

# Avaruusromu ja sen torjunta

LuK-tutkielma  
Turun yliopisto  
Fysiikan ja tähtitieteen laitos  
Fysiikka  
2025  
Fil. yo. Niko Heinonen  
Tarkastaja:  
Prof. Rami Vainio

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan ja tähtitieteen laitos

HEINONEN, NIKO: Avaruusromu ja sen torjunta

LuK-tutkielma, 21 s.

Fysiikka

Kesäkuu 2025

---

Avaruuden hyötykäyttö on olennainen osa nyky-yhteiskuntaa ja avaruuspohjaisten palveluiden tärkeys kasvaa vuosi vuodelta. Avaruuden hyötykäytön piiriin kuuluu muun muassa tietoliikenne, tiede, navigointi ja meteorologia. Avaruusmissioiden yhteydessä kehitetyt teknologiat ovat myös edesauttaneet lukemattomia eri aloja, kuten lääketiedettä, energiateollisuutta ja informaatioteknologiaa.

Koska avaruuden hyötykäytön asema on räjähdysmäisessä kasvussa, myös avaruusympäristön suojelun tärkeys kasvaa. Suurin uhka avaruuden hyötykäytölle on avaruusromu. Avaruusromuksi määritellään kaikki ihmisen toimesta Maan kiertoradoilla olevat hyödyttömät kappaleet. Avaruusromua on kertynyt Maan kiertoradoille jo paljon ja suunta on kasvussa. Avaruusromu uhkaa nykyisiä sekä tulevia avaruusmissioita ja johtaa pahimmassa tapauksessa avaruusmission kokonaiseen epäonnistumiseen. Todennäköisyys katastrofaalisille törmäyksille on vielä pieni, mutta jokainen Maata kiertävä avaruusalus kohtaa pieniä avaruusromuhiukkasia lähes varmasti.

Avaruusromun poistamiselle on kehitteillä monia teorioita ja tapoja, mutta yhtään romukappaletta ei vielä ole poistettu kiertoradoilta. Suurin syy tähän on, ettei avaruusromun poistaminen ole vielä taloudellisesti kannattavaa. Tästä syystä on tärkeämpi keskittyä avaruusromun synnyn ehkäisemiseen muun muassa lainsäädännön, uusien standardien ja parannellun suunnittelun avulla. Viime vuosina Maan kiertoratojen käyttö on kokenut ennennäkemätöntä kasvua, sillä se on nykYTEKNOLOGIAN ansiosta taloudellisesti kannattavaa. Satelliittien määrän kasvuun vaikuttaa avaruusjärjestelmien pienentyminen ja suurten satelliittikonstillaatioiden käyttöönotto. Mitä enemmän satelliitteja lähetetään kiertoradoille, sitä suurempi riski on katastrofaalisille törmäyksille ja uuden avaruusromun synnylle.

Tutkielmassa käydään läpi mitä avaruusromu on ja kuinka sitä syntyy. Otetaan myös esille avaruusromun haittavaikutuksia ja miten sen syntymistä voidaan ehkäistä. Käydään myös läpi monia tämän hetkisiä suunnitelmia ja tapoja avaruusromun aktiiviseen poistamiseen.

Avainsanat: Avaruusromu, Avaruusromun aktiivinen poistaminen, Kesslerin syndrooma.

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Avaruusromu</b>	<b>2</b>
1.1 Avaruusromun lähteet . . . . .	3
1.1.1 Sirpaloitumisen seurauksena syntyvät kappaleet . . . . .	3
1.1.2 Avaruusaluksien rappeutuminen ja anomaaliset kappaleet . . . . .	4
1.1.3 Avaruusalusten ja -rakettien tominassa syntyvät partikkelit . . . . .	4
1.1.4 Avaruusmissioihin liittyvät kappaleet . . . . .	5
<b>2 Avaruusromun haittavaikutukset</b>	<b>5</b>
<b>3 Avaruusromun syntymisen ehkäisy</b>	<b>7</b>
<b>4 Avaruusromun aktiivinen poistaminen</b>	<b>9</b>
4.1 Kaappausmenetelmät . . . . .	10
4.1.1 Kaappaus lonkeroilla . . . . .	11
4.1.2 Kaappaus verkolla . . . . .	12
4.1.3 Kaappaus harppuunalla . . . . .	13
4.2 Poistomenetelmät . . . . .	13
4.2.1 Ilmanvastuksen lisäysjärjestelmä . . . . .	13
4.2.2 Sähködynaaminen ja -staattinen lieka . . . . .	14
4.2.3 Kontaktillinen poistaminen . . . . .	15
4.2.4 Kontaktiton poistaminen . . . . .	15
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>17</b>
<b>Viitteet</b>	<b>18</b>

## Johdanto

Ihmiskunta on lähettänyt materiaalia Maan kiertoradalle jo yli 60 vuotta ensimmäisen satelliitin laukaisusta nykypäivään. Satelliittien ja muiden kappaleiden avaruuteen lähettämisen yhteydessä Maan kiertoradalle on kertynyt myös muuta käyttökelvotonta materiaalia, jota kutsutaan avaruusromuksi. Avaruusromuksi lasketaan kaikki ihmisen toimien seurauksena pääasiassa Maan kiertoradalle kertynyt käyttökelvoton materiaali [4]. Avaruusromua on Maan kiertoradalla jo suuria määriä ja suunta on kasvussa, sillä avaruuden hyötykäytöstä tulee jatkuvasti tärkeämpää ja taloudellisesti kannattavampaa [1].

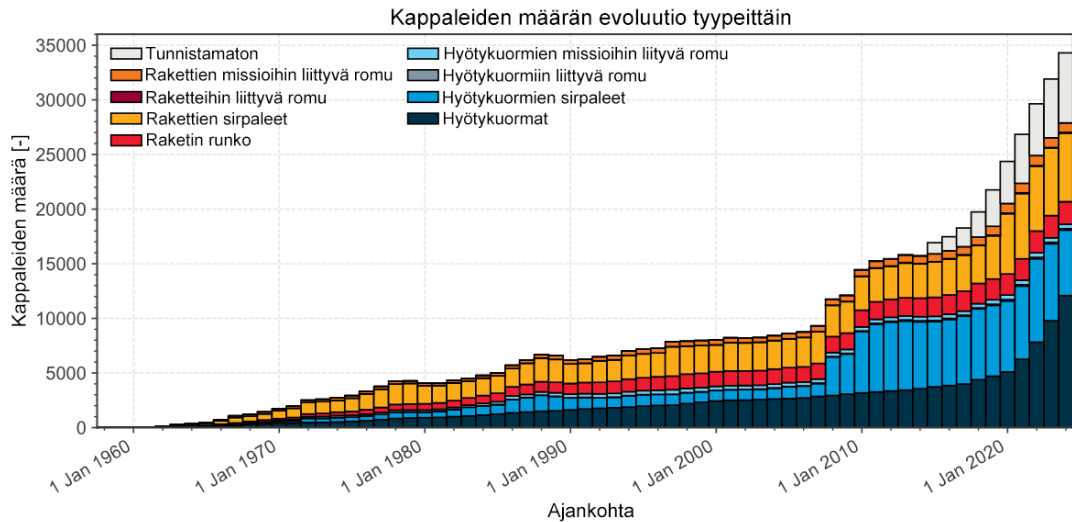
Maan kiertoradalle lähetettyjen kappaleiden kokonaisuudessa oli vuonna 2023 yli 11 500 tonnia [1]. Säännöllisesti tarkkailtuja romukappaleita on jo yli 20 000 [1]. Arvio yli 10 cm kokoisista kappaleista on noin 34 000, 1 cm - 10 cm kappaleita on noin 900 000 ja muita 1 mm ja 1 cm välillä olevia kappaleita on kiertoradalla arviolta yli 128 miljoonaa [1]. Suurin osa romukappaleista on siis pienempiä kuin 1 cm [1]. Myös pienet kappaleet ovat haitallisia varsinkin satelliittien aurinkopaneeleille ja herkille instrumenteille, sillä kappaleiden ratanopeudet ovat suuria [4].

Avaruusromun ehkäisyä ja poistamista on tutkittu jo pitkään, sillä avaruusromu on uhka satelliiteille ja ihmisille, varsinkin matalalla Maan kiertoradalla [4]. Törmäykset avaruudessa luovat lisää avaruusromua ja vuonna 1978 Donald J. Kessler kuvasi teoreettisen tilanteen, jossa matalalla Maan kiertoradalla olevien kappaleiden ja mahdollisten törmäysten määrä kasvaisi niin suureksi, että lähiavaruus olisi ihmisille ja satelliiteille käyttökelvoton. Tätä tilannetta kutsutaan Kesslerin syndroomaksi [2]. Satelliittien merkitys muun muassa nykypäivän avaruustutkimuksessa, informaatioteknologiassa ja viestinnässä on korvaamaton, joten avaruusromun hallinta on tärkeää [4] [13].

Tämä tutkielma käsittelee avaruusromun vaikutusta nykypäivän ja tulevaisuuden avaruustoimintaan sekä tapoja, joilla uuden avaruusromun syntymistä välletään. Tutkielmassa tutustutaan avaruusromuun ja sen lähteisiin. Käsittelemme myös erilaisia tapoja avaruusromun poistamiseen Maan kiertoradalta ja siihen liittyviä haasteita.

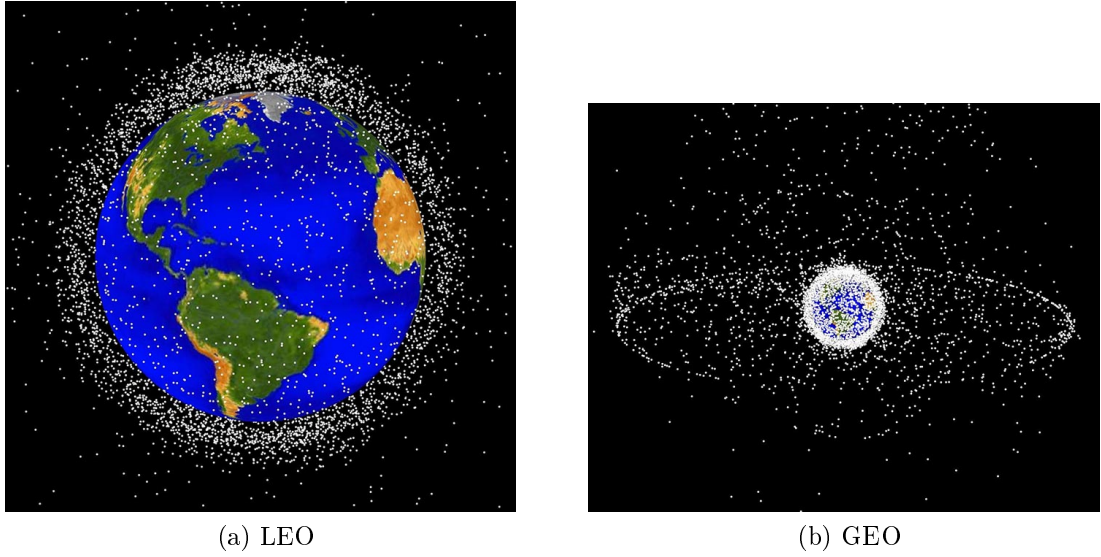
# 1 Avaruusromu

Kiertoradalla olevan avaruusromun määrä on kasvava ongelma käytössä oleville ja tuleville satelliiteille. Ongelma on suurin varsinkin käytetyimmillä kiertoradoilla, kuten matalalla Maan kiertoradalla eli LEO:lla (Low Earth Orbit) ja geosynkronisella kiertoradalla eli GEO:lla (Geosynchronous Earth Orbit). LEO ylettyy 2000 km korkeuteen Maan pinnasta. Suurin osa avaruusromusta, sekä aktiivisista satelliiteista sijoittuu tälle alueelle [1]. GEO on noin 35786 km korkeudella Maan pinnasta ja tällä kiertoradalla olevien satelliittien ja kappaleiden kiertoaika on sama kuin Maan pyörimisaika, joten ne pysyvät Maan pinnan suhteen lähes paikoillaan. GEO:lla olevat kappaleet näyttävät päivän aikana kulkevan taivaalla edestakaisin pohjois-eteläsuunnassa riippuen niiden inkliinaatiosta. Kappaleet kuitenkin palaavat aina samaan paikkaan samaan aikaan. Geostationaarinen kiertorata on ympyrän muotoisen geosynkronisen kiertoradan erikoistapaus, jonka inkliinaatio on  $0^\circ$  [4]. Geostationarisella kiertoradalla olevat satelliitit pysyvät Maan pinnan suhteen täysin paikoillaan. Myös geostationarisesta radasta käytetään usein lyhennettä GEO.



Kuva 1: GEO:lla ja LEO:lla olevien kappaleiden määrän kehittyminen ajan funktiona tyypeittäin [1].

Kyseisillä kiertoradoilla on nykypäivänä kuvan 1 mukaisesti yli 33 000 kappaletta, joita seurataan ja luetteloidaan aktiivisesti. Suurin osa kiertoradalla olevista kappaleista on avaruusromua. Seurannassa olevat kappaleet ovat yli 10 cm kokoisia johtuen sitä pienempien kappaleiden havaitsemisen vaikeudesta. Havaintoteknolo-



Kuva 2: Tietokoneella tuotettuja kuvia LEO:lla ja GEO:lla olevista seuratuista kappaleista. (Lähde: NASA ODPO).

gian kehittyessä yhä pienempiä kappaleita voidaan luotettavasti seurata ja luetteloida. Luetteloidut kappaleet ovat muun muassa käytössä olevia avaruusaluksia, käytöstä poistettuja tai hajonneita avaruusaluksia ja kantorakettien runko-osia [1]. Osa avaruusromusta on syntynyt tarkoituksellisesti ja osa kulumisen sekä tahattomien törmäysten ja räjähdysten seurauksena [4] [1].

Avaruudessa olevat kappaleet voidaan jakaa kahteen luokkaan: kappaleet joiden alkuperä tunnetaan ja voidaan liittää johonkin tiettyyn rakettilaukaisuun sekä kappaleet joiden alkuperää tai ominaisuuksia ei tunneta [1]. Osassa 1.1 tarkastellaan tarkemmin avaruusromun lähteitä. Kuvassa 2 on esitetty matalalla Maan kiertoradalla (a) ja geosynkronisella kiertoradalla (b) olevia kappaleita, joita seurataan parhaillaan. Kuvista nähdään, että suurin osa kappaleista ja samalla avaruusromusta sijoittuu matalalle Maan kiertoradalle.

## 1.1 Avaruusromun lähteet

### 1.1.1 Sirpaloitumisen seurauksena syntyvät kappaleet

Kiertoradoilla olevien kappaleiden sirpaloituminen voi johtua tarkoituksellista tai tahattomista räjähdyksistä ja törmäyksistä. Sirpaloituminen voi myös johtua aerodynaamisten voimien seurauksena kappaleiden palatessa ilmakehään. Kappaleiden hajoaminen ilmakehään paluun yhteydessä on tavallista, mutta syntyvä romu on

harvoin pitkäikäistä. Tahattomat törmäykset ovat harvinaisia, mutta kiertoradoille lähetettävien kappaleiden määrän kasvaessa myös todennäköisyyden törmäyksille oletetaan kasvavan [4]. Törmäyksiin liittyy kaksi suurta tapahtumaa, joiden aiheuttama avaruusromu nähdään kuvassa 1 hyppäyksinä vuosina 2007 ja 2009.

Vuonna 2007 satelliittiin Fengyun-1C törmäsi tahallisesti ballistinen kappale tuottaen yhden suurimmista romupilvistä avaruushistoriassa. Törmäyksessä syntyi yli 2200 tunnistettavaa romukappaletta, joista suurimman osan oletetaan olevan pitkäikäisillä kiertoradoilla [4]. Vuonna 2009 tietoliikennesatelliitit Iridium 33 ja Cosmos 2251 törmäsivät toisiinsa tahattomasti [5]. Törmäys oli ensimmäinen kahden satelliitin välinen ja törmäyksessä syntyi yli 1800 tunnistettavaa romukappaletta ja myös monia alle 10 cm kokoisia kappaleita pystyttiin havaitsemaan [5].

### 1.1.2 Avaruusaluksien rappeutuminen ja anomaaliset kappaleet

Anomaaliseksi kappaleiksi kutsutaan avaruusaluksien rappeutuessa syntyvää romua. Anomaalinen tapahtuma on osan tai palasen tahaton erkaantuminen avaruusaluksista usein hitaalla nopeudella [4]. Avaruusaluksien rappeutuminen johtuu siitä, että ne viettävät monia vuosia avaruuden haastavissa olosuhteissa. Pieniä alle millimetrin kokoisia partikkeleita syntyy esimerkiksi avaruusaluksien maalipinnan ja aurinkopaneelien rappeutuessa [1] [4]. Myös avaruusraketin vaiheiden ja avaruusaluksen erkaantuessa toisistaan syntyy usein anomaalista romua [4].

### 1.1.3 Avaruusaluksen ja -raketin tominassa syntyvät partikkelit

Kiinteää ajoainetta käyttävät raketinmoottorit tuottavat sivuaineena alumiinioksidipartikkeleita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Koska kantoraketin siirtoradat niiden muuttaessa kiertorataansa ovat elliptisiä, suurin osa syntyvästä alumiinioksidista palaa Maan ilmakehään nopeasti ilmanvaston ansiota. Syntyneiden partikkelien koko on kuitenkin huomattava avaruusolosuhteissa. Raketinmoottorien käytössä syntyneet 100  $\mu\text{m}$  ja sitä suuremmat partikkelit ovat huolenaihe avaruusympäristössä. Jopa 1 cm kokoisten partikkelien epäillään olevan mahdollisia Maassa tapahtuvien testien ja havaintojen perusteella. Alumiinioksidipartikkeleita syntyy suuria määriä aina, kun kiinteää ajoainetta käytetään. Syntynyt alumiinioksidi voi aiheuttaa muiden avaruusaluksen pintaeroosiota ja johtaa materiaalien kontaminaatioon. [4]

Huomattava avaruusromun lähde on myös RORSAT-sarjan satelliiteista (Radar Ocean Reconnaissance Satellite) lähtöisin oleva natrium-kalium (NaK) metalliseos [14]. RORSAT-satelliitit olivat Neuvostoliiton 1967 ja 1988 välillä lähettämiä meritiedustelusatelliitteja, jotka käyttivät energialähteenä ydinreaktoria [15]. Mission päättyessä RORSAT-satelliitit ovat poistaneet ydinreaktorin korkeammalle hautausmaarakadalle [15]. Arvion mukaan noin 16 satelliittia on poistanut ydinreaktorinsa vuoden 1980 jälkeen [14]. Ytimen poiston yhteydessä avaruuteen on päässyt ydinreaktorin jäähdytysainetta muodostaen NaK metallipisaroita kiertoradalle. Mudostuvat NaK pisarat ovat pyöreitä ja niiden maksimihalkaisija on noin 5,5 cm. Alle 1 cm kokoiset pisarat ovat jo palanneet Maan ilmakehään, mutta sitä suurempien pisaroiden oletetaan pysyvän kiertoradalla pitkään [14]. Suurten NaK pisaroiden ratakorkeus on yli 800 km ja ne ovat pyöreillä kiertoradoilla, joten niiden paluu Maahan voi kestää tuhansia vuosia [4].

Näistä esimerkeistä huomataan, miten nykypäivän kantorakettien ja avaruusaluusten suunnittelu voi vaikuttaa negatiivisesti muiden avaruusaluusten toimintaan nyt ja jopa tuhansia vuosia tulevaisuudessa.

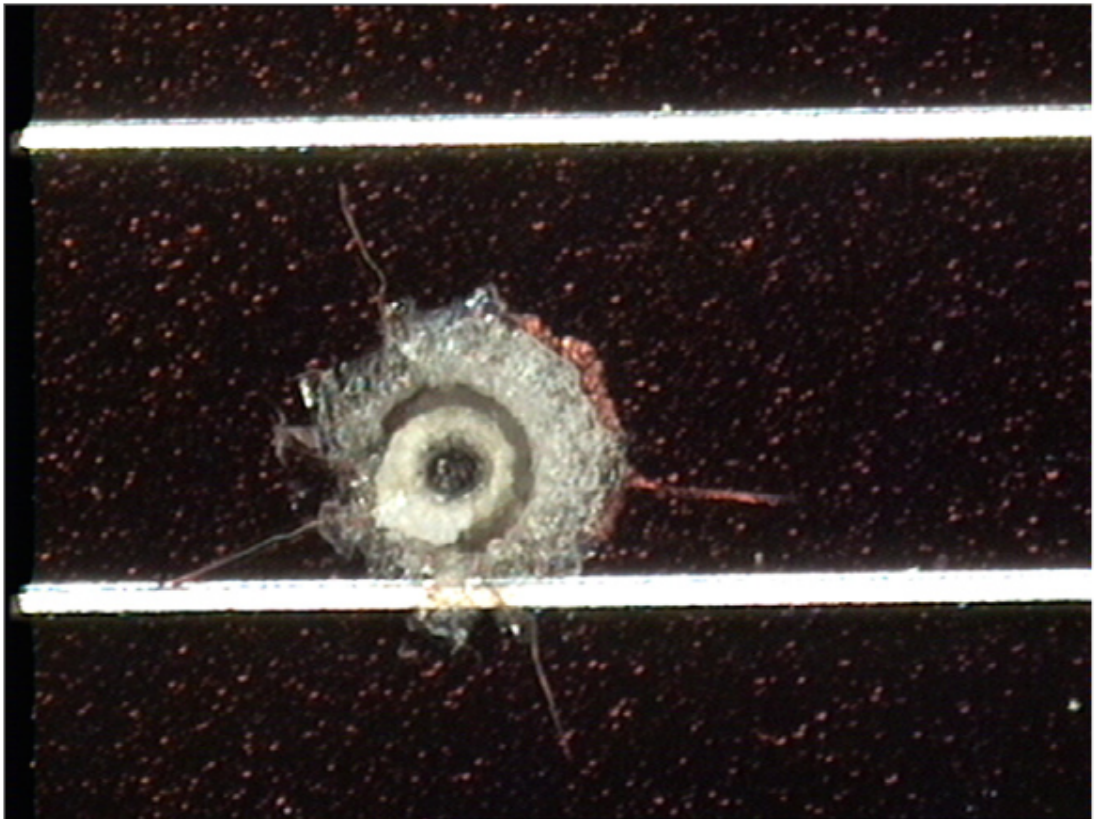
#### 1.1.4 Avaruusmissioihin liittyvät kappaleet

Avaruusmissioiden yhteydessä syntyy joitakin romukappaleita tarkoituksellisesti. Näihin kuuluu esimerkiksi rakettien moottoreita ja erilaisia hyötykuormien suoja [1]. Kappaleisiin kuuluu myös optisten instrumenttien suojakuoria ja joitakin astronauttien avaruuskävelyjen yhteydessä hukkaamia tavaroita [4]. Useimmissa avaruusmissioissa syntyy vain vähän tämän tyyppistä romua ja LEO:lla tämän tyyppiset romukappaleet palaavat usein nopeasti Maan ilmakehään [4].

## 2 Avaruusromun haittavaikutukset

Törmäysriski avaruudessa on kasvava uhka avaruusaluksille ja ihmisille. Törmäys voi tapahtua muun muassa muiden avaruusaluusten tai avaruusromun kanssa [4]. Törmäysten aiheuttama uhka johtuu pääasiassa kiertoradoilla olevien kappaleiden valtavista nopeuksista. Tyypillinen törmäysnopeus on 10 - 20 km/s [10]. Törmäys suuren romukappaleen kanssa voi aiheuttaa aktiivisen avaruusaluksen kokonaisen

tuhoutumisen, joka puolestaan tuottaa suuren määrän lisää avaruusromua [4]. Pienet romukappaleet voivat läpäistä paineistettujen avaruusalusten seiniä tai tuhota avaruusalusten alisysteemejä [10]. Törmäykset heikentävät myös aurinkopaneelien tehokkuutta avaruudessa, sillä suuren pinta-alansa ansiosta ne kokevat monia törmäyksiä. Kuvassa 3 on esimerkki pienen romukappaleen törmäyksen aiheuttamasta vahingosta Hubble-avaruusteleskoopin aurinkopaneeliin [10].



Kuva 3: Törmäyskraateri Hubble-avaruusteleskoopin aurinkopaneelissa. Kraaterin koko on noin 0,8 mm [10].

Todennäköisyys törmäykseen suurten romukappaleiden kanssa on vielä pieni, mutta pieniä romukappaleita on kiertoradoilla jo niin paljon, että ne vaikuttavat jokaiseen kiertoradoilla olevaan avaruusalukseen lähes varmasti. Monet pienet törmäykset johtavat sensoreiden ja pintamateriaalien ominaisuuksien rappeutumiseen [10]. Myös pienet törmäyksistä johtuvat reiät suojarakenteissa voivat aiheuttaa suuria haittavaikutuksia, kun reaktiivinen kaasu tai plasma pääsee avaruusaluksen sisään ja pääsee vaikuttamaan herkkiin instrumentteihin [10].

Avaruusromun määrän kasvaessa uusien avaruusmissioiden suunnittelemisesta tulee yhä hankalampaa. Mitä enemmän haitallisia kappaleita kiertoradoilla on, si-

tä suurempi riski on törmäyksille, jotka voivat johtaa avaruusmission osittaiselle tai kokonaiselle epäonnistumiselle. Myös satelliittien rakentaminen on monimutkaisempaa, kun pitää ottaa huomioon miten suojata instrumentteja törmäyksiltä ja kuinka paljon päällekkäisyyksiä systeemit vaativat, jotta toiminta voi jatkua vaurion tapahetuessa [4].

### 3 Avaruusromun syntymisen ehkäisy

Avaruusromun aktiivinen poistaminen on vaikeaa sekä taloudellisesti epäkannattavaa [3]. Tästä syystä tärkeämpää on hallita avaruusromun lisääntymistä nyt ja tulevaisuudessa. Avaruusromua on pyritty hallitsemaan varsinkin parantuneen suunnittelun, avaruuslainsäädännön ja uusien standardien avulla [11] [12].

Avaruusaluksia ja avaruusraketteja on suunniteltu niin, että avaruustoiminnassa syntyisi mahdollisimman vähän uutta avaruusromua. Esimerkiksi rakettilaukaisuja voidaan suunnitella niin, että hyötykuormien suojat ja muut uhrattavissa olevat osat, kuten rakettimoottorien alemmat vaiheet, irtaantuvat hyötykuormasta ennen, kuin niillä on tarpeeksi nopeutta päästäkseen kiertoradalle [4]. Myös uudelleen käytettävien rakettien kehitys on ollut viime vuosina nopeaa. Avaruusrakettien uudelleenkäytettävyyden edelläkävijä on ollut SpaceX Falcon 9 -raketilla. Falcon 9 on osittain uudelleenkäytettävä raketti, joka on jo suorittanut satoja onnistuneita laskeutumisia. Myös kokonaan uudelleenkäytettävän Starship -raketin kehitystyö on ollut nopeaa. Avaruusrakettien uudelleenkäytettävyyteen pyrkii jo yhä useampi avaruusyhtiö, kuten Blue Origin ja avaruusjärjestö ESA [17].

Parantuneen suunnittelun ansiosta avaruusraketit ovat luotettavampia ja niiden riski spontaaneihin räjähdyksiksiin on laskenut huomattavasti [4]. Voidaan kuitenkin huomioida, että viime vuosien aikana on nähty suuria määriä räjähdyksiä uudelleen käytettävien rakettien kehitystyön yhteydessä.

Avaruusromun syntymistä ehkäistään myös passivoinnin avulla [4]. Passivointi tarkoittaa sellaisten energiavarastojen tyhjentämistä, jotka voisivat johtaa avaruusaluksen tahattomaan hajoamiseen [12]. Passivointi suoritetaan avaruusmission päättyessä ja on tärkeää varsinkin pitkäikäisillä kiertoradoilla.

Geostationaarisella kiertoradalla oleva avaruusalus voidaan siirtää hautausmaa-

radalle, jossa se pysyy siihen asti, kunnes teknologia on tarpeeksi kehittyntä sen aktiiviseen poistamiseen tarvittaessa [1] [4]. Hautausmaarata on noin 200 km - 300 km GEO:n yläpuolella. Nykykäsityksen mukaisesti hautausmaaradan käyttö on riittävä toimenpide hyödyllisten GEO-alueiden suojelemiseksi [4].

Avaruuslainsäädännön rooli on kasvavassa asemassa niin kansainvälisesti kuin kansallisesti, kun yhä useammat maat pyrkivät avaruuden hyötykäyttöön. Suomessa on otettu vuonna 2018 käyttöön laki avaruustoiminnasta, joka sisältää useita säädöksiä. Laki ottaa myös kantaa avaruusromuun 10 §:n mukaisesti niin, että avaruustoimintaa tulee harjoittaa kestäväällä tavalla [11]. Sen mukaan avaruustoimintaa tulee harjoittaa niin, ettei siinä synny avaruusromua varsinkaan normaalin toiminnan yhteydessä. 10 §:n mukaan toiminnanharjoittajan tulee myös pienentää riskejä rikkoutumisesta ja törmäyksistä avaruudessa, sekä pyrkiä siirtämään avaruusesine toiminnan loputtua vähän käytetylle kiertoradalle tai takaisin ilmakehään [11].

Monet avaruusjärjestöt kuten ESA kehittävät ja ottavat käyttöön uusia standardeja ja teknologioita avaruusromun ehkäisemiseksi. ESA on ottanut 2023 esille suositukset avaruusromun ehkäisemiseksi dokumentin "ESA Space Debris Mitigation Requirements" mukaisesti ja pyrkii vähentämään uuden avaruusromun synnyn nollaan vuoteen 2030 mennessä [12]. Suosituksen mukaan avaruusaluksien pitäisi itsenäisesti siirtyä joko vähemmän käytetylle kiertoradalle tai takaisin ilmakehään. Avaruusaluksilla pitäisi myös olla kiinnittymiskohtia aktiivista poistamista varten, jos itsenäinen poistuminen epäonnistuu. Nykyohjeen mukaisesti satelliitin tai raketin rungon pitäisi palata matalalta Maan kiertoradalta 25 vuoden sisään. Uuden ohjeen mukaan suositellaan, että kappaleen pitäisi palata viiden vuoden sisään ja törmäysriskin muiden yli 1 cm kokoisten kappaleiden kanssa pitäisi olla alle 1 tuhannesta koko avaruusmission ajan [12].

Satelliittien suositellaan myös varautuvan yhä useampiin väistöliikkeisiin esimerkiksi parannellun automaation ja kommunikaatiojärjestelmien avulla. Sateelliittien pitäisi myös pyrkiä parempaan järjestelmän tilan seurantaan ja passivointiin, jotta voidaan välttyä sisäiseltä hajoamiselta ylijääneen polttoaineen tai varastoidun energian aiheuttamana. Avaruusmissioiden pitäisi välttää tarkoituksella tuotettua avaruusromua kaikin keinoin. Tälläisiin kuuluu muun muassa suojakuolet, linssi-suojukset ja kantoraketin nokkakartiot. [12]

ESA pyrkii myös kehittämään työkaluja ja menetelmiä riskienhallintaan välttääkseen Maahan palaavien kappaleiden haittavaikutuksia. Avaruusmissioiden yhteydessä tulisi myös huomioida, että taivaalla olevat kappaleet häiritsevät mahdollisimman vähän optista, infrapuna- ja radiotähtitiedettä. Tumman ja hiljaisen tähtitaivaan säilyttämistä uhkaa nykypäivänä suosioon nousseet suuret satelliittikonstellatit.[12]

Myös muita kiertoratoja kuin matalaa Maan kiertorataa ja geostationaarista kiertorataa, esim. kuun kiertoratoja tulisi ESA:n mukaan suojella pitkän aikavälin kestävyysvarmistamiseksi. ESA:n mukaan ohjeistuksia avaruusromun ehkäisemiseksi tulisi kehittää, jotta myös vähemmän käytetyt kiertoradat pysyisivät romuvalpaina. [12]

## 4 Avaruusromun aktiivinen poistaminen

Avaruusromun aktiivisen poistamisen ensimmäinen askel on sopivien kohteiden valinta. Ideaalimaailmassa kiertoradat pidettäisiin puhtaina kaikesta avaruusromusta, mutta todellisuudessa täytyy priorisoida ja etsiä realistisia ratkaisuja. Pääkysymys avaruusromun aktiiviselle poistamiselle onkin mahdollisesti "Minkä takia ja miten?"[9]. Aiheeseen ei vielä löydy konkreettisia vastauksia ja oleellinen osa avaruusromun aktiivisen poistamisen tutkimista on etsiä vastauksia moniin kysymyksiin kuten: "Onko tarpeellista vakauttaa avaruusympäristö?"tai "Onko asia kiireellinen vai voidaanko odottaa vuosia tai vuosikymmeniä?"[9].

Kohteiden valinta perustuu yleisesti niiden massaansa, kokoon ja todennäköisyyteen törmätä muihin kiertoradoilla oleviin kappaleisiin [9]. Jer Chyi Liou on simuloinut aktiivisen avaruusromun poistamisen vaikutusta tulevaisuuden avaruusympäristöön [3]. Hän on simuloinut eri valintakriteerejä sekä vuotuisia poistomääriä verraten niitä perustilanteeseen, jossa avaruusromun aktiivista poistamista ei suoriteta. Hänen simulaationsa ovat osoittaneet, että romukappaleiden massaansa ja törmäystodennäköisyyteen perustuvat valintakriteerit ovat tehokas tapa avaruusromun määrän hallitsemiseksi. Simulaatiot osoittavat, että 800 ja 1000 km ratakorkeudella olevien kappaleiden poistaminen hallitsee avaruusromun määrää merkittävästi. Kyseisillä ratakorkeuksilla on suuria hyötykuormia ja kantorakettien osia, joten todennäköisyys törmäyksille on muita alueita suurempi [3].

Aktiiviseen poistamiseen soveltuvia kohteita voidaan listata kiertorata-alueiden mukaan, kuten Liou on tehnyt [3]. Kohteita voidaan myös listata yksittäisinä kappaleina. Esimerkiksi Carsten Wiedemann on tehnyt listan vaarallisimmista kappaleista, joilla on suurin todennäköisyys törmäykseen. Listaan kuuluu muun muassa Envisat-satelliiti ja useita Zenith-rakettien ylempiä vaiheita [6].

Avaruusromukappaleita on monia erilaisia ja niiden soveltumista aktiivisen poistamisen kohteiksi voidaan luokitella sen mukaan tunnetaanko kappaleen fysikaalisia ominaisuuksia vai ei. Esimerkiksi romukappaleiden mahdollinen pyörimisläike vaikuttaa oleellisesti niiden soveltuvuuteen aktiivisen poistamisen kohteiksi. Kappaleet voivat myös olla hyvinkin massiivisia esim. Zenith-2:n ylempi vaihe painaa 8226 kg [6]. Massiivisten kappaleiden pyörimisenergiat voivat olla valtavia, mikä vaikeuttaa niiden poistamista ja vaikuttaa poistamistavan valintaan. Seuraavissa osioissa käsitellään useita eri menetelmiä romukappaleiden kaappaamiseen ja niiden poistamiseen kiertoradalta.

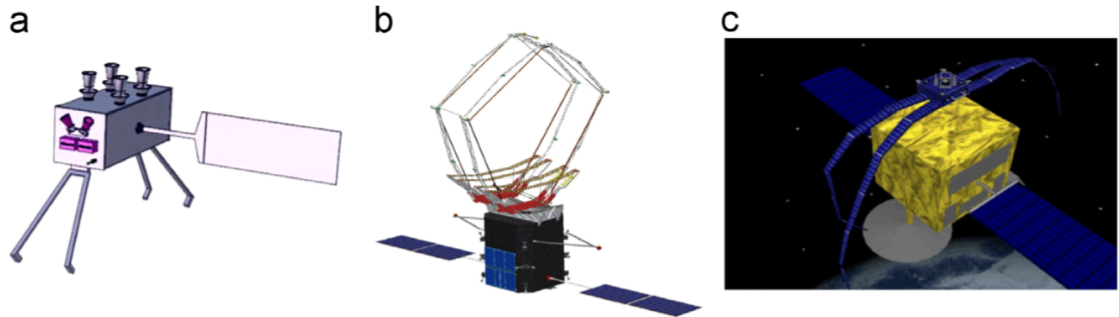
## 4.1 Kaappausmenetelmät

Avaruusromun poistaminen jakautuu kahteen eri osioon: kappaleiden kaappaamiseen ja poistamiseen. Kappaleiden kaappaaminen on vain puolet tehtävästä ja niiden poistaminen tapahtuu yleensä asettamalla kappaleet sellaiselle kiertoradalle, jolla ne palavat Maan ilmakehässä. Erilaisia kaappausmenetelmiä kehittää moni avaruusyhtiö ja -organisaatio kuten ESA ja Aviospace [6]. Yleiskatsaus esille otetuista kaappausmenetelmistä on listattu taulukkoon 1.

<b>Kaappausmenetelmä</b>	<b>Hyvät puolet</b>	<b>Huonot puolet</b>
Kaappaus lonkeroilla	Helppo testata maanpinnalla. Vakaa yhteys kohteeseen. Teknologisesti kehittynyt menetelmä.	Kappaleen lähestyminen on monimutkaista. Vaatii tarkan tiedon kappaleen nopeudesta ja paikasta.
Kaappaus verkolla	Kaappaus voidaan suorittaa etäältä. Tarkkuusvaatimukset ovat pienemmät. Sopii moniin eri kokoisiin kappaleisiin.	Vaikea kontrolloida kappaletta. Menetelmän testaus maanpinnalla on vaikeaa.
Kaappaus harppuunalla	Ei vaadi kiinnitysmiskohtaa. Kaappaus voidaan suorittaa etäältä. Sopii monen tyyppisiin kappaleisiin.	Riski kappaleen sirpaloitumiselle ja hajoamiselle pienemmiksi palasiksi. Yhteys kappaleeseen ei ole vakaa.

Taulukko 1: Yleiskatsaus eri kaappausmenetelmistä [6].

#### 4.1.1 Kaappaus lonkeroilla



Kuva 4: Kaappaus lonkeroilla (a) e.Deorbit (b) CADET (c) TAKO [6].

ESA:n e.Deorbit-projektin yhteydessä on tutkittu mekaanisten lonkeroiden käyttöä, jotka käärivät romukappaleen ja ottavat sen haltuun. Samaa menetelmää on tutkittu myös Aviospacen CADET-projektissa ja japanilaisessa TAKO Gripper -projektissa. Kuvassa 4 on esitetty visuaalisesti nämä kolme suunnitelmaa. CADET-projektissa lonkerot ovat suljetussa silmukassa, joka asetetaan romukappaleen ympärille, jonka jälkeen vyöt ottavat kontaktin kappaleeseen pehmentäen kaappausta. TAKO Gripperin lonkerot on mallinnettu luonnon mukaan ja ne toimivat kuten norsun kärsä tai mustekalojen lonkerot. Nämä lonkerot toimivat paineistetun kaasun avulla ja pyrkivät saamaan hyvän otteen myös pyörivästä kappaleesta. [6]

Fyysisen kontaktin haasteita ovat kohteen pyörimisliikkeen hallitseminen ja kovien

iskujen välttäminen. Kovat iskut kohteen kanssa sekä hallitsematon kappaleen pyöriminen voivat aiheuttaa lisää avaruusromua, kun esim. kohteen herkät osat hajoavat kiinnioton yhteydessä. Kovien iskujen välttäminen vaatii kaappaussatelliitin tarkkaa ohjausta, joka voi perustua esim. visuaaliseen ohjaukseen ja kohteen liikkeen ennustamiseen Kalman-suodattimen avulla. Pyörimisliikkeen hallitsemista on tutkinut Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) ja yksi ratkaisu siihen on käyttää robottikäden päässä olevaa harjaa. Harjan avulla kappaleen pyörimisenergiaa siirtyy vähän kerrallaan kaappaussatelliittiin, jossa sitä voidaan hallita satelliitin asennon hallintajärjestelmän avulla. JAXA:n mukaan alle  $3^\circ/\text{s}$  pyörivät kappaleet voidaan kaapata helposti ja yli  $30^\circ/\text{s}$  pyörivät kappaleet eivät ole sopivia kohteita. Välillä  $3^\circ/\text{s} - 30^\circ/\text{s}$  voidaan käyttää harjaa pyörimisliikkeen hallitsemiseksi. [6]

#### 4.1.2 Kaappaus verkolla

ESA:n sponsoroimat projektit Robotic Geostationary Orbit Restorer (ROGER) ja e.Deorbit ovat tutkineet verkon käyttämistä avaruusromun kaappaamiseen. Kaappausmenetelmä perustuu verkon laukaisemiseen jousisysteemin avulla. Verkon neljässä kulmassa on paino, jolloin verkon pyörimisliike avaa sen. Näin avattu verkko pystyy käärimään kohteen, jonka jälkeen se voidaan poistaa esimerkiksi hinaamalla se hautausmaaradalle, jos kohde on geostationaarisella kiertoradalla. Jos kohde on alemmalla kiertoradalla, voidaan käyttää muita aktiivisia poistomenetelmiä kohteen palauttamiseksi ilmakehään. [6]

Verkon käyttämistä avaruusromun kaappaamiseen pidetään yhtenä lupaavimmista kaappausmenetelmistä perustuen sen moniin etuihin. Menetelmä sallii suuren etäisyyden kohteen ja kaappaussatelliitin välillä. Kohdetta ei siis tarvitse lähestyä, eikä satelliitin tarvitse suorittaa vaativaa telakointia kohteen kanssa. Menetelmä sopii monien erilaisten kohteiden kaappaamiseen ja on kustannustehokas. Tämän kaappausmenetelmän vahva puoli on myös se, ettei kohteen massaa, liikemäärää tai muita fyysisiä ominaisuuksia tarvitse tietää etukäteen. Tällä menetelmällä on kuitenkin myös omat haasteensa. Menetelmä vaatii lisätutkimuksia monista aiheista kuten sopivan verkon mallinnus, kohteen ja verkon vuorovaikutus, sekä kohteen pyörimisliikkeen huomioonotto. [6]

Kun kohde kaapataan käyttämällä verkkoa, fyysinen kontakti kohteen ja verkon

välillä on välttämätöntä. Tästä syystä on mahdollista, että kohteen herkkä osa hajoaa kaappauksen yhteydessä ja ajautuu pois tuottaen lisää avaruusromua esim. jos laukaistun verkon paino osuu suoraan kohteeseen. On myös mahdollista, että verkko epäonnistuu käärimään kohteen tarpeeksi hyvin sen poistamiseksi, jolloin poisto-operaatio epäonnistuu kokonaan, sillä laukaistun verkon uudelleen virittäminen olisi hyvin haastavaa avaruudessa. Tärkein osa avaruusromun poistamista on välttää uuden avaruusromun syntymistä. Tästä syystä verkon ja kohteen vuorovaikutuksen tutkiminen on tärkeää. [6]

### 4.1.3 Kaappaus harppuunalla

Harppuunan käyttöä avaruusromun kaappaukseen on ehdotettu e.Deorbit-projektin yhteydessä. Harppuuna ammuttaisiin kiinni kohteeseen, jonka jälkeen kohde voitaisiin hinata hautausmaaradalle tai takaisin Maan ilmakehään. Harppuunan käytön hyviä puolia on, että se sopii monenlaisten kappaleiden pyydystämiseen ja erilaisten harppuunajärjestelmien testaaminen Maassa on helppoa. Käytön heikkouksia ovat mm. kaappauksen yhteydessä on suuri riski uuden avaruusromun syntymiseen ja se, että tapa ei sovi kohteille, joilla on suuri pyörimisliike. Harppuunalla kaappausta on tutkinut myös Astrium-yhtiö Grappling System -nimisen harppuunan yhteydessä. [6]

## 4.2 Poistomenetelmät

Avaruusromun poistomenetelmät ja kaappausmenetelmät eroavat toisistaan siten, että kohteen kaappaus ei vielä poista sitä kiertoradaltaan. Lähes aina kohteen kaappausta seuraa sen poistaminen jollain sopivalla menetelmällä. Kuitenkin poistomenetelmät pyrkivät kohteen poistoon ilman sen kaappausta, sillä kohteiden kaappaminen on monimutkaista [6]. Taulukkoon 2 on listattu yleiskatsaus eri poistomenetelmistä, niiden hyvistä ja huonoista puolista sekä kehitteillä olevia esimerkkimenetelmiä.

### 4.2.1 Ilmanvastuksen lisäysjärjestelmä

Läheisillä kiertoradoilla olevat romukappaleet palaavat ilmakehään sen aiheuttaman kitkan ansiosta. Kappaleen pysyvyys kiertoradallaan kasvaa nopeasti ratakorkeuden

noustessa ja myös LEO:lla olevat kappaleet voivat pysyä kiertoradallaan satojakin vuosia. Tästä syystä kehitteillä on monia ilmanvastuksen lisäysjärjestelmiä, joiden avulla romukappaleita voitaisiin palauttaa ilmakehään nopeammin. Nämä järjestelmät perustuvat yksinkertaisesti kappaleen pinta-alan suurentamiseen suhteessa niiden massaan. Mitä suurempi kappaleen pinta-alan suhde on sen massaan, sitä enemmän ilmanvastus vaikuttaa kappaleen kiertorataan. Tämä poistomenetelmä toimii pääasiassa vain LEO:lla olevien kappaleiden poistamiseen, sillä ilmakehän tiheys laskee nopeasti korkeuden kasvaessa. Tämän poistomenetelmän hyviä puolia on se, että poistamisen suorittavan satelliitin ei välttämättä tarvitse lähestyä kohdetta ja menetelmä soveltuu monien eri kokoisten kappaleiden poistamiseen. [6]

Ilmanvastuksen lisäysjärjestelmät jakautuvat sen mukaan, miten romukappaleen pinta-alaa suurennetaan. Eräs tapa olisi käyttää vaahtoa joka kiinnittyy kappaleeseen ja lajenee ympäröiden kappaleen vaahtopalloon. Toinen tapa olisi käyttää kaasulla täytettävää palloa, joka kiinnitetään kappaleeseen ja vaikuttaa samalla tavalla, kuin vaahtomenetelmä. Vaahdon sijasta on myös ehdotettu, että käytettäisiin kuitupohjaista ainetta, joka kietoutuisi romukappaleen ympärille. Jokaisella tavalla on omat heikkoutensa, esim. miten välttää, ettei vaahtopallo hajoa kappaleen palatessa ilmakehään tai kuinka varmistua siitä, ettei täytettävä pallo rikkoudu toisen pienen romukappaleen törmätessä siihen. [6]

#### 4.2.2 Sähködynaaminen ja -staattinen lieka

Sähködynaaminen lieka on pitkä johteesta valmistettu lanka, jonka läpi kulkee sähkövirta. Sähködynaamista liekaa voidaan käyttää satelliitin kiertoradan muuttamiseen tarvittaessa, mutta konseptia voitaisiin myös soveltaa avaruusromun poistamiseen. Lieka levitetään pitkäksi siten, että kappaleen kiertäessä Maan magneettikentässä syntyy Lorentzin voima, joka työntää kappaletta kohti ilmakehää. Tässä menetelmässä käytetään siis Maan magneettikenttää hyödyksi romukappaleen poistamiseksi. Menetelmä toimii tehokkaasti vain LEO:lla, sillä Maan magneettikentän voimakkuus ei ole tarpeeksi suuri korkeammilla ratakorkeuksilla. Toinen menetelmän haaste on tuottaa liekaan tarpeeksi suuri sähkövirta, jotta Lorentzin voima on tarpeeksi voimakas kohteen poistamiseksi. [6]

Menetelmässä avaruusromukappale pitäisi ottaa ensin kiinni, jotta esim. robot-

tikäsi pystyisi kiinnittämään sähködynaamisen liean kappaleeseen. Ongelmana on kuitenkin se, että romukappale voi olla hallitsemattomassa pyörimisliikkeessä, joka tekee menetelmän käyttämisestä haastavaa. Sähködynaamisen liean pitää pysyä oikeassa asennossa vaikuttaakseen halutulla tavalla. [6]

Sähköstaattinen lieka perustuu sähköpotentiaaliluo-  
miseen liean päiden välille niin, että sen vuorovaikutus ionosfäärin varattujen hiukkasten kanssa jarruttaa romukappaletta [7]. Sähköstaattinen lieka on sähködynaamista yksinkertaisempi, sillä ionosfäärin varatut hiukkaset eivät aiheuta siihen sähkövarausta [7]. Yksi edistyneimpiä esimerkkejä sähköstaattisesta lieasta on suomalaiskeksintö plasmajarru [8]. Plasmajarru perustuu negatiivisesti varattuun liekaan, joka voi olla yksi satelliitin instrumenteista [8]. Satelliitin liikkuaessa lähes paikallaan olevan avaruusplasman läpi se aiheuttaa liekaan plasmavastuksen, joka jarruttaa kappaleen ratanopeutta [8]. Plasmajarrua voitaisiin myös soveltaa avaruusromun poistamiseen.

### 4.2.3 Kontaktillinen poistaminen

Kontaktillisissa poistamistavoissa otetaan nimensä mukaisesti fyysinen kontakti kohteeseen. Menetelmä vaatii siis, että kaappaussatelliitti lähestyy ensin romukappaletta, jonka jälkeen voidaan hyödyntää suoraa vuorovaikutusta sen poistamiseen [6]. Tämä voi tapahtua esimerkiksi siten, että satelliitti kaappaa romukappaleen ja heittää sen lyhytikäiselle kiertoradalle tai palaamaan ilmakehään. Menetelmä hyödyntäisi liikemäärän vaihtamista kohteen ja satelliitin välillä polttoaineen sijasta [16].

Toinen varteenotettava vaihtoehto on käyttää emoaluksena suurempaa satelliittia, jonka mukana on monia pienempiä itsestään toimivia satelliitteja. Nämä piensatelliitit voidaan emosatelliitin mission aikana laukaista monien eri romukappaleiden poistamiseksi. Laukaisun jälkeen pieni satelliitti kiinnittyy kohteeseen ja jarruttaa sen liikettä niin, että kohde ja satelliitti palaavat ilmakehään. Kontaktillisten poistamistapojen heikkous on, että ne vaativat tarkkaa ohjausta ja romukappaleiden fyysiset ominaisuudet pitää tietää tarkasti. [6]

### 4.2.4 Kontaktiton poistaminen

Kontaktittomat tavat poistaa avaruusromua ovat suotuisampia kuin kontaktilliset tavat. Kun kohteeseen ei tarvitse ottaa fyysistä kontaktia, ei tarvitse huomioida

kohteen ja poistamiseen käytettävän satelliitin välistä vuorovaikutusta. Fyysisellä kontaktilla on monia riskejä esim. lähestymisen tai kiinnioton epäonnistuminen. Pahimmassa tapauksessa, kun otetaan kohteeseen yhteys, menetetään satelliitin ohjattavuus kokonaan. Tällaisessa tilanteessa kohde ja satelliitti voivat ajautua hallitsemattomaan pyörimisliikkeeseen tai sinkoutua eri suuntiin. [6]

Kontaktittomien menetelmien huono puoli on se, että niiden toteuttaminen kestää pitkään. Tällaisiin tapoihin kuuluu esim. keinotekoisien ilmakehän luominen kohteen eteen, sekä laser- tai plasmasäteen ampuminen kohteeseen. Kaikki nämä tavat hidastavat kohteen liikettä, jolloin ne palaavat ilmakehään nopeammin. Edellä mainitut menetelmät toimivat kuitenkin vain matalilla Maan kiertoradoilla ja niiden vaikutus varsinkin suuri massaisiin kappaleisiin on hidasta. Tämä tarkoittaa myös sitä, että menetelmät eivät sovi kappaleiden poistamiseen, joilla on suuri riski törmäyksiin. Laser-systeemin käytön suurin etu on se, että sitä voidaan käyttää maasta. Tehokasta laseria käytettäessä uuden avaruusromun syntymisen riski on suuri. Plasmasäteen käyttö tai keinotekoisien ilmakehän luominen puolestaan vaatii, että poistamiseen tarkoitettu satelliitti on kohteen lähettyvillä. [6]

Poistomenetelmät	Hyvät puolet	Huonot puolet	Esimerkkimenetelmät
Ilmanvastuksen lisäysjärjestelmä	Kohdetta ei tarvitse lähestyä. Sopii monen kokoisten kappaleiden poistamiseen.	Mahdollisuus uuden avaruusromun syntymiseen. Ei niin tehokas kuin muut tavat.	Vaaho, täytettävä pallo tai kuitupohjainen aine.
Sähködynaaminen ja -staattinen lieka	Ei vaadi polttoainetta. Menetelmän teknologia on kehittynyttä.	Vaatii kohteen kaappauksen. Sähködynaaminen lieka ei ole käytettävissä LEO ulkopuolella.	Romukappaleeseen kiinnitettävä lieka. Plasmajarru.
Kontaktillinen poistaminen	Voidaan poistaa monia kohteita yhdellä kertaa. Kohde saadaan pois kiertoradalta nopeasti.	Vaatii kohteeseen lähestymisen. Vaatii monimutkaisen ohjausjärjestelmän.	Kohteeseen kiinnittyminen. Kohteen sinkoaminen ilmakehään.
Kontaktiton poistaminen	Voidaan suorittaa etäältä. Sopii monen kokoiseen kohteisiin.	Vaatii paljon aikaa. Ei käytettävissä LEO ulkopuolella.	Keinotekoinen ilmakehä. Laser järjestelmä.

Taulukko 2: Yleiskatsaus eri poistomenetelmistä [6] [8].

## 5 Yhteenveto

Avaruusromun torjunnan tärkein osa on sen ennaltaehkäisy. Tästä syystä on tärkeää, että jokaisella avaruuden lähtevällä satelliitilla on suunnitelma avaruusromun syntymisen ehkäisemiseksi. Jokaisen satelliitin elinkaaren loppupää pitää myös ottaa huomioon jo suunniteluvaiheessa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että matalla Maan kiertoradalla satelliiteilla on suunnitelma siitä, miten ne tuodaan turvallisesti takaisin ilmakehään. Korkeammilla kiertoradoilla olevat satelliitit voidaan saattaa hautausmaaradalle avaruusmission päättyessä.

Monille tärkeille kiertoradoille on jo keräytynyt huomattava määrä avaruusromua. Kertyneen avaruusromun poistuminen kiertoradalta voi viedä satoja tai jopa tuhansia vuosia, jos asialle ei tehdä mitään. Tästä syystä tässä tutkielmassa käytiin pintapuolisesti läpi monia avaruusromun kaappaamiseen, poistamiseen ja ehkäisemiseen liittyviä asioita. Avaruusromun huomioon ottaminen muuttuu vuosi vuodelta tärkeämmäksi, sillä käytämme avaruutta hyväksi kiihtyvällä tahdilla ja kiertoradoilla olevien satelliittien määrä kasvaa lähes eksponentiaalisesti. Satelliittien määrän kasvuun vaikuttaa varsinkin lähivuosina avaruustoiminnassa tapahtunut satelliittijärjestelmien pienentyminen, suurten satelliittikonstillaatioiden käyttöönotto ja siirtyminen kaupallisiin operaattoreihin.

Avaruusromun ehkäisemiseksi tehdään jo paljon, mutta puhtaan avaruuden säilyttämiseksi myös tulevaisuudessa vaatii jatkuvaa työtä. Maan avaruusympäristöä voidaan ajatella lähes uusiutumattomana luonnonvarana, mutta sitä voidaan suojella aktiivisin toimin. Avaruusromun huomioon ottaminen ei ole vain suositus, vaan edellytys tulevaisuuden avaruustoiminnalle ja Maan avaruusympäristön kestäväälle kehitykselle.

## Viitteet

- [1] ESA's Annual Space Environment Report [online, viitattu 15.1.2025]. Saatavilla [www-muodossa](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](https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf).
- [2] D. Kessler ja B. Cour-Palais, Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt, *Journal of Geophysical Research*, Vol 83, Issue A6, s. 2637-2646, 1978.
- [3] J.-C. Liou, N. Johnson ja N.Hill, Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal, *Acta Astronautica* 66, s. 648-653, 2010.
- [4] NASA-HDBK-8719.14: NASA Handbook for Limiting Orbital Debris [online, viitattu 4.4.2025]. Saatavilla [www-muodossa](https://standards.nasa.gov/sites/default/files/standards/NASA/Baseline/1/nasa-hdbk-871914_baseline_with_change_1.pdf)  
[https://standards.nasa.gov/sites/default/files/standards/NASA/Baseline/1/nasa-hdbk-871914\\_baseline\\_with\\_change\\_1.pdf](https://standards.nasa.gov/sites/default/files/standards/NASA/Baseline/1/nasa-hdbk-871914_baseline_with_change_1.pdf).
- [5] The Collision of Iridium 33 and Cosmos 2251: The Shape of Things to Come [online, viitattu 10.2.2025]. Saatavilla [www-muodossa](https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100002023.pdf)  
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100002023.pdf>.
- [6] M. Shan, J. Guo ja E. Gill, Review and comparison of active space debris capturing and removal methods, *Progress in Aerospace Sciences* Vol.80, s. 18-32, 2016.
- [7] B. C. Yalçın, C. Martinez, M. H. Delisle, G. Rodriguez, J. Zheng, M. Olivares-Mendez. ET-Class: An Energy Transfer-Based Classification of Space Debris Removal Methods and Missions. Saatavilla [www-muodossa](https://www.frontiersin.org/journals/space-technologies/articles/10.3389/frspt.2022.792944/full)  
<https://www.frontiersin.org/journals/space-technologies/articles/10.3389/frspt.2022.792944/full>. doi=10.3389/frspt.2022.792944
- [8] P. Janhunen, P. Toivanen ja J. Envall. Electrostatic tether plasma brake. ESA CleanSat Building Block 15 (BB15) final report. Saatavilla [www-muodossa](https://www-muodossa)

- <https://www.electric-sailing.fi/papers/BB15-LSIversion-with-execsum.pdf>.
- [9] C. Bonnal, J.M. Ruault ja M.C. Desjean, Active debris removal: Recent progress and current trends, *Acta Astronautica* Vol.85, s. 51-60, 2013.
- [10] G. Drolshagen, Impact effects from small size meteoroids and space, *Advances in Space Research* 41, s. 1123-1131, 2008.
- [11] Laki avaruustoiminnasta [online, viitattu 16.1.2025]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2018/20180063>.
- [12] ESA Space Debris Mitigation Requirements [online, viitattu 16.1.2025]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) [https://technology.esa.int/upload/media/DGHKMZ\\_6542582e18e33.pdf](https://technology.esa.int/upload/media/DGHKMZ_6542582e18e33.pdf).
- [13] Benefits Stemming from Space Exploration [online, viitattu 27.3.2025]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/01/Benefits-Stemming-from-Space-Exploration-2013-TAGGED.pdf>.
- [14] The contribution of NaK droplets to the space debris environment [online, viitattu 29.5.2025]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/367>.
- [15] Characterization of NaK Coolant Droplets from Soviet RORSAT Reactors [online, viitattu 18.6.2025]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <https://amostech.com/TechnicalPapers/2023/Poster/Battle.pdf>.
- [16] J. Missel ja D. Mortari, Path optimization for Space Sweeper with Sling-Sat: A method of active space debris removal, *Advances in Space Research* 52, s. 1339-1348, 2013.
- [17] How Fully Reusable Rockets Are Transforming Spaceflight [online, viitattu 31.5.2025]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa) <https://www.global-aero.com/how-fully-reusable-rockets-are-transforming-spaceflight/>.