



**TTÜ tudengisatelliidi Hämarik päikesepatareide andmete analüüs**  
Bakalauruse töö

Üliõpilane: Risto Vaalma

Üliõpilase kood: 213501YAFB

Juhendaja: Taavi Raadik

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut  
Vanemteadur

Kaasjuhendaja: Veljo Sinivee

Küberneetika instituut  
Insener

Õppekava: Rakendusfüüsika

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Risto Vaalma

/allkirjastatud digitaalselt/ 20.05.2024

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele.

Juhendaja: Taavi Raadik

/allkirjastatud digitaalselt/ 20.05.2024

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele.

Kaasjuhendaja: Veljo Sinivee

/allkirjastatud digitaalselt/ 20.05.2024

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>4</b>
<b>1 Ülevaade satelliidist</b>	<b>5</b>
1.1 Orbiidi parameetrid . . . . .	6
1.2 Kosmose keskkond . . . . .	7
1.3 Päikesepatareide spetsifikatsioonid . . . . .	8
1.4 Andmete kogumine . . . . .	10
<b>2 Andmete analüüs</b>	<b>12</b>
2.1 Kahemõõtmeline probleem . . . . .	13
2.2 Kolmemõõtmeline kuubik . . . . .	16
2.3 Kolmemõõtmeline satelliit . . . . .	17
2.4 Pinge ja temperatuur . . . . .	19
<b>Kokkuvõte</b>	<b>26</b>
<b>Abstract</b>	<b>27</b>
<b>Kasutatud kirjandus</b>	<b>28</b>
<b>Tänuavaldused</b>	<b>29</b>
<b>Lisad</b>	<b>30</b>

## **Sõnastik**

**ADCS** Attitude Determination and Control System moodul. 5, 12

**AM** Air Mass. 7

**COM** Communications moodul. 5

**EPS** Electrical Power Supply moodul. 5, 6, 9, 10

**LEO** Low Earth Orbit. 6

**OBC** On Board Computer moodul. 5

**PCC** Power Control Circuit . 5

**UHF** Ultra high frequency moodul. 5

**UTC** Universal Time Coordinated. Aastast 1972 hoitud maailmaaeg, mis asendas varasema Greenwich Mean Time. 6

## Sissejuhatus

Pea 4 aastat tagasi lennule saadetud tudengisatelliit TTU100 Hämarik on tiirelnud ümber Maa pea 20000 korra. Kuigi missioon ise pidi ainult kestma 2 aastat, on ta ületanud ootusi oma vastupidavuse ja pika eluga ning tänaseni saadab andmeid. Nende aastate jooksul on ta teinud mitmeid pilte maapinnast, sooritanud teaduskatseid ning pea koguaegselt maa-pealse meeskonnaga suhelnud. Innovatsioonikesuse Mektory poolt toodetud kuupsatelliidi peamine ülesanne on olnud Maa kaardistamine 500 km kõrguselt, kasutades üht RGB ja üht NIR kaamerat. Satelliidi peal on ka mitu teaduskatset, mis koosnevad omakorda mitmetest süsteemidest ja komponentidest. Seda kõike on toitnud 9 päikesepaneeli.

Päikesepaneelide kasutuselevõtt on selliste väikeste satelliitide jaoks vajalik, kuna muud elektrit tootvad süsteemid on kas liiga suured, liiga kallid või liiga keerukad. Päikesepaneele on kasutatud kosmoseajastu algusest, kuna nendel ei ole vaja kütust, kasutavad ära atmosfääri puudumist, et rohkem elektrit saada kui maapealsed paneelid ning on võrreldasimi kergemad, kui kütuseelemendid. Kuna päikesepaneelid on nii tähtsad, siis on vajalik teada, kuidas need paneelid reageerivad lennu ja kosmose tingimustele ning kui hästi nad vastu peavad. Kuna tänapäeval on aina enam arenemas kosmosetööstus, siis on tähtis, et arendatud satelliidid oleksid kasulikkud ja töökorras. Selle eesmärgini jõudes peab analüüsima seda, mida on varem tehtud ning mida ka praegu tehakse ja selle põhjal andma teadmisi tulevaste satelliiti tootajate jaoks. Tähelepanu peab ka tooma kosmoseprügi mure juurde. Nimelt sellise kasvava tööstusega on tekkinud keskkond, kus ei mõelda, mis juhtub satelliitide ning rakettide osadega, kui nad on oma eluea läbinud. Kuna kõik see materjal jääb orbiidile, siis ta hakkab praegustele ja uutele missioonidele muresid tekitama. Kosmoseprügi probleemi üks lahendus on disainida ja planeerida projekte nii, et nendest ei tekiks prügi. Rakettide jaoks võib see tähendada korduvkasutatavat kanderaketisüsteemi. Satelliitide jaoks võib see olla eluea suurendamine aga ka tehnoloogia arendamine nende alla toomiseks ning atmosfääriks ära põlemiseks näiteks *plasma brake* (satelliidi kiiruse vähendamise meetod, kus õhukene traat, mis on ühendatud satelliidiga, tekitab elektrostaatilist takistust, kui ta läbi ionosfääri liigub), mida Estcube 2 tahtis katsetada.

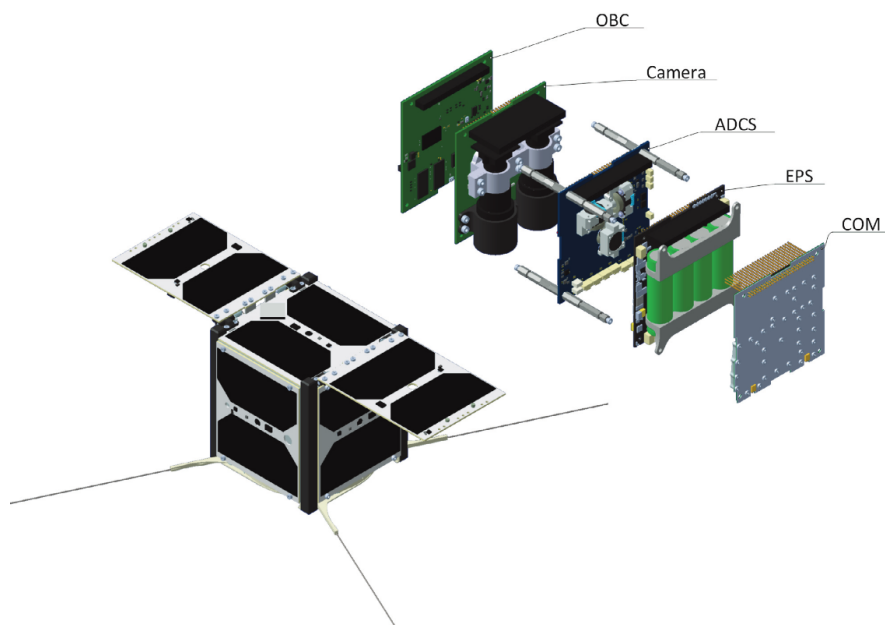
Vaatamata sellele, et Hämarikul puudub tehnoloogia atmosfääri alla toomiseks ja selle põletamiseks, on tema orbiit alates missiooni algusest tasapisi vähenenud ning on langenud atmosfääri. Kuigi satelliidi orbiidi kõrguseks algusest oli  $\sim 500$  km, siis nüüdseks on ta langenud  $\sim 400$  km kõrgusele. Sealt edasi ta langeb nii kaua, kuni ta on piisavalt madalal, et atmosfääris takistuse tõttu ära põleda. Sellegipoolest satelliit veel praegusel hetkel töötab pärast 3.5 aastat kosmoses ning päikeseelemendid teevad oma tööd, mis annab meile võimaluse uurida missuguseid muutuseid on toimunud nende aastate jooksul.

Töö eesmärgiks oli uurida satelliidi päikesepatareid, nende praegust olekut ning degradatsiooni üle kogu missiooni. Selle põhjal saab tagasisidet päikesepatareide valiku üle, võrrelda teiste organisatsioonide poolt tehtud sarnaseid analüüse ning anda võimalikke muudatusi tulevasteks missioonideks nagu TTÜ ja TÜ poolt arendatud tudengisatelliit SUTS.

# 1 Ülevaade satelliidist

TTU100 Hämarik on kuupsatelliit, mille suuruseks on 10x10x10 cm, mis kaalub alla 1.33 kg ning vastab standarditele, mida teised kuupsatelliidid on järginud. Neid standardeid on arendanud *California Polytechnic State Ülikool* aastast 1999 [3]. Satelliiti arendati ning ehitati Mektorys Tallinna Tehnikaülikooli tudengite poolt. Kuupsatelliidi kasutuselevõtt sellise projekti jaoks oli kasulik, kuna see on soodne ja standardiseeritud viis saada kosmosesse. Kuupsatelliite on mitmeid loodud ning neid ka saadetakse kosmosesse tihti, eriti teiste ülikoolide poolt. Nende eelis on selles, et on olemas configureeruv taristu, mille põhjal muundada satelliiti, et enda missioonile seda otstarbekaks teha. Kuupsatelliitide soodsus tuleb sellest, et nad on nii väikesed ning neid saab lennata suurte parvedena, vähendades ruumi ja massi raketite peal.

Satelliit ise koosneb viiest moodulist: EPS, ADCS, COM, OBC ja kaamerad. OBC (*On Board Computer*) moodul on satelliidi arvuti, mis tegeleb satelliidi erinevate moodulite kommunikatsiooniga ja juhiste andmisega. ADCS (*Attitude Determination and Control System*) mooduli tööks on määrata satelliidi asendit orbiidil, et satelliiti saaks hoida paigal näiteks piltide tegemise või kommunikatsiooni jaoks. Kuna asendikontrolli süsteemi tarkvara ei saadud valmis lennu jaoks, siis satelliidil puudub viis, kuidas enda asendit määrata ja muuta. COM (*Communications*) moodul tegeleb andmete edastamise ning vastu võtmisega Maa pealt. Seda ta teeb kahe raadioga, UHF transiiver, mis edastab korraldusi ning X-riba saatja, mis saadab satelliidi poolt tehtud pilte tagasi. Viimaseks mooduliks, mis antud bakalaureusetöö võimalikuks tegi on EPS (*Electrical Power Supply*) moodul.



Joonis 1: Satelliidi moodulid [2].

EPS alla kuulub PCC (*Power Control Circuit*), päikesepaneelid ja akupatareid [4]. PCC tegeleb elektri haldamisega üle kõikide moodulite ning +5V pinget reguleerimisega. Seda ta

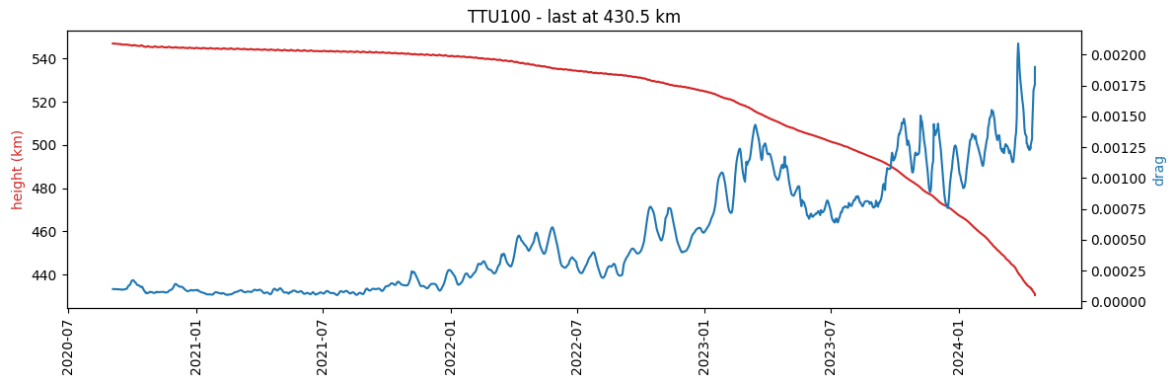
teeb kasutades mikrokontrollerit. Päikesepaneelidest tulev elekter saadetakse kas teistele moodulitele, või kasutatakse patareide laadimiseks. Satelliidi prioriteet on algselt teised alamsüsteemide moodulid elektrienergiaga varustada ning peale seda akusid laadida. Toitesüsteem kasutab 4 liitium-ioon akupatareid suurusega 18650 ning mahtuvus on ühe patarei jaoks 3200 mAh, kõik kokku 12800 mAh. EPS moodulile on paigaldatud ka saatja, mis on võimeline iseseisvalt saatma telemeetria informatsiooni Maajaamale.

## 1.1 Orbiidi parameetrid

Hämarik saadeti üles koos Vega VV16 lennuga, mille hulgas oli kokku 65 satelliiti ja milles osales 21 tootjat kolmeteistkümnest riigist. Nende hulgast oli 46 CubeSat satelliiti [6]. Raketi start algas Guiana Kosmosekeskusest 3. septembril 2020 kell 1:51:10 UTC [7]. Lend kokku võttis umbes 2h, et kõik nanosatelliidid 500km kõrgusele päikesesünkroonsele orbiidile viia. Päikesesünkroonne orbiit on selline, kus orbiiditasandi ja päikese vaheline nurk ei muutu. Ehk kui tehakse satelliidiga pilte, siis valguse nurk on konstantne. Päikesesünkroonne orbiit on kasulik ka päikesepaneelide tööks, kuna satelliit on enamuses ajast päikese käes, mitte Maa varjus. Esimene kontakt satelliidiga saadi 15. novembril 2020, kasutades kolme meetrise läbimõõduga parabolantenni [8].

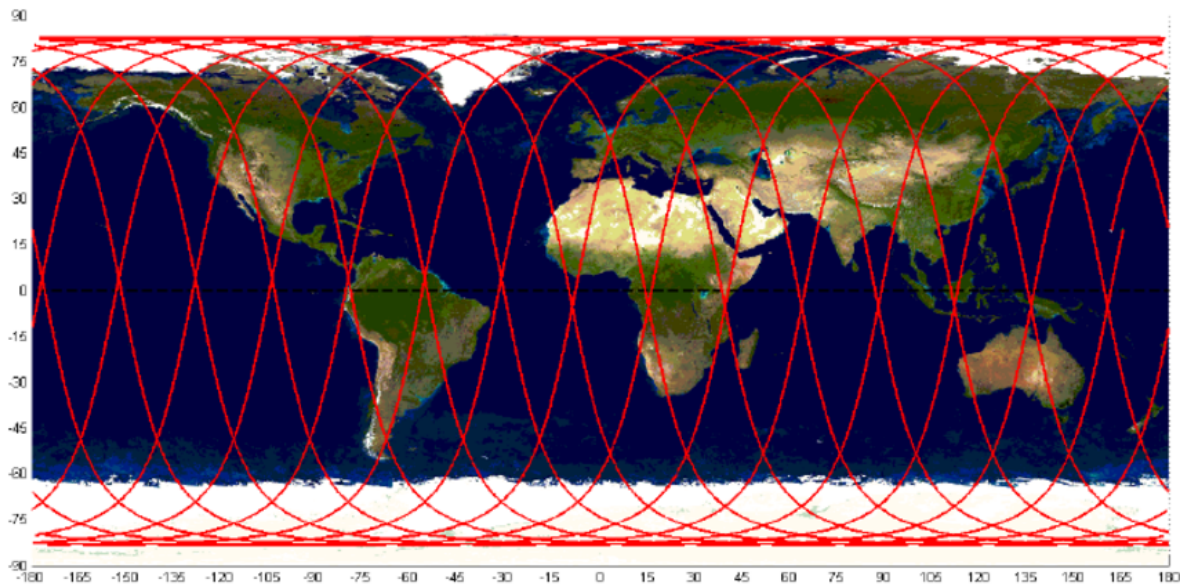
Satelliit asub maalähedases päikesesünkroonses orbiidis ~500 km kõrgusel maast. Orbiidi- perioodiks on 90 minutit, millest 60 veedab ta päikese käes ja 30 minutit varjus [1]. Selline Maa-lähedane orbiit (LEO) on väga tavaline kuupsatelliidide ning ka teisteilmastiku pildistamiseks mõeldud satelliitide jaoks. Maalähedasel orbiidil on kasu selles, et selleni jõudmine on soodne võrreldes kaugemale orbiidile ning täpsete piltide tegemine on võimalik. Teiseliselle eelis on ka selles, et atmosfääri takistuse tõttu kaotab satelliit koguaegselt kiirendust, mis tähendab, et satelliit ei jää igaveseks oma orbiidile prügina, vaid langeb atmosfäärini ja seal põleb ära. See juhtub ka antud töös uuritava satelliidiga, prognoositud atmosfääri sisenemine 01.08.2024, ning juhtus TTU101 Koit satelliidiga 01.04.2024. Joonisel 2 on näha satelliidi Hämariku orbiidi degredatsiooni, kus orbiidi kõrgus on langenud 550 km kuni 430 km.

Atmosfääri langemisega kaasneb ka see, et satelliidi asend peaks stabiliseeruma. Kui lennu alguses satelliit pöörles ümber kõiki telgi, siis praeguseks peaks ta asend olema piki z telge stabiliseerunud, ehk satelliidi z telg on piki kiiruse suunda. Uuritava satelliidi puhul on see telg, mis on risti tiibadega.



Joonis 2: TTÜ100 Hämarik orbiidi degredatsioon.

Orbiidi inklinatsioon on  $98^\circ$ , mis tähendab, et satelliit katab väga suure osa Maa pinnast, mis on vajalik piltide tegemiseks. Sellise inklinatsiooniga orbiiti nimetatakse ka polaarorbiidist, kuna ta liigub pooluste lähedal.  $90^\circ$  inklinatsioon tähendaks, et satelliit ületab pooluseid ja ekvaatorit risti.



Joonis 3: Näide nanosatelliidi päikesesünkroonorbiidist ühe päeva jooksul [5].

## 1.2 Kosmose keskkond

Kosmose keskkond ei ole kõige sõbralikum elektroonika vastu, veelgi enam päikesepatareide vastu. Suured temperatuuride muutused, kosmosevaakum, päikese- ja kosmiline kiirgus.

Kuna kosmoses pole atmosfääri, siis päikesest tuleva valguse spekter ei muutu ning seda peab arvestama, kui võrrelda Maa peal mõõdetud paneelidega. Sel juhul kasutatakse AM (*Air Mass*) skaalat, kus AM0 on atmosfäärita keskkond, AM1 on päikesespekter merepinnal ekvaatoril, AM1.5 on päikesespekter 60 laiuskraadi juures.

Temperatuur kosmoses on umbes 3 K ( $-270^\circ\text{C}$ ), kuid päikese käes on satelliidi temperatuur umbes  $60^\circ\text{C}$ . Kuna temperatuur muutub kogu aeg, siis see tekitab termilisi pingeid paneeli-



des.

Päikese kiirgustihedus Maa orbiidil on  $1367 \text{ W/m}^2$ . See kiirgus on peamiselt fotonid, aga võib ka kõrge energia prootonitest ja elektronidest koosneda, kui toimub näiteks päikese purse, kus eritatakse Päikese kroonis olevat ainet. Kuna see aine on plasma, siis purske ajal eritub kõrge energiaga laetud osakesi.

Kosmilise kiirguse kahju tuleb sellest, et see peamiselt koosneb kõrge energia prootonitest (elementide tuumadest) ja elektronidest, mis mõlemad tekitavad defekte päikesepaneelide struktuurides. Päikeseplatade väljundpinge vähenemine tuleneb peamiselt rekombinatsiooni suurenemisest, kus elektronid rekombineerivad aukudega, eritades soojust või kiirgust. See protsess toimub koguaeg päikeseplatades, kuna elektronid liiguvad vabalt mööda struktuuri, kuid kõrge energiaga elektronid kas kosmilisest või päikesekiirgusest kiirendavad seda protsessi.

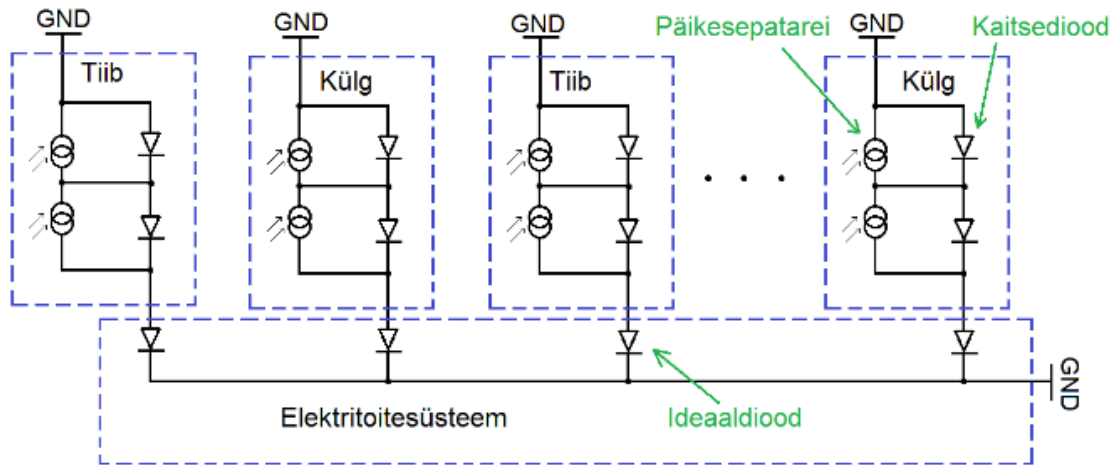
Voolutugevuse langus tuleneb peamiselt kõrge energia prootonite või elektronide põrkumisest GaInP ja GaAs kihtides [11], mis on mitmesiirdeliste päikeseelementide pealmised kihid. Nendes kihtides toimub 300-800 nm lainepikkusega valguse neeldumine.

Defektide teke sõltub sellest, kui palju osakesi läbib materjali, kus enamus osakesi jõuavad läbida ainult pealmisi kihte päikeseelementidel. Siin on eksponentsiaalne suhe pinna pikkuse ja defektide teke vahel. Selle põhjal on kasutusel päikesepaneelidel kaitseklaas, mis kaitseb kiirguse eest. Sellised kaitseklaasid on väga efektiivsed, kuna enamus kõrge energiaga osakesi ei jõua läbida kaitseklaasi ning tekitada defekte päikeseelementi kihtides.

Maa magnetosfääris liigub ringi palju selliseid osakesi, mis võib ka paneelide tööd takistada. See kiirgus on hoitud Van Alleni vööndis, kus kõrge energiaga osakesed on kinni magnetosfääri tõttu. Kuigi ekvaatori lähedal on Van Alleni vöönd umbes 1000 km kõrgusel, siis satelliit satub ikka sellesse vööndisse pooluste lähedal. On olemas ka Lõuna-Atlandi anomaalia, kus Maa tuuma nihke tõttu on magnetväli nõrgem ja Van Alleni vöönd palju lähemale maapinnale, umbes 200 km kõrgusel. Poolustel elektronide energiad on kuni 7 MeV ja prootonitel 600 MeV.

### 1.3 Päikeseplatade spetsifikatsioonid

Päikeseplatadeid on *AzurSpace 3G30C*, mis on 3 üleminekuga tandem kosmoseklassi GaInP/GaAs/Ge paneelid [9]. Päikeseplatadel on ka kaitseklaas, mis vähendab kasutegurit, kuid kaitseb kiirgusvoo eest. See kaitseklaas võib missiooni jooksul tuhmuda kas radiatsiooni või kosmoseprahi tõttu, mis vähendab paneelide võimsust. Näiteks Estcube 1 korral ei kasutatud kaitseklaasi, mis oluliselt mõjutas päikeseplatade tööd ning lühendas missiooni eluiga. Paneelid valiti, kuna nad sobivad satelliidi mõõtmetele, on piisavalt efektiivsed ning olid ka kõige soodsamad pakututest.



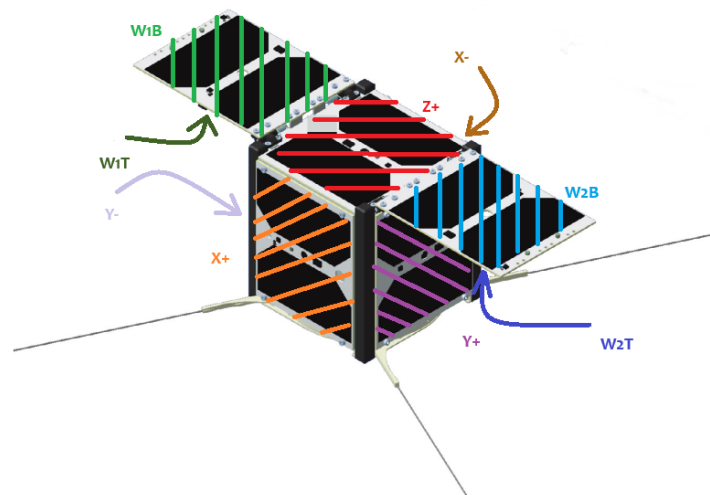
Joonis 4: Päikesepatareide elektriskeem [1].

Päikesepatareid on paaride kaupa jadamisi ühendatud satelliidi tahkudele. Kuubiku kuuest tahust on 5 paneelidega kaetud, kuna ühe tahu jaoks on jätetud kaamerad ja teised instrumendid. Satelliidil on olemas ka kaks tiiba, mille mõlematel pooltel on olemas üks paar patareisid. Tiibadel on olemas kokku 8 päikesepatareid ja kuubiku tahkudel on 10, ehk kokku on satelliidil 18 päikesepatareid. Üle kõikide paneelide summaarne võimsus on umbes 7,5 W.

Paneelidel on olemas piirang, kus nad toodavad elektrit maksimaalse võimsuse ajal (inglise keeles *Maximum Power Point*). Antud satelliidil pandi see paika 4550 mV juurde. See piirang ei ole väga range, kuid see tähendab, et voolu laadimine patareidesse toimub peamiselt  $\sim 4550 - 6000$  mV piirkonnas. Akude laadimisvool on EPSi juhtkoodis piiratud 500 mA väärtuseni.

Satelliidi 9 paneeli on nimetatud koordinaatide ja tiibade järgi nii, nagu joonisel 5. Kuna koordinaadid algavad satelliidi keskelt, siis on iga telje (peale Z- telje, kus on kaamerad) kas positiivses või negatiivses suunas paneel. Ehk X+ ja X- paneelid on x telje positiivses ja negatiivses suunas, Y+ ja Y- on y telje negatiivses suunas, Z+ on z telje positiivses suunas. Satelliidi tiivad on nimetatud Wing 1 ja Wing 2 ning nende peal olevaid paneele eristatakse selle järgi, mis tiiva peal nad on ning kas nad on nõ üleval või all, z teljega võrreldes. W1B on esimese tiiva all z negatiivses suunas, W1T esimese tiiva z telje positiivses suunas, W2B teise tiiva all ja W2T teise tiiva peal. Tiibade peal olevad paneelid on ainult siis z telje suunas, kui nad on välja sirutatud, muidu nad on y telje suunas.

Kuigi disainimise protsessis olid tiibade nimetused teistpidi, et Z+ positiivses suunas on W1T ja W2T, siis kas jootmise protsessis või kuskil programmeerimises, näiteks andmete dekodeerimises, tehti viga, et kummale poole on mis tiiva paneelid. See viga avastati alles antud töö käigus, kui päikesepatareide tööd analüüsima hakati. Tekkis lahknemus seoses sellega, et mis paneelide voolud korreleeruvad teiste paneelide voolutugevustega. Näiteks Z+ paneeli voolutugevus ühtis rohkem W1B paneeliga, kui W1T paneeliga, mis ei klapi, kuna Z+ ja W1T peaksid olema samas suunas paneelid.



Joonis 5: Satelliit päikesepaneelide tähistega.

#### 1.4 Andmete kogumine

Andmete ülekande toimub aegadel, mil satelliit on piisavalt lähedale maapealsele jaamale, umbes 3000 km kaugusel. EPS moodul ise edastab andmeid ainult siis, kui neid temalt küsitakse. See tähendab, et me saame andmeid paneelide olukorrast nendest hetkedest, mil satelliit teeb ülekannet. EPS moodul salvestab ka satelliidi pardale väärtusi, kuid nende väärtustega on see mure, et iga ülennu ajal tehakse reset ning aja lugemine algab nullist. See tähendab, et salvestatud väärtustel ei teada, millal need võetud on ning neid ei saa usaldusväärselt pidada. Ülennu ajal saadud andmed on jagatud kahte faili, kuna korraga ei saa kõigi registrite sisu küsida.

Satelliidi pardal on olemas kaks raadiot, kus üks, UHF transiiver, edastab satelliidi telemeetrilise informatsiooni. Maajaamas on olemas 435.450 MHz ja 10.460..10.465 GHz amatööraradiosagedusalade antennisüsteemid, mis saavad neid andmeid vastu võtta [8]. Pärast seda, toimub andmete salvestamine ja dekodeerimine. Meie jaoks vajalikud andmed on paneelide pinge, voolutugevus ja temperatuur.

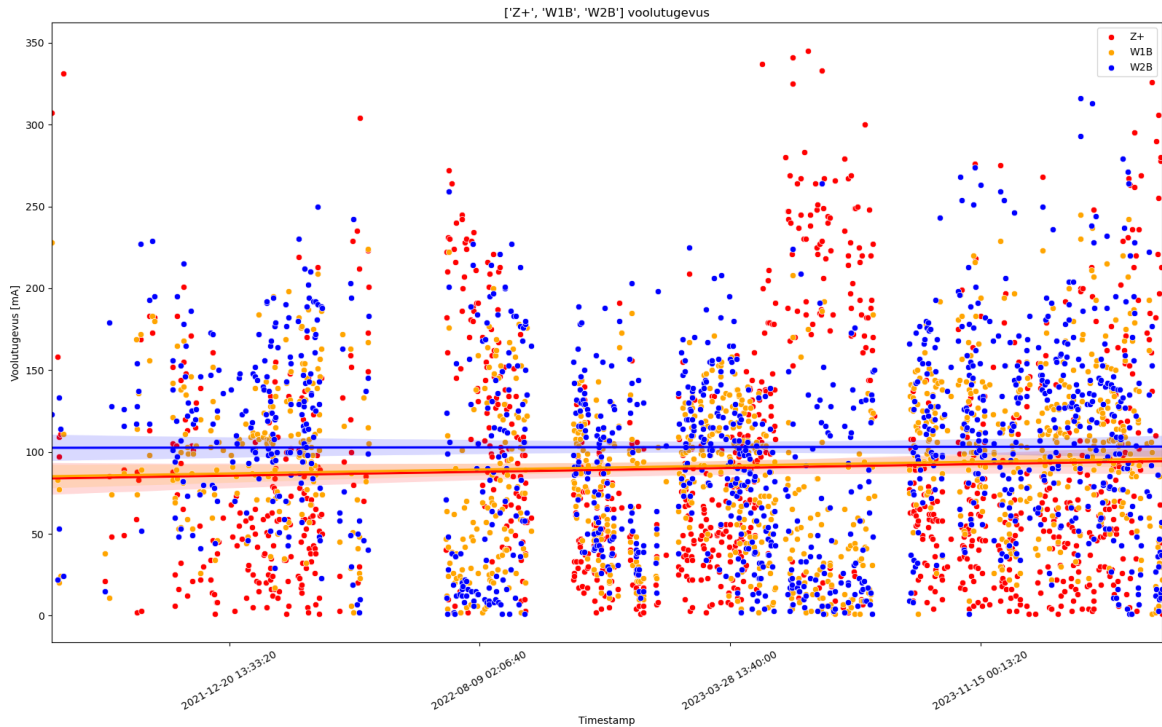


Joonis 6: Maajaama antenn Mekotry katusel.

Kõik satelliidi andmed on vormistatud suur endian 16-bit registritesse, kus nummeerimine algab nullist. Analoo väärtused on loetud iga 10ms tagant, kuid kuna kõiki väärtusi ei saa samal ajal lugeda, siis analoog-digitaalmuundurid salvestavad väärtusi iga 100ms tagant. Pinge ja voolutugevus on mõõdetud 10 korda, maksimum/miinum väärtused kõrvaldatud ja kaheksast keskmine on salvestatud registrisse. Siin peab ka mainima, et mõõdetakse üle kõikide paneelide iga 10 ms tagant. Pinge mõõtmiseks kasutatakse analoog-digitaalmuundurit MAX11617, mille mõõtmise suhteline täpsus on  $\pm 1$  mV ja sisemise võimendi täpsus on  $\pm 4$  mV. Voolutugevuse mõõtmiseks kasutatakse ideaaldioode LTC4415, kus mõõtetakisti on  $499 \Omega \pm 0,1 \%$ . Temperatuuriandur on DS18B20, mille täpsus on  $\pm 0,5$  °C ja mõõteulatus on + 125 °C.

## 2 Andmete analüüs

Andmete analüüs põhineb satelliidi poolt saadetud andmetel, mis on kogutud september 2021 kuni jaanuar 2024 jooksul. Andmetes on olemas iga 9 paneeli jaoks volutugevus, pinged ja temperatuur. Võimsuse leidmiseks saab kasutada Oomi seadust.



Joonis 7: Z+, W1B ja W2B paneelide volutugevused ja pinged koos lineaarregressiooniga.

Voolutugevusi ei saa me antud töös analüüsiks kasutada, kuna satelliit kasutab päikesepatareide poolt toodetud energiat ainult alamsüsteemide käigus hoidmiseks ja akude laadimiseks. Ehk kui akupatareid on täis ja toitmist ei ole vaja, siis ei saaks teha vahet, kas satelliit on varjus või mitte, sest paneele ei pea kasutama. See tähendab, et ei saa näiteks I-V kõveraid luua, kuna seal on vaja maksimum voolutugevusi ja pingeid uurida, mida meie satelliit ei kasuta eriti tihti.

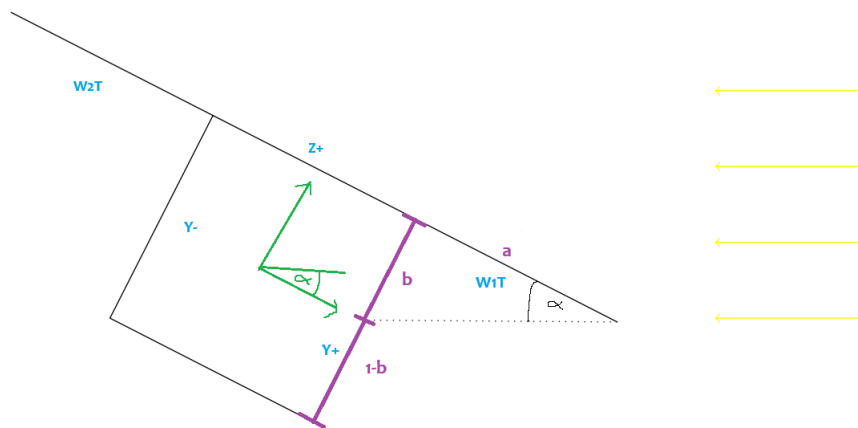
Kuna andmeid on palju 4 aasta jooksul ning satelliit saadab ~ 5-10 väärtust iga ülelennu ajal, siis on kasulik leida nendest väärtusteks maksimumid. Joonisel 7 on tehtud nii, et on võetud igast tunnist maksimum voolutugevus. Joonisele on ka peale pandud lineaarregressiooni joon, et anda aimu, kuidas voolutugevused võiks ajas muutuda.

Degredatsiooni uurimiseks peab andmetest eemaldama mõju, mis tuleneb päikesepaneelide nurgast Päikese valgusest. Selleks peab leidma selle nurga ja siis vaatama ainult päikesekiirguse mõju voolutugevusele. Nurga leidmise teeb raskeks selle, et satelliit ise pöörleb kosmoses. Seda põhjusel, et ADCS moodul, mis peaks satelliidi asendit korrigeerima, ei tööta. Sellega kaasneb ka see, et ei saa kasutada ADCS moodulis olevaid sensoreid (magnetomeeter, päikese sensor, güroskoop). Ehk peab leidma muu viisi, kuidas määrata satelliidi asendit Päikese suhtes.

Kuna satelliit on langemas atmosfääri, siis hakkab takistusjõud mõjutama tema asendit. See asend hakkab stabiliseeruma, mida madalamal kõrgusel ta on ning lõpuks satelliit valib stabiilsema asendi tulenevalt sellest, mis on kõige aerodünaamiline. Antud satelliidi juhul oleks see  $z$  telje suunas, kus  $Z^-$  paneel on liikumise suunas ja  $Z^+$  ning tiivad on vastassuunas. See peaks ka tähendama, et aja jooksul peaks  $Z^+$ ,  $W1B$ ,  $W1T$ ,  $W2B$  ja  $W2T$  paneelid olema kõige stabiilsemad, sest nende asend ei liigu nii palju kui teised paneelid, mis võivad pöörelda ümber  $z$  telje ning võivad võnkumised esineda.

## 2.1 Kahemõõtmeline probleem

Proovime analüüsida paneelide voolutugevust vaadeldes satelliiti kahemõõtmelisena. Siin kasutame samu nimetusi, nagu päris satelliidil.



Joonis 8: Kahemõõtmeline satelliit.

Oletame, et iga satelliidi paneeli karakteristikud on samad ja et kõik tahud on sama pikkusega, mis on 1 m.

Paneeli voolutugevuse sõltuvus päikese langemisnurgast on

$$I = I_{max} \cdot \cos(\alpha). \quad (1)$$

$$I = I_{max} \begin{cases} \cos \alpha, & \text{kui } 0^\circ < \alpha < 90^\circ. \\ 0, & \text{mujal.} \end{cases} \quad (2)$$

Siin peab ka arvestama tiiva poolt küljele heidetava varjuga. Jooniselt 8 on näha, et  $\frac{b}{a} = \tan(\alpha) \Rightarrow b = a \cdot \tan(\alpha)$ . Kuna päikesevalgus satub ainult  $1 - b$  oleval osale paneelile, siis  $1 - b = 1 - a \cdot \tan(\alpha)$ . Kui arvestada, et  $a = 1$ , siis voolutugevus on

$$I = I_{max} \cdot \cos(\alpha) \cdot (1 - \tan(\alpha)). \quad (3)$$

Koosinusega läbi korrutades saab

$$I = I_{max} \cdot (\cos(\alpha) - \sin(\alpha)). \quad (4)$$

See valem kehtib ainult siis, kui  $0 < \alpha < \frac{\pi}{4}$ . Kui  $\alpha < 0$ , siis tuleb arvesse valem (1).  $\alpha < -\frac{\pi}{2}$  ja  $\alpha > \frac{\pi}{4}$  korral on voolutugevus 0. Siin võtame kasutusele sellised tähised, kus tiibade all olevad paneelid on W1B ja W2B, tiibade peal olevate paneelide jaoks arvestame ainult Z+, Z- puudub ning alles jäänud paneelid on X+ ja X-.

Ehk siis kõik kokku pannes saab

$$I_{Y+} = I_{max} \begin{cases} \cos \alpha, & \text{kui } \frac{3\pi}{2} < \alpha < 0, \\ \cos \alpha - \sin \alpha, & \text{kui } 0 < \alpha < \frac{\pi}{4}, \\ 0, & \text{mujal.} \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{Z+} = I_{max} \begin{cases} \cos(\alpha - \frac{\pi}{2}) = \sin \alpha, & \text{kui } 0 < \alpha < \pi, \\ 0, & \text{mujal.} \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{Y-} = I_{max} \begin{cases} -\sin \alpha - \cos \alpha, & \text{kui } \frac{3\pi}{4} < \alpha < \pi, \\ -\cos \alpha, & \text{kui } \pi < \alpha < \frac{3\pi}{2}, \\ 0, & \text{mujal.} \end{cases} \quad (7)$$

$$I_{W2T} = I_{max} \begin{cases} -\sin \alpha, & \text{kui } \pi < \alpha < \frac{3\pi}{2}, \\ -\sin \alpha - \cos \alpha, & \text{kui } \frac{3\pi}{2} < \alpha < \frac{7\pi}{4}, \\ 0, & \text{mujal.} \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{W1T} = I_{max} \begin{cases} \cos \alpha - \sin \alpha, & \text{kui } \frac{5\pi}{4} < \alpha < \frac{3\pi}{2}, \\ -\sin \alpha, & \text{kui } \frac{3\pi}{2} < \alpha < 2\pi, \\ 0, & \text{mujal.} \end{cases} \quad (9)$$



Joonis 9: Paneelide voolude teoreetiline sõltuvus Päikese suunast.

Jooniselt 9 on näha, et tekib 8 vahemikku, kus peab eraldi arvutama voolutugevusi. Siin on kasulik jagada voolutugevusi omavahel, et saada lahti  $I_{max}$  tundmatust.

Vahemike kaupa näeb välja nii:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq 0 : \quad \frac{I_{W1T}}{I_{Y+}} = \frac{-\sin \alpha}{\cos \alpha}, \quad (10)$$

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{4} : \quad \frac{I_{Y+}}{I_{Z+}} = \frac{\cos \alpha - \sin \alpha}{\sin \alpha}, \quad (11)$$

$$\frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{4} : \quad I_{Z+} = I_{max} \sin \alpha, \quad (12)$$

$$\frac{3\pi}{4} \leq \alpha \leq \pi : \quad \frac{I_{Z+}}{I_{Y-}} = \frac{\sin \alpha}{-\sin \alpha - \cos \alpha}, \quad (13)$$

$$\pi \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{4} : \quad \frac{I_{W2T}}{I_{Y-}} = \frac{-\sin \alpha}{\cos \alpha}. \quad (14)$$

Nüüd peab arvesse võtma kolme paneeli voolutugevused.

$$\frac{5\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2} : \quad \frac{I_{W1T} + I_{W2T}}{I_{Y-}} = \frac{\cos \alpha - \sin \alpha - \sin \alpha}{\cos \alpha}, \quad (15)$$

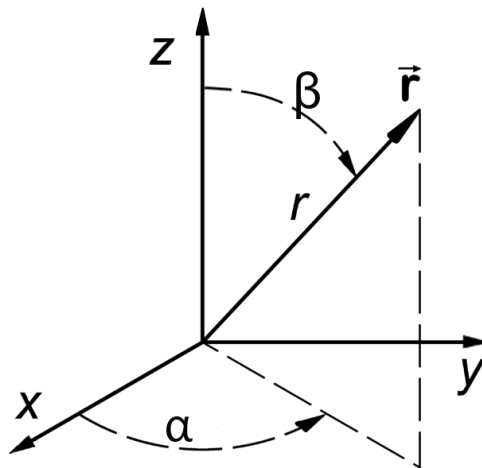
$$\frac{3\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{7\pi}{4} : \quad \frac{I_{W1T} + I_{W2T}}{I_{Y+}} = \frac{-\sin \alpha - \cos \alpha - \sin \alpha}{\cos \alpha}, \quad (16)$$



$$\frac{7\pi}{4} \leq \alpha \leq 2\pi : \quad \frac{I_{W1T}}{I_{Y+}} = \frac{-\sin \alpha}{\cos \alpha}. \quad (17)$$

## 2.2 Kolmemõõtmeline kuubik

Enne kolmemõõtmelise satelliidini jõudmiseni peame uurima, kuidas voolutugevus sõltub kolmemõõtmelisel kuubiku-kujulisel satelliidil. Sellist satelliiti saab vaadelda kui sellist, millel puuduvad tiivad. Siin me jällegi kasutame satelliidist tulevaid tähiseid, et märkida paneele. Sellele lisaks, kasutame polaarkoordinaatidest tulevaid nurki  $\alpha$  (asimuut) ja  $\beta$  (tõusunurk). Koordinaatide alguspunkt on satelliidi keskel. Siin amplituud rolli ei mängi, kuna Päikese kiired on paralleelsed ja me eeldame, et Päikese kaugus satelliidist on konstantne.  $\alpha = 0$  ja  $\beta = 90$ , siis kui nad on X telje positiivses suunas, ehk X+ paneeli keskel.



Joonis 10: Sfäärilised koordinaadid  $\alpha$  ja  $\beta$ . Siin  $\vec{r}$  näitab Päikese suunda satelliidi keskaiga suhtes.

X-Y suunas tuleb

$$\begin{aligned} I_{X+} &= I_{max} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta, \text{ kus } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha, \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ I_{Y+} &= I_{max} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta, \text{ kus } -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \text{ ja } 0 \leq \alpha \leq \pi \\ I_{X-} &= -I_{max} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta, \text{ kus } -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \text{ ja } \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2} \\ I_{Y-} &= -I_{max} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta, \text{ kus } -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \text{ ja } \pi \leq \alpha \leq 2\pi. \end{aligned} \quad (18)$$

X-Z suunas tuleb

$$\begin{aligned}
 I_{X+} &= I_{max} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta, \text{ kus } -\pi \leq \beta \leq 0 \text{ ja } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\
 I_{Z+} &= I_{max} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta, \text{ kus } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha, \beta \leq \frac{\pi}{2} \\
 I_{X-} &= -I_{max} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta, \text{ kus } \frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{3\pi}{2} \text{ ja } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\
 I_{Z-} &= -I_{max} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta, \text{ kus } -\pi \leq \beta \leq 0 \text{ ja } -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Kui Päikese käes on kolm paneeli X+, Y+ ja Z+, siis saab valemid

$$\frac{I_{X+}}{I_{Z+}} = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \tan \beta, \tag{20}$$

$$\frac{I_{Y+}}{I_{X+}} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha. \tag{21}$$

Nendest valemitest saab, et

$$\beta = \arctan\left(\frac{I_{X+}}{I_{Z+}}\right), \tag{22}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{I_{Y+}}{I_{X+}}\right). \tag{23}$$

### 2.3 Kolmemõõtmeline satelliit

Satelliidi jaoks vaatleme viite paneeli X+, Y+, Z+, X- ja Y-. Siin valem (21) veel kehtib, kuid  $\alpha$  jaoks tekib uus valem

$$\frac{I_{Y+}}{I_{X+}} = 1 - \tan \alpha \Rightarrow \alpha = \arctan\left(1 - \frac{I_{Y+}}{I_{X+}}\right) \tag{24}$$

See valem kehtib siis, kui Y+ paneel on tiiva varjus, muidu kehtib valem (23). Kuna X+ paneeli saab ainult võrrelda Z+ paneeliga siis, kui  $-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq 0$ , siis peab kasutusele võtma X-, et suuremaid väärtusi leida. Sama juhtub ka  $\alpha$  korral, ehk peab Y- paneeli arvesse võtma.

$$\begin{aligned}
 \frac{I_{X-}}{I_{Z+}} &= -\tan \beta \Rightarrow \beta = \arctan\left(-\frac{I_{X-}}{I_{Z+}}\right), \\
 \frac{I_{Y-}}{I_{X+}} &= -1 - \tan \alpha \Rightarrow \alpha = \arctan\left(-1 - \frac{I_{Y-}}{I_{X+}}\right).
 \end{aligned}$$

$\alpha$  arvutades on positiivse väärtuse korral võrdlemine Y+ ja X+ paneeli vahel. Tiib heidab Y+ paneelile varju ainult siis, kui  $-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$ . Ehk siis on kaks valemite positiivse  $\alpha$  väärtuse jaoks. Sama kehtib ka negatiivse jaoks, kus võrreldatakse Y- paneeliga.

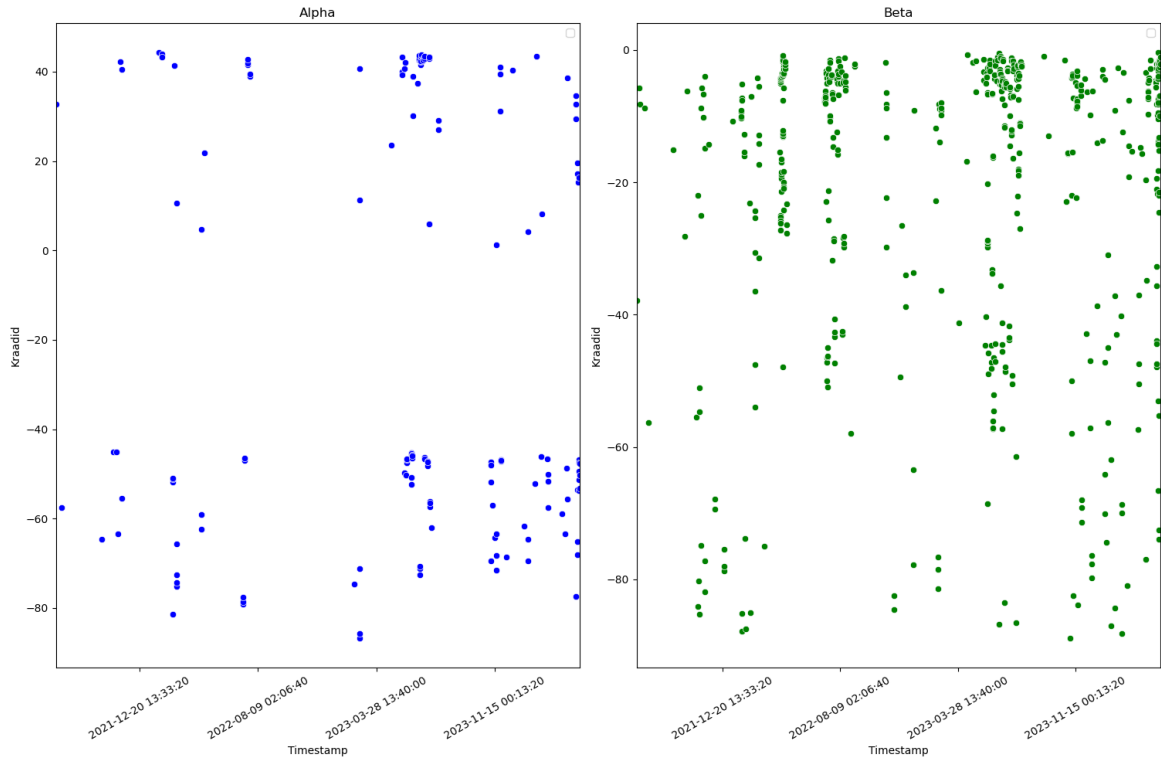
Algoritm töötab nii, et algselt leidakse  $Y_+$ ,  $Y_-$  suhes  $\alpha$  ja siis  $Z_+$ ,  $X_+$  ja  $X_-$  suhtes  $\beta$ .

$$\begin{aligned}\alpha_{Y_+} &= \arctan\left(1 - \frac{I_{Y_+}}{I_{X_+}}\right), \quad \alpha_{Y_+\beta_0} = \arctan\left(\frac{I_{Y_+}}{I_{X_+}}\right), \\ \alpha_{Y_-} &= \arctan\left(-1 - \frac{I_{Y_-}}{I_{X_-}}\right), \quad \alpha_{Y_-\beta_0} = \arctan\left(-\frac{I_{Y_-}}{I_{X_-}}\right), \\ \beta_{X_+} &= \arctan\left(\frac{I_{X_+}}{I_{Z_+}}\right), \quad \beta_{X_-} = \arctan\left(-\frac{I_{X_+}}{I_{Z_+}}\right).\end{aligned}$$

Siit tuleb siis, et

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{Y_-}, & \text{kui } \beta_{X_+} = 0 \text{ või } \beta_{X_+} = -\frac{\pi}{2} \text{ ja } \alpha_{Y_+} \leq 0 \text{ või } \alpha_{Y_+} \geq \pi, \\ \alpha_{Y_-\beta_0}, & \text{kui } \alpha_{Y_+} \leq 0 \text{ või } \alpha_{Y_+} \geq \pi, \\ \alpha_{Y_+}, & \text{kui } \beta_{X_+} = \pi \text{ või } \beta_{X_+} = -\pi \text{ ja } \alpha_{Y_+} \leq 0 \text{ või } \alpha_{Y_+} \geq \pi, \\ \alpha_{Y_+\beta_0}, & \text{kui } \alpha_{Y_+} \leq 0 \text{ või } \alpha_{Y_+} \geq \pi. \end{cases} \quad (25)$$

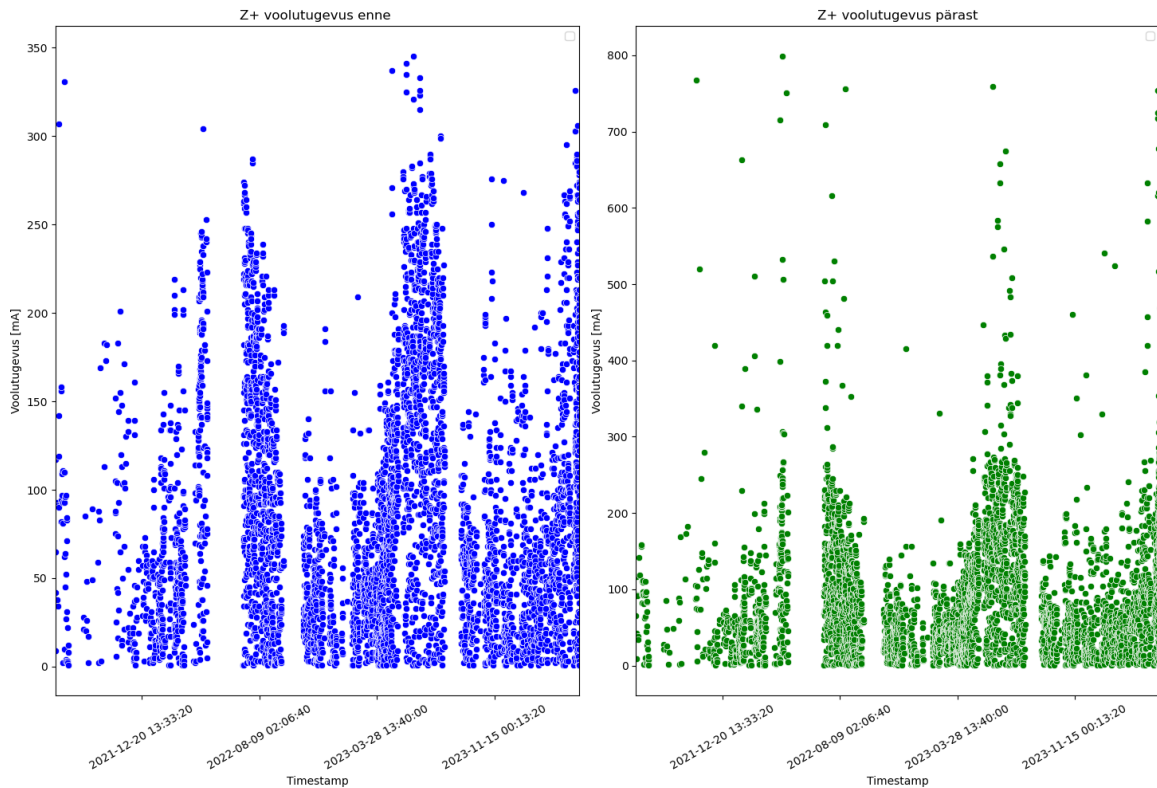
$$\beta = \begin{cases} \beta_{X_-}, & \text{kui } \beta_{X_+} \geq 0, \\ \beta_{X_+}, & \text{mujal.} \end{cases} \quad (26)$$



Joonis 11: Arvutatud nurgad  $Z_+$  paneeli suhtes.

Kuna nüüd on nurgad  $Z_+$  paneeli suhtes leitud, siis saab kasutada valemit  $I_{max} = \frac{I_{Z_+}}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}$ ,

et leida korrigeeritud voolutugevused. Nendes nurkades on mõningaid huvitavaid märkusi. Nimelt,  $\beta$  väärtused on ainult 0 ja  $-\frac{\pi}{2}$  vahemikus, mis eeldab, et ainult  $\beta_{X+}$  kasutatakse nurga arvutamisel.



Joonis 12: Andmetest tulevate ja korrigeeritud voolutugevuste erinevus X+ paneeli juhul.

Nendest andmetest on näha, et voolutugevuse korrigeerimine tugevalt ei muutnud väärtuste jaotust. See võib tulla sellest, et nagu varem mainitud, voolutugevus ei ole täpselt korreleeritud Päikese asendiga. Ainuke muutus on see, et voolutugevuste väärtuste skaala on suurenenud, ehk kui enne on voolutugevused 350 mA, siis pärast on kuni 800 mA. Nii kõrgeid voolud tehniliselt päikeseplatari jaoks võimalikud ei ole ning andmete analüüsimise protsessis pidi ka ekstreemsemaid väärtusi eemaldama (näiteks neid, mis on negatiivse voolutugevusega). Sama mudelit prooviti ka kasutada pingete jaoks, kuid seal tulid nurkade erinevused minimaalsed ( $40^\circ$  ja  $45^\circ$  vahel) arvatavasti sellepärast, et pingete väärtused ei erine nii palju paneelist paneelile, kui voolutugevuse korral.

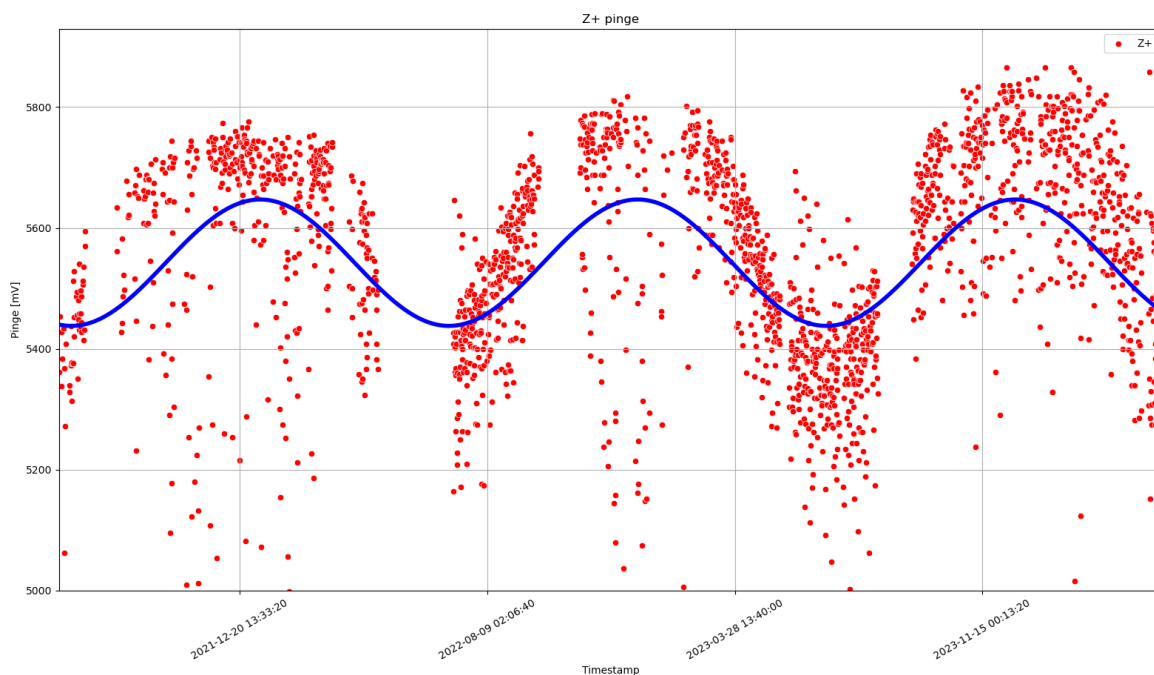
Kahjuks osutus loodud mudel ebasobivaks Hämariku positsiooni määramiseks Päikese suhtes, kuna päikeseplatari ei hoita kogu aeg maksimaalse tootlikuse punktis vaid tarbitakse energiat vastavalt vajadusele. Antud mudelil on suur potentsiaal kasutamaks uue loodava tudengisatelliidi positsiooni kontrollimiseks.

## 2.4 Pinge ja temperatuur

Pinge ise ei sõltu nii tugevalt päikesekiirgusest kui voolutugevus, ehk seda ei saa asendi määramiseks kasutada rakendades eelmises peatükis arendatud mudelit. Kuid pingel toi-

mub endal degredeerumine ajas, mida me saame uurida. Joonisel 13 on näha Z+ paneeli pinget üle terve missiooni, kus on võetud igast tunnist maksimumid. Sinna peale on sobitud koosinusfunktsioon. Sealt on näha, et pingel on omane perioodilisus, kus pinge väärtused on kõrgemad talvel ning madalamad suvel. Selle koosinuse amplituud on 3%, mis klapib Maa liikumisega ümber Päikese, kuna Maa orbiidi lähima ja kaugeima punkti vahe on umbes 3%. Maa kaugus Päikesest iseenest ei ole koosinuse sõltuvusega, kuid Päikese intensiivsus ajas on koosinusega.

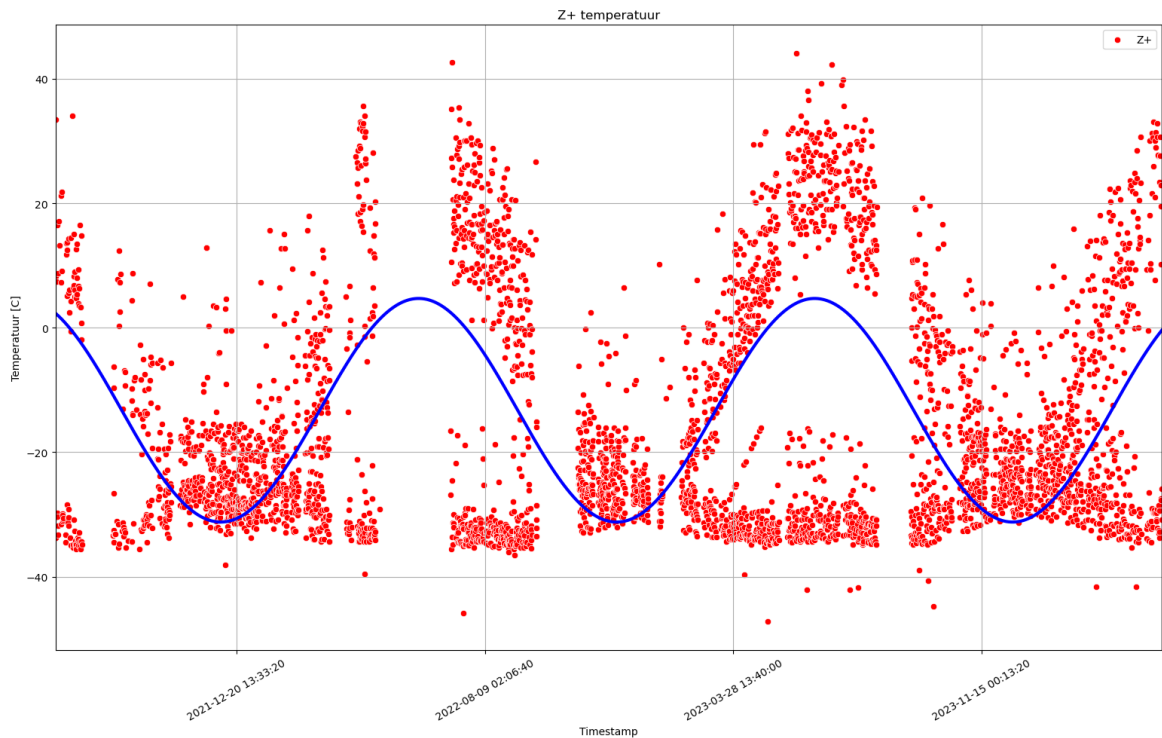
Joonisel 13 on ka näha, et pinge kasvab ajas. Seda juhtuda ei saa kuna siis tõuseks paneeli efektiivsus, ehk peab olema kuskil viga. See viga võib olla näiteks satelliidi sees kuskil elektroonikas tõuseb takistus ja siis pinget mõõtja ei mõõda õigesti.



Joonis 13: Z+ paneeli pingete maksimumid ning sellele sobitatud koosinusfunktsioon.

Teisi paneeli uurides selgus, et perioodilisus esineb vaid tiiva peal olevatel paneelidel, aga mitte satelliidi "kuubiku"peal. See võib viidata sellele, et satelliit on piki z telge stabiliseerunud, ehk x ja y võivad pöörelda igatipidi ning esinevad võnkumised, aga z telje suhtes on satelliit stabiilne.

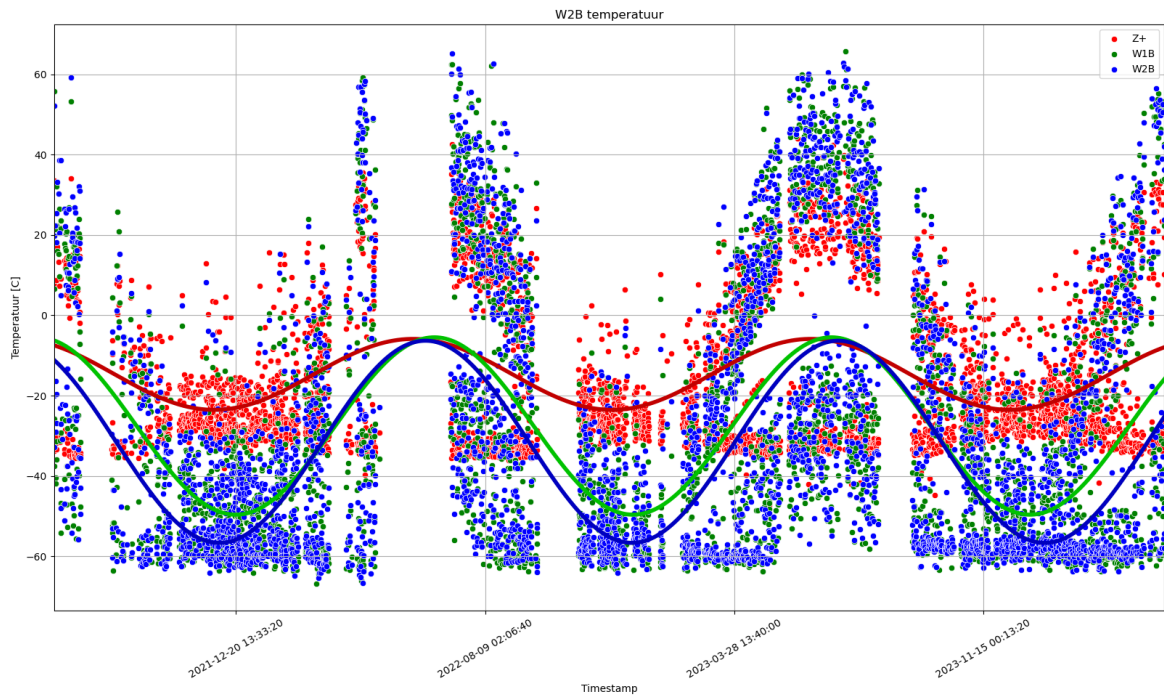
Joonisel 14 on näha, et temperatuuril esineb ka sarnane perioodilisus, ainult teistpidi ehk talvel on külmem ja suvel soojem.



Joonis 14: Z+ paneeli temperatuuride maksimumid ning sellele sobitatud koosinusfunktsioon.

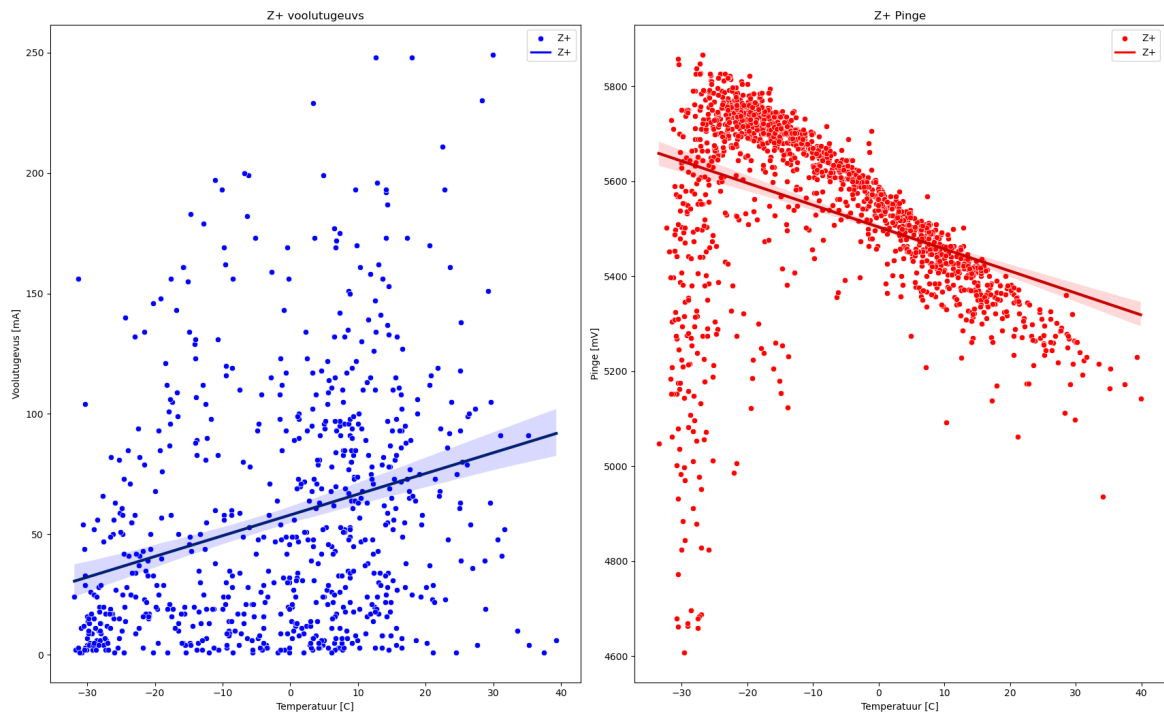
Erinevate paneelide temperatuure vaadates selgus ka, et ühe tiiva peal olevad temperatuurid on väga sarnaste väärtustega. Kui korrelatsioone uurides, siis Wing 1 jaoks oli see 1 ning Wing 2 jaoks 0.99. See tuleneb sellest, et termoandurid tiibade jaoks on sama trükiplaadi peale pandud.

Jooniselt 15 on näha, et Z+ paneeli temperatuur on pidevalt 20° kõrgem, kui tiibadel. Andmeid analüüsid tuleb ka välja, et Z+ keskmine temperatuur on kõrgem võrreldes teiste paneelidega (W1B temperatuur on 4°C, W2B on -8°C ja Z+ on 19°C). See võib tulla selle pärast, et Z+ paneel asub lähemale satelliidi keskele, kus on kõik elektroonika ning sealt eritub soojust. Kuna ta on lähemal massikesele, siis seal on ka suurem soojusmahtuvus.



Joonis 15: W1B, W2B ja Z+ paneelide temperatuuride maksimumid.

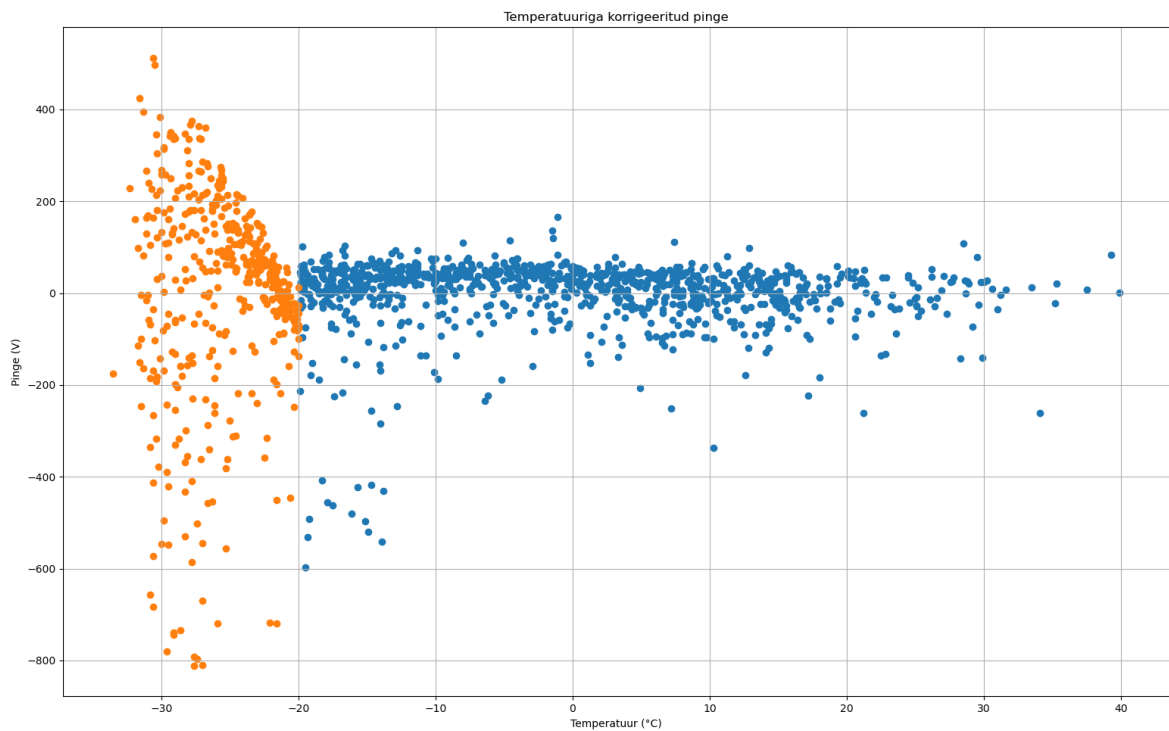
Jooniselt 16 on näha, et voolutugevus ja temperatuuril ei ole väga mingit seost. Kuigi temperatuur sõltub sellest, kui palju paneel on Päikese käes ning see peaks ka voolutugevust mõjutama, siis siin on arvatavasti jällegi see mure, et voolutugevus ei näita paneeli tõelist võimsust. Jooniselt on ka näha et temperatuuri ja pinge vahel on negatiivne seos, mis on klassikaline pooljuhtidele ja päikeseplatade käitumisele, aga ka on välja toodud tootja spetsifikatsioonides.



Joonis 16: Z+ paneeli voolutugevuse/temperatuuri ja pinge/temperatuuri korrelatsioon.

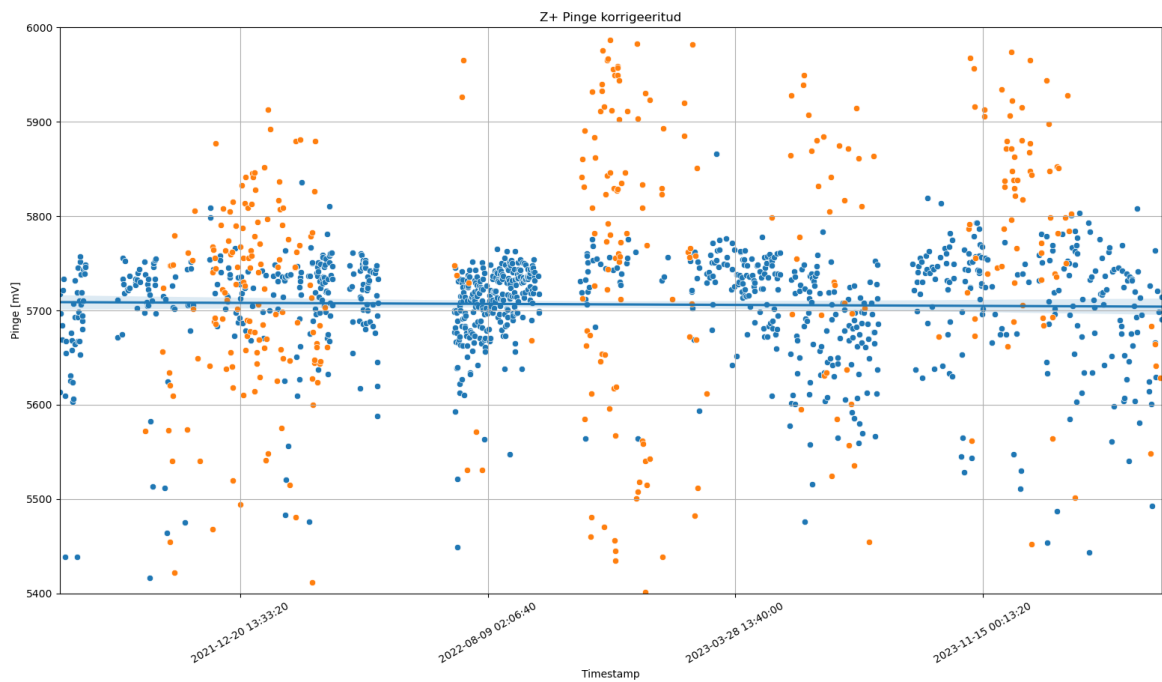
Seda negatiivset korrelatsiooni saab sobitada lineaarkorrelatsiooni kasutades. Siin on jagatud andmed kaheks: need temperatuurid, mis on alla  $-20^{\circ}\text{C}$  ja need, mis on üle. Seda on tehtud sellel põhjusel, et alla  $-20^{\circ}\text{C}$  on pingete väärtused rohkem hajunud ning on raskem määrata lineaarset seost. Ideaalselt joonisel 17 oleks pinged sirgel joonel, kuid jällegi hajuvuse tõttu ei ole alla  $-20^{\circ}\text{C}$  pinged nii.





Joonis 17: Z+ paneeli pinge korrigeeritud temperatuuriga.

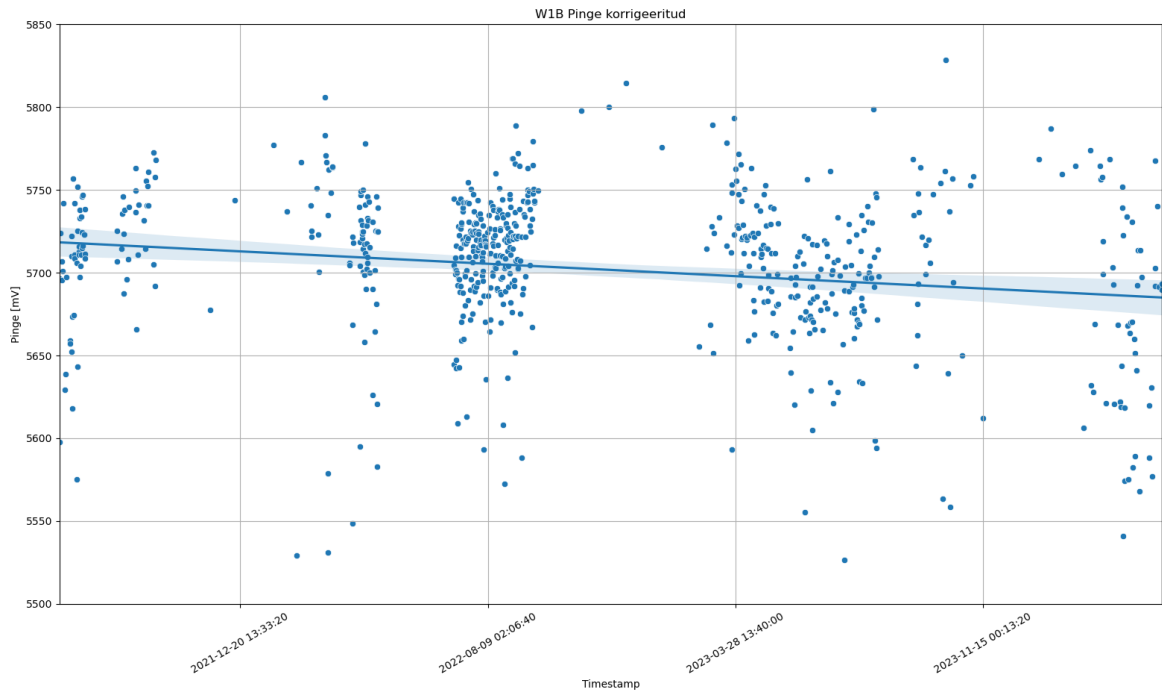
Joonisel 18 on Z+ paneeli pinged korrigeeritud temperatuuriga. Siit on näha, et pingete perioodilisus kaob ära. See tähendab, et pinge ei sõltu Maa kaugusest Päikesega, vaid temperatuurist.



Joonis 18: korrigeeritud Z+ paneeli pinge.

Joonisel 19 on tehtud sama protsess W1B paneelile, mida Z+ paneeli jaoks, ainult pinged

alla  $-20^{\circ}\text{C}$  on välja jäetud. Nendele andmetel on leitud läbi lineaarregressiooni pingede degradatsioon. Reaalsuses see degradatsioon oleks eksponentsiaalne, kuid väikeste muutuste korral on lineaarfunktsioon piisavalt täpne. Siin muutus on umbes  $5710\text{ mV}$  kuni  $5690\text{ mV}$  ehk umbes  $20\text{ mV}$  langus  $3.5$  aasta jooksul. Sama kehtib enamasti teiste tiibadel olevate paneelidega, peale W2T, kus langus on väiksem (umbes  $5\text{ mV}$ ). Külgedel olevate paneelidega on raske lineaarregressiooni teha, kuna väärtused on nii hajunud.



Joonis 19: korrigeeritud W1B paneeli pinged koos lineaarregressiooniga.

## Kokkuvõte

Töö aluseks oli satelliidi poolt saadetud andmed iga 9 päikesepaneeli kohta. Need andmed on salvestatud igast hetkest, mil satelliit on tegemas ülekannet maajmaamaga, kus on kirjas paneeli temperatuur, pinge ja voolutugevus. Nendest andmetest võeti iga ülelennu kohta maksimum väärtused, kuna iga ülelennu kohta oli ~5-10 väärtust.

Päikesepatareide jaoks suur mõju on Päikese asend satelliidi suhtes, kuna see mõjutab voolutugevust väga tugevalt. Kuna satelliidil ei ole viisi enda asendit määrata, siis selle määramiseks saab kasutada voolutugevust. Selleks loodi matemaatiline mudel, mis kirjeldaks voolutugevuse muutust sõltuvalt Päikese nurgast. Mudeli printsiip on selles, et saab satelliidi erinevate paneelide voolutugevusi üksteistega võrrelda, et leida Päikese nurk nende paneelide vahel. Selle põhjal saab leida satelliidi asendi üle kõige lennu. Pärast mudeli kasutamist andmetele voolutugevusele suuri muutusi ei tekkinud. Seda sel põhjusel, et voolutugevus satelliidil ei näita seda voolu, mis tekib paneeli peal vaid seda, mis liigub paneelilt satelliidini ning kuna satelliiti ei pea koguaeg toitma, siis ei saa leida täpset voolutugevust. Antud mudelit saaks rakendada uue satelliidi asendikontrolli puhul.

Päikesepatareide degredatsiooni uurimiseks saab kasutada voolutugevust, pinget või võimsust. Kuna antud juhul voolutugevuse väärtused ei ütle palju, siis siin kasutame pinget. Pinge väärtusi mõjutab väga tugevalt paneeli temperatuur. Et pinge väärtuseid ühtlustada, kasutati lineaarregressiooni temperatuuri ja pinge väärtustele. Siin pidi andmed jagama kahte vahemikku: need pinged, kus temperatuur on väiksem kui  $-20^{\circ}\text{C}$  ja need mis on suuremad. Seda tehti sel põhjusel, et alla  $-20^{\circ}\text{C}$  on andmed on palju rohkem hajunud, nii et lineaarregressioon ei ole nii täpne antud juhul. Pärast seda, pingeid uurides on näha satelliitide tiibade peal olevatel paneelidel langusi pingetes, kus vahe on umbes 30 mV. See muutus kehtib satelliidi tiibadel olevatele paneelidele, aga mitte teistele. Satelliidi pealmisele  $Z+$  paneelile, mis asetseb teiselpool kaameraid, on pinge tõusnud. See muutus eeldaks efektiivsuse kasvu, mida ei saa juhtuda. Viga võib esineda elektroonika veast, kus ahelas on takistus kasvanud, nii et mõõtmised muutuvad. Satelliidi ülejäänud paneelide pinged on liiga hajunud, et täpselt kirjeldada nende degredatsiooni. Havujus võib esineda selle tõttu, et satelliidi asend on stabiliseerunud mööda z telge, kus telg on satelliidi liikumise suunas. See tähendaks, et tiibade nurk Päikese suhtes ei muutuks nii palju, kui satelliidi külgedel.

## Abstract

The basis of this work was data sent from the satellite about the 9 on-board solar panels. This data was collected from each instance that the satellite made contact with the Earth station. This data includes information about each solar panels temperature, voltage and current. From this data, it was possible to take the maximum values during each fly-by, as there were about ~5-10 values during these instances.

The direction of the Sun is a major influence on solar cell current. As the satellite has no way of describing its orientation, we can use the current of the solar cells as a rough estimate. A mathematical model was proposed that would be able to describe the Suns angle from currents. The underlying principle of this model is that you can compare the currents of different solar panels to find the angle of the Suns incoming light. Based on this, you can find the orientation of the satellite over the entire flight. After applying the model, there were no major differences in currents. This is because in the case of this satellite, the currents are not always correlated with the illumination angle of the solar panels, as the solar cells only output current when the satellite requires power. This means that it is not possible to find accurate enough currents. This model could be used in future missions, in tandem with Attitude Control Systems.

While current, voltage or power can be used in the analysis of solar cell degradation, this paper focuses on voltages, as the current of the solar cells are not reliable enough. As the voltage depends heavily on temperature, linear regression was used to find a function, that would describe this relationship. It was important to divide the data into two parts: the voltages below  $-20^{\circ}\text{C}$  and the voltages above  $-20^{\circ}\text{C}$ . This is because the voltages below  $-20^{\circ}\text{C}$  are much more dispersed, meaning that linear regression is not as accurate. After these adjustments, it was possible to use linear regression on the voltages, to find the rate of change. In the solar panels used on the wings of the satellite, the drop in voltage over the entire flight was around 30 mV. The voltage on the solar panel on top of the satellite, opposite the cameras, increased. This increase would assume that the efficiency of the solar cells increased, which is not possible. This might be an electronics error, where there was an increase of resistance in a resistor. The other solar panel voltages are too dispersed to accurately determine the degradation. This dispersion might arise due to the stabilization of the satellite along the z axis, where this axis would be parallel to the direction of travel. This would mean that the angle between the wings and the Sun would not change as much as with the rest of the satellite.

## kasutatud kirjandus

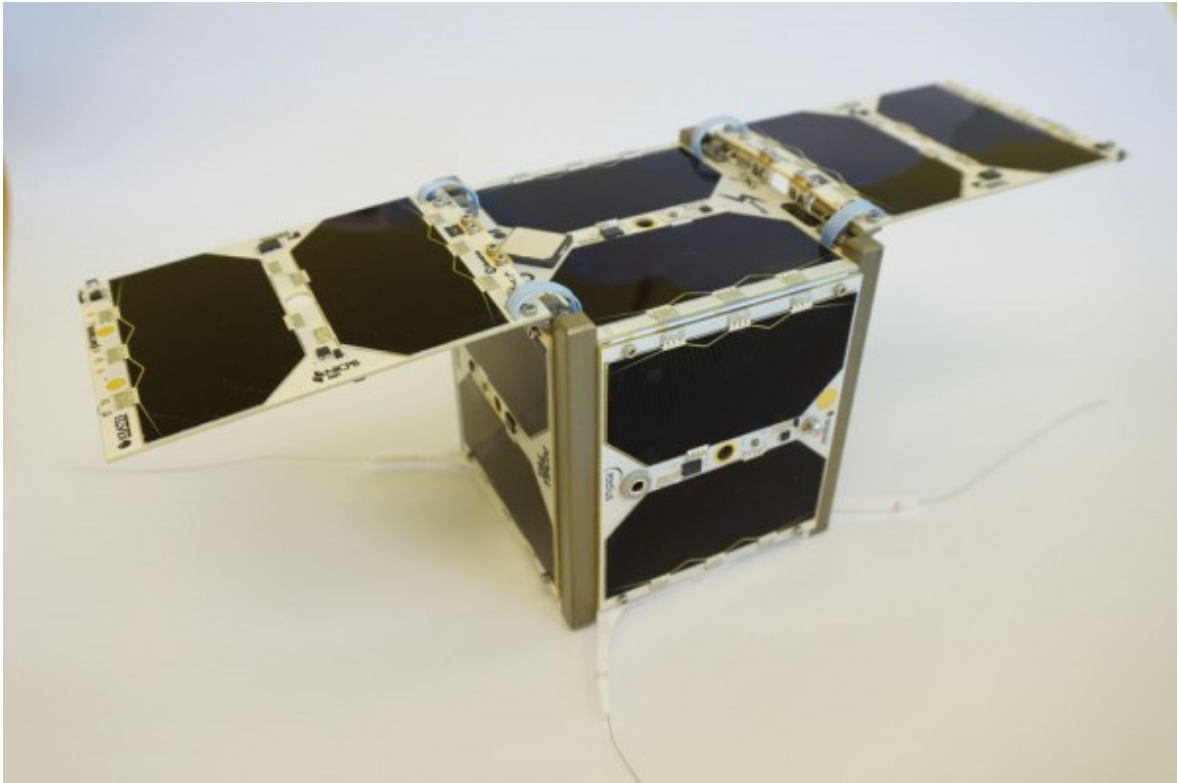
1. Kern, L., Joosepson, R. (2017). Päikeseplatareide valimine ja uurimine TTÜ Mektory satelliidi programmile.
2. Rassõlkin A., et al. (2021). ADCS development for student CubeSat satellites - TalTech case study.
3. Lee, S., et al. (2009) CubeSat Design Specification Rev. 12.
4. <http://www.ece3sat.com/cubesatmodules/eps/> [WWW] (Kontrollitud 19.05.2024)
5. Mahdi C., Mohammed. (2015). Orbit Design and Simulation for Kufasat Nanosatellite. Artificial Satellites. 50. 157-168.
6. Arianespace. (2020). Vega flight VV16 launch kit
7. <https://www.arianespace.com/press-release/with-vega-arianespace-successfully-performs-the-first-european-mission-to-launch-multiple-small-satellites/> [WWW] (Kontrollitud 19.05.2024)
8. <https://satellite.ttu.ee/> [WWW] (Kontrollitud 19.05.2024)
9. AzurSpace (2014). AzurSpace 3G30C Datasheet.
10. Bourgoïn, J.C., Angelis, N. de. (2001). Radiation-induced defects in solar cell materials.
11. Hongliang G., et al. (2018). Degradation analyses of GaInP/GaAs/Ge solar cells irradiated by 70 keV and 150 keV protons by current-voltage curves under various intensities of light.

## **Tänuavaldused**

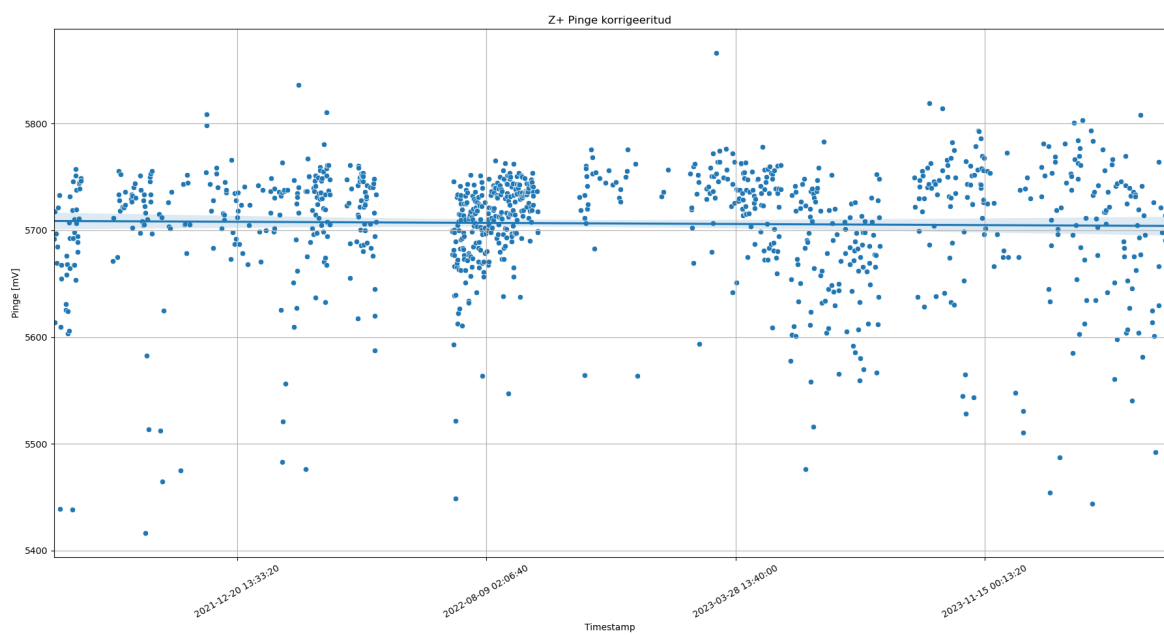
Tahan tänada oma juhendajat Taavi Raadikut ja kaasjuhendajat Veljo Siniveed nõuannete ja abi eest lõputöö koostamisel. Suured tänud nõu ja abistamise eest Ivo Mürsepale, Vladislav Veniamin-Pustõnskile, Raavo Joosepsonile ja Madis Kaalule.

## Lisad

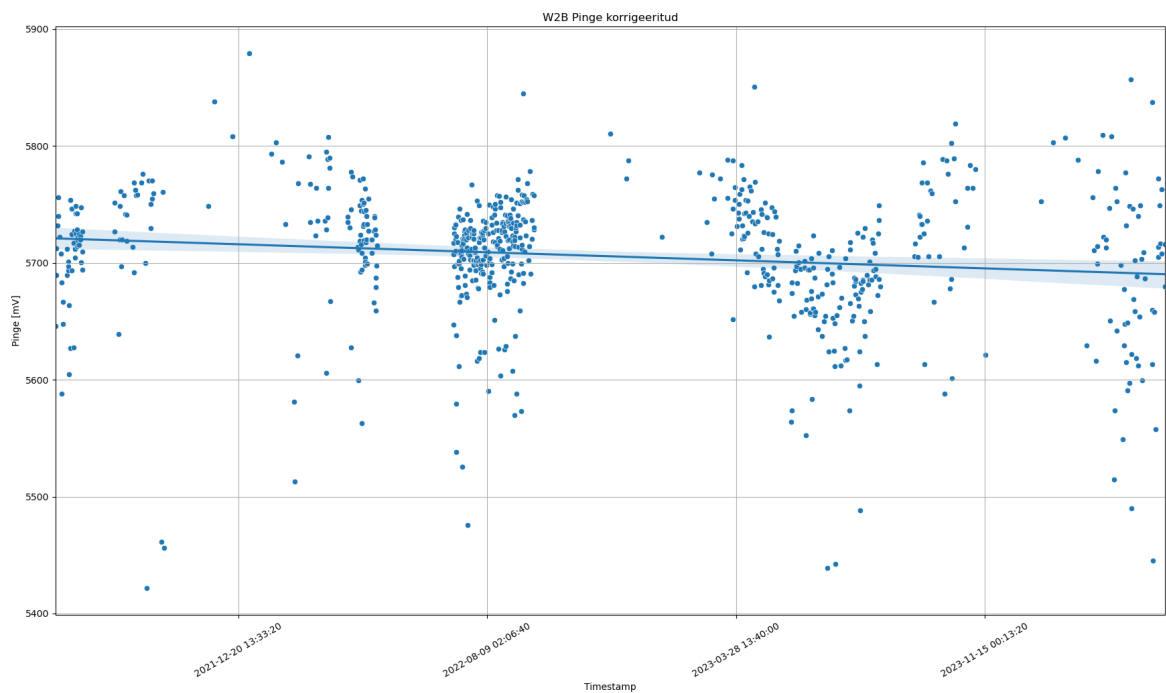
### Lisa 1 TTÜ100 Hämarik



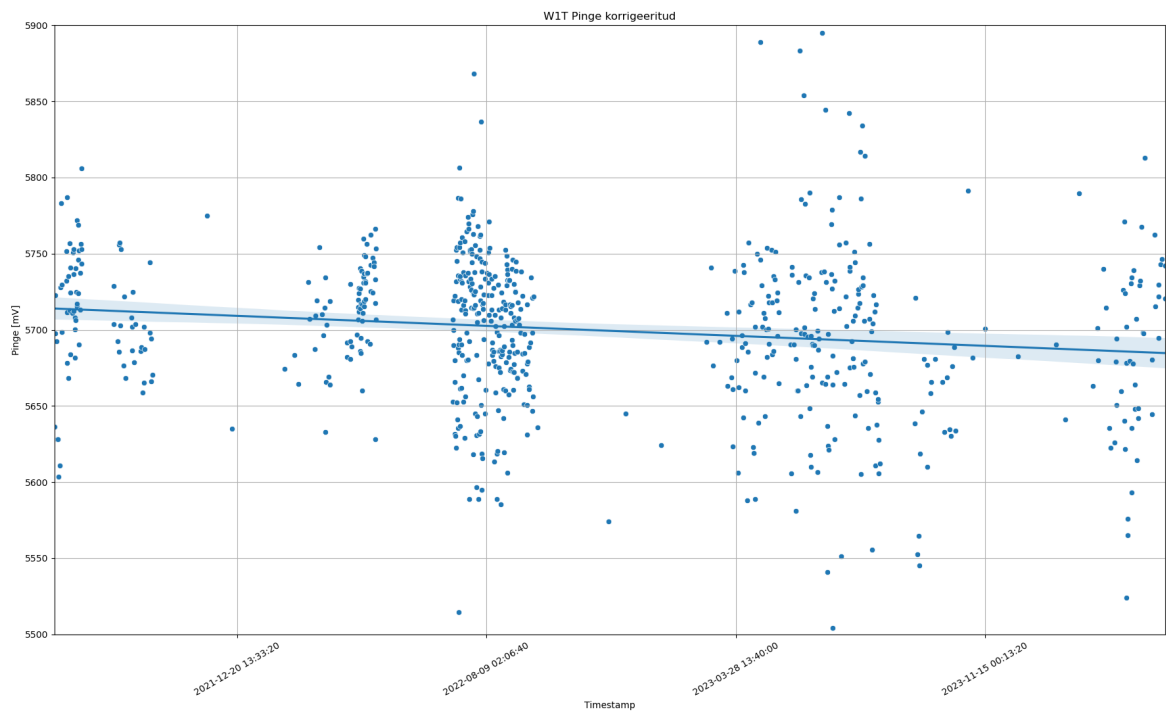
### Lisa 2 Z+ paneeli pinged korrigeeritud temperatuuridega



### Lisa 3 W2B paneeli pinged korrigeeritud temperatuuridega



### Lisa 4 W1T paneeli pinged korrigeeritud temperatuuridega





## Lisa 5 W2T paneeli pinged korrigeeritud temperatuuridega

