

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jolana Jeriová

## Kosmický odpad a jeho vliv na dopravu ve vesmíru

Katedra dopravních prostředků

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Sliacky, Ph.D.

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní Specializace: Inteligentní dopravní systémy

Praha 2024



**K616.....Ústav dopravních prostředků**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Jolana Jeriová**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**bakalářský – ITS – Inteligentní dopravní systémy**

Název tématu (česky): **Kosmický odpad a jeho vliv na dopravu ve vesmíru**

Název tématu (anglicky): Space Debris and its Impact to Space Transport

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Popište problematiku kosmického odpadu z hlediska jeho vlivu na své okolí
- Analyzujte rizika vycházející z existence kosmického odpadu pro vesmírnou dopravu
- Popište možné způsoby eliminace těchto rizik
- Formulujte závěry a doporučení Jeriová



Rozsah grafických prací: dle požadavků vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: ESA Space Debris Mitigation Handbook. ESA, 2003.  
Limiting Future Collision Risk to Spacecraft.  
The National Academies Press, 2011.  
ESA's Annual Space Environment Report. ESA, 2023.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Sliacky, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **23. června 2023**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **5. srpna 2024**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu dopravních prostředků



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Jolana Jeriová  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 23. června 2023

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc. a NM studiu.

V ...Praze..... dne 26.07.2024

.....  
Podpis autora

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Milanu Sliacky, Ph.D. za jeho trpělivost, cenné rady, neocenitelné konzultace a odborné, ale přesto vlídné vedení této práce. Dále bych ráda poděkovala Dušanu Majerovi a Janu Spratkovi za konzultace a také projektu LASAR za poskytnutí informací.

V neposlední řadě chci také poděkovat také své rodině a přátelům za nejen psychickou podporu při psaní této práce a při celém bakalářském studiu.

Název práce: Kosmický odpad a jeho vliv na dopravu ve vesmíru

Autor: Jolana Jeriová

Katedra: Katedra dopravních prostředků

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Sliacky, Ph.D., Katedra dopravní telematiky

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá problematikou kosmického odpadu a jeho vlivu na dopravu ve vesmíru. Cílem bylo zhodnotit situaci v různých částech vesmíru ve vztahu k vesmírným dopravním nosičům, ale také k satelitům, které již ve vesmíru jsou. Taktéž bylo cílem práce vyhodnotit rizika plynoucí z kolizí s kosmickým odpadem a nastínění eliminací těchto rizik. Byl zjištěn kritický stav na nízké oběžné dráze a na geostacionární dráze. Současně je velmi alarmující exponenciální růst kosmického odpadu a satelitů především na nízké oběžné dráze. Rychlost přirozeného zániku na nízké oběžné dráze je nedostačující, hrozí Kesslerův syndrom.

Klíčová slova: kosmický odpad, doprava ve vesmíru, situace v chráněných oblastech, riziko kolize

Title: Space debris and its influence to space transport

Author: Jolana Jeriová

Department: Department of Vehicle Technology

Supervisor: Ing. Milan Sliacky, Ph.D., Department of Transport Telematics

Abstract: This bachelor thesis deals with problem of space debris and its impact on transportation in space. This thesis aims to assess the situation in various parts of the space in relation to space vehicles, but also to spacecrafts already in space. Another aim of this thesis is to evaluate collision risk with space debris and to assess risk elimination. A critical situation was identified in low Earth orbit and geostationary orbit. Furthermore, the exponential growth of space debris and satellites especially in low Earth orbit is alarming. The rate of orbital decay in low earth orbit is insufficient and Kessler syndrome is imminent.

Keywords: space debris, transportation in space, situation in protected regions, collision risk

# Obsah

Seznam použitých zkratek	1
Úvod	3
<b>1 Kosmický odpad</b>	<b>4</b>
1.1 Zdroje kosmického odpadu . . . . .	4
1.2 Proč je kosmický odpad problém? . . . . .	5
1.3 Zemské orbity . . . . .	6
1.4 Doprava ve vesmíru . . . . .	7
<b>2 Přehled objektů ve vesmíru</b>	<b>9</b>
2.1 Druhy objektů . . . . .	9
2.2 Křížující objekty . . . . .	11
2.3 Odhad zaplněnosti vybraných drah kosmickým odpadem . . . . .	13
2.4 Odhady celkového počtu kosmického odpadu . . . . .	14
<b>3 Situace v chráněných oblastech</b>	<b>16</b>
3.1 LEO . . . . .	17
3.2 GEO . . . . .	24
<b>4 Rizika související s kosmickým odpadem</b>	<b>28</b>
4.1 Kesslerův syndrom . . . . .	28
4.2 Riziko kolize . . . . .	29
4.3 Riziko v chráněných oblastech . . . . .	31
<b>5 Způsoby eliminace rizik</b>	<b>33</b>
5.1 Zmírnění tvorby kosmického odpadu . . . . .	33
5.1.1 Omezování vypuštěného odpadu . . . . .	33
5.1.2 Minimalizace potenciálního rozpadu na orbitě . . . . .	33
5.1.3 Odstranění satelitu po skončení mise . . . . .	34
5.1.4 Prevence kolize na orbitě . . . . .	36
5.2 Odstraňování kosmického odpadu . . . . .	39
<b>Závěr</b>	<b>41</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>42</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>49</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>51</b>

<b>A Přílohy</b>	<b>52</b>
A.1 První příloha . . . . .	52



# Seznam použitých zkratek

<b>KO</b> .....	Kosmický odpad
<b>ASAT</b> .....	Antisatelitní test
<b>GPS</b> .....	Global Positioning System
<b>LEO</b> .....	Low Earth Orbit
<b>GEO</b> .....	Geostationary Orbit
<b>MEO</b> .....	Medium Earth Orbit
<b>GTO</b> .....	Geostationary Transfer Orbit
<b>EGO</b> .....	Extended Geostationary Orbit
<b>NASA</b> .....	National Aeronautics and Space Administration
<b>ESA</b> .....	European Space Agency
<b>SSN</b> .....	Space Surveillance Network
<b>ORDEM</b> .....	Orbital Debris Engineering Model Reference
<b>MASTER</b> .....	Meteoroid And Space Debris Terrestrial Environment Reference
<b>PL</b> .....	Payload
<b>PF</b> .....	Payload Fragmentation Debris
<b>PD</b> .....	Payload Debris
<b>PM</b> .....	Payload Mission Related Objects
<b>RB</b> .....	Rocket Body
<b>RF</b> .....	Rocket Fragmentation Debris
<b>RD</b> .....	Rocket Body Debris
<b>RM</b> .....	Rocket Mission Related Objects
<b>UI</b> .....	Unidentified
<b>NSO</b> .....	Navigation Satellites Orbit
<b>LMO</b> .....	LEO-MEO Crossing Orbits
<b>MGO</b> .....	MEO-GEO Crossing Orbit
<b>HEO</b> .....	Highly Eccentric Orbit

---

**IADC** ..... Inter-Agency Space Debris Coordination Committee  
**ISS** ..... International Space Station  
**JAXA** ..... Japan Aerospace Exploration Agency  
**SSO** ..... Heliosynchronní orbita  
**LNT** ..... Lethal Non-Trackable  
**SEM** ..... Space Environment Management

# Úvod

Píše se datum 2. dubna 2022 a v jedné indické vesnici se zrovna připravuje společná hostina. Náhle je příprava přerušena padajícím červeným diskem z nebe a následnou ránou. Lidé se ve strachu běží schovat do svých domovů a čekají půl hodiny, než se jim zdá bezpečné vyjít ven. Později zjišťují, že objekt pochází z vesmíru a že se jedná o kosmický odpad. Jednalo se tehdy o část čínské rakety, která odstartovala v únoru 2021.

Obyvatelé Pobřeží slonoviny zažili také pád kosmického odpadu, těm ale na rozdíl od minulého případu zničil kosmický odpad dům. Opět se jednalo o část čínské rakety, tentokrát to byla 12metrová roura [1].

Počet satelitů rapidně roste, důvodem je levnější výroba a méně nákladný provoz než kdy dřív. Také tomu pomáhají znovupoužitelné nosiče, ty zapříčiňují levnější starty. V roce 1981 stálo dostat 1 kg nákladu do vesmíru \$ 85 216, v roce 2017 to bylo jen \$ 1 891 [2]. Tím, že roste počet satelitů ve vesmíru, tak roste i množství kosmického odpadu. Zbavit se ho jednoduše nelze. Každý satelit sice jednou skončí v zemské atmosféře (vlivem odporu vzduchu, tlaku slunečního záření), ale jedná se o pomalý proces. Pokud umístíte satelit do výšky 1 200 km nad povrchem Země, na Zem spadne za 2 000 let [3].

Kosmický odpad je problém, který se začíná dotýkat každého z nás. V této práci jde o pochopení a popsání problematiky kosmického odpadu ve vesmíru, které mimo jiné ohrožuje i dopravu ve vesmíru. Je zde kladen důraz na zmapování kosmického odpadu na nejhroženějších oblastech, popsání rizik vycházejících z existence kosmického odpadu a možnost jejich eliminace.

# 1. Kosmický odpad

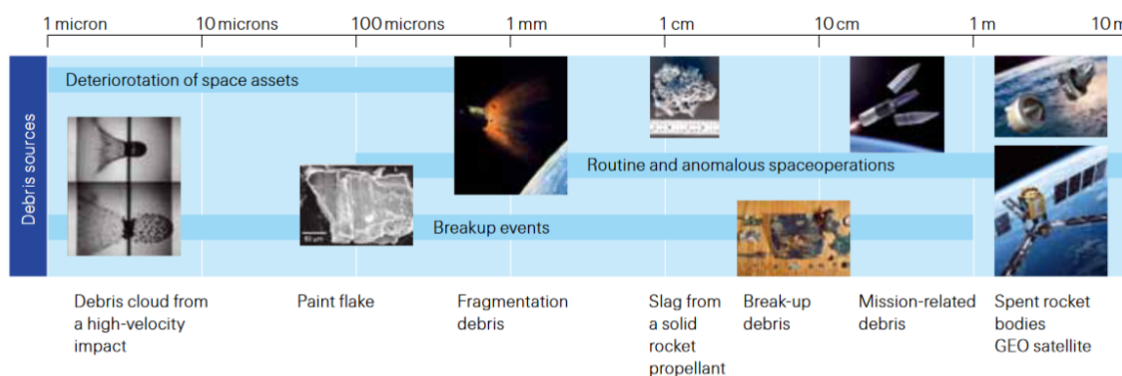
Tato práce se zabývá kosmickým odpadem (dále KO), což jsou objekty ve vesmíru, které (již) neplní žádnou užitečnou funkci. Jedná se o objekty různých velikostí, které mohou měřit pár mikrometrů, ale i několik metrů. Stejně tak hmotnost takových objektů se pohybuje od pár miligramů až po několik tun [4]. Největší objekty jsou katalogizované a pravidelně se sledují, víc informací je v Kapitole 2.

## 1.1 Zdroje kosmického odpadu

Za kosmický odpad se považují objekty vyrobené lidmi a části/fragmenty z těchto objektů. Některé zdroje řadí mezi KO i asteroidy, komety a jiná vesmírná tělesa, v této práci se ovšem uvažuje KO pouze „umělého“ původu [5]. Odkud se samotný odpad bere? Zdrojů je hned několik typů:

- Fragmentace - Takovými objekty jsou fragmenty vzniklé roztrháním satelitu nebo rakety, a to z důvodu kolize, exploze nebo kvůli anomálii. Mezi fragmentaci se řadí také antisatelitní testy (ASAT testy).
- Neaktivní satelity - Jedná se o buď nefunkční satelity, nebo satelity po ukončení mise. Aktivní satelity se jako KO neberou.
- Části raket - Takový odpad vzniká kvůli dopravě satelitu do vesmíru. Často se dělá totiž to, že raketa, či její část, dopraví satelit na chtěnou orbitu a pak se nevrátí na Zem, a tím tvoří ve vesmíru KO.
- Objekty související s misí - Jak název napovídá, jedná se o jakékoliv objekty, které jsou vypouštěné (ať už záměrně či nikoliv) v rámci mise, a nejsou satelitem. Do této kategorie se řadí především šrouby, krytky, šupinky laku a částice oxidu hlinitého, vzniklé z provozu raketových motorů [6].

Ukázka toho, jak jsou většinou různé typy KO velké, je na Obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Zobrazení toho, jakou velikost má většinou jaký typ KO [7].

## 1.2 Proč je kosmický odpad problém?

KO se dá popsat podle jejich rychlosti pohybu po své oběžné dráze. Pro zjednodušení předpokládáme, že se objekt pohybuje po kruhové orbitě kolem Země. Na objekt působí gravitační síla  $F_g$

$$F_g = \kappa \cdot \frac{m_O \cdot m_Z}{r^2}, \quad (1.1)$$

kde  $\kappa$  je gravitační konstanta,  $m_O$  hmotnost objektu,  $m_Z$  hmotnost Země a  $r$  vzdálenost středu Země od objektu.

Dále působí na pohybující se objekt odstředivá síla  $F_{od}$

$$F_{od} = m_O \cdot a_n = m_O \cdot \frac{v^2}{r}. \quad (1.2)$$

Přičemž  $a_n$  je normálové zrychlení a  $v$  je rychlost pohybujícího se objektu.

Aby se objekt udržel na své orbitě, musí se gravitační síla rovnat síle odstředivé. Taková rovnice vypadá následovně.

$$\kappa \cdot \frac{m_O \cdot m_Z}{r^2} = m_O \cdot \frac{v^2}{r} \quad (1.3)$$

Proměnná  $r$  se vyjádří jako  $r_Z + h$ , kde  $r_Z$  je poloměr Země a  $h$  výška nad povrchem Země. Pokud vezmeme hodnotu poloměru Země u rovníku  $r_Z = 6378$  km, bude se jednat o konstantu. Odtud pro  $v$  platí

$$v = \sqrt{\kappa \cdot \frac{m_Z}{r_Z + h}} \quad (1.4)$$

Z rovnice 1.4 vychází, že rychlost objektu závisí nepřímo a úměrně na výšce nad Zemí, takže s rostoucí výškou nad Zemí klesá rychlost. Důležitý poznatek také je, že rychlost objektu nezáleží na hmotnosti objektu [8].

Při použití rovnice 1.4 se dá spočítat, že objekt ve výšce 400 km nad povrchem Země (jako je například Mezinárodní vesmírná stanice) se pohybuje rychlostí  $7,664 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , satelity navigačního systému Global Positioning System (GPS), nacházející se ve výšce 20 000 km nad povrchem Země, se pohybují rychlostí  $3,871 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a v neposlední řadě satelity na geostacionární dráze, ve výšce 35 756 km nad povrchem Země, se pohybují rychlostí  $3,074 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  [9] [10].

Tento výčet rychlostí má dát představu o tom, jak rychle se objekty ve vesmíru pohybují.

Pro objekty, které mají mezi sebou relativní rychlost  $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , platí Tabulka 1.1. Tabulka poukazuje na to, že i malé objekty o malé hmotnosti mají vysokou energii. To je jeden z důvodů, proč je třeba KO věnovat víc pozornosti. Pokud totiž, byť jen malý, objekt narazí do satelitu, může ho poškodit, nebo dokonce celý zničit a vytvořit tak další KO. To může vést ke Kesslerovu syndromu, což je nechtěný jev, který je víc vysvětlen v Kapitole 4.1. S problémovým KO se musí potýkat také operátoři satelitů, protože ochrana satelitů a neustálé monitorování je velmi nákladné. V některých případech to může být až 10 % z celkových nákladů z mise satelitu [11].

Debris size	Mass (g) aluminum sphere	Kinetic Energy (J)	Equivalent TNT (kg)	Energy similar to
1 mm	0.0014	71	0.0003	Baseball
3 mm	0.038	1910	0.008	Bullets
1 cm	1.41	70,700	0.3	Falling anvil
5 cm	176.7	8,840,000	37	Hit by bus
10 cm	1413.7	70,700,000	300	Large bomb

Tabulka 1.1: Zobrazení kinetické energie kolízi s různě velkými objekty ve chvíli, kdy má kolize relativní rychlost  $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  [4].

### 1.3 Zemské orbity

Jak bude víc vysvětleno v Kapitole 3, KO není kolem Země rozložen homogenně. K pochopení rozložení KO ve vesmíru je třeba znát jednotlivé zemské orbity, respektive oblasti. Orbity (oběžné dráhy) popisují trajektorii objektů kolem Země, oblasti popisují části vesmíru, ve kterých se nacházejí dané typy orbit.

Pokud bereme jako začátek vesmírného prostoru Kármánovu hranici [12], tedy 100 km nad povrchem Země, můžeme říct, že blízký vesmír se nachází od této hranice dál. V takovém prostoru kolem Země můžeme definovat hned několik druhů oběžných drah a jejich oblasti [13]. Mezi ty nejznámější, a zároveň pro nás ty nejdůležitější, patří následující:

- LEO (Low Earth orbit = nízká oběžná dráha) - Taková oběžná dráha má perigeum (bod na orbitě tělesa, kdy je těleso nejbližší k Zemi) nad 100 km nad povrchem Země a apogeum (bod na orbitě tělesa, kdy je těleso nejdále od Země) do 2 000 km nad povrchem Země [10] [13].
- GEO (Geostationary orbit = geostacionární oběžná dráha) - jedná se o trochu speciální oběžnou dráhu, jelikož objekty na této dráze se pohybují se stejnou úhlovou rychlostí, jako se Země otáčí kolem své osy. Výška nad povrchem Země (apogeum i perigeum je stejné) této orbity je od 35 586 km do 35 986 km a tato orbita je omezená inklinací (sklon dráhy, jedná se o úhel oběžné roviny od rovníku), a to v intervalu  $[0^\circ; 25^\circ]$  [13] [14].

- MEO (Medium Earth orbit = Střední oběžná dráha) - Jedná se o prostor mezi LEO a GEO, tedy mezi 2 000 km a 35 786 km nad povrchem Země [10]. Na těchto orbitách bychom našli například navigační systémy jako je Galileo či GPS [15].
- GTO (Geostationary transfer orbit = Dráha přechodová k dráze geostacionární) - Orbita využívající se při dopravě satelitu na geostacionární dráhu ze Země, její perigeum je proto od 0 km do 2 000 km, apogeum od 31 570 km do 40 002 km a taková orbita má tvar elipsy [16].
- EGO (Extended Geostationary orbit = Rozšířená geostacionární dráha) - Orbity této oblasti jsou charakterizované velikostí hlavní poloosy, přičemž tato velikost, tedy apogeum, je od výšky 37 948 km do 46 380 km nad Zemí, dále excentricitou orbity, ta je od 0 do 0,25 a inklinací, přičemž hodnoty inklinace se pohybují od 0° do 25° [17].

Na Obrázku 1.2 lze vidět vybrané orbity a jejich oblasti kolem Země v měřítku. Červená oblast označuje LEO, modrá MEO, černá čára představuje GEO a šedá čára oběžnou dráhu Mezinárodní vesmírné stanice.

## 1.4 Doprava ve vesmíru

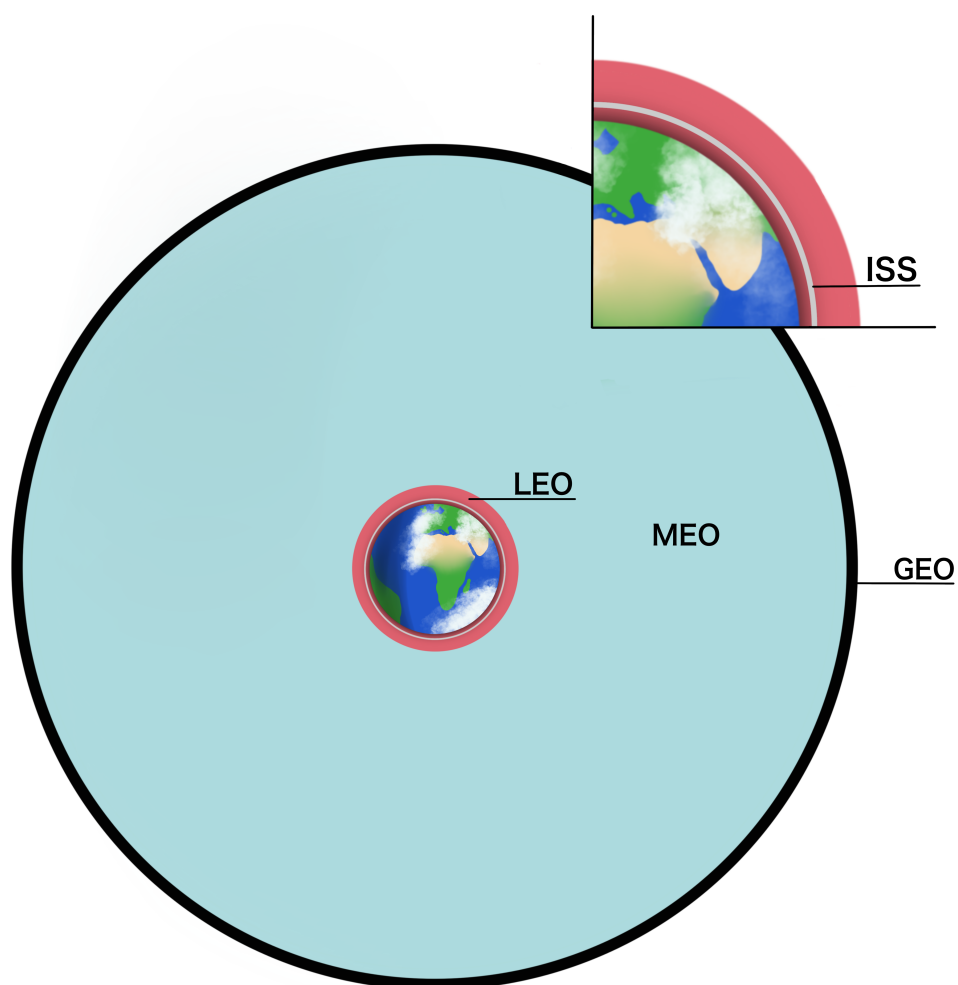
Dopravou ve vesmíru se myslí doprava užitečného nákladu do vesmíru pomocí raketového nosiče. Start rakety je plánován na takovou dobu, kdy je nejmenší riziko kolize s KO. Jednotlivé starty dostávají časová okna, kdy je bezpečné provést start. Z principu věci dopravování věcí do vesmíru není až tak rizikové jako samotný pobyt ve vesmíru. Satelity jsou příkladem objektů, které mají dlouho setrvat ve vesmíru a hrozí jim vyšší riziko kolize s KO během jejich provozní fáze. Princip a důsledky kolizí jsou identické jak pro raketové nosiče, tak pro satelity.

Některé satelity mají využití v dopravě a když je potřeba, sami o sobě se umí pohybovat. Asi nejnámějším a nejpoužívanějším způsobem využití satelitů v dopravě jsou navigační systémy. Těch se využívá nejen v klasické navigaci, ale využívají je třeba i logistické společnosti, aby věděli, kde se právě nachází jejich vozový park. Také díky satelitům se dá sledovat aktuální stav počasí a díky navigačním satelitům poloha vozidla, a tím se dá vytvořit optimální cesta. Také vozidla veřejné hromadné dopravy, lodní doprava a také železniční doprava využívají satelity navigačních systémů [18] [19].

Komunikační satelity mají samozřejmě také své využití v dopravě. Výhodné je jejich použití v odlehlých oblastech (třeba na moři).

Pomocí satelitů sledujících povrch Země se studují oceánské proudy a víry, což se pak dá využít pro lodní dopravu, kdy využití určitých proudů zrychlí cestovní čas lodí, a to je zároveň výhodné pro životní prostředí (méně spotřebovaného paliva).

Satelity také mohou studovat stupeň znečištění ovzduší v přístavech a pokud je někde příliš velké, nedovolí se tam lodi vplout [20].



Obrázek 1.2: Vybrané orbity kolem Země v měřítku včetně detailního pohledu na LEO oblast, zdroj autor.



## 2. Přehled objektů ve vesmíru

V této práci se hojně používá pojem **objekty**, který se vztahují jak ke KO, tak k aktivním satelitům. Zkratka je to vše, co bylo vypuštěno do vesmíru nebo vzniklo fragmentací ve vesmíru. Pojmem **aktivní satelity** se rozumí vše, co je funkční zařízení ve vesmíru. Od zdroje [10] se často vyskytuje pojem **payload**, ten se v této práci rovná **satelitu**. Je to tedy aktivní i neaktivní satelit.

### 2.1 Druhy objektů

Jak bylo již zmíněno, objekty od určité velikosti jsou katalogizované a pravidelně sledované. Takové objekty jsou sledovány několika vesmírnými agenturami, včetně americké National Aeronautics and Space Administration (NASA) a evropské European Space Agency (ESA). Asi nejvyužívanějším systémem je U. S. Space Surveillance Network (SSN), kterého mimo jiné využívá i zdroj [10], ze kterého je velké množství grafů použitých v této práci. SSN sleduje kosmický odpad větší než 10 cm, což tvoří méně než 1 % celkového KO [3] [10]. Podle [21] SSN pravidelně sleduje kolem 35 750 objektů. Se sledováním jednotlivých objektů to není jednoduché, na LEO se dají spolehlivě sledovat objekty větší než 10 cm, na GEO větší než 1 m [22].

Protože příliš malý KO nelze spolehlivě sledovat, monitorovat, tak se jejich počet stanovuje pomocí statistických modelů. Jak NASA, tak ESA modelují populaci KO. NASA má model s názvem Orbital Debris Engineering Model (ORDEM), ESA má model Meteoroid And Space debris Terrestrial Environment Reference (MASTER). Oba tyto modely vycházejí z dat z SSN a oba popisují objekty na LEO, MEO a GEO [23]. ORDEM popisuje KO od velikosti 10  $\mu\text{m}$ , MASTER od 1  $\mu\text{m}$  [24]. Podle [21] evropský model MASTER k 18.06.2024 odhaduje:

- 40 500 objektů větších než 10 cm
- 1 100 000 objektů větších než 1 cm a zároveň menších než 10 cm
- 130 000 000 objektů větších než 1 mm a zároveň menších než 1 cm

Přehled hmotnosti, plochy a počtu všech katalogizovaných objektů ve vesmíru na jednotlivých oblastech jsou v Tabulce 2.1, 2.2 a 2.3. Řádky představují jednotlivé orbitální oblasti a sloupce typ objektu:

- PL = Payload - V překladu užitečný náklad, je to cokoliv, co je chtěné mít ve vesmíru. Tím mohou být třeba komunikační satelity nebo vědecké přístroje [25].
- PF = Payload Fragmentation debris - Kosmickým odpadem tohoto typu se myslí úlomky vzniklé z PL kvůli fragmentaci (např. exploze a kolize) a objekty, které byly nezáměrně vypuštěny v rámci PL [10].

## 2.1. DRUHY OBJEKTŮ

- PD = Payload debris - Podle orbitálních a fyzikálních vlastností se s největší pravděpodobností jedná o typ odpadu vytvořený obdobně jako PF, tedy fragmentací PL.
- PM = Payload Mission Related Objects - Jak název napovídá, PM označuje KO vzniklé kvůli správnému chodu PL. Příkladem PM jsou krytky optických zařízení.
- RB = Rocket Body - Tímto se myslí tělo raket.
- RF = Rocket Fragmentation Debris - Jedná se o KO vytvořený obdobně jako PF, akorát zde je zdroj odpadu RB.
- RD = Rocket Debris - Opět se jedná o obdobu PD, s tím rozdílem, že zdrojem odpadu je v tomto případě RB.
- RM = Rocket Mission Related Objects - Stejně jako PM, i KO označovaný jako RM vznikl kvůli správnému fungování rakety.
- UI = Unidentified - Označuje kosmický odpad takového původu, který nelze jednoznačně určit. jedná se tedy o objekty, které se pravidelně sledují, ale neví se, odkud se vzaly. V posledních letech počet tohoto typu KO roste, viz Obrázek 2.3 [10].

Další zmíněné orbity v Tabulkách 2.1 až 2.3 jsou Navigation Satellites orbit (NSO), LEO-MEO Crossing Orbits (LMO), MEO-GEO Crossing Orbits (MGO) a Highly Eccentric Orbit (HEO), přičemž dále se budeme zabývat pouze oblastmi LEO a GEO, jelikož se jedná o ty nejnepříznivější oblasti ze všech.

Z Tabulky 2.1 lze mimo jiné vyčíst, že ze všech objektů tvoří fragmenty skoro 41 % (kategorie PF, PD, RF a RD).

	PL	PF	PD	PM	RB	RF	RD	RM	UI	Total
<b>LEO</b>	7889	6772	114	232	948	2782	22	609	326	19694
<b>GEO</b>	786	3	3	7	66	0	0	0	28	893
<b>EGO</b>	496	1	1	49	191	90	3	3	1689	2523
<b>GTO</b>	54	26	1	11	239	206	13	54	639	1243
<b>NSO</b>	278	0	0	1	95	0	0	2	29	405
<b>MEO</b>	72	0	5	52	22	38	1	3	318	511
<b>LMO</b>	85	145	6	49	237	713	19	219	988	2461
<b>MGO</b>	67	70	1	2	176	2167	4	0	1057	3544
<b>HEO</b>	37	16	0	1	52	111	0	0	927	1144
<b>Other</b>	42	0	0	5	6	0	0	0	69	122
<b>Total</b>	9806	7033	131	409	2032	6107	62	890	6070	32540

Tabulka 2.1: Počet objektů na jednotlivých orbitách v kusech. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10].

## 2.2. KŘÍŽUJÍCÍ OBJEKTY

	PL	PF	PD	PM	RB	RF	RD	RM	UI	Total
<b>LEO</b>	2767.1	0.2	0.0	10.8	1411.3	0.0	0.0	10.9	0.0	4200.4
<b>GEO</b>	2571.3	0.0	0.0	1.0	136.6	0.0	0.0	0.0	0.0	2709.0
<b>EGO</b>	834.8	0.0	0.0	4.9	358.3	0.0	0.0	0.2	0.0	1198.3
<b>GTO</b>	95.1	0.0	0.0	1.0	556.9	0.0	0.0	25.1	0.0	678.2
<b>NSO</b>	358.0	0.0	0.0	0.4	212.5	0.0	0.0	0.0	0.0	570.8
<b>MEO</b>	70.2	0.0	0.0	0.3	31.7	0.0	0.0	2.0	0.0	104.2
<b>LMO</b>	63.8	0.0	0.0	8.4	425.2	0.0	0.0	86.7	0.0	584.1
<b>MGO</b>	92.5	0.0	0.0	1.9	288.9	0.0	0.0	0.0	0.0	383.3
<b>HEO</b>	65.0	0.0	0.0	0.1	123.8	0.0	0.0	0.0	0.0	188.9
<b>Other</b>	70.4	0.0	0.0	0.1	17.5	0.0	0.0	0.0	0.0	88.0
<b>Total</b>	6988.2	0.2	0.0	28.9	3562.9	0.0	0.0	124.9	0.0	10705.1

Tabulka 2.2: Hmotnost objektů na jednotlivých orbitách v tunách. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10].

	PL	PF	PD	PM	RB	RF	RD	RM	UI	Total
<b>LEO</b>	58891.4	0.5	0.0	73.3	11424.6	2.6	0.0	312.1	0.0	70704.5
<b>GEO</b>	25343.2	0.0	23.6	8.4	1486.5	0.0	0.0	0.0	0.0	26861.7
<b>EGO</b>	10798.9	0.0	0.6	37.0	3927.9	0.0	0.0	1.3	0.0	14765.8
<b>GTO</b>	734.3	0.0	0.0	8.9	5654.9	0.0	0.0	774.9	0.0	7173.0
<b>NSO</b>	3057.8	0.0	0.0	0.8	1875.9	0.0	0.0	0.0	0.0	4934.4
<b>MEO</b>	976.7	0.0	0.0	11.2	307.6	0.0	0.0	15.3	0.0	1310.8
<b>LMO</b>	633.0	0.0	0.0	25.2	4642.8	0.6	0.0	1569.5	0.0	6871.1
<b>MGO</b>	854.0	0.0	0.0	14.5	3089.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3958.3
<b>HEO</b>	875.4	0.0	0.0	0.1	1270.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2145.6
<b>Other</b>	453.7	0.0	0.0	0.5	157.8	0.0	0.0	0.0	0.0	612.0
<b>Total</b>	102618.3	0.5	24.2	180.0	33837.8	3.2	0.0	2673.1	0.0	139337.1

Tabulka 2.3: Plocha objektů na jednotlivých orbitách v m<sup>2</sup>. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10].

## 2.2 Křižující objekty

Některé objekty nemají svou oběžnou dráhu jen v jedné oblasti, ale křižují více oblastí. Jelikož nás zajímají pouze 2 oblasti, LEO a GEO, tak jsou dále popsány objekty křižující chráněné oblasti LEO ( $LEO_{IADC}$ ) a GEO ( $GEO_{IADC}$ ). Chráněné oblasti jsou detailněji popsány v Kapitole 3. Prozatím stačí zmínit, že chráněné oblasti se označují dolním indexem IADC a jedná se o nejkritičtější místa LEO a GEO. Počet objektů v kusech, které setrvávají v chráněných oblastech, nebo je křižují, jsou v Tabulce 2.4, hmotnost takovýchto objektů v Tabulce 2.5 a plocha těchto objektů v Tabulce 2.6.

## 2.2. KŘÍŽUJÍCÍ OBJEKTY

Řádek **both (abs)** vyjadřuje počet objektů (respektive hmotnost nebo plochu), které kříží jak  $LEO_{IADC}$ , tak  $GEO_{IADC}$ , řádek **none (abs)** vyjadřuje takový počet objektů (respektive hmotnost nebo plochu), které nekřížují  $LEO_{IADC}$  ani  $GEO_{IADC}$ . Zkratka **abs** v závorce vyjadřuje celkový počet objektů, **eqv** v závorce znamená, že celkový počet objektů (respektive hmotnost nebo plocha) je vynásoben určitým koeficientem, přičemž hodnota tohoto koeficientu je daná podílem času objektu stráveného na dané oblasti za 1 jeho oběh a celkové doby oběhu [10]. Dalo by se říct, že jde o přepočítanou hodnotu počtu objektů (respektive hmotnosti nebo plochy) v chráněné oblasti k jednomu okamžiku. Tabulky 2.4 až 2.6 vycházejí z Tabulek 2.1 až 2.3.

	PL	PF	PD	PM	RB	RF	RD	RM	UI	Total
<b>both (abs)</b>	19	18	1	1	75	131	0	18	327	590
<b><math>LEO_{IADC}</math> (abs)</b>	8043	6959	121	293	1461	3760	54	882	2125	23698
<b><math>LEO_{IADC}</math> (eqv)</b>	7921	6862	118	244	1000	2989	26	644	501	20306
<b><math>GEO_{IADC}</math> (abs)</b>	952	59	5	50	307	802	2	20	2863	5060
<b><math>GEO_{IADC}</math> (eqv)</b>	826	5	3	18	104	38	1	1	210	1206
<b>none (abs)</b>	830	33	6	67	339	1676	6	6	1409	4372

Tabulka 2.4: Počet objektů v chráněných oblastech v kusech. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10].

	PL	PF	PD	PM	RB	RF	RD	RM	UI	Total
<b>both (abs)</b>	24.6	0.0	0.0	0.1	167.7	0.0	0.0	6.1	0.0	198.5
<b><math>LEO_{IADC}</math> (abs)</b>	2944.4	0.2	0.0	20.3	2492.5	0.0	0.0	122.7	0.0	5580.2
<b><math>LEO_{IADC}</math> (eqv)</b>	2791.7	0.2	0.0	13.5	1486.8	0.0	0.0	21.5	0.0	4313.8
<b><math>GEO_{IADC}</math> (abs)</b>	2890.1	0.0	0.0	6.4	601.8	0.0	0.0	6.3	0.0	3504.7
<b><math>GEO_{IADC}</math> (eqv)</b>	2663.1	0.0	0.0	2.1	208.5	0.0	0.0	0.4	0.0	2874.2
<b>none (abs)</b>	1178.2	0.0	0.0	2.2	636.3	0.0	0.0	2.0	0.0	1818.8

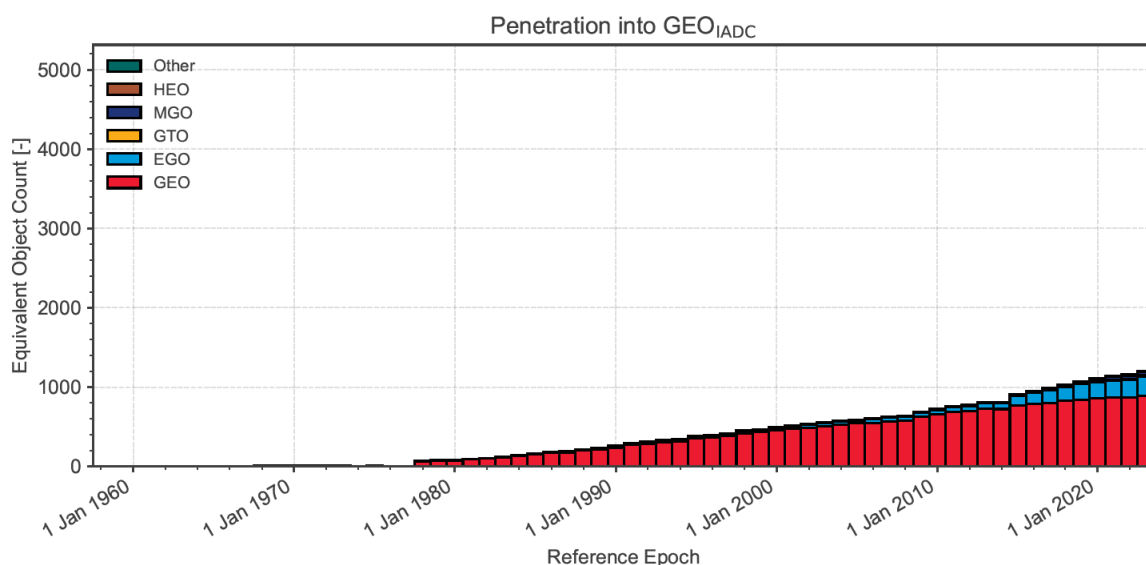
Tabulka 2.5: Hmotnost objektů v chráněných oblastech v tunách. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10].

	PL	PF	PD	PM	RB	RF	RD	RM	UI	Total
<b>both (abs)</b>	197.0	0.0	0.0	0.1	1958.2	0.0	0.0	343.0	0.0	2498.3
<b><math>LEO_{IADC}</math> (abs)</b>	60524.2	0.5	0.0	107.5	22787.8	3.2	0.0	2656.6	0.0	86079.7
<b><math>LEO_{IADC}</math> (eqv)</b>	59056.4	0.5	0.0	81.6	12257.3	2.7	0.0	521.8	0.0	71920.2
<b><math>GEO_{IADC}</math> (abs)</b>	28652.5	0.0	23.6	52.1	6471.9	0.0	0.0	344.3	0.0	35544.3
<b><math>GEO_{IADC}</math> (eqv)</b>	26304.4	0.0	23.6	17.8	2273.3	0.0	0.0	22.6	0.0	28641.7
<b>none (abs)</b>	13638.6	0.0	0.6	20.6	6536.4	0.0	0.0	15.3	0.0	20211.4

Tabulka 2.6: Plocha objektů v chráněných oblastech v  $m^2$ . Data se vztahují ke konci roku 2022 [10].

### 2.3. ODHAD ZAPLNĚNOSTI VYBRANÝCH DRAH KOSMICKÝM ODPADEM

Když se srovnají hodnoty ze sloupce **Total** u **GEO<sub>IADC</sub> (abs)** a **GEO<sub>IADC</sub> (eqv)** z Tabulky 2.4 a **GEO** z Tabulky 2.1, zjistíme, že v Tabulce 2.1 je počet objektů na GEO pouze 893, kdežto v Tabulce 2.4 je absolutní počet objektů penetrující GEO víc než pětikrát větší. Přepočítaná, a tím pádem víc vypovídající hodnota, ukazuje sice výrazně menší počet kusů než při absolutním počtu, ale i tak vyjadřuje ten fakt, že v jedné chvíli je v chráněné oblasti GEO<sub>IADC</sub> cca čtvrtina všech objektů pouze prolétávajících touto oblastí. Vizualní vyjádření této skutečnosti je na Obrázku 2.1. Z něho lze vidět, že nejvíc křížují oblast GEO<sub>IADC</sub> objekty z oblasti EGO (Extended Geostationary Orbit) a MGO (MEO-GEO Crossing Orbits).



Obrázek 2.1: Přepočítaný počet objektů penetrující oblast GEO<sub>IADC</sub> v kusech v jednotlivých rocích. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10].

## 2.3 Odhad zaplněnosti vybraných drah kosmickým odpadem

Z Tabulek 2.1 až 2.3 lze porovnat, jak jsou jednotlivé oblasti zaplněné. Z každé dosavadní tabulky vychází nejhůř LEO, tak se zanalyzovalo, jak dopadne LEO v přepočtu na zaplněnost v km<sup>3</sup> vůči ostatním oblastem. Byly spočítány objemy jednotlivých oblastí, přesněji řečeno LEO, MEO a GEO<sub>IADC</sub> a poté se vzaly přepočítané hodnoty z Tabulek 2.4 a 2.5 pro LEO a GEO<sub>IADC</sub> a z Tabulek 2.1 a 2.2 hodnoty pro MEO.

## 2.4. ODHADY CELKOVÉHO POČTU KOSMICKÉHO ODPADU

Orbitální oblast	Objemová hustota	Měrný objem	Prostorová hustota
	[mg · km <sup>-3</sup> ]	[km <sup>3</sup> · mg <sup>-1</sup> ]	[kus · km <sup>-3</sup> ]
<b>LEO</b>	3,26	0,307	1,53 · 10 <sup>-8</sup>
<b>MEO</b>	3,39 · 10 <sup>-4</sup>	2 950 · 10 <sup>6</sup>	1,66 · 10 <sup>-12</sup>
<b>GEO<sub>IADC</sub></b>	1,93	0,518	1,49 · 10 <sup>-10</sup>

Tabulka 2.7: Propočítané hodnoty na vybraných oblastech, zdroj autor .

Z výpočtů vyplývá, že v průměru nejplnější oblastí je LEO. Tento fakt vyplývá jak z objemové hustoty, měrné hustoty tak i prostorové hustoty. Objemová hustota říká, kolik mg objektů se v průměru nachází v jednom km<sup>3</sup>, měrný objem je převrácená hodnota objemové hustoty a vyjadřuje, v jak velkém objemu se v průměru nachází 1 mg objektů. Prostorová hustota je veličina, která říká kolik kusů objektů připadá průměrně na 1 km<sup>3</sup>.

Ačkoliv se při objemové hustotě hodnoty GEO<sub>IADC</sub> drží těsně za LEO, MEO má za LEO odstup výrazně větší. Obdobně to platí pro měrný objem, kdy se svou vysokou hodnotou vyniká MEO vůči LEO a GEO<sub>IADC</sub>. Při prostorové hustotě LEO se svou plností překonává GEO o 2 řády a MEO dokonce o 4.

Pomocí této tabulky bylo opět ukázáno, že LEO je nejzaplněnější oblastí objekty v blízkém vesmíru.

## 2.4 Odhady celkového počtu kosmického odpadu

Časový vývoj počtu kusů KO a jejich typ je na Obrázku 2.2 a na Obrázku 2.3 je časový vývoj hmotnosti KO a jejich typ. První věc, které se dá všimnout, je rozdílné rozložení typů objektů. Na Obrázku 2.2 je největší podíl kategorie Payload (užitečný náklad, neboli satelity), Payload Mission Related Object (KO vzniklé kvůli správnému chodu Payload), Rocket Fragmentation Debris (nezáměrně vypuštěné objekty v rámci rakety) a objekty neznámého původu. Kdežto na Obrázku 2.3 převažuje Payload a Rocket Body (části raket). Z toho vyplývá, že objekty typu Payload Fragmentation Debris a Rocket Fragmentation Debris mají nízkou hmotnost, což nám říká, že při fragmentacích vzniká velké množství objektů s malou hmotností.

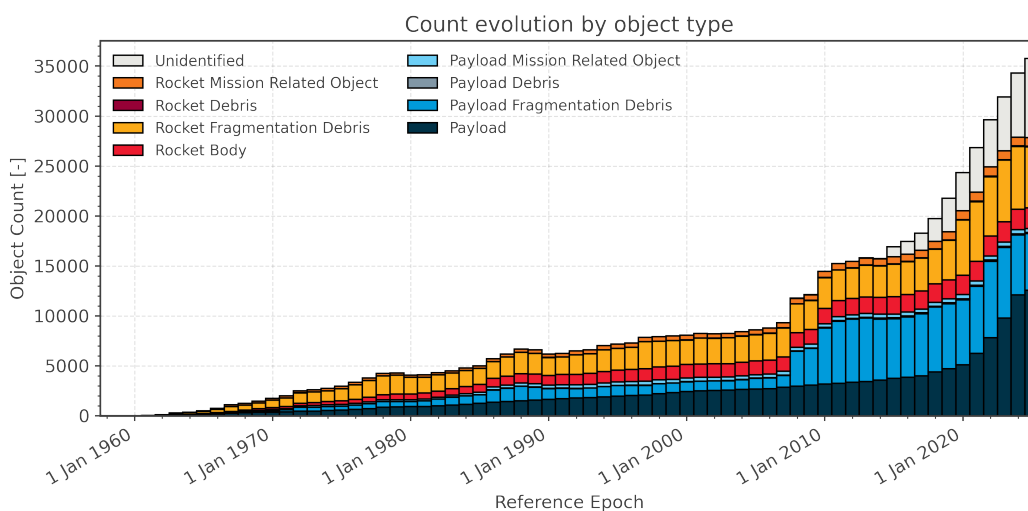
Dále je z Obrázků 2.2 a 2.3 zřejmý větší nárůst objektů z kategorie Payload v posledních letech. Především na Obrázku 2.2 je vidět rozdíl v dosavadním trendu počtu kusů Payload.

Na stejném obrázku lze také vidět schod v roce 2007 v kategorii Payload Mission Related Object (PM). Tento schod počtu kusů vznikl kvůli čínskému antisatelitnímu testu (antisatelitní test je záměrné zničení satelitu kvůli testu antisatelitní zbraně), další schod v počtu kusů je na obrázku jen o 2 roky později, v roce 2009, a může za něj kolize dvou satelitů. Poslední výraznější schod v kategorii PM je z roku 2021, opět

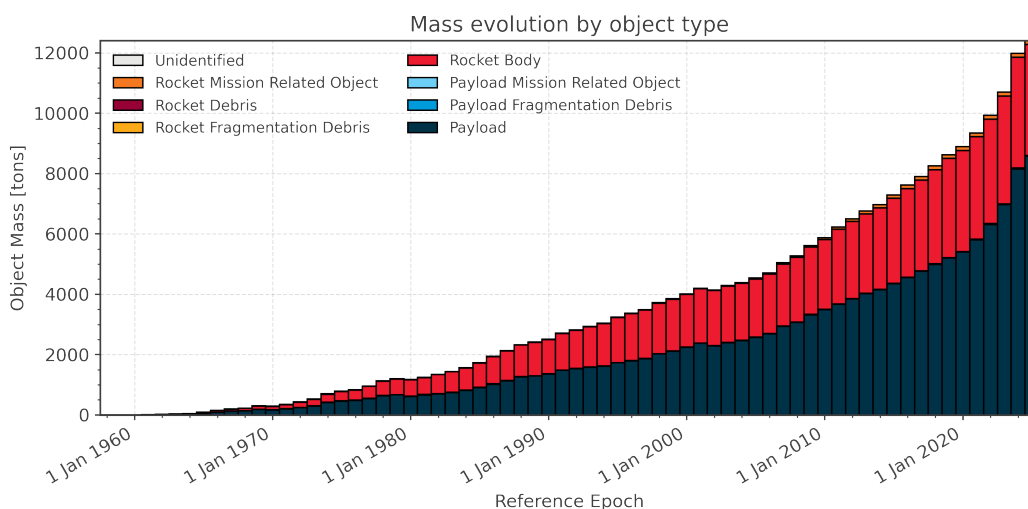
## 2.4. ODHADY CELKOVÉHO POČTU KOSMICKÉHO ODPADU

se jedná o antisatelitní test, tentokrát ruský. O všech zmíněných katastrofách je více v Kapitole 3.

Během posledních 10 let došlo k viditelnému nárůstu objektů v kategorii Unidentified, viz Obrázek 2.2. Takový nárůst je dán neustálým zlepšováním sledovacích zařízení, jelikož s každým rokem se díky vyšší citlivosti přístrojů objeví další, dosud neobjevené, objekty. Tyto objekty ale nutně nemusí být ve vesmíru nově, do jejich objevení se mohly ve vesmíru vyskytovat již dlouho dobu a kvůli tomu je náročnější, či dokonce nemožné, určit zdroj vzniku a tím klasifikovat takový objekt [3].



Obrázek 2.2: Časový vývoj počtu kusů KO na všech orbitách a jejich typ. Data se vztahují k 18.06.2024 [21].



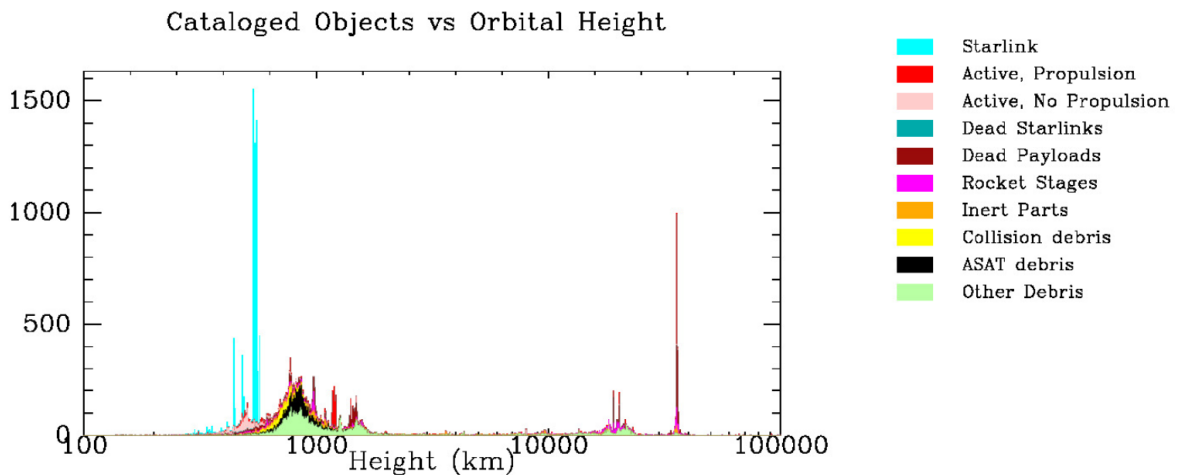
Obrázek 2.3: Časový vývoj hmotnosti KO na všech orbitách a jejich typ v tunách. Data se vztahují k 18.06.2024 [21].

### 3. Situace v chráněných oblastech

Ze všech zmíněných orbitálních oblastí vynikají svými vlastnosti LEO a GEO. Výhody těchto dvou oblastí jsou více rozvedeny v dalších kapitolách. Kvůli jejich výhodám je po takových orbitách vyšší poptávka a do těchto oblastí se často vypouští satelity, což vede k vysoké zaplněnosti těchto oblastí. Tyto oblasti jsou ale co do objemu omezené a s tím je nutné pracovat. Vyšší koncentrace objektů může vést ke Kesslerovu syndromu, což je nežádoucí stav a je snaha se mu vyvarovat. Proto oblast LEO a část GEO dostaly název chráněné oblasti. Jejich ochrana spočívá ve snaze nevytvářet další KO.

Kvůli problematice KO vznikl už v roce 1993 výbor kosmických agentur Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) [26] [27]. Ten koordinuje aktivity ve spojitosti s KO. IADC vydal doporučení pro snížení KO, přičemž se mezi to řadí likvidace satelitů po ukončení jejich mise, limitace vypouštění KO během provozu satelitu, minimalizace pravděpodobnosti rozpadu satelitu během provozu a prevence srážky na orbitě, víc informací v Kapitole 5 [27].

Momentální stav katalogizovaných objektů na LEO, GEO i MEO je na Obrázku 3.1. Z obrázku vyplývá, že ze tří výše zmíněných oblastí jsou nejvíce plné LEO a GEO. Na první pohled zaujme vysoký počet satelitů Starlink ve výšce 500 km nad povrchem Země a dále ve výšce 35 000 km nad povrchem Země směs aktivních a neaktivních satelitů, které se nacházejí na geostacionární dráze.



Obrázek 3.1: Rozložení objektů na LEO, MEO a GEO, tedy od 0 do 100 000 km nad zemským povrchem v kusech. Data jsou z 19.06.2024 [28].



## 3.1 LEO

Nízká oběžná dráha je prostor kolem Země od výšky 100 km do výšky 2 000 km nad povrchem Země. Jedná se tedy vzhledem k Zemi o nejbližší oblast, kterou můžeme nazývat vesmírem. Díky tomu se vyplatí na LEO umisťovat satelity pro dálkový průzkum Země, nízká výška orbity satelitů nad povrchem Země totiž umožňuje pořizovat velmi kvalitní a detailní snímky. Dále se oblast LEO využívá pro vědecké účely, za zmínění stojí Hubbleův vesmírný teleskop, nacházející se ve výšce 540 km nad povrchem Země už od roku 1990. Tento dalekohled má na kontě spoustu významných úspěchů, mezi ně patří například změření Hubbleovy konstanty, pozorování černých děr a známý snímek Hubbleovo hluboké pole [29].

Mezi vědecká zařízení v LEO regionu můžeme zařadit také vesmírné stanice. Momentálně bychom našli 2 vesmírné stanice, a to Mezinárodní vesmírnou stanici (ISS) a čínskou vesmírnou stanici Tiangong. ISS se nachází ve výšce 370 km až 460 km nad povrchem Země, její výška se neustále snižuje především kvůli atmosferickému odporu, takže je nutné ji pravidelně co pár měsíců posunovat výše. Na stavbě a chodu stanice se podílí několik vesmírných agentur, mezi ně patří NASA, ESA, ruský Roskosmos, japonská Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) a Kanadská kosmická agentura [30].

ISS se skládá z několika modulů, přičemž jednotlivé moduly se složily dohromady až na oběžné dráze. Společně se solárními panely stanice měří na délku 109 m a na šířku 51 m, což z ISS dělá největší objekt vytvořený lidmi ve vesmíru. Hlavním účelem stanice je vědecký výzkum v mikrogravitaci a příprava na budoucí delší pobyty astronautů dál od Země [31].

Benefity vědeckého výzkumu na ISS se uplatňují především na Zemi, mezi časté oblasti vědeckého výzkumu patří medicína, biologie a fyzika, ale ani ostatní vědecké disciplíny nejsou vynechány [32].

V roce 2021 začala Čína vynášet do vesmíru svou vlastní vesmírnou stanici, v roce 2022 třetím modulem dokončila její konstrukci [33]. Čínská vesmírná stanice dostala název Tiangong a plní stejný účel jako ISS, tedy především vědecký. Tiangong se nachází také přibližně 400 km nad povrchem Země a je menší než ISS. Na délku má necelých 56 m a na šířku 39 m. Obyvatelný objem stanice Tiangong je pouze 122 m<sup>3</sup>, kdežto u ISS je to 388 m<sup>3</sup>. Rozdíl je také ve váze stanic; Tiangong váží 66 t, ISS dokonce 465 t [34].

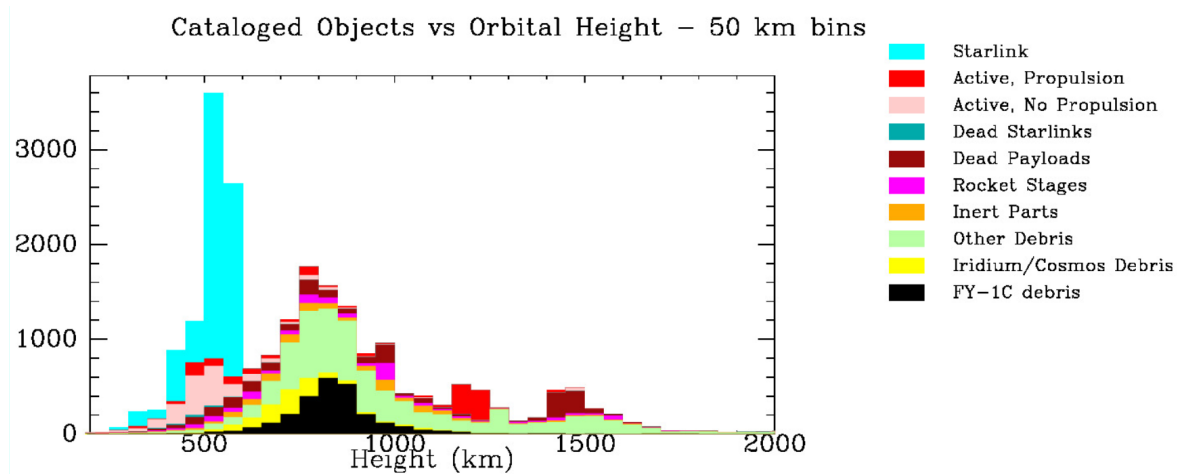
Jak bylo popsáno v Kapitole 1.2, čím blíže je objekt k tělesu, které obíhá, tím rychleji se musí pohybovat. V LEO oblasti je proto nutné, aby objekty obíhaly s vysokou rychlostí. ISS se pohybuje rychlostí 7,7 km · s<sup>-1</sup> a Zemi ji trvá obletět za 90 minut. To znamená, že na rozdíl od satelitů na GEO, LEO satelity nejsou neustále nad jedním místem nad Zemí.

LEO se využívá také pro komunikační satelity, výhoda LEO spočívá právě v blízkosti Zemi, datový přenos má díky tomu nízkou latenci. Tato latence je nižší než u satelitů

na MEO či GEO.

S LEO regionem se ovšem pojí jedna nevýhoda, a tou je, že satelity na LEO pokrývají v jednu chvíli pouze malou část povrchu Země. Takový problém se u komunikačních satelitů řeší satelitní konstelací, což je systém složený z několika satelitů komunikujících mezi sebou. Příklady takových systémů jsou Iridium satellite constellation se svými 66 satelity či Starlink, u kterého je momentálně schváleno vypuštění až 12 000 satelitů [35]. Satelitní konstelace mají tu výhodu, že jsou málo náchylné k rušení, a že jejich signál dosáhne až do odlehlých částí světa [36].

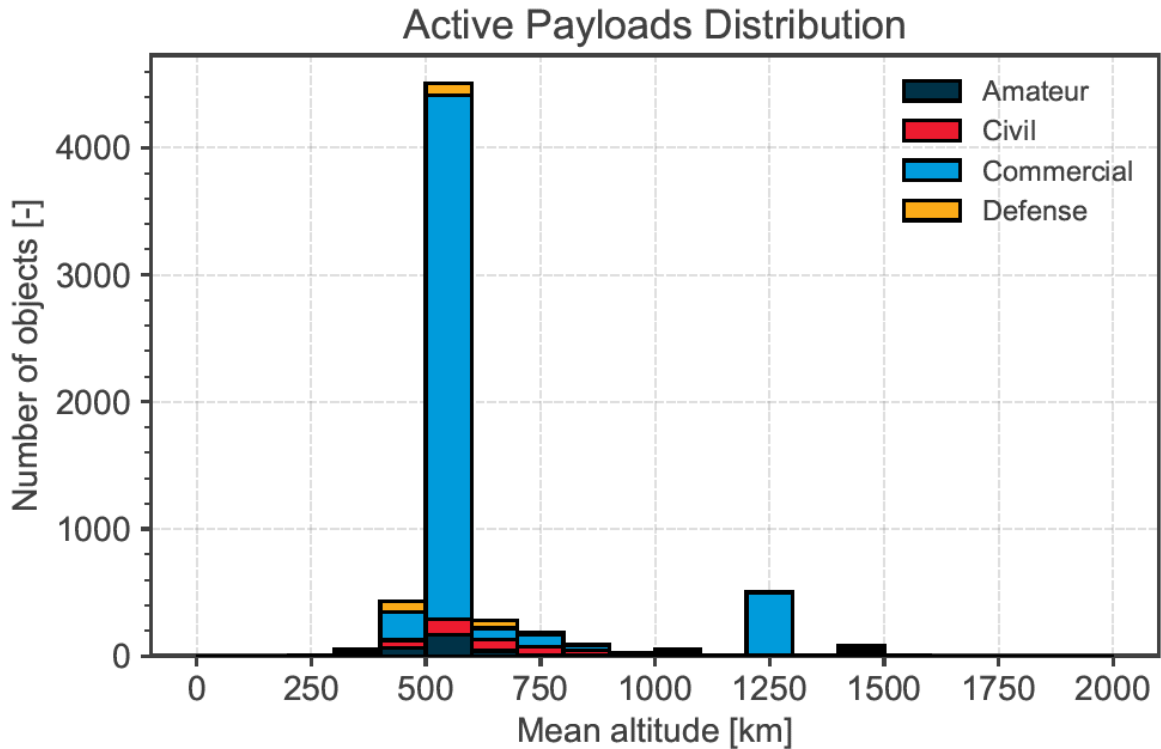
Objekty na LEO regionu nejsou rozloženy homogenně, některé orbity jsou více zaplněné, viz Obrázek 3.1 a Obrázek 3.2. Na Obrázku 3.2 se opět nachází pík okolo výšky 500 km nad povrchem Země kvůli konstelaci Starlink. Další viditelný pík je okolo výšky 800 km, v tomhle případě je na vině především KO, viz složení objektů v grafu.



Obrázek 3.2: Rozložení objektů na LEO orbitách v závislosti na výšce nad Zemí v rozlišení 50 km v kusech. Data se vztahují k 19.06.2024 [37].

Na Obrázku 3.3 je oproti předchozímu obrázku znázorněno rozložení pouze funkčního PL, tzv. aktivní payload, tedy také aktivní satelity. Zde je patrné, že dominanci v počtech kusů objektů na LEO má komerční sféra, přičemž většina satelitů z této kategorie se řadí k satelitní konstelaci Starlink od SpaceX (během tvorby grafu to bylo 3 664 satelitů) a k satelitní konstelaci OneWeb (během tvorby grafu to bylo 502 satelitů). Satelity Starlink jsou ve výšce 500 - 600 km nad povrchem Země, Oneweb je ve výšce 1 250 km nad povrchem Země. Ostatní kategorie jsou skoro až zanedbatelné. Mezi ně patří vojenský průmysl, amatérské satelity a civilní satelity (vědecké přístroje, meteorologické satelity a satelity pro dálkový průzkum Země).

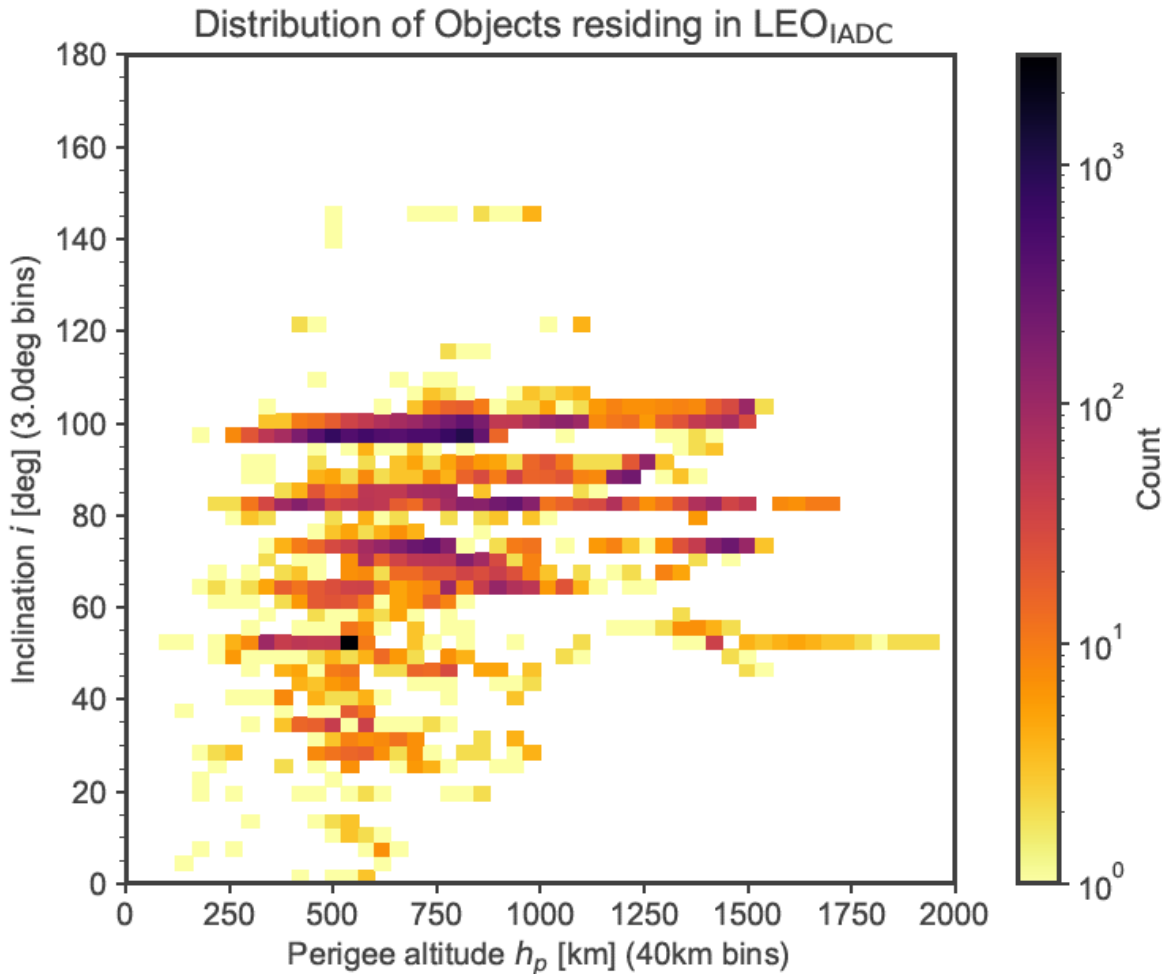
Za necelé dva roky, k datu 18.07.2024, přibýly další satelity Starlink, a tak se počet aktivních satelitů na LEO zvedl na 10 036 kusů. Z tohoto počtu tvoří Starlink satelity 6 154 kusů. To znamená, že satelity Starlink tvoří přes 61 % všech aktivních satelitů na LEO [38].



Obrázek 3.3: Rozložení funkčního PL na LEO orbitách v závislosti na výšce nad Zemí v rozlišení 100 km. Data v grafu jsou ke konci roku 2022 [10].

Počet všech objektů (včetně KO) v LEO regionu se liší nejenom v různých výškách, ale i v různých inklinacích. Graf zobrazující rozložení objektů v LEO oblasti v závislosti na perigeu a inklinaci je na Obrázku 3.4. Inklinace  $0^\circ$  znamená, že se objekty pohybují nad rovníkem, do inklinace  $90^\circ$  se objekty pohybují stejným směrem jako je směr rotace Země (tzv. progradní dráha) [39] a inklinace mezi  $90^\circ$  a  $180^\circ$  znamená, že se objekty pohybují proti směru rotace Země (tzv. retrogradní dráha). Speciální drahou je pak orbita s  $90^\circ$  inklinací, objekty na této dráze prolétávají nad zemskými póly, a díky tomu se tato orbita nazývá polární dráha. Inklinace této dráhy nemusí být nutně přesně  $90^\circ$ , ale stačí aby byla v rozmezí  $60^\circ - 120^\circ$  [13]. Umisťovat satelity na polární dráhu je výhodné v tom, že po určité době satelit takto proletí nad celým zemským povrchem.

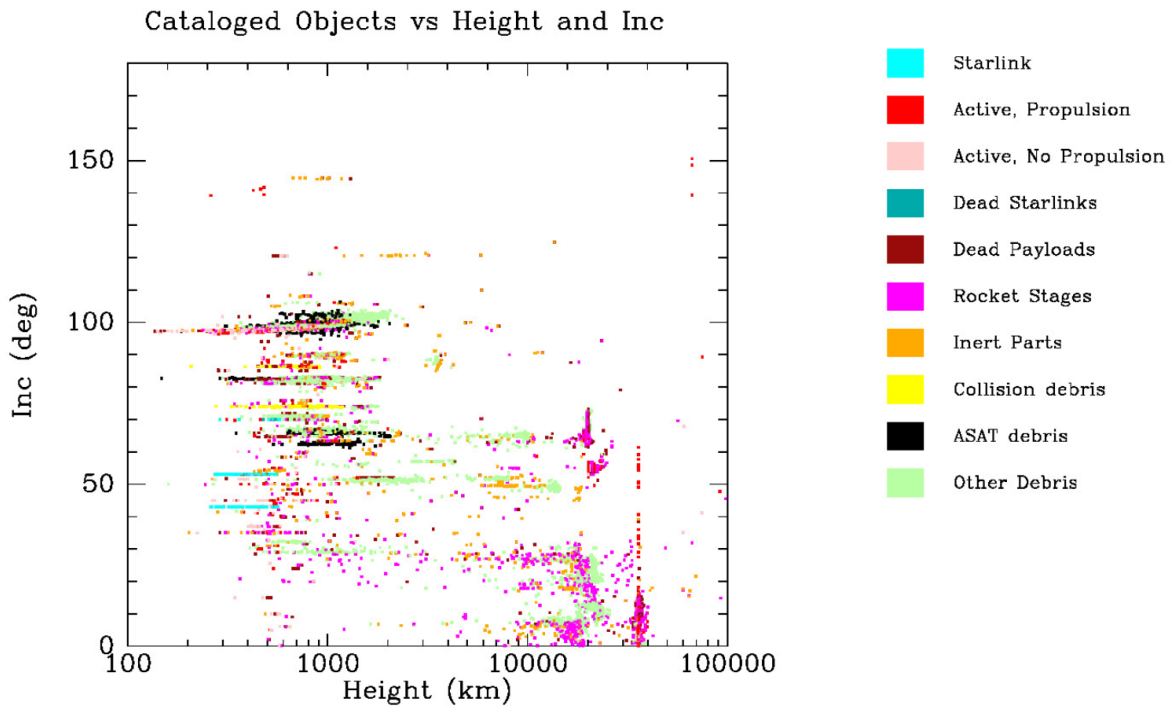
Jednotlivé objekty, jejich typ/původ, inklinace a perigeum jsou na Obrázku 3.5. V této kapitole nás zajímají objekty do výšky pouze 2 000 km nad povrchem Země.



Obrázek 3.4: Rozložení objektů v LEO regionu v závislosti na perigeu a na inklinaci orbity v počtech kusů. Data v grafu jsou ke konci roku 2022 [10].

Z obrázku 3.4 vyplývá, že nejvíc objektů je na inklinaci necelých  $100^\circ$  a vesměs na celém intervalu perigeí v LEO oblasti na této inklinaci. Společně s vyšším výskytem objektů na inklinaci  $90^\circ$  a  $85^\circ$  to vypadá, že polární dráha je oproti jiným drahám na LEO víc obsazená, čemuž by odpovídal i větší počet bodů na Obrázku 3.5. Stejně tak je vidět, jak klesá počet objektů směrem k rovníku, tedy k inklinaci hodnoty  $0^\circ$ . Dále se dá všimnout toho, že od perigea cca 250 km a níž klesá skokově počet objektů. Příčinou toho je větší odpor vzduchu od zemské atmosféry. Zajímavé také je, jak nevyrovnaný je počet objektů na prográdních drahách oproti retrográdním drahám. Důvodem je to, že dostat objekt na retrográdní dráhu oproti prográdní dráze je energeticky náročnější kvůli opačnému směru rotace Země [41].

Z Obrázku 3.3 lze vyčíst, že je zvýšený počet aktivních satelitů s perigeem okolo 500 km, což při pohledu na Obrázek 3.4 koresponduje s některými inklinacemi. V první řadě jde o inklinaci  $53^\circ$ , která je zaplněná satelity od společnosti Starlink. Černá barva na Obrázku 3.4 na inklinaci  $53^\circ$  a perigeu 540 km odpovídá várce 1. generace satelitů Starlink, kterých je s těmito parametry k lednu 2024 přes 3 000 kusů [42]. Další satelity Starlink

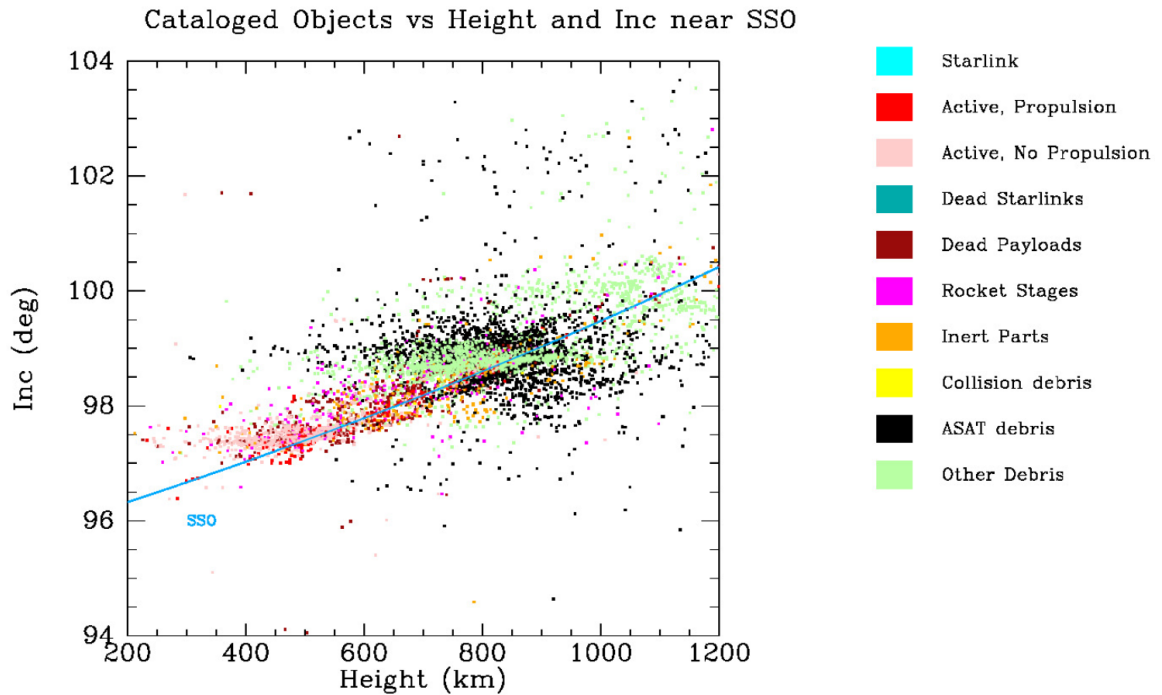


Obrázek 3.5: Rozložení katalogizovaných objektů a jejich typ/původ. Data v grafu jsou k 19.06.2024 [40].

se pak ve stejné výšce nachází na inklinaci  $98^\circ$ ,  $43^\circ$  a  $70^\circ$ , viz Obrázek 3.5. V příloze je zobrazen graf rozložení 1. generace satelitů Starlink s perigeem 547 km a inklinací  $54^\circ$ . Další satelitní konstelace, kterou lze vysledovat na Obrázku 3.4, je OneWeb s inklinací  $87^\circ$  a perigeem 1 200 km. Osamocenou oblast na inklinaci  $53^\circ$  s perigeem cca 1 500 km až 2 000 km lze připsat neaktivním satelitům. Stejně tak vyšší intenzita počtu objektů na perigeu okolo 1 500 km s inklinací  $73^\circ$  je tvořena především z neaktivních satelitů.

Z Obrázků 3.4 a 3.5 lze vidět, že velmi zaplněná oblast je kolem inklinace  $100^\circ$  a perigea od asi 200 km do 1 200 km. Taková oblast je v detailu na Obrázku 3.6.

V rámci LEO lze definovat další orbitu, a tou je heliosynchronní orbita (v angličtině se označuje zkratkou SSO). Taková orbita je typem polární orbity, má totiž inklinaci okolo  $98^\circ$  a výšku od 600 km do 800 km nad povrchem Země. Satelity na takové orbitě mají fixní pozici vůči Slunci, což znamená, že můžou být neustále vystaveny slunečním paprskům. Výhoda takové orbity spočívá v tom, že satelit nad určitým místem nad Zemí proletí pokaždé ve stejný tamní čas. To se hodí všem takovým odvětvím, které vyžadují sledovat periodicky určité místo na Zemi, a tak sledovat změny v oblasti. Taková odvětví jsou například dálkový průzkum Země a meteorologie [13]. Popularita takové orbity je zřejmá například z Obrázku 3.6. Zde je vidět velké množství manévrovatelných, ale i aktivních nemanévrovatelných satelitů. Také jsou zde viditelné trosky po čínském antisatelitním testu.



Obrázek 3.6: Rozložení všech objektů v detailu u polární dráhy. Data v grafu jsou k 19.06.2024 [40].

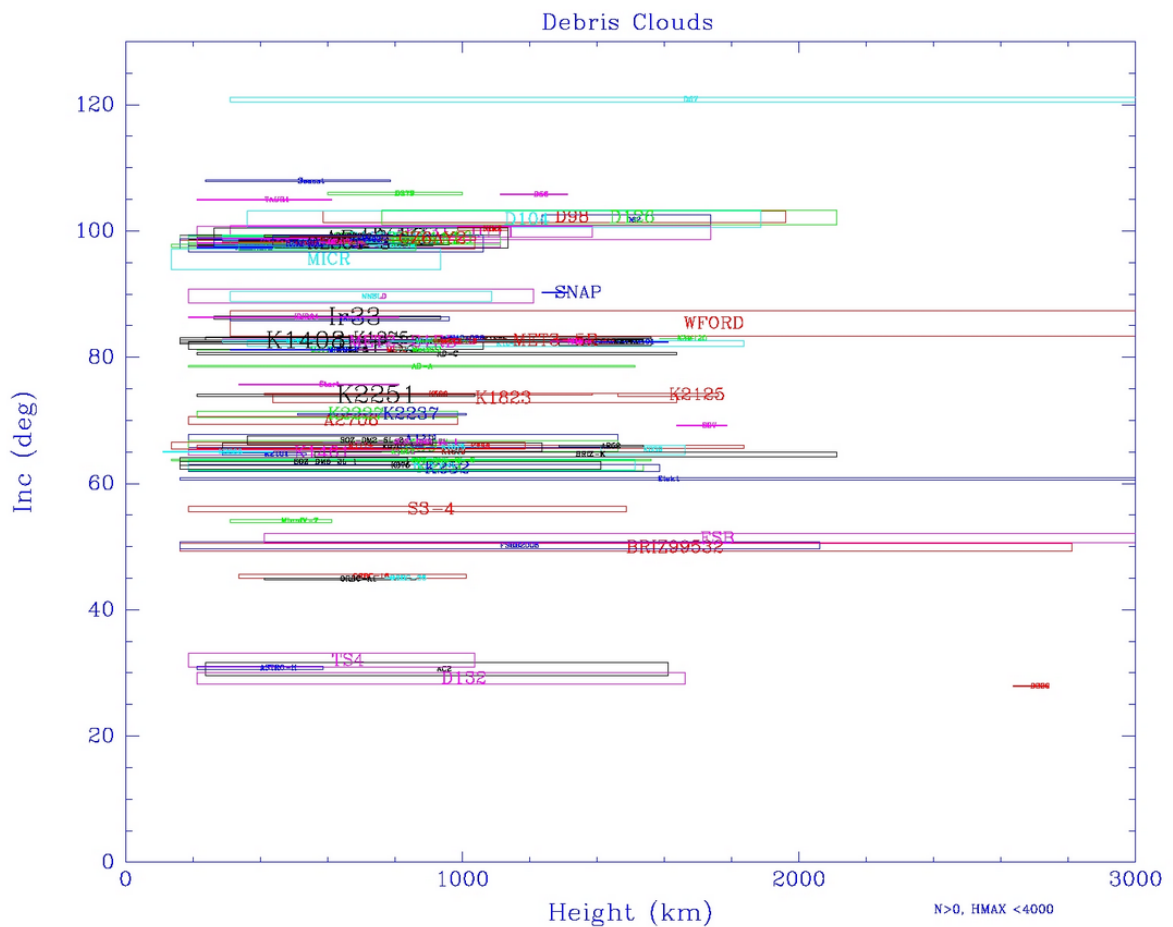
V LEO oblasti je vedle velkého množství (ne)aktivních satelitů také velké množství KO. Pokud se jeho vznik váže k určité události, při kterém vzniklo větší množství objektů, říká se o něm, že pochází z určitého Space debris cloud (do češtiny to lze přeložit jako oblaka kosmického odpadu, dále se v textu bude vyskytovat jako KO cloud).

KO cloud může vzniknout různými způsoby, především to jsou antisatelitní testy, kolize mezi satelity a výbuchy satelitů/raket. Dalšími způsoby jsou destrukce satelitů či raket kvůli impaktu KO a úmyslné vypuštění objektů ze satelitů.

Graficky se KO clouds zobrazují pomocí tzv. Gabbardových diagramů, kdy v grafu je zobrazené apogeum a perigeum jednotlivých fragmentů a jejich orbitální perioda. KO clouds jsou velmi běžné na LEO a vyskytují se v různých výškách nad povrchem Země a na různých inklinacích [43]. Graf zobrazující rozložení jednotlivých KO clouds je na Obrázku 3.7.

Při vizuálním porovnání Obrázků 3.4 a 3.7 lze najít podobu. Tam, kde je to na Obrázku 3.4 víc plné, tam je s velkou pravděpodobností nějaký KO cloud. Na Obrázku 3.7 jsou vyobrazeny všechny KO clouds na LEO regionu zasahující až do výšky 4 000 km nad povrchem Země. Mezi nimi je cca 50 KO clouds s počtem pozorovatelných fragmentů alespoň 50 kusů a 5 KO clouds s počtem pozorovatelných fragmentů alespoň 500 kusů. Ačkoliv většina KO clouds má méně než 50 katalogizovaných objektů, ty největší mohou mít i tisíc kusů, a to se bavíme jen o objektech větších než 10 cm. Takové se dají najít v Obrázku 3.4. Na inklinaci  $99^\circ$  a perigeu okolo 1 000 km se rozkládají trosky po čínském antisatelitním testu z roku 2007, po kterém zbylo přes 3 000 kategorizovaných trosek, odhadováno je však 150 000 kusů větších než 10 mm [44]. Druhým antisatelitním testem

### 3.1. LEO



Obrázek 3.7: Rozložení všech KO clouds na LEO regionu v závislosti na výšce nad Zemí a na inklinaci orbity. Jednotlivé obdélníky znázorňují oblast, kde se fragmenty vyskytují. Každý obdélník má svůj název, v grafu jsou použité jejich zkratky. Za povšimnutí stojí to, jak jsou všechny obdélníky úzké, a to vždy v intervalu inklinace. Data v grafu jsou k roku 2022 [43].

je ruský test z roku 2021, při kterém vzniklo přes 1 500 kategorizovaných trosek [45]. Fragmenty se nachází kolem perigea 400 km a inklinace 82°. Další velkou událostí byla v roce 2009 kolize dvou satelitů - Iridium 33 a Cosmos 2251. Cosmos 2251 byl skoro tunový satelit a Iridium 33 víc než půl tunový satelit. Kolize způsobila vznik 2 200 fragmentů, přičemž alespoň už o 3 roky později bylo přes 300 kusů deorbitováno. Jedna taková událost tedy vedla ke vzniku více než 2 000 objektů, které jsou větší než 10 cm a dalších menších objektů. Lze to porovnat s počtem vynesených satelitů Starlink, kterých je momentálně přes 6 000. Je to velké číslo, ale je „jen“ 3krát větší než kolik objektů vznikne při jedné jediné kolizi. Navíc Starlink satelity jsou manévrovatelné, fragmenty z kolize nikoliv. KO clouds z této kolize jsou na inklinaci 74° a perigea 400 km až 100 km a dále na inklinaci 86° a perigea 400 km až 900 km [46]. Za zmínku také stojí exploze rakety Pegasus v roce 1994. Při explozi vzniklo přes 600 kategorizovaných trosek. KO cloud těchto trosek se rozprostírá na inklinaci 82° a perigeích 300 km až 1 000 km [47].

## 3.2 GEO

Geostacionární dráha je typ geosynchronní dráhy, která se vyznačuje tím, že satelity na této dráze zůstávají neustále nad jedním místem nad Zemí, satelity tedy musí být 35 786 km nad povrchem Země. Geosynchronní dráha může mít různou inklinaci, kdežto GEO je ohraničené, a to je rozdíl mezi geosynchronní dráhou a GEO.

Geostacionární dráha je kruhová orbita ( $e = 0$ ) s perigeem (tedy i apogeem) 35 786 km, přičemž jako GEO se bere i perigeum orbity z intervalu  $\langle 35\,586; 35\,986 \rangle$  km. GEO oblast nemá tvar slupky, jako je to u LEO, ale GEO tvoří pás okolo rovníku, pás je široký (z hlediska inklinace)  $50^\circ$  a osa tohoto pásu je přímo nad Zemským rovníkem. Jak bylo již zmíněno, objekty na GEO se pohybují stejnou úhlovou rychlostí jako se Země otáčí kolem své osy, což má za následek to, že objekty na GEO jsou vůči rotující se Zemi nepohyblivé. Z toho plyne, že objekty se musí pohybovat stejným směrem jako se Země otáčí, jsou tedy na prográdní dráze [13]. Objekty jsou tak stále nad jedním místem na Zemi, což je výhodné pro mnoho různých satelitů. Výhodou větší vzdálenosti od Země, než je LEO, je pokrytí většího území na Zemi. S tím se ovšem pojí nevýhoda vyšší latence, protože signálu, který se pohybuje rychlostí světla ve vakuu, trvá dostat se od Země k satelitu na GEO a zpět na Zem kolem 0,22 s [48]. Taková latence nevadí například u televizního přenosu, u telefonního přenosu už ale ano. Proto se pro telefonní komunikaci využívají satelity na jiných orbitách, takových, které jsou k Zemi blíže. Další výhodou satelitů na GEO je, že antény na Zemi můžou neustále mířit jedním směrem ke GEO satelitům.

Na GEO nachází uplatnění satelity komunikační, navigační a meteorologické, přičemž komunikační satelity se využívají pro přenos televizních signálů a rádiových signálů. Některé satelity mají dvojí využití, a to navigační a komunikační a také komunikační a pro pozorování Země [48] [49].

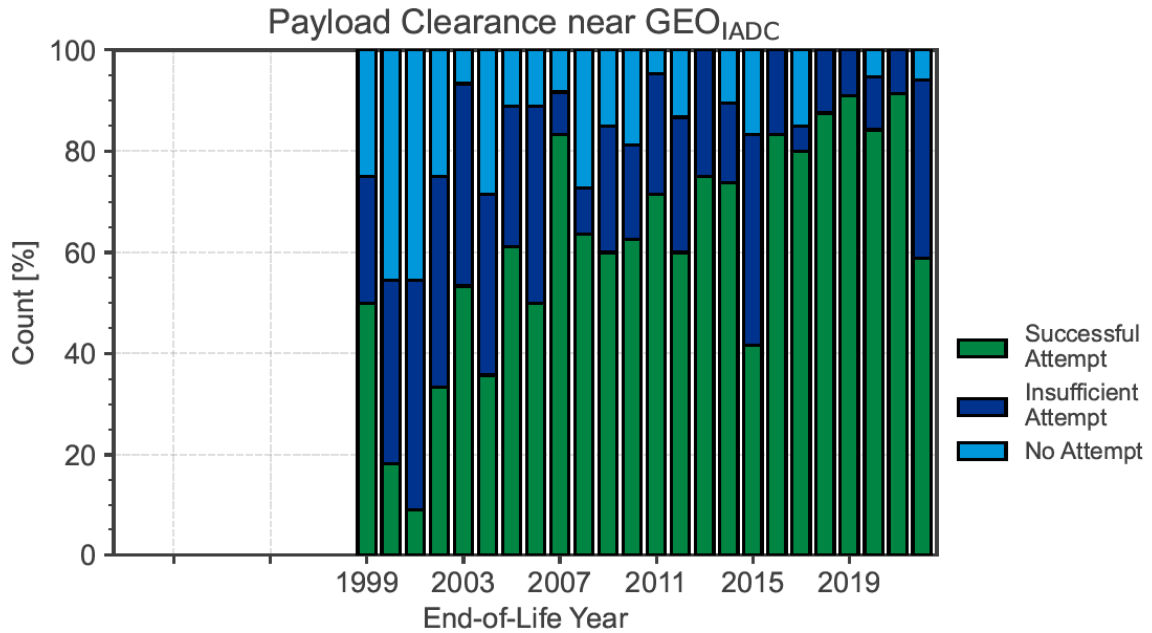
Rychlost satelitů na GEO je kolem  $3,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , přičemž takovou rychlostí se pohybují všechny satelity na GEO. To má za následek to, že satelity mají vůči sobě nulovou rychlost. S tím se snižuje riziko srážky mezi jednotlivými satelity.

Na rozdíl od  $\text{LEO}_{\text{IADC}}$ ,  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$  není totožný s GEO, pás  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$  má sice totožnou hloubku, a to  $\langle 35\,586; 35\,986 \rangle$  km, ale jedná se o užší pás, má totiž na šířku (z hlediska inklinace) jen  $30^\circ$  a opět platí, že osa tohoto pásu je přímo nad Zemským rovníkem [10]. Ke konci roku 2022 bylo na GEO 590 aktivních satelitů a z toho jen 12 mimo  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$ , tedy s inklinací větší než  $15^\circ$  [49]. Ve většině situacích můžeme data o GEO i o  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$  považovat za stejné.

Pokud se zpětně podíváme do Tabulky 2.1, můžeme říct, že na GEO je 196 neaktivních satelitů a 107 jiných větších objektů - KO (připomínáme, že počty objektů v Tabulce 2.1 se vztahují k takovým objektům, které je možné detekovat a sledovat, tedy pro objekty na GEO platí, že jsou větší než 1 m [22]). Pokud to porovnáme s LEO, zjistíme, že na LEO je aktivních cca 6 500 satelitů, což znamená, že neaktivních satelitů je cca 1 500 (viz Tabulka 2.1). Z toho se dá říct, že neaktivní satelity tvoří 25 % všech satelitů



na GEO a pro LEO platí to, že neaktivní satelity tvoří z celkového počtu satelitů na LEO 19 %. Ačkoliv by se mohlo zdát, že to, že čtvrtina všech satelitů na GEO je neaktivních, je hodně, tak i přesto za posledních cca 10 let došlo u alespoň 80 % všech satelitů, co dospěly ke konci své mise, ke snaze o deorbitaci. Skoro každý rok za posledních cca 10 let byla snaha úspěšná, a tak až 60 - 90 % satelitů bylo úspěšně deorbitováno, viz Obrázek 3.8. Pozitivní také je, že relativní počet pokusů o odklizení satelitů v průběhu let roste.



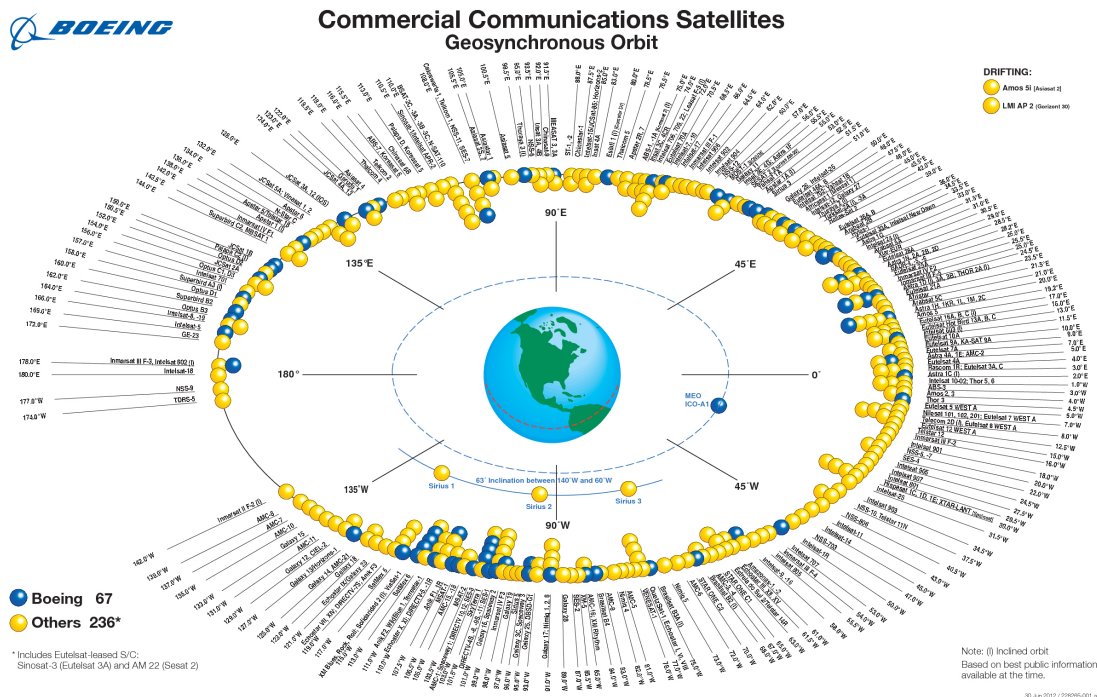
Obrázek 3.8: Snaha o odklizení satelitů na konci své mise na GEO<sub>IADC</sub> v procentech. Data v grafu jsou ke konci roku 2022 [10].

Plošné rozložení satelitů na GEO je rovnoměrnější než na LEO, alespoň co se týče satelitů s nulovou inklinací. Na obrázku 3.9 jsou zobrazené aktivní komerční komunikační satelity (které zastupují většinu satelitů) na geosynchronní dráze, tedy především na GEO. Obrázek je sice staršího data, ale rozložení satelitů ke květnu roku 2023 je obdobné [49].

Na obrázku jde vidět, jak se satelity shlukují nad určitými místy na Zemi. Lze vidět, že zvýšená koncentrace satelitů je nad Amerikou, Evropou a Asií (přesněji řečeno kolem 105° východní délky). Za povšimnutí také stojí minimum satelitů nad světovými oceány, zvláště nad Tichým oceánem. Ke květnu 2023 se na GEO nachází 74 satelitů nad Evropou, 119 nad Severní a Jižní Amerikou, z toho 107 satelitů jsou satelity USA a Kanady. Nad Asií a Austrálií se nachází 84 satelitů.

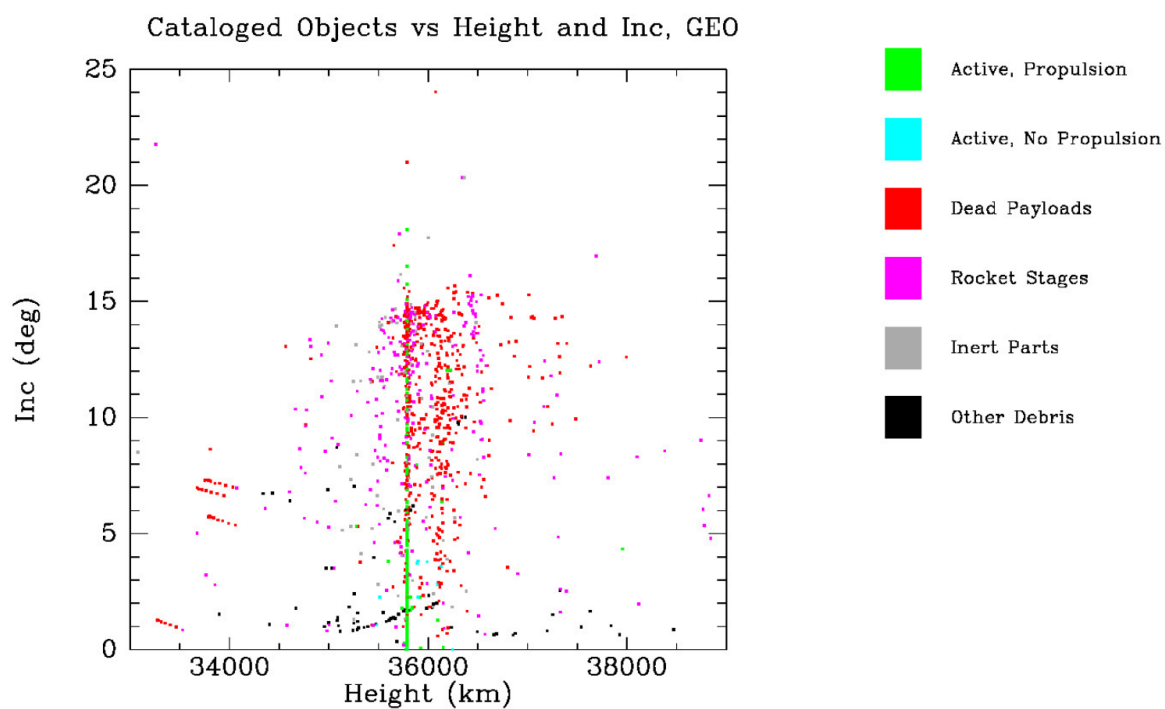
Podle [51][52] je minimální vzdálenost mezi jednotlivými satelity na GEO 0,1°, v přepočtu je to kolem 72 km.

Rozložení objektů na GEO podle výšky nad povrchem Země a inklinací je na Obrázku 3.10. Na něm je vidět vysoká obsazenost satelitů na perigeu 35 786 km a 0° inklinace.



Obrázek 3.9: Rozložení aktivních komerčních komunikačních satelitů na geosynchronní orbitě. Data použité v obrázku jsou k 30.06.2012 [50].

Za povšimnutí stojí mimo jiné to, kde se nachází většina neaktivních satelitů. Ty jsou na tzv. hřbitovní orbitě, což je oblast cca 235 km nad  $GEO_{IADC}$  (více je v Kapitole 5), případně na konci chráněné oblasti, tedy blízko inklinace  $15^\circ$ . Také je zajímavé rozložení raketových stupňů, které se nacházejí ještě dál za hřbitovní orbitou, či jinak nepřekážejí na  $GEO_{IADC}$ .



Obrázek 3.10: Rozložení katalogizovaných objektů na geostacionární orbitě. Data použité v obrázku jsou k 19.06.2024 [40].

## 4. Rizika související s kosmickým odpadem

KO tvoří problém hned z několika důvodů. V první řadě je to riziko srážky s jiným objektem ve vesmíru, rovněž pád KO na Zem představuje riziko pro lidi, škody na majetku a také pro leteckou dopravu. Pravděpodobnost tohoto typu rizika je ovšem minimální, k červnu roku 2023 nebyl ani jeden potvrzený případ zásahu KO do letadla a jen jeden případ pádu KO na člověka [53] [54]. Riziko spočívá také v pádu KO do zabydlené oblasti, přičemž takových případů přibývá [1].

Současně začíná být KO problémem v astronomii a ve vědě. Mikrometrové částičky odpadu narušují povrch optiky vědeckých přístrojů ve vesmíru a jiné kusy, o velikosti desetin mm, můžou ve velkém množství na jednom místě rozptylovat světlo od Slunce, a tak zhoršovat astronomická pozorování. Při dlouhých expozicích se na snímcích můžou zobrazit světelné stopy KO a to vadí vědeckým pozorováním ze Země, světelné stopy totiž částečně znehodnocují pozorování, a mohou mít za následek falešná data. KO je problematický mimo jiné také v radioastronomii, kdy KO odráží rádiové signály [5].

Dále se zaměříme pouze na problém kolizí způsobené KO. S kolizemi ve vesmíru souvisí pojem Kesslerův syndrom, který je záhy vysvětlen.

### 4.1 Kesslerův syndrom

Kesslerův syndrom popisuje řetězovou reakci kolizí, během které budou ve vesmíru přibývat další umělé objekty, a to i přesto, že se do vesmíru nebudou záměrně další vypouštět. Nové objekty začnou vznikat kvůli kolizím mezi umělými objekty ve vesmíru. Takové kolize budou čím dál častější, a tak dojde k exponenciálnímu růstu objektů ve vesmíru. Největším přispěvatelem KO bude právě tento způsob produkce odpadu [55] [56]. Podle D. J. Kesslera (po kterém nese Kesslerův syndrom své jméno) Kesslerův syndrom není něco, co se objeví v průběhu pár dnů či měsíců, nebo až populace KO překročí nějakou kritickou hranici. Spíš se podle něj jedná o jev, během kterého budou satelity víc ohrožené malými fragmenty (vzniklé kvůli náhodným kolizím) než meteoroidy [56].

Jestli již Kesslerův syndrom začal, či ne, je diskutabilní, názory se objevují různé [57]. Pokud ovšem začal, či začne, podle [58] mohou být, respektive budou, následky poměrně fatální. Všechny satelity budou v neustálém ohrožení a časem dojde pravděpodobně k jejich zničení. Nemluvě o tom, že fragmenty mohou na své orbitě zůstat mnoho let a tím znepříjemnit budoucí vesmírné mise. Kesslerův syndrom bude znamenat také přímé ohrožení astronautů na vesmírných stanicích.

## 4.2 Riziko kolize

Kolizi mezi satelitem a KO lze mimo jiné popsat pomocí pravděpodobnosti srážky. Pravděpodobnost kolize satelitu s KO lze podle [59] [60] vyjádřit jako

$$P_{\text{coll} \geq 1} = 1 - e^{-S\Delta v \sigma t}, \quad (4.1)$$

kde  $S$  je prostorová hustota, ta vyjadřuje počet kusů objektů na  $\text{km}^3$ ,  $\Delta v$  je rozdíl rychlostí objektů při kolizi, tzv. nárazová rychlost, nebo také relativní kolizní rychlost, jednotkou je  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\sigma$  je celková průřezová plocha obou kolizních objektů v  $\text{km}^2$  a  $t$  je časový úsek, pro který se počítá riziko kolize a je vyjádřen v sekundách.

Vztah 4.1 vyjadřuje pravděpodobnost minimálně jednoho nárazu s vybraným satelitem, pravděpodobnost žádného nárazu vyjadřuje vztah 4.2 [61].

$$P_{\text{coll}=0} = e^{-S\Delta v \sigma t} \quad (4.2)$$

Pokud je pravděpodobnost kolize dostatečně malá, může se vztah 4.1 upravit na lineární vztah 4.3 [59] [60].

$$P_{\text{coll} \geq 1} = S\Delta v \sigma t \quad (4.3)$$

Pokud není známa prostorová hustota, ale je známa hodnota veličiny flux, použije se vztah 4.4. Veličina flux  $F$  nemá český překlad, dala by se ale přeložit jako tok kosmického odpadu, ovšem dále budeme používat anglický výraz flux.

$$P_{\text{coll} \geq 1} = 1 - e^{-F\sigma t}, \quad (4.4)$$

Flux vyjadřuje kolik částic/objektů projde jednotkovou plochou za jednotkový čas, a při výpočtech pravděpodobnosti kolize satelitů s KO ho lze vyjádřit jako součin prostorové hustoty a nárazové rychlosti (relativní rychlosti) mezi satelitem a objektem, viz rovnice 4.5 [62] [63].

$$F = S \cdot \Delta v \quad (4.5)$$

Flux se běžně udává v kusech  $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ , proto za průřezovou plochu objektů  $\sigma$  z rovnice 4.4 dosazujeme hodnotu s jednotkou  $\text{m}^2$  a za časový úsek  $t$  jednotku rok [64]. Stejně tak jako matematické vyjádření pravděpodobnosti kolize pomocí prostorové hustoty šlo zjednodušit na lineární tvar, i rovnici 4.4 lze při malé pravděpodobnosti kolize zjednodušit na vztah

$$P_{\text{coll} \geq 1} = F\sigma t, \quad (4.6)$$

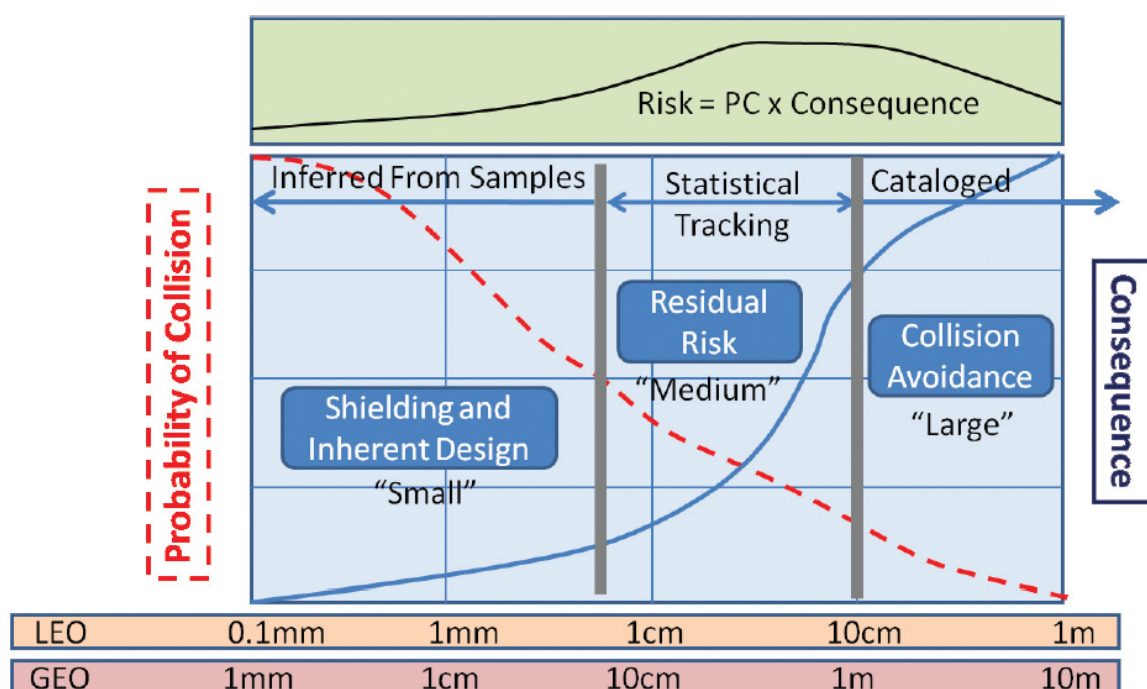
a stejně tak lze pomocí veličiny flux vyjádřit, jaká je pravděpodobnost, že ke kolizi vůbec nedojde, viz rovnice 4.7.

$$P_{\text{coll}=0} = e^{-F\sigma t} \quad (4.7)$$

Ze vztahů 4.1 až 4.7 lze vyčíst, že pravděpodobnost kolize roste s prostorovou hustotou, vzájemnou rychlostí kolizních objektů, průřezem jak satelitu, tak kolizních objektů,

s časem a také s veličinou flux.

Velikost rizika kolize s KO je dána součinem pravděpodobnosti kolize a následku kolize [60] [65]. Když se zaměříme na následky kolizí s KO a podíváme se na Obrázek 4.1, zjistíme, že fatální následek má kolize s katalogizovaným objektem, tedy větším než 10 cm na LEO a větším než 1 m na GEO. Podle [66] jsou následky kolize s takovými objekty katastrofální. Při takových kolizích vzniká totiž velký počet fragmentů, a to navíc takových, které mají velikost mezi 5 mm a 10 cm na LEO a na GEO mají mezi 5 cm až 1 m. Problém těchto objektů je vysvětlen záhy. Naopak nejmírnější následek kolize je od objektů menších než cca 5 mm na LEO a menších než cca 5 cm na GEO. Jak lze vidět z Obrázku 4.1, malé objekty mají kvůli své vysoké početnosti vysokou pravděpodobnost kolize, zatímco velké objekty díky své nízké početnosti mají malou pravděpodobnost kolize.



Obrázek 4.1: Závislost pravděpodobnosti a následku kolize na velikosti objektů. Graf zároveň zobrazuje riziko v závislosti na velikosti KO. [66].

Z obrázku lze vyčíst, jaký způsob ochrany se v praxi používá vůči různě velkému KO. Při riziku kolize s velkým KO dochází k protikolizním manévřům, proti malému KO se dá chránit pomocí vnějšího pláště (více je v Kapitole 5.1.4), zatímco u prostřední kategorie objektů (cca 5 mm až 10 cm na LEO a cca 5 cm až 1 m na GEO) je štítek „Zbytkové riziko“. U prostřední kategorie je zobrazená poměrně vysoká pravděpodobnost kolize a zároveň závažný následek. To se ve výsledku projeví na celkovém riziku, jehož vážnost lze vidět na zeleném poli v obrázku. Největší riziko srážky tedy tvoří středně velké objekty, za ním se drží velké objekty a nejmenší riziko tvoří malé objekty. Objekty střední kategorie tvoří riziko v tom, že se nedají spolehlivě objevit a dále sle-

dovat, což má za následek to, že se satelity těmto objektům nemohou vyhnout. Zároveň jako ochrana proti nárazům takových objektů nestačí pouze upravený vnější plášť satelitů. Proto tyto objekty dostaly název Lethal Non-Trackable (LNT) debris, tedy smrtící nesledovatelný odpad. Tyto objekty vznikají kvůli výbuchům satelitů či těl raket a také při kolizích. Pokud kolize satelitu s jiným objektem ukončí misi satelitu, je 95 % šance, že tím jiným objektem je LNT odpad [22].

### 4.3 Riziko v chráněných oblastech

Ze všech oblastí blízkého vesmíru mají objekty na LEO největší pravděpodobnost kolize s jiným objektem. Podle [67] je pravděpodobnost kolize s katalogizovaným objektem za jeden rok 15 %, což vychází na 1 kolizi za 7 let. Nutno podotknout, že tato hodnota byla stanovena k datu 01.01.2017, k roku 2024 bude tato hodnota s největší pravděpodobností vyšší. Za vysokou pravděpodobnost srážky na LEO může víc faktorů, mezi ně patří vyšší prostorová hustota objektů a vyšší kruhová rychlost objektů. Další rizikem na LEO je existence tzv. massive derelicts, tedy masivních opuštěných objektů, což jsou takové objekty, které jsou běžně velké několik metrů a váží několik tun. Příkladem takového objektu je opuštěné tělo rakety nebo neaktivní satelit. Ty jsou problémové z toho důvodu, že při kolizi generují desetitisíce LNT objektů [22].

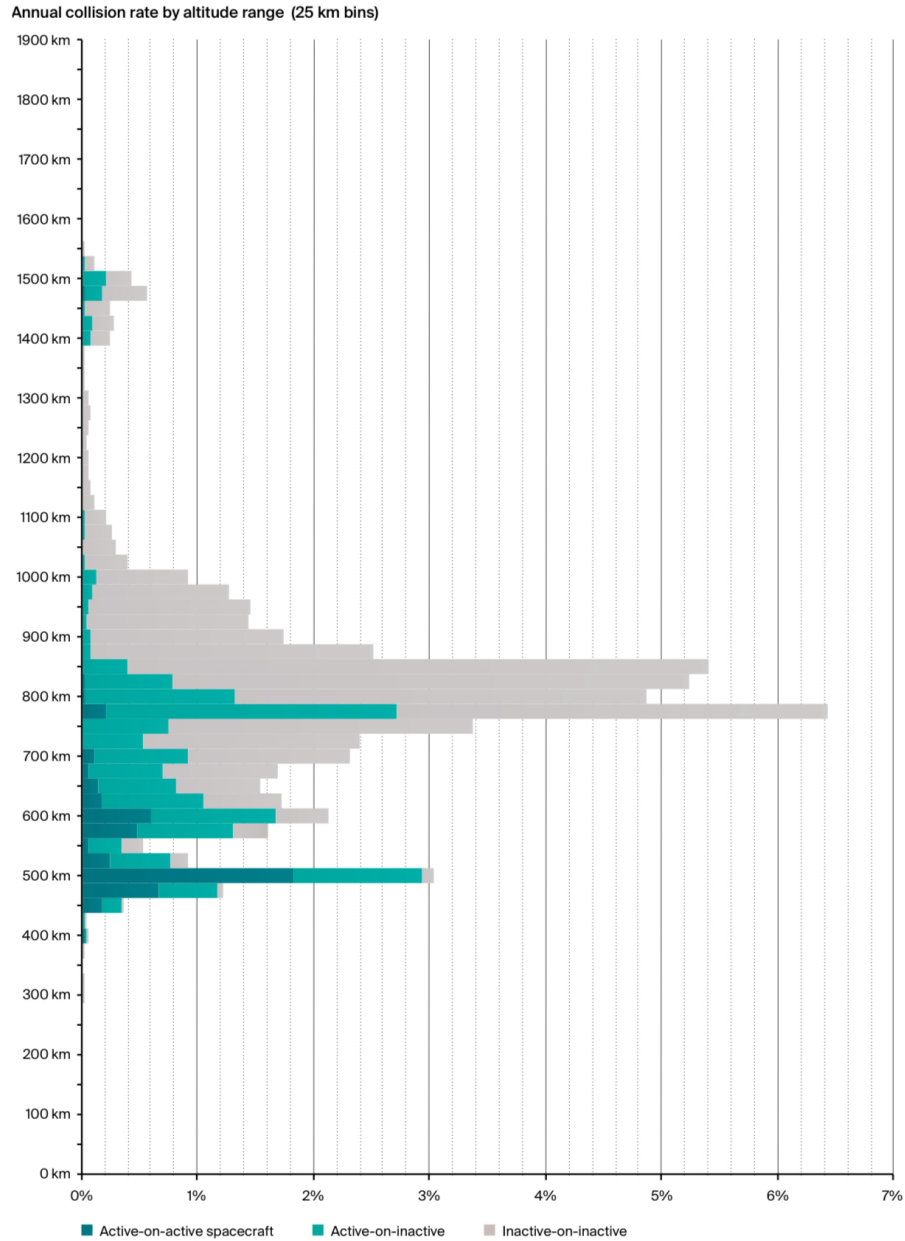
Vyjádření ročního rizika kolize na LEO je na Obrázku 4.2. Z něho vychází například to, že nad 650 km nad povrchem Země je pravděpodobnost kolize vyšší mezi jednotlivými objekty KO než aktivním satelitem s KO či aktivním satelitem s aktivním satelitem [68].

Satelity na orbitách s vyšší inklinací jsou vystaveny daleko vyšší pravděpodobnosti kolize než satelity s inklinací nižší. Důvodem je velký počet objektů kolem polární dráhy. Jedná se také o objekty tvořené aktivními satelity, ale především jsou to fragmenty z kolizí, antisatelitních testů a podobně, viz Obrázek 3.6 [22]. Podle [69] byla v roce 2015 největší pravděpodobnost kolize ve výšce 800 km nad povrchem Země a inklinaci okolo 85°. Současně byla vyšší pravděpodobnost kolize na inklinaci cca 110°. Pravděpodobnost kolize kopíruje rozložení objektů z Obrázku 3.4, tudíž k polovině roku 2024 můžeme odhadnout, že nejvyšší pravděpodobnost kolize je i po skoro 10 letech stále okolo polární dráhy, přesněji řečeno na inklinacích 85° a 100°. Vedle toho roste vyšší pravděpodobnost na inklinaci 50°.

Na geostacionární dráze je pravděpodobnost kolize výrazně menší než na LEO, a to podle [67] jen 0,032 % za rok. To znamená jedna kolize s katalogizovaným objektem za 3000 let. Spousta zdrojů ovšem stanovila hodnotu roční pravděpodobnosti kolize na GEO jinak, některé práce přišly s hodnotou  $2,2 \cdot 10^{-5}$  % a jiné například s 0,6 % [60]. Na GEO se KO koncentruje na dvou místech, na tzv. Geopotential wells. Jedná se o místa, která kvůli nedokonalému kulatému tvaru Země přitahují pomocí gravitačních sil objekty v blízkosti. Tyto místa se vyskytují na 75° východní délky a 105° západní

### 4.3. RIZIKO V CHRÁNĚNÝCH OBLASTECH

délky [59]. Pravděpodobnost kolize na těchto zemských délkách je vyšší než na jiných místech GEO [22].



Obrázek 4.2: Odhad roční pravděpodobnosti kolize na jednotlivých výškách nad Zemí na LEO v rozlišení 25 km. Graf také zobrazuje typ srážky (aktivní satelit s aktivním satelitem, aktivní s neaktivním satelitem, KO). Data jsou z roku 2019 [68].



## 5. Způsoby eliminace rizik

V této kapitole jsme se zaměřili pouze na rizika vyplývající z kolizí způsobených KO. Při eliminaci takových rizik se věnujeme 2 aspektům vycházejícím z konceptu Space Environment Management (SEM) - zmírnění tvorby KO a odstraňování KO [70]. Zmírnění tvorby KO představuje soubor jednotlivých opatření, mezi které se řadí prevence před vypouštěním odpadu, prevence před explozí či kolizí, omezení životnosti neaktivního satelitu a řešení rizika z možného pádu KO na Zemi. Odstraňování KO popisuje například aktivní odstraňování KO.

IADC definuje 4 hlavní hlediska zmírňování tvorby KO při řešení vesmírné mise, těmi jsou:

- omezování vypuštěného odpadu během běžného provozu satelitu
- minimalizace potenciálního rozpadu na orbitě
- odstranění satelitu po skončení mise
- prevence kolize na orbitě

Povšimněte si, že tyto body se skoro přesně shodují s aspekty konceptu SEM.

### 5.1 Zmírnění tvorby kosmického odpadu

V této kapitole jsou víc popsány způsoby zmírnění populace KO vycházejících z hledisek IADC.

#### 5.1.1 Omezování vypuštěného odpadu

Podle [27] se má při konstrukci satelitu zajistit to, aby se během běžného provozu satelitu nic neuvolnilo. Pokud tam jistá pravděpodobnost uvolnění musí zůstat, má být pravděpodobnost alespoň minimální.

#### 5.1.2 Minimalizace potenciálního rozpadu na orbitě

Mělo by se předejít několika možným typům rozpadu satelitu, mezi ty se řadí rozpad během mise, rozpad po ukončení mise a úmyslná destrukce [27].

Už při konstrukci satelitu se má zajistit to, že tam nebude možná závada, která by mohla vést k explozi. Pokud přeci jen taková možná závada musí zůstat, pravděpodobnost exploze musí být do  $1 \cdot 10^{-3} \%$ .

Po ukončení mise je nutné vyřešit všechny zbylé zdroje energie v satelitu. Ať už je to ve formě baterií, zbytků pohonných hmot, vysokotlakých nádob, sebedestruktivních zařízení, setrvačnicků nebo reakčních kol. Samotný proces odstraňování nahromaděné

energie při ukončení mise satelitu se nazývá pasivace.

Pokud se neaktivní satelit dostane na takovou orbitu, pro kterou není stvořen, může se přehřát. Stejně tak lze dojít k přehřátí při příliš dlouhém vystavení jedné strany satelitu Slunci. V takovém případě dochází k riziku exploze kvůli zbylým pohonným hmotám a bateriím. Pokud dojde ke zvýšení teploty v nádržích s pohonnou hmotou, dojde k rozdělení paliva na jednotlivé chemické složky, což může vést ke zvýšení tlaku v nádrži. Při příliš velkém tlaku v nádrži může dojít k explozi. Pasivace se provádí vypouštěním zbylého paliva skrz ventily [71].

U baterií to funguje obdobně, kvůli přehřátí také mohou explodovat. Proto se v rámci pasivace odpojují a nechají se vybit [72] [22].

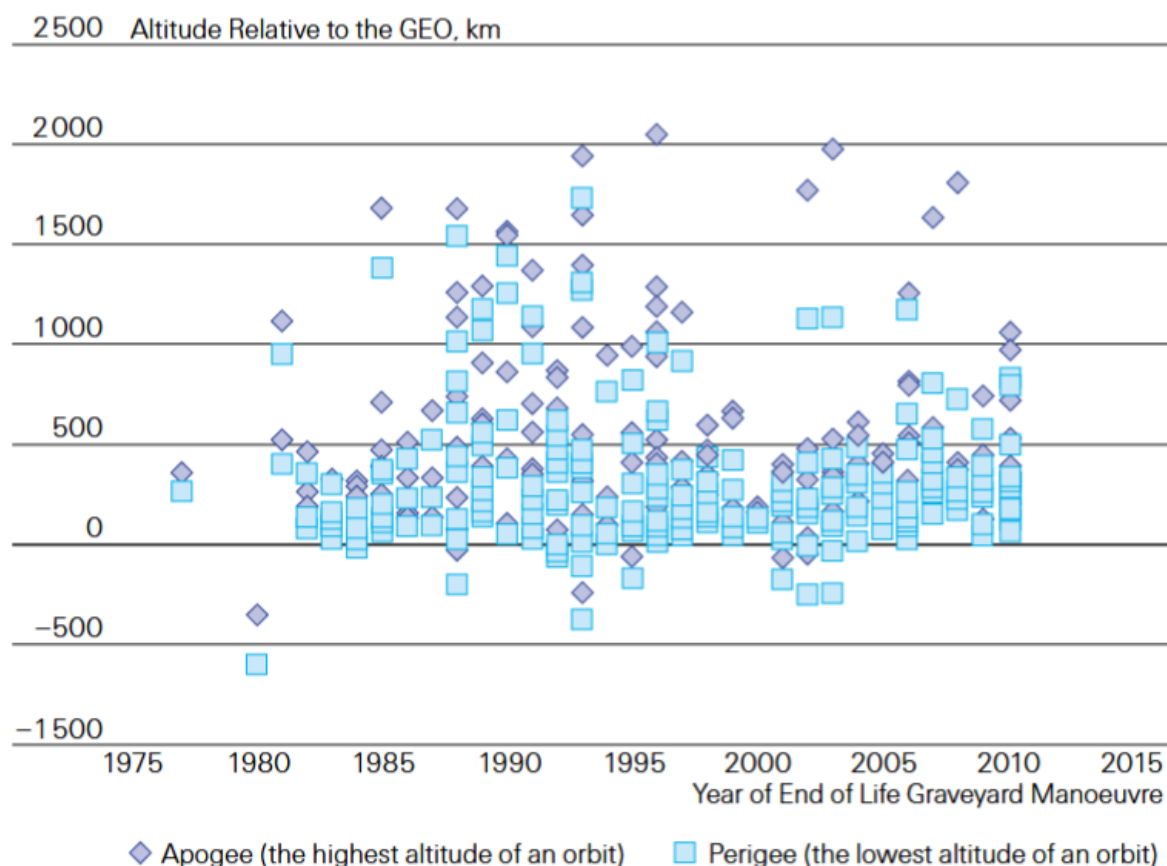
### 5.1.3 Odstranění satelitu po skončení mise

V chráněných oblastech existují způsoby, jak pracovat s vysloužilými satelity. Pro satelity z  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$  existuje hřbitovní dráha (Graveyard orbit), ta se nachází minimálně 235 km nad  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$ , tedy nad 35 786 km nad zemským povrchem. Minimálně 235 km je to proto, protože se k hodnotě 235 km přičítá součin konstanty tlaku slunečního záření  $C_R$ , poměr plochy a hmotnosti satelitu  $\frac{A}{m}$  a hodnota 1 000, viz rovnice 5.1.

$$h_{min} = 235 + \left( 1\,000 \cdot C_R \cdot \frac{A}{m} \right) \quad (5.1)$$

Hodnota  $h_{min}$  vyjadřuje o kolik km minimálně se má satelit při konci své mise přesunout nad  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$  [27]. Od roku 1977, kdy byl 1. satelit přesunut na hřbitovní orbitu, se na hřbitovní orbitu přesunulo skoro 300 satelitů [66]. Ačkoliv to momentálně problém řeší, vytváří to řešení pouze dočasné, ne trvalé. Satelity se totiž především kvůli tlaku slunečního záření neustále posouvají blíže zemskému povrchu, a tudíž blíže  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$  [66]. Počítá se s tím, že na hřbitovní orbitě satelity vydrží alespoň 100 let. Jak se nacházejí satelity na hřbitovní orbitě zobrazuje Obrázek 5.1. Z Kapitoly 3.2 připomínáme Obrázek 3.8, který zobrazuje snahu a úspěšnost odklizení satelitů na konci své mise na  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$ . Z něho vyplývá, že snaha v posledních letech byla velká, průměrně se za posledních třeba 10 let cca 85 % operátorů satelitů rozhodlo pokusit se o deorbitaci. Satelity na LEO řeší konec své životnosti jinak než satelity na  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$ . Zatímco u satelitů na  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$  je reorbitace, satelity na LEO deorbitují. Kvůli odporu vzduchu, tlaku slunečního záření a měsíční a sluneční perturbaci (gravitační vliv na objekt od Měsíce či Slunce) se neustále satelitům snižuje výška nad povrchem Země [73]. Velikost odporu vzduchu a tlaku slunečního záření souvisí s plochou objektu, což má za následek to, že například ISS musí často zvyšovat svou výšku nad Zemí (každých 3-6 týdnů [74] [75]), zatímco jiné satelity, s menší plochou, zvyšují svou výšku jen čtyřikrát do roka. Pokud je Slunce ve slunečním maximu, můžou satelity zvyšovat svou výšku nad Zemí každé 2-3 týdny [76]. Při slunečním maximu, tedy při zvýšené sluneční aktivitě, totiž expanduje zemská atmosféra a satelity se tak potýkají s náhlým větším odporem vzduchu [77]. Tohle neustálé snižování výšky satelitů má ovšem výhodu v tom, že je jisté, že každý objekt na LEO (i  $\text{GEO}_{\text{IADC}}$ ) jednou dopadne na Zem, nebo shoří v at-

## 5.1. ZMÍRNĚNÍ TVORBY KOSMICKÉHO ODPADU



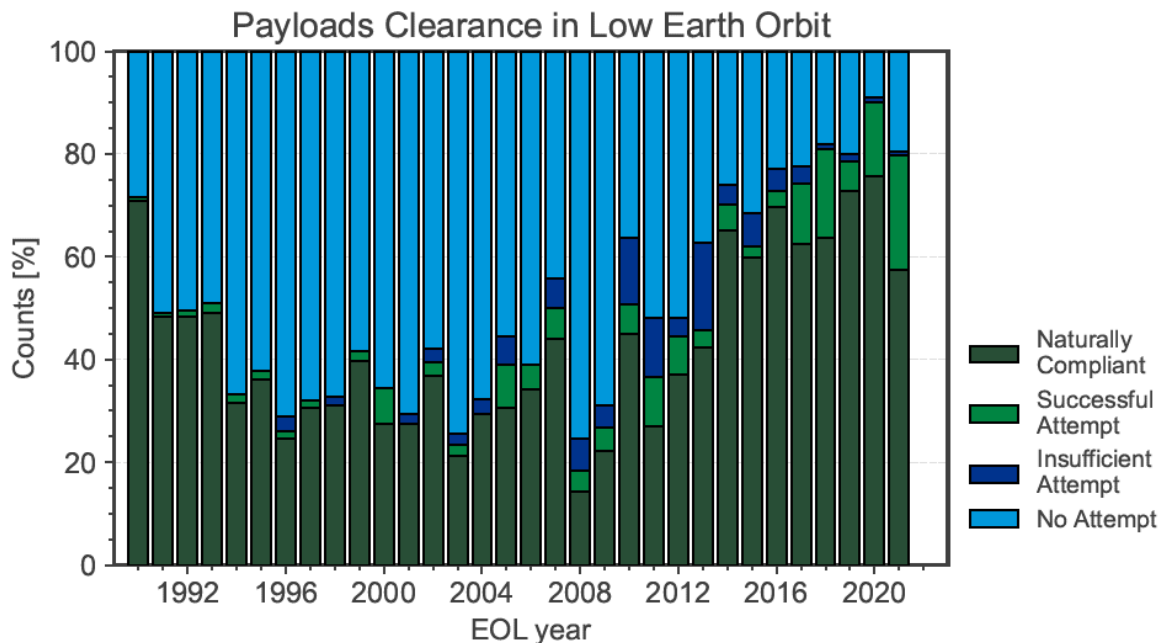
Obrázek 5.1: Apogea a perigea jednotlivých nových satelitů na hřbitovní orbitě v průběhu let. Průměrná výška nad  $GEO_{IADC}$  je 200 km. Graf je z roku 2011 [7].

mosféře. Tento přirozený zánik objektů je jedním ze způsobů deorbitace satelitů na LEO. Dalším způsobem deorbitace je řízený pád do zemské atmosféry, kdy satelit buď shoří v atmosféře, nebo se případně trosky navedou do neobydlené oblasti. Nejpoužívanějším místem je tzv. Pacifický pól nedostupnosti, což je nejdlehlší místo v oceánu. Nejbližší pevnina je 2 700 km daleko a tento bod se nachází v Tichém oceánu. Jelikož se do tohoto místa posílají vysloužilé satelity, nazývá se vesmírným hřbitovem. Největším objektem poslaným do tohoto místa se stala v roce 2001 ruská vesmírná stanice MIR s hmotností 120 t [78].

Objekt o velikosti 1 m se dostane do zemské atmosféry alespoň jednou za týden, menší objekty, ale stále katalogizované, se do zemské atmosféry dostávají v průměru 2 za den [79].

Na LEO platí pravidlo, že pokud satelit dojde ke konci své mise, musí se do 25 let deorbitovat do Zemské atmosféry. Pravděpodobnost úspěšnosti této deorbitace má být alespoň 90 % [27]. Jak lze vidět na Obrázku 5.2, v posledních několika letech se dbá víc na snahu odstraňovat satelit po ukončení mise a podle hodnot v obrázku se to ve většině případů i daří. Největší podíl na odstraňování satelitů má přirozený zánik, čímž se myslí zároveň zánik takových objektů, které podléhají 25letému pravidlu. Když se

porovná Obrázek 5.2 s Obrázkem 3.8, tedy s reorbitací satelitů na  $GEO_{IADC}$ , jsou zde vidět rozdíly, a to především v tom, že na  $GEO_{IADC}$  je vyšší snaha odstraňovat satelity po ukončení mise.



Obrázek 5.2: Snaha o odklizení satelitů na konci své mise na LEO v procentech. EOL year na vodorovné ose představuje rok, kdy došlo k zániku satelitu. Graf je z konce roku 2022 [10].

#### 5.1.4 Prevence kolize na orbitě

V rámci prevence kolize se na orbitě provádí protikolizní manévry a také se vytváří taková konstrukce satelitu, která má za cíl zmírnit následky případných kolizí. V nejlepším případě aby se při kolizi satelity vůbec nerozpadly a aby byly stále funkční.

##### Protikolizní manévry

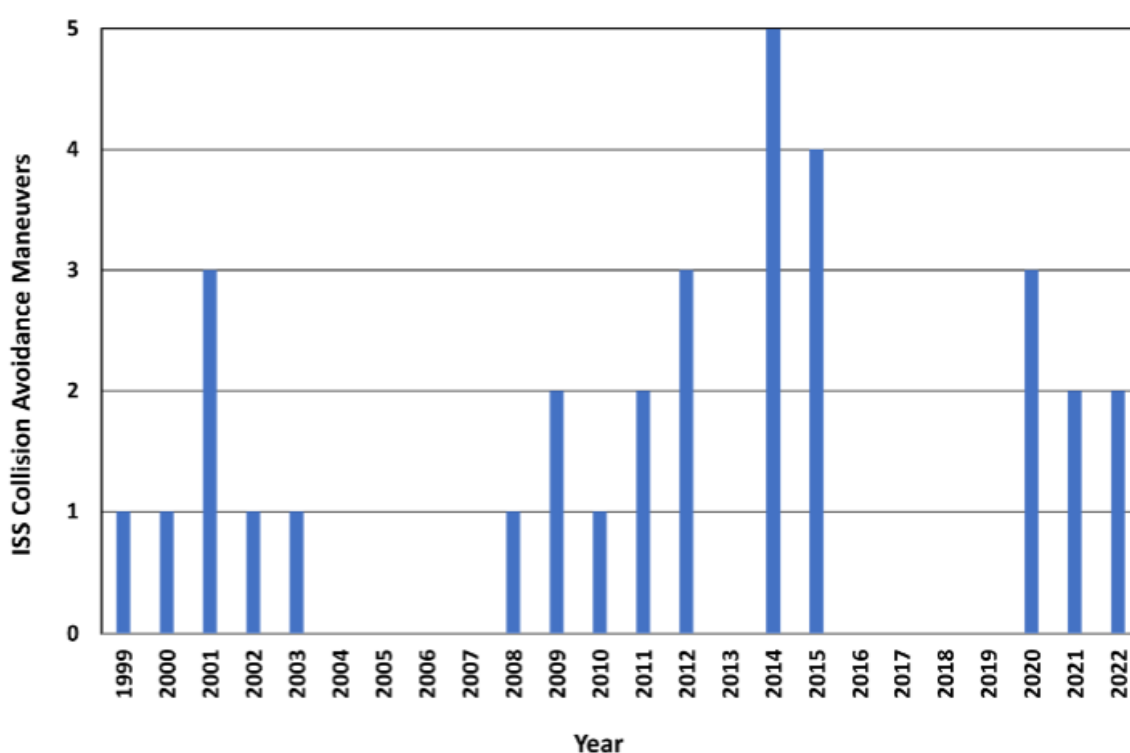
Již před samotným letem do vesmíru se musí ověřit, že při cestě na chtěnou orbitu nebude příliš velké riziko kolize od katalogizovaných objektů. Protože zjistit riziko pro každý možný čas startu je náročné, každý start má časově ohraničený úsek, časové okno, během kterého se musí provést start. Takové časové okno může být velké pár minut až pár hodin [4].

Pokud hodnota pravděpodobnosti kolize satelitu s jiným objektem ve vesmíru vzroste nad určitou hodnotu, provádí se protikolizní manévr. U objektů bez lidské posádky je taková hranice přibližně 1 z 10 000, tedy pravděpodobnost kolize 0,01 %. Může to však být i větší pravděpodobnost, a to 1 z 1 000, tedy 0,1 % [80]. Pro kosmické lodě s lidskou posádkou platí, že musí provést manévr pro vyhnutí se kolize při ještě nižší pravděpo-

dobnosti kolize. Pokud je pravděpodobnost větší než 1 ze 100 000, tedy 0,001 %, hovoří se o žluté hranici a dojde k protikoliznímu manévru pouze tehdy, pokud to neohrozí cíl vesmírné mise. Při pravděpodobnosti kolize 1 z 10 000, tedy 0,01 % a větším, se hovoří o červené hranici, a je nutné provést protikolizní manévr.

Podle [79] ESA provádí průměrně 12 protikolizních manévrů za rok a podle [22] operátoři satelitů dostanou stovky varování o potenciálním riziku za rok, na některých orbitách to mohou být i stovky varování za týden.

Ke konci roku 2021 ISS provedla od roku 1999 32 protikolizních manévrů, přičemž z toho 2 protikolizní manévry musely být provedeny kvůli ruskému antisatelitnímu testu z listopadu 2021, viz Obrázek 5.3.



Obrázek 5.3: Historie protikolizních manévrů ISS. Data z grafu jsou z konce roku 2022 [81].

### Zmírnění následků kolize

Pokud přeci jen dojde ke kolizi satelitu s KO, je důležité zmírnit následky. To, že kolize je vážný problém, dokládá následující Obrázek 5.4. Na něm lze vidět náraz vytvořený hliníkovým projektilem do hliníkového kvádrů. Náraz vznikl v rámci experimentu na Zemi a lze si díky němu představit, jak vážné jsou kolize ve vesmíru. Kulička na obrázku není originální projektil, originální projektil se totiž při nárazu úplně zničil [5].

Aby se zmírnily následky při kolizích, existují 2 způsoby. Za prvé se dělá to, že se

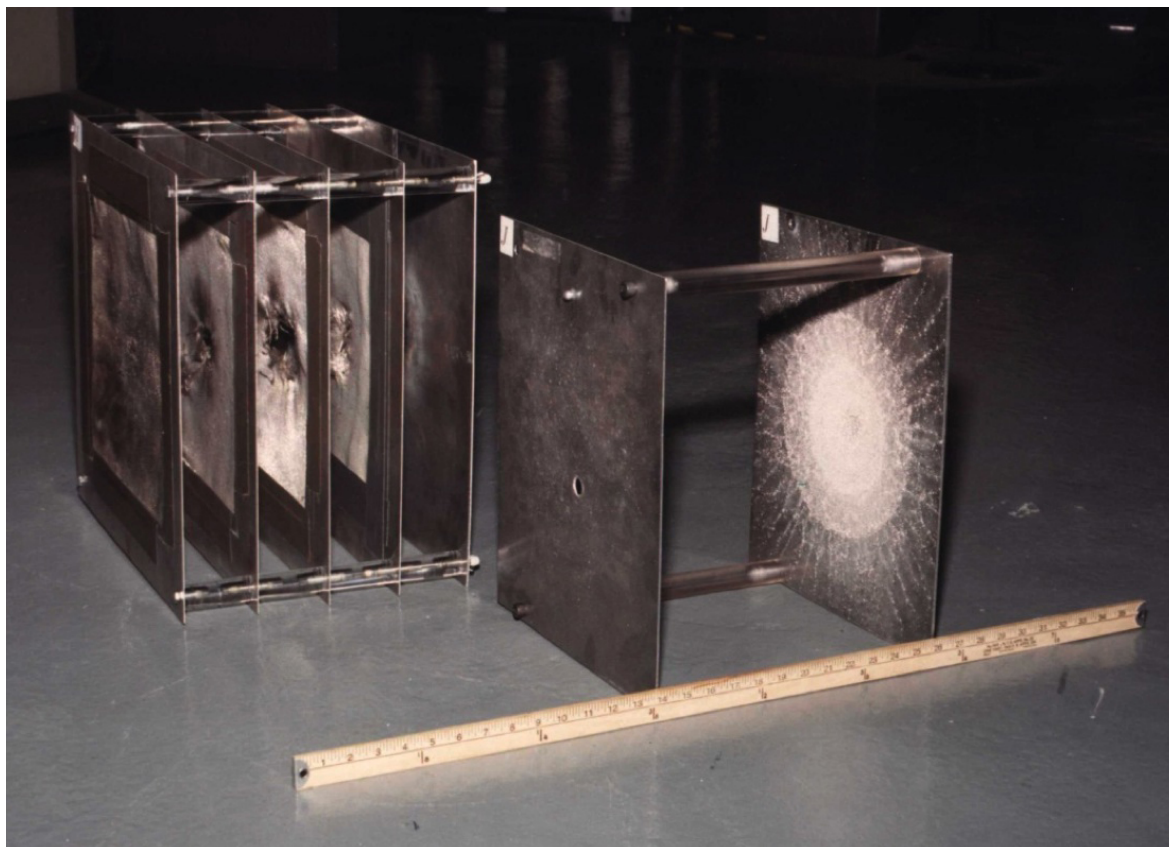


Obrázek 5.4: Náraz hliníkového projektilu o průměru 1,2 cm a rychlosti  $6,8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  do hliníkového kvádru s tloušťkou 18 cm [82] [83].

nejcitlivější zařízení (popřípadě obytné prostory pro astronauty) dávají co nejdál od nejpravděpodobnějšího místa nárazu a nejlépe se za něco uvnitř satelitu „schovají“. Také se používají redundantní systémy a izolují se tlakové nádoby [73] [66].

Dalším způsobem je uzpůsobený vnější plášť satelitu vůči nárazu KO. Velmi častým řešením je tzv. Whipple shield, což je tenká vrstva hliníku, která plní funkci nárazníku. Pokud do ní KO narazí, objekt se roztříští na několik menších kusů a energie takových fragmentů se rozprostře na větší ploše. Tím se zmenší risk samotné penetrace do satelitu. Vylepšením Whipple shield je přidání dalších vrstev mezi satelit a Whipple shield, toto řešení se nazývá stuffed Whipple shield, tedy vycpaný Whipple shield. Takové vrstvy mohou být z Kevlaru či Nextelu, dělají se již i hliníkové plástve a kovové pěny a jednotlivé vrstvy jsou od sebe přibližně 10 cm [79]. Na Obrázku 5.5 lze vidět, jak vypadá jednoduchý Whipple shield (vpravo) a jak vycpaný Whipple shield (vlevo) [6].

ISS je příkladem soustavy spojených modulů, který je na mnoha místech chráněn právě pomocí Whipple shield. Na většině místech je ISS chráněna pro nárazy objektů o velikosti až 1 cm [84].



Obrázek 5.5: Whipple shield (vpravo) a vycpaný Whipple shield (vlevo) [6].

### Velikost kosmického odpadu a jeho řešení

Na každou velikost KO se dá nějak reagovat (velikosti vycházejí z Obrázku 4.1 a Kapitoly 2.4). Pro zmírnění rizika kolize s malým KO se využívá především upravených pláštů satelitů. V případě rizika kolize velkých objektů se využívá protikolizních manévrů. Co se týče středně velkých objektů, tak jak bylo již zmíněné v Kapitole 4.2, nelze ve velké spoustě případech uplatnit ani ochranný plášť, ani protikolizní manévr.

## 5.2 Odstraňování kosmického odpadu

Způsobů aktivního odstraňování KO je mnoho, jen ještě žádný není v ostrém provozu [22]. Mezi vyvíjenými technologiemi je například použití laserů. To se může využít při odstraňování malého KO, kdy pomocí laseru se nechá část KO vypařit, případně změnit oběžná dráha KO, což nadále vede k jeho odstranění. Dalším způsobem je „vesmírný tahač“, který se připojí k velkému kusu KO a vyšle ho směrem k Zemi, kde dojde k přirozenému zániku.

Novým způsobem řešení, pocházející z České republiky, je projekt LASAR (Laser Satellite Recovery). Tento nápad pochází z České republiky a popisuje možnost, jak z nekomunikujících satelitů (kvůli softwarové chybě) udělat opět satelity komunikující. Jak už název napovídá, proces opravy spočívá ve využití laseru. Funguje to takovým způsobem, že se vyšle laserový paprsek na neaktivní satelit, přesněji řečeno na solární panely neaktivního satelitu a tím se vyvolá dočasné přetížení elektrickým proudem. Kontrolní jednotka satelitu to vyhodnotí jako potřebu k rebootu a během tohoto rebootu se do satelitu zašle aktualizace softwaru, která opraví problém v satelitu [85].

Tento laser se dá použít i k odstraňování KO. Princip fungování byl popsán výše.

Takový laser bude namontovaný na automatickém dalekohledu, který bude sloužit jako prostředek pro přesné sledování satelitu. Momentálně je tento projekt ve fázi testování, ale již teď sklízí na mezinárodní půdě úspěchy [86].



# Závěr

V rámci této práce byla zmapována problematika kosmického odpadu (nejen) vzhledem k dopravě ve vesmíru. Zkoumáno bylo především riziko vycházející z existence kosmického odpadu vůči raketovým nosičům a satelitům, které mnoha způsoby pomáhají v dopravě.

Bylo zjištěno, že dnešní technologie dokáží pravidelně sledovat a katalogizovat méně než 1 % všech kusů kosmického odpadu. Většina takových objektů se navíc nachází v jedné oblasti, tou je nízká oběžná dráha (LEO). Nejen z pohledu prostorové hustoty se jedná o nejplnější oblast kosmickým odpadem v blízkém vesmíru. Také na geostacionární dráze (GEO) se nachází velké množství odpadu, respektive objektů obecně.

Bylo také zjištěno, že především kvůli komerčnímu (a také vzrůstajícímu amatérskému) sektoru roste exponenciálně počet objektů na LEO, dominantou v posledních letech jsou satelity od společnosti Starlink. Ty k červenci 2024 tvoří přes 60 % všech aktivních satelitů ve vesmíru.

Na LEO jsou velkými přispěvateli objektů také antisatelitní testy a náhodné kolize mezi objekty. V rámci LEO je nejvíc zaplněná polární orbita, nachází se tam nejenom aktivní satelity, ale i velké množství KO.

Bylo identifikováno, že největším rizikem při kolizi tvoří takové objekty, které jsou příliš malé pro detekci, ale zároveň příliš velké na to, abych jejich impakt zbrzdil plášť satelitu. Takové objekty mají velikost od 1 cm do 10 cm na LEO a od 10 cm do 1 m na GEO. Významné riziko tvoří také kolize s velkými objekty (od 10 cm na LEO a od 1 m na GEO). Významné riziko spočívá v katastrofálních následcích při potenciální srážce.

Je také dobré zmínit, že na GEO se daří deorbitovat vysloužilé satelity na hřbitovní orbitu a nechávat tak GEO co nejvíc volnou.

Vzhledem k historickým katastrofickým událostem by se do budoucna za každou cenu mělo zamezit antisatelitním testům, kolizím mezi katalogizovanými objekty a jiným typům fragmentace, které vedou ke katastrofickým scénářům.

Dle autorky se zdá, že ke Kesslerovu syndromu již pomalu začalo docházet a tak by se mělo dělat vše pro to, aby takový vývoj byl co nejvíc potlačen.

# Seznam použité literatury

- [1] Paul D. Maley. History of space and launch debris recoveries. <https://pauldmaley.com/sd1/>, Jun 2024. Citováno 2024-07-17.
- [2] FutureTimeline.net. Launch costs to low earth orbit, 1980-2100). <https://futuretimeline.net/data-trends/6.htm>, Sep 2018. Citováno 2024-07-26.
- [3] Herbert J. Kramer. Orbital debris. <https://www.eoportal.org/other-space-activities/orbital-debris>, Apr 2017. Citováno 2024-07-03.
- [4] The Aerospace Corporation. Understanding space debris: Causes, mitigations, and issues. <https://aerospace.org/sites/default/files/2019-04/Crosslink%20Fall%202015%20V16N1%20.pdf>, 2015. Citováno 2024-07-24.
- [5] Australian Space Academy. A guide to orbital space debris. <https://www.spaceacademy.net.au/watch/debris/gsd/gsd.htm>, 2010. Citováno 2024-07-17.
- [6] National Aeronautics and Space Administration. Orbital debris management and risk mitigation. [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/12/692076main\\_orbital\\_debris\\_management\\_and\\_risk\\_mitigation.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/12/692076main_orbital_debris_management_and_risk_mitigation.pdf), 2012. Citováno 2024-07-14.
- [7] Philip Chrystal. Space debris: On collision course for insurers? [https://www.swissre.com/dam/jcr:b359fb24-857a-412a-ae5c-72cdf0eaa94/Publ11\\_Space+debris.pdf](https://www.swissre.com/dam/jcr:b359fb24-857a-412a-ae5c-72cdf0eaa94/Publ11_Space+debris.pdf), 2011. Citováno 2024-07-22.
- [8] the Physics Classroom. Mathematics of satellite motion. <https://www.physicsclassroom.com/class/circles/Lesson-4/Mathematics-of-Satellite-Motion>. Citováno 2024-07-06.
- [9] GPS.gov. Space segment. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>, Jul 2023. Citováno 2024-07-25.
- [10] European space agency. Esa's annual space environment report. [https://www.sdo.esoc.esa.int/environment\\_report/Space\\_Environment\\_Report\\_latest.pdf](https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf), Sep 2023. Citováno 2024-04-28.
- [11] European Space Agency. The cost of space debris. [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Debris/The\\_cost\\_of\\_space\\_debris](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/The_cost_of_space_debris), May 2020. Citováno 2024-07-25.
- [12] Anna Dubey. Karman line. <https://www.britannica.com/science/Karman-line>, Nov 2023. Citováno 2024-04-28.
- [13] European Space Agency. Types of orbits. [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Types\\_of\\_orbits](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits), Mar 2020. Citováno 2024-04-28.

- [14] Loterre.fr. Astronomy (thesaurus). <https://skosmos.loterre.fr/MDL/en/page/-LMXLGCNT-X>, Dec 2022. Citováno 2024-07-26.
- [15] Holli Riebeek. Catalog of Earth Satellite Orbits. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog>, Sep 2009. Citováno 2024-04-28.
- [16] Dušan Majer. Druhy oběžných drah. <https://kosmonautix.cz/2020/04/druhy-obeznych-drah/>, Sep 2009. Citováno 2024-04-28.
- [17] European Space Agency. Space Environment Statistics. <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics>, Dec 2023. Citováno 2024-04-28.
- [18] Tigernix.com.au. The role of satellite technology in the roading industry). <https://tigernix.com.au/blog/role-satellite-technology-roading-industry>, Nov 2022. Citováno 2024-07-26.
- [19] Dr Jaime Reed. How space technology is bringing green wins for transport). <https://www.cgi.com/uk/en-gb/blog/space/how-space-technology-is-bringing-green-wins-to-transport>, Jun 2022. Citováno 2024-07-26.
- [20] European Space Agency. The impact of space data on smart transport and logistics). <https://business.esa.int/news/impact-space-data-smart-transport-logistics>, May 2018. Citováno 2024-07-26.
- [21] European Space Agency. Space environment statistics. <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>, Jun 2024. Citováno 2024-07-03.
- [22] Luke Shadbolt. Technical study space debris. [https://www.hdi.global/globalassets/\\_local/international/newsroom/hdi\\_global\\_specialty\\_study\\_space\\_debris\\_2023\\_corpv5.pdf](https://www.hdi.global/globalassets/_local/international/newsroom/hdi_global_specialty_study_space_debris_2023_corpv5.pdf), 2023. Citováno 2024-06-01.
- [23] A. Manis, M. Matney, A. Vavrin, D. Gates, J. Seago, and P. Anz-Meador. Comparison of the nasa ordem 3.1 and esa master-8 models. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNv25i3.pdf>, Sep 2021. Citováno 2024-07-04.
- [24] A. Horstmann, A. Manis, V. Braun, M. Matney, Gates D. Vavrin A., J. Seago, P. Anz-Meador, C. Wiedemann, and S. Lemmens. Flux comparison of master-8 and ordem 3.1 modelled space debris population. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210011563/downloads/ORDEM\\_MASTER\\_ECSD\\_paper\\_Final\\_submitted%20v2.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210011563/downloads/ORDEM_MASTER_ECSD_paper_Final_submitted%20v2.pdf). Citováno 2024-07-04.
- [25] Evona. What is... a payload. <https://www.evona.com/blog/what-is-a-payload/>. Citováno 2024-05-14.
- [26] Aerospace.org. A brief history of space debris. <https://aerospace.org/article/brief-history-space-debris>, Nov 2022. Citováno 2024-07-20.

- [27] Inter agency Space Debris Coordination Committee. IADC space debris mitigation guidelines. [https://iadc-home.org/documents\\_public/file\\_down/id/5249](https://iadc-home.org/documents_public/file_down/id/5249), Jun 2021. Citováno 2024-07-20.
- [28] Jonathan McDowell. Satellite and debris population: Height distribution. <https://www.planet4589.org/space/stats/satht.html>, Jun 2024. Citováno 2024-06-23.
- [29] Petr Kulháněk. Hubbleův vesmírný dalekohled. *www.aldebaran.cz*, Nov 2008. Citováno 2024-05-07.
- [30] NASA. International Space Station. <https://www.nasa.gov/reference/international-space-station/>, May 2023. Citováno 2024-05-09.
- [31] The Planetary Society. International Space Station, preparing humans for deep space exploration. <https://www.planetary.org/space-missions/international-space-station>. Citováno 2024-05-11.
- [32] Ana Guzman. 20 breakthroughs from 20 years of science aboard the international space station. <https://www.nasa.gov/missions/station/>, Oct 2020. Citováno 2024-05-11.
- [33] Jones Andrew. China's Tiangong space station. <https://www.space.com/tiangong-space-station>, Aug 2021. Citováno 2024-05-11.
- [34] The Associated Press. China launches 3rd and final space station component. <https://web.archive.org/web/20221031225307/https://abcnews.go.com/>, Oct 2022. Citováno 2024-05-29.
- [35] Tereza Pultarová and Elizabeth Howell. Starlink satellites: Facts, tracking and impact on astronomy, May 2024. Citováno 2024-06-25.
- [36] David Daly. The basics of LEO satellite systems. <https://www.basecampconnect.com/leo-satellite-systems/>, Feb 2022. Citováno 2024-05-12.
- [37] Jonathan McDowell. Satellite and debris population: Height distribution, objects vs height. <https://planet4589.org/space/stats/satht50.html>, Jun 2024. Citováno 2024-06-25.
- [38] Jonathan McDowell. Satellite statistics: Satellite and debris population. <https://planet4589.org/space/stats/active.html>, Jun 2024. Citováno 2024-07-06.
- [39] Jason Davis. Of inclinations and azimuths. <https://www.planetary.org/articles/3450>, Apr 2012. Citováno 2024-05-26.
- [40] Jonathan McDowell. Satellite and debris population: Height-inc distribution. <https://www.planet4589.org/space/stats/sathi.html>, Jun 2024. Citováno 2024-06-23.

- [41] Shkelzen Cakaj, Michael Fischer, and Arpad Scholtz. Practical horizon plane for low earth orbiting (leo) satellite ground stations. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/istanbul/TELE-INFO/TELE-INFO-08.pdf>, 2009. Citováno 2024-06-23.
- [42] Jonathan McDowell. Enormous (‘mega’) satellite constellations. <https://planet4589.org/space/con/conlist.html>, Jan 2024. Citováno 2024-06-20.
- [43] Jonathan McDowell. space debris clouds catalog. <https://www.planet4589.org/space/debris/debriscat/maps/maps.html>, 2024. Citováno 2024-06-13.
- [44] T. S. Kelso. Chinese asat test. <https://celestrak.org/events/asat.php>, Jun 2022. Citováno 2024-06-23.
- [45] U.S. Space Command Public Affairs Office. Russian direct-ascent anti-satellite missile test creates significant, long-lasting space debris. <https://celestrak.org/events/asat.php>, Nov 2021. Citováno 2024-06-23.
- [46] T. S. Kelso. Iridium 33/cosmos 2251 collision. <https://celestrak.org/events/collision/>, Jun 2012. Citováno 2024-06-23.
- [47] Mark Matney and Tom Settecerri. Characterization of the breakup of the pegasus rocket body 1994-029b. <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc2/paper/79/SDC2-paper79.pdf>, Jun 1996. Citováno 2024-06-23.
- [48] Virgil Labrador. Satellite communication - how satellites work. <https://www.britannica.com/technology/satellite-communication/How-satellites-work>, 2019. Citováno 2024-05-31.
- [49] Union of Concerned Scientists. Ucs satellite database. <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>, May 2023. Citováno 2024-06-03.
- [50] Dušan Majer. Rozložení telekomunikačních družic na geostacionární oběžné dráze z roku 2012. <https://kosmonautix.cz/2016/07/top5-prinosy-kosmonautiky/geo-satellites/>, Jul 2016. Citováno 2024-06-03.
- [51] Brian Weeden. Dealing with galaxy 15: zombiesats and on-orbit servicing. <https://thespacereview.com/article/1634/1>, May 2010. Citováno 2024-06-15.
- [52] Robin Dickey and James Wilson. Why there should not be a norm for “minimum safe distance” between satellites. <https://warontherocks.com/2023/12/why-there-should-not-be-a-norm-for-minimum-safe-distance-between-satellites/>, Dec 2023. Citováno 2024-06-15.
- [53] Uniting Aviation. Ensuring the safety of aviation when there are uncontrolled space object reentries. <https://unitingaviation.com/news/safety/ensuring-the-safety-of-aviation-when-there-are-uncontrolled-space-object-reentries/>, Jul 2023. Citováno 2024-07-17.

- [54] Andrea Gini. Has anyone been hit by space debris? <https://www.spacesafetymagazine.com/space-debris/falling-satellite/has-anyone-been-hit-by-space-debris/>, Sep 2011. Citováno 2024-07-17.
- [55] www.solar mems.com. The kessler effect, the potential danger of the domino effect for space debris. <https://solar-mems.com/news/the-kessler-effect-the-potential-danger-of-the-domino-effect-for-space-debris/>, Feb 2022. Citováno 2024-07-13.
- [56] Donadl J. Kessler and Burton G. Cour-Palais. Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt. <https://web.archive.org/web/20100527195029/http://webpages.charter.net/dkessler/files/KesSym.html>, Jun 1978. Citováno 2024-07-17.
- [57] Jon Kelvey. Understanding the misunderstood kessler syndrome. <https://aerospacemercia.aiaa.org/features/understanding-the-misunderstood-kessler-syndrome/>, Mar 2024. Citováno 2024-07-17.
- [58] Tinelmis. Kessler syndrome – definition and detailed explanation – astronomical objects glossary. [https://sentinelmission.org/astronomical-objects-glossary/kessler-syndrome-2/?utm\\_content=cmp-true](https://sentinelmission.org/astronomical-objects-glossary/kessler-syndrome-2/?utm_content=cmp-true), Apr 2024. Citováno 2024-07-13.
- [59] Darren S. McKnight and Frank R. Di Pentino. New insights on the orbital debris collision hazard at geo. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576512004869>, 2013. Citováno 2024-07-18.
- [60] D.L. Oltrogge, S. Alfano, A. Law, C. Cacioni, and T.S. Kelso. A comprehensive assessment of collision likelihood in geosynchronous earth orbit. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517315011?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=8a41e2eaed0e2788](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517315011?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8a41e2eaed0e2788), 2018. Citováno 2024-07-15.
- [61] Jonas Radtke, Christopher Kebschull, and Enrico Stoll. Interactions of the space debris environment with mega constellations —using the example of the oneweb constellation. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009457651630515X?ref=cra\\_js\\_challenge&fr=RR-1](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009457651630515X?ref=cra_js_challenge&fr=RR-1), 2017. Citováno 2024-07-18.
- [62] Mohamed Torky, Aboul Ella Hassanein, Ahmed H. El Fiky, and Yazeed Alsbou. Analyzing space debris flux and predicting satellites collision probability in leo orbits based on petri nets. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8736224>, 2019. Citováno 2024-07-18.
- [63] Kenny Andersson. Risk assessment for space debris collisions. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1807713/FULLTEXT01.pdf>, Jun 2023. Citováno 2024-07-14.

- [64] National Aeronautics and Space Administration. Process for limiting orbital debris. [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/01/process\\_for\\_limiting\\_orbital\\_debris.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/01/process_for_limiting_orbital_debris.pdf), 2021. Citováno 2024-07-18.
- [65] Agnieszka Sienkiewicz. Project risk assessment: an example with a risk matrix template. <https://bigpicture.one/blog/project-risk-assessment-examples/>, Jun 2022. Citováno 2024-07-18.
- [66] National Academy of Sciences. Limiting future collision risk to spacecraft: An assessment of nasa's meteoroid and orbital debris programs, 2011. Citováno 2024-07-14.
- [67] S. Frey and S. Lemmens. Status of the space environment: Current level of adherence to the space debris mitigation policy. <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/483/SDC7-paper483.pdf>, 2017. Citováno 2024-07-15.
- [68] R. Buchs. *Collision risk from space debris: Current status, challenges and response strategies*. International Risk Governance Center (IRGC), Lausanne, 2021.
- [69] Duncan Steel. Dependence of the orbital debris collision hazard upon inclination for low-earth orbit satellites. [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/12/692076main\\_orbital\\_debris\\_management\\_and\\_risk\\_mitigation.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/12/692076main_orbital_debris_management_and_risk_mitigation.pdf), 2015. Citováno 2024-07-16.
- [70] Darren Dr. McKnight and Timothy Dr. Maclay. Space environment management: A common sense framework for controlling orbital debris risk. <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Orbital-Debris/McKnight.pdf>, 2019. Citováno 2024-07-20.
- [71] Jessica. Get your satellite to sleep safely II. <https://blogs.esa.int/cleanspace/2016/11/04/get-your-satellite-to-sleep-safely-ii/>, Nov 2016. Citováno 2024-07-22.
- [72] François Bausier. Spacecraft electrical passivation overview. [https://indico.esa.int/event/181/contributions/1463/attachments/1381/1606/Spacecraft\\_electrical\\_passivation\\_-\\_Overview.pdf](https://indico.esa.int/event/181/contributions/1463/attachments/1381/1606/Spacecraft_electrical_passivation_-_Overview.pdf), Oct 2017. Citováno 2024-07-22.
- [73] European Space Agency. *Update of the ESA Space Debris Mitigation Handbook*. Jul 2002.
- [74] Jim R. Space station | orbit reboots. <https://jarphys.wordpress.com/2014/06/14/space-station-orbit-reboots/>, Jun 2014. Citováno 2024-07-23.
- [75] Chris Peat. Height of the iss. <https://www.heavens-above.com/IssHeight.aspx>, 2024. Citováno 2024-07-23.
- [76] Space Weather Prediction Center. Satellite drag. <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/satellite-drag>. Citováno 2024-07-23.

- [77] Habimana Sylvestre. Space debris: Reasons, types, impacts and management. [https://www.researchgate.net/publication/324161123\\_Space\\_debris\\_Reasons\\_types\\_impacts\\_and\\_management](https://www.researchgate.net/publication/324161123_Space_debris_Reasons_types_impacts_and_management), Mar 2017. Citováno 2024-07-23.
- [78] phys.org. Earth's watery graveyard for spacecraft. <https://phys.org/news/2018-03-nemo-earth-watery-graveyard-spacecraft.html>, Mar 2018. Citováno 2024-06-04.
- [79] European Space Agency. Space debris: The esa approach. [https://download.esa.int/esoc/downloads/BR-336\\_Space\\_Debris\\_WEB.pdf](https://download.esa.int/esoc/downloads/BR-336_Space_Debris_WEB.pdf), 2017. Citováno 2024-07-23.
- [80] European Space Agency. Esa spacecraft dodges large constellation. [https://www.esa.int/Space\\_Safety/ESA\\_spacecraft\\_dodges\\_large\\_constellation](https://www.esa.int/Space_Safety/ESA_spacecraft_dodges_large_constellation), Sep 2019. Citováno 2024-07-14.
- [81] National Aeronautics and Space Administration. Orbital debris quarterly news: International space station maneuvers to avoid another russian asat fragment. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i4.pdf>, Dec 2022. Citováno 2024-07-24.
- [82] European Space Agency. Hypervelocity impact. [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Debris/Hypervelocity\\_impacts\\_and\\_protecting\\_spacecraft](https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Hypervelocity_impacts_and_protecting_spacecraft), Apr 2013. Citováno 2024-07-24.
- [83] Peter Martinez. Space debris – an overview. [https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/space/pdfs/kankyuu\\_gaiyou\\_201212\\_04.pdf](https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/space/pdfs/kankyuu_gaiyou_201212_04.pdf), 2012. Citováno 2024-07-24.
- [84] The Aerospace Corporation. Space debris 101. <https://aerospace.org/article/space-debris-101>. Citováno 2024-07-24.
- [85] Lasar. [https://lasar.spacecarrots.cz/?page\\_id=264](https://lasar.spacecarrots.cz/?page_id=264). Citováno 2024-07-24.
- [86] Astro.cz. Čeští středoškoláci ovládli finále prestižní soutěže nasa v houstonu. <https://www.astro.cz/clanky/multimedia/cesti-stredoskolaci-ovladli-finale-prestizni-souteze-nasa-v-houstonu.html>, Apr 2024. Citováno 2024-07-24.
- [87] Jonathan McDowell. Satellite constellations - orbital distribution. <https://www.planet4589.org/space/con/star/planes.html>, Jun 2024. Citováno 2024-06-27.



# Seznam obrázků

1.1	Zobrazení toho, jakou velikost má většinou jaký typ KO [7]. . . . .	4
1.2	Vybrané orbity kolem Země v měřítku včetně detailního pohledu na LEO oblast, zdroj autor. . . . .	8
2.1	Přepočítaný počet objektů penetrující oblast $GEO_{IADC}$ v kusech v jednotlivých rocích. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10]. . . . .	13
2.2	Časový vývoj počtu kusů KO na všech orbitách a jejich typ. Data se vztahují k 18.06.2024 [21]. . . . .	15
2.3	Časový vývoj hmotnosti KO na všech orbitách a jejich typ v tunách. Data se vztahují k 18.06.2024 [21]. . . . .	15
3.1	Rozložení objektů na LEO, MEO a GEO, tedy od 0 do 100 000 km nad zemským povrchem v kusech. Data jsou z 19.06.2024 [28]. . . . .	16
3.2	Rozložení objektů na LEO orbitách v závislosti na výšce nad Zemí v rozlišení 50 km v kusech. Data se vztahují k 19.06.2024 [37]. . . . .	18
3.3	Rozložení funkčního PL na LEO orbitách v závislosti na výšce nad Zemí v rozlišení 100 km. Data v grafu jsou ke konci roku 2022 [10]. . . . .	19
3.4	Rozložení objektů v LEO regionu v závislosti na perigeu a na inklinaci orbity v počtech kusů. Data v grafu jsou ke konci roku 2022 [10]. . . . .	20
3.5	Rozložení katalogizovaných objektů a jejich typ/původ. Data v grafu jsou k 19.06.2024 [40]. . . . .	21
3.6	Rozložení všech objektů v detailu u polární dráhy. Data v grafu jsou k 19.06.2024 [40]. . . . .	22
3.7	Rozložení všech KO clouds na LEO regionu v závislosti na výšce nad Zemí a na inklinaci orbity. Jednotlivé obdélníky znázorňují oblast, kde se fragmenty vyskytují. Každý obdélník má svůj název, v grafu jsou použité jejich zkratky. Za povšimnutí stojí to, jak jsou všechny obdélníky úzké, a to vždy v intervalu inklinace. Data v grafu jsou k roku 2022 [43]. . . . .	23
3.8	Snaha o odklizení satelitů na konci své mise na $GEO_{IADC}$ v procentech. Data v grafu jsou ke konci roku 2022 [10]. . . . .	25
3.9	Rozložení aktivních komerčních komunikačních satelitů na geosynchronní orbitě. Data použité v obrázku jsou k 30.06.2012 [50]. . . . .	26
3.10	Rozložení katalogizovaných objektů na geostacionární orbitě. Data použité v obrázku jsou k 19.06.2024 [40]. . . . .	27
4.1	Závislost pravděpodobnosti a následku kolize na velikosti objektů. Graf zároveň zobrazuje riziko v závislosti na velikosti KO. [66]. . . . .	30
4.2	Odhad roční pravděpodobnosti kolize na jednotlivých výškách nad Zemí na LEO v rozlišení 25 km. Graf také zobrazuje typ srážky (aktivní satelit s aktivním satelitem, aktivní s neaktivním satelitem, KO). Data jsou z roku 2019 [68]. . . . .	32

---

SEZNAM OBRÁZKŮ

---

5.1	Apogea a perigea jednotlivých nových satelitů na hřbitovní orbitě v průběhu let. Průměrná výška nad $GEO_{IADC}$ je 200 km. Graf je z roku 2011 [7]. . . . .	35
5.2	Snaha o odklizení satelitů na konci své mise na LEO v procentech. EOL year na vodorovné ose představuje rok, kdy došlo k zániku satelitu. Graf je z konce roku 2022 [10]. . . . .	36
5.3	Historie protikolizních manévru ISS. Data z grafu jsou z konce roku 2022 [81]. . . . .	37
5.4	Náraz hliníkového projektilu o průměru 1,2 cm a rychlosti $6,8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ do hliníkového kvádru s tloušťkou 18 cm [82] [83]. . . . .	38
5.5	Whipple shield (vpravo) a vycpaný Whipple shield (vlevo) [6]. . . . .	39
A.1	Rozložení satelitů Starlink na orbitě s perigeem 547 km a inklinací $54^\circ$ k 27.06.2024 [87]. . . . .	53

# Seznam tabulek

1.1	Zobrazení kinetické energie kolizí s různě velkými objekty ve chvíli, kdy má kolize relativní rychlost $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ [4]. . . . .	6
2.1	Počet objektů na jednotlivých orbitách v kusech. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10]. . . . .	10
2.2	Hmotnost objektů na jednotlivých orbitách v tunách. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10]. . . . .	11
2.3	Plocha objektů na jednotlivých orbitách v $\text{m}^2$ . Data se vztahují ke konci roku 2022 [10]. . . . .	11
2.4	Počet objektů v chráněných oblastech v kusech. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10]. . . . .	12
2.5	Hmotnost objektů v chráněných oblastech v tunách. Data se vztahují ke konci roku 2022 [10]. . . . .	12
2.6	Plocha objektů v chráněných oblastech v $\text{m}^2$ . Data se vztahují ke konci roku 2022 [10]. . . . .	12
2.7	Propočítané hodnoty na vybraných oblastech, zdroj autor . . . . .	14

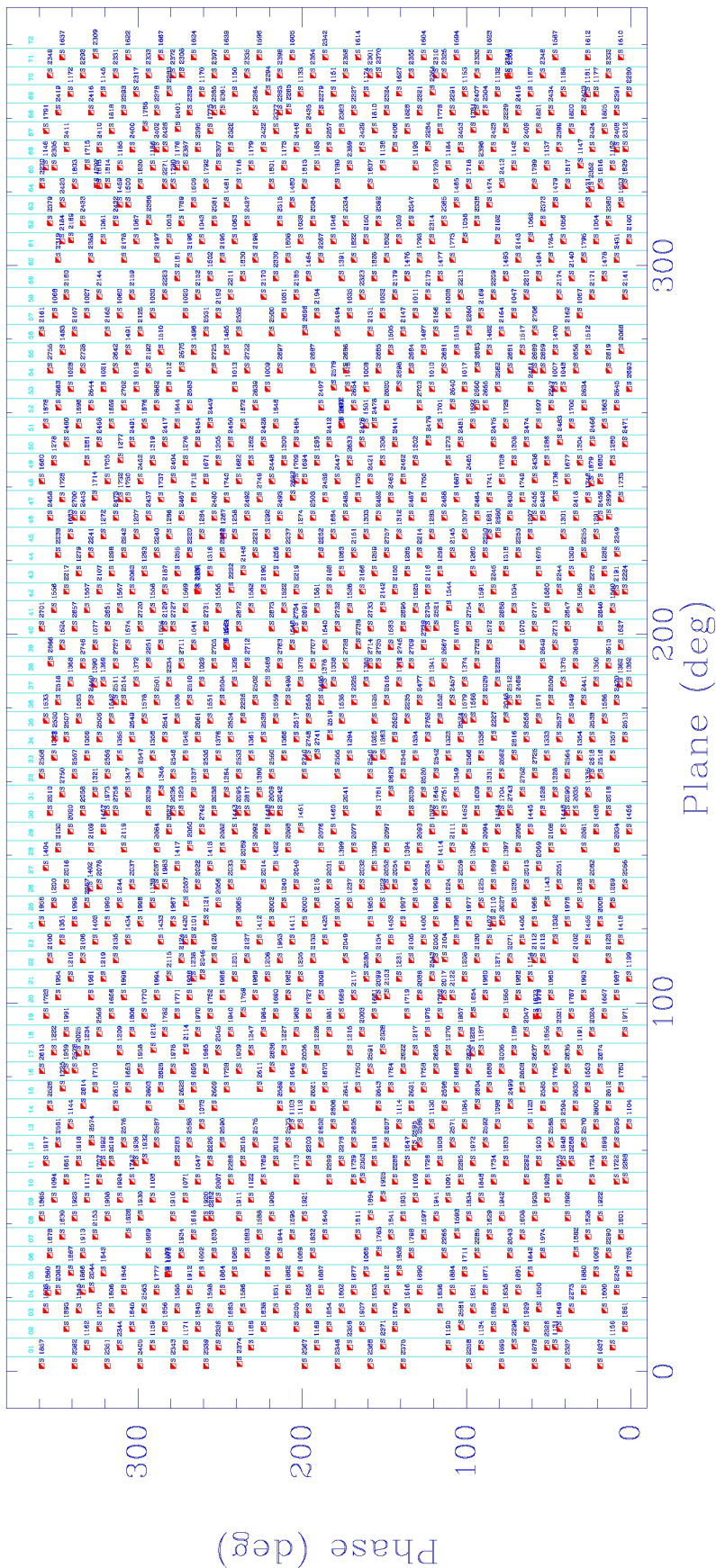
# A. Přílohy

## A.1 První příloha

# A.1. PRVNÍ PŘÍLOHA

## Starlink G1 Group 1

Planes (nominal): 72 spaced 5.0 deg  
 Planes (actual): 72 spaced 5.0 deg  
 Plane system: h = 547.0 km i = 53.00 deg



Obrázek A.1: Rozložení satelitů Starlink na orbitě s perigeem 547 km a inklinací 54° k 27.06.2024 [87].