



# Eroosiosuojausmenetelmä POC laitteen kehitys ja valmistus

Joonas Siltala

Opinnäytetyö, AMK  
Kesäkuu 2024  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma

**Siltala, Joonas**

## **Eroosiosuojausmenetelmä POC laitteen kehitys ja valmistus**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Kesäkuu 2024**, 54 sivua

Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Opinnäytetyön aiheena oli kehittää ja valmistaa toimeksiantaja Tekninen Laskenta Siltala Oy:lle POC laite uuden eroosiosuojausmenetelmän todentamiseksi. Suunnittelussa tuli kiinnittää huomiota valmistettavuuden, toimivuuden ja laajan vaatimuslistan moninasiin kohtiin.

Opinnäytetyön taustalla oli konseptia kohtaan ilmennyt mielenkiinto yrityksen kontakteissa. Työllä siis lähdettiin kehittämään ratkaisua oikeaan maailmalla vallitsevaan ongelmaan. Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena ja sitä varten perehdyttiin laajasti aallokon ja siitä aiheutuvan eroosion lainalaisuuksiin sekä teoriaan.

Kehittämistyön tuloksena saatiin suunniteltua ja valmistettua mittava koelaitte uuden konseptin todentamiseksi.

### **Avainsanat (asiasanat)**

kehittäminen, tuotekehitys, proof of concept, kehittämistutkimus, suunnittelu, 3D-mallinnus, eroosio, aaltoenergia

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

Liite 2 on salassa pidettävä, ja se on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 21, teknologista tai muuta kehittämistyötä tai niiden arviointia koskevat asiakirjat. Salassapitoaika on kaksikymmentä (20) vuotta, salassapito päättyy 8.6.2044.

**Siltala, Joonas**

### **Erosion protection method POC device development and manufacturing**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, June 2024, 54 pages

Degree Programme in Mechanical Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The topic of the thesis was to develop and manufacture a POC device for the client, Tekninen Laskenta Siltala Oy, to validate a new erosion protection method. The design needed to address manufacturability, functionality, and the diverse aspects of an extensive list of requirements.

The thesis was motivated by the interest shown in the concept by the company's contacts. Thus, the aim was to develop a solution to a real-world problem. The work was conducted as a development study, which involved extensive research into the principles and theory of wave action and the resulting erosion.

As a result of the development work, a substantial test device was designed and manufactured to validate the new concept.

### **Keywords/tags (subjects)**

development, product development, proof of concept, development research, design, 3D modeling, erosion, wave energy

### **Miscellaneous (Confidential information)**

Annex 2 is confidential and has been removed from the public record. The basis for secrecy is Publicity Act 621/1999 § 24, Section 21, documents concerning technological or other development work or their evaluation. The confidentiality period is twenty (20) years, confidentiality ends on June 8, 2044.

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>4</b>
1.1	Kehittämistyön tausta ja tavoitteet.....	4
1.2	Toimeksiantaja .....	5
<b>2</b>	<b>Tietoperusta</b> .....	<b>6</b>
2.1	Meriaaltojen ominaisuuksia.....	6
2.2	Allokon synty .....	9
2.3	Aallokon energia.....	11
2.4	Aallon korkeus, jaksoaika ja tuuli .....	13
2.5	Aallokon painevaikutus.....	14
2.6	Eroosio .....	15
2.6.1	Aaltoeroosion tyypit .....	16
2.6.2	Eroosion seuraukset .....	17
2.6.3	Eroosion esiintyvyys .....	18
2.7	Seawall .....	19
2.8	Seawall tyypit .....	19
<b>3</b>	<b>Tutkimusmenetelmät ja -ote</b> .....	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Työn vaatimukset suunnittelun ja toteutuksen osalta</b> .....	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Toteutus/tulokset</b> .....	<b>23</b>
5.1	Toteutuksen taustaa .....	23
5.2	Paalutus.....	24
5.3	Paalukaulukset .....	24
5.4	Orsikokoonpano .....	28
5.5	Liukuakselikokoonpano .....	30
5.6	Varsikokoonpanot .....	34
5.7	Vaimentimen akselikokoonpano ja FEM laskenta .....	37
5.8	Aalto-ohjuri .....	42
5.9	Vaimennin .....	43
5.10	Kokonaisuus .....	43
<b>6</b>	<b>Pohdinta</b> .....	<b>49</b>
	<b>Lähteet</b> .....	<b>51</b>
	<b>Liitteet</b> .....	<b>53</b>
	Liite 1. Piirustuksia.....	53
	Liite 2. Vaimennin (Salassapidettävä) .....	54

## Kuviot

Kuvio 1. Aallokon korkeuden todennäköisyysjakauma Rayleigh`n mukaan.....	8
Kuvio 2. Jonswapin spektri eli aallokon energiajakauma taajuuden funktiona. ....	9
Kuvio 3. Kohtaavien aaltojen muodostama ristiaallokko, yksinkertaistettu tilanne.....	10
Kuvio 4. Vesipartikkelien liike aallossa.....	11
Kuvio 5. Aallon korkeuden muutos rantaa lähestyttäessä .....	12
Kuvio 6. Aallonkorkeuden ja jaksonajan riippuvuus tuulen nopeudesta ja puhallusmatkasta.	13
Kuvio 7. Aallon painevaikutus rantarakenteeseen. ....	14
Kuvio 8. Hiekkaperäisten rannikoiden osuus maanosittain .....	18
Kuvio 9. Kiilapintaaiset supistusholkit .....	24
Kuvio 10. Paalukauluksen valmistusta .....	25
Kuvio 11. Paalukauluksen testaus yhdellä holkillä ja poikkileikkaus .....	26
Kuvio 12. Paalukauluksen valmistusta .....	27
Kuvio 13. Paalukaulus kulmasäädöllä .....	27
Kuvio 14. Orsikokoonpano .....	28
Kuvio 15. Kannatuskorvakkeiden kokoonpanoa .....	29
Kuvio 16. Orsikokoonpanon nivelpääty .....	29
Kuvio 17. Pintakäsitelty orsikokoonpano .....	30
Kuvio 18. Liukuakselikokoonpano.....	31
Kuvio 19. Liukuakselin kulmasäätö .....	32
Kuvio 20. Nuorrutusteräsakselin esilämmitys.....	33
Kuvio 21. Liukuakseli ja liukulaakerilevyt.....	33
Kuvio 22. Liukulaakerien ja levyen kierteytyt.....	33
Kuvio 23. Koneistetut laakeripesät varsien päissä.....	34
Kuvio 24. Varsien koestusta .....	34
Kuvio 25. Erilaiset laakeripesät.....	35
Kuvio 26. Akselinpäädyn varsikokoonpano.....	36
Kuvio 27. Anturinpäädyn varsikokoonpano .....	36
Kuvio 28. Varsikokoonpanon koneistetut osat.....	37
Kuvio 29. Akselitapin Von Mises jännitykset.....	38
Kuvio 30. Sylinterivipu Von Mises jännitykset.....	39
Kuvio 31. Kuormitustilanne FEM laskennassa.....	40
Kuvio 32. Vaimentimen akselikokoonpano .....	41
Kuvio 33. Vaimentimen akseli .....	41

Kuvio 34. Akselikokoonpanon valmistusta.....	42
Kuvio 35. Aalto-ohjuri .....	43
Kuvio 36. Kokonaisuus 1.....	44
Kuvio 37. Kokonaisuus 2.....	44
Kuvio 38. Kumpikin akselikokonaisuus .....	45
Kuvio 39. Pääkuvat 1-5. ....	46

## **Taulukot**

Taulukko 1. Aallokon ominaisuuksia.....	6
---	---

# 1 Johdanto

## 1.1 Kehittämistyön tausta ja tavoitteet

Valtamerien rannikoilla aalto iskee keskimäärin 3 miljoonaa kertaa vuodessa rantaan. Tästä aiheutuu suojaamattomiin rantoihin voimakasta eroosiota, jonka takia rantapenkat sortuvat vieden mukanaan laitureita, teitä, ja jopa rakennuksia. Rantoja suojataan eroosiota vastaan erilaisilla suojarakenteilla, jotka nekin joutuvat alttiiksi aaltojen kulutukselle. Pitkällä aikavälillä tämä tuhoaa passiiviset suojarakenteet täysin, sillä aalto pääsee iskemään niihin joka kerta täydellä teholla ilman minkäänlaista rajoitusta. Aiheutuva paineisku nitkuttaa rakenteisiin käytettyjä kivenjätkäleitä toisiaan vasten kuluttaen ja murtaen niitä. Nykyisten Seawall rakenteiden materiaalimenekki ja niiden uusimisen tarve on valtava ongelma valtamerien rannikkoseuduilla, sillä niiden kunnostamiseen käytetään miljardeja dollareita vuosittain. Suurempien suojarakenteiden hintaluokka on miljoonia dollareita/metri. Huollettunakin useiden nykyratkaisuiden kestoikä on muutamia vuosikymmeniä, kyse on siten valtavista taloudellisista arvoista. Tilannetta vielä pahentaa valtamerien pinnan nousu, sekä ilmaston muutoksen myötä voimistuvat myrskytuulet ja niistä aiheutuvat aallokot, joten tarve näille ratkaisuille on hyvin akuutti. Tästä kumpuaa myös tilaajan tarve työlle.

Tähän ongelmaan pyritään tarjoamaan ratkaisu, jollaista ei aikaisemmin alalla olla nähty. Yksinkertaistaen ilmaistuna rantarakenteita hajottava aallokon energia pitää vaimentaa siihen soveltuvalla tavalla ja siirtää vaimentimeen kertyvä energia muualle. Tällöin aallosta aiheutuva paineisku aallonmurtajaan pienenee ja suojarakenteille saadaan moninkertainen kestoikä nykyiseen verrattuna. Rajoittamalla ja hidastamalla aallon liikettä voidaan samalla tuottaa uusiutuvaa energiaa.

Opinnäytetyön aiheena on suunnitella, kehittää, mallintaa, dokumentoida ja valmistaa rantarakenteita aaltoeroosiolta suojaavan vaimennusmenetelmän todentamiseen käytettävä POC (proof of concept) laite sen mekaanisilta osuuksiltaan. Työstä jätetään pois mm. anturointeihin, hydraulikkaan ja tiedonsiirtoon liittyvät seikat. Työssä ei myöskään käsitellä materiaalien, tarvikkeiden, raaka-aineiden jne. hankintaa sekä tilaamista koskevia seikkoja ollenkaan, vaikka nämä kaikki yhdessä ovat olleet merkittävä osa kokonaisuutta sekä suuri työllistäjä taustalla. Mittavan suunnitelu- ja kehitystyön pohjalta tullaan valmistamaan koelaitte konseptin toimivuuden todentamiseksi oikeassa ympäristössään. Koelaitteelle suoritetaan opinnäytetyön jälkeen mittavat koeajot sen ympäristövaikutusten arvioimiseksi sekä aikaisempien laskentatulosten varmistamiseksi.

Projektin toteutus kumpuaa yrityksen kontaktien kautta ilmenneeseen kovaan kiinnostukseen kyseisestä konseptista, eikä ihme sillä vastaavaa toteutusta ei alalla vielä ole olemassa kyseiseen tarkoitukseen. Työ on siis uutuusarvoltaan hyvin merkittävä projekti alalla.

## **1.2 Toimeksiantaja**

Toimeksiantaja on Muuramelainen insinööritoimisto, Tekninen Laskenta Siltala Oy. Yritys on vuonna 1994 Turussa perustettu insinööritoimisto. Yrityksen ydinosaaminen on meritekniikan puolella, jossa on työskennelty mm. laivojen, sukellusveneiden, laivalaitteiden yms. parissa. Yritys tekee keskivertoa haastavampien suunnittelutoimeksiantojen ohella myös suunnittelua tukevia teoreettisia laskemia kuten lujuus- ja virtauslaskentaa. Viimevuosina yritys on toiminut myös aktiivisesti infrapuolen teräsrakentamiseen liittyvissä projekteissa suunnittelun ja tuotannon parissa. Suunnittelutoimeksiantojen lisäksi yritys tuottaa myös mm. yksittäiskappaleina prototyyppejä, teollisuuden asennuspalveluja, tuotannon ohjaamista ja erinäisiä koeajoja viranomaistarkoituksiin.



## 2 Tietoperusta

### 2.1 Meriaaltojen ominaisuuksia

Sorensenin mukaan maailman merissä esiintyvät aallot pystytään jakamaan eri kategorioihin niiden syntyperän sekä jaksoajan perusteella. (Sorensenin 2006, 10–11,117)

Taulukko 1. Aallokon ominaisuuksia

	AALTO	JAKSOAIKA [s]	KORKEUS [m]
1	Maankuoren liikkeistä aiheutuvat geologiset aallot	5min- 1 h, kertaluontoisia	0.6–100 m
2	Kuusta ja auringosta aiheutuvat vuorovesiaallot	n. 12 h, jatkuvia	jopa 13 m
3	Myrskytuulen veden kuljetuksesta sekä ilmanpaineen imun ja puhalluksen vaihtelusta aiheutuvat sääaallot	1d – 1w, kertaluontoisia	1–3 m
4	Vesillä liikkuvien alusten aiheuttamista satunnaisista perä- ja keula-aalloista	1–3 s, satunnaisia	1–2 m
5	Tuulen aiheuttama säännöllisen spektrin jatkuva aallokko	1–30 s, jatkuva spektri	valtamereillä 30 m, sisämerillä alle 6 m

Yllä olevan taulukon lisäksi:

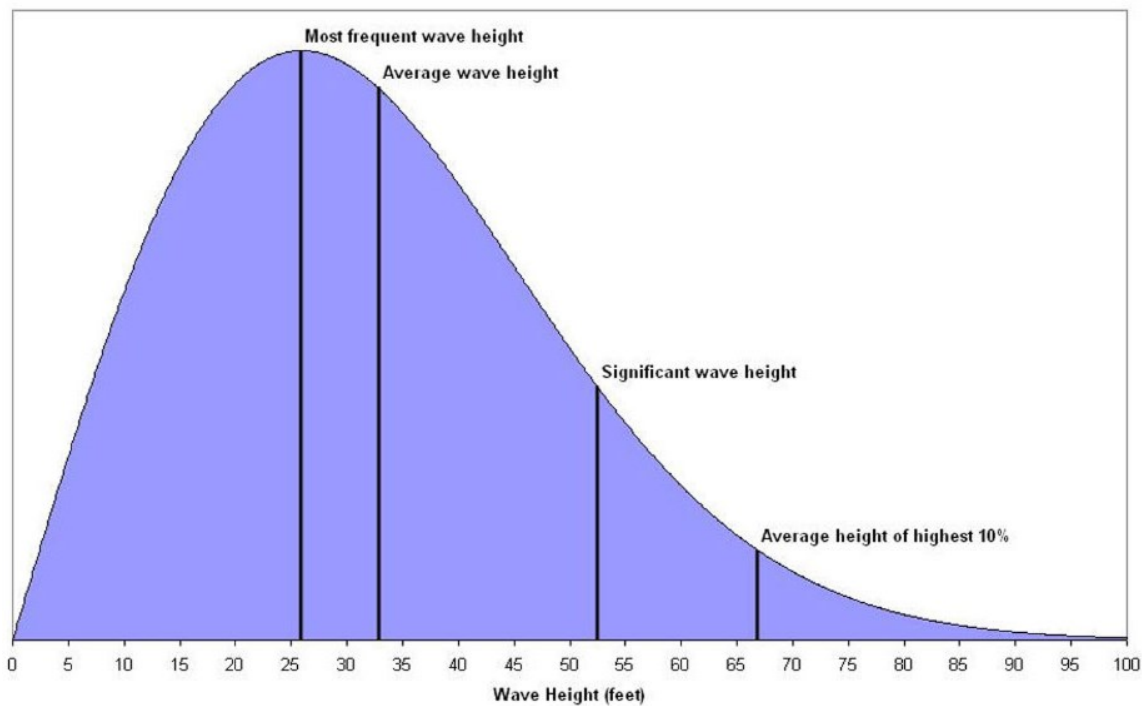
1. Geologiset aallot eli tsunamit sisältävät valtavasti energiaa ollen ihmisen hallintamahdollisuuksiin nähden ylivoimaisia. Tuloksena onkin mittavaa tuhoa. (Sorensen 2006, 10.)
2. Vuorovesiaalloilla on merkittävästi energiaa, mutta sen hyödyntäminen on vaikeaa. Aallon korkeus ja siitä aiheutuvat virtaukset vaihtelevat täysin ennustettavalla tavalla ja ovat taukoituina merenkulkijoita varten lähes koko maapallolla.
3. Sääaallot sisältävät paljon potentiaalienergiaa, ollen tuhoisia ylittäessään niitä vastaan rakennetut rakenteet, esim. hurrikaani Katrina New Orleansissa 2005.
4. Alusten keula- ja peräaallot aiheuttavat eroosiota väylien rannoilla.
5. Säännöllisintä, hyvin yleistä sekä työn kannalta relevanttia aallokkoa edustavat tuulen aiheuttamat aallot, jotka saapuvat syvän avoveden alueilta rantaan muuttaen muotoaan.

Sorensen (2006, 21) painottaa että meriaallokko ei ole monotonista vaan aalloilla on spektrimuotoinen jakauma eri korkuisia aaltoja, riippuen tarkastelupaikan vesialueen koosta ja vallitsevista tuulista. Aallokon korkeusjakauman on yleisessä tapauksessa esim. vuoden seurantajaksolla todettu noudattavan Rayleigh'n jakaumaa.

Kuviossa 1 on esitetty Rayleigh'n korkeusjakauma erään hirmumyrskyn aallokelle. Kuvion asteikko loppuu 100 jalkaan, sillä siitä korkeammat aallot ovat teorian mukaan jo niin harvinaisia, ettei niiden huomioiminen muuttaisi jakaumaa mitenkään. Pysty akselin kuvaajassa on aaltojen todennäköisyys  $P$  (probability) kullakin  $x$ -akselin aallonkorkeudella. Kaavion pinta-ala vastaa kaikkien aaltojen yhteistä todennäköisyyttä tarkastelujaksolla, ollen tasan 1. Selvitettäessä tietyn korkuisten aaltojen lukumäärää tarkastelujaksolla, otetaan  $X$ -akselilta pieni siivu ja lukumäärä on ajanjakson kokonaisuusmäärä kerrottuna tuon siivun pinta-alalla. Kaikkien siivujen kokonaissumma on siis 1.

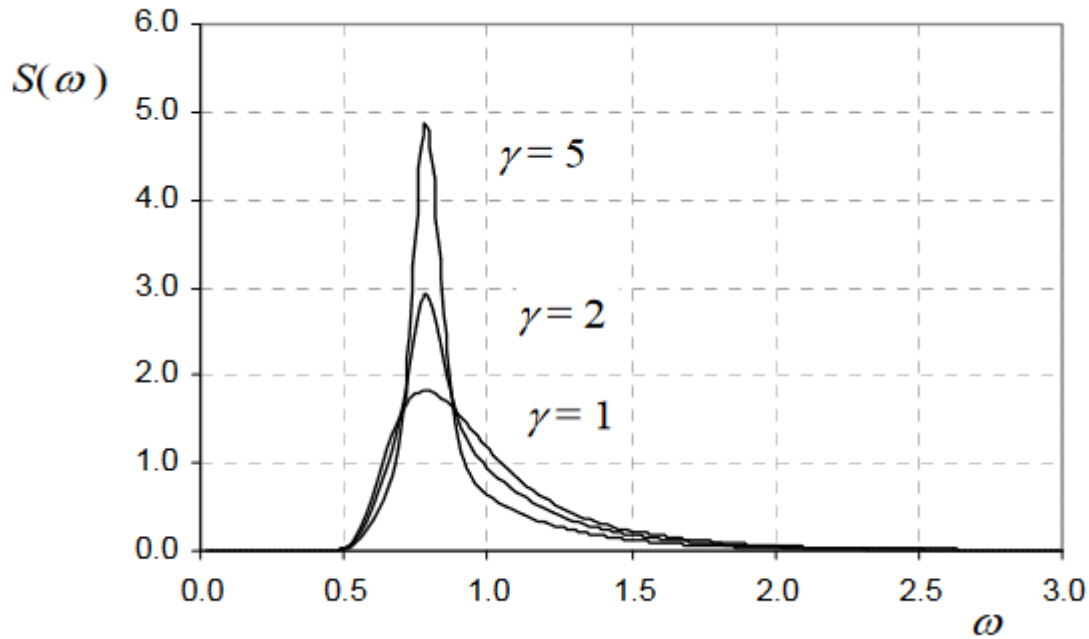
Rayleigh'n jakauman  $x$ -akselin kohdassa 0.525 maksimiaallonkorkeudesta sijaitsee niin kutsuttu merkittävä aallonkorkeus. Se on aallonkorkeus, jonka kokenut tarkkailija visuaalisesti aallokkoa tarkkaillessaan yleensä ilmoittaa. Se on aaltojakauman suurimman kolmanneksen keskiarvo.

Merkille pantavaa on myös se, että suurimman esiintymistodennäköisyyden aallonkorkeus (missä käyrä on korkeimmillaan ja tämän kokoisia aaltoja esiintyy eniten) on olennaisesti alempana, noin 26 % kohdalla maksimista. Keskimääräinen aalto taas on vähän ylempänä, 33 % kohdalla. Sitä pienempien ja suurempien aaltojen lukumäärä on yhtä suuri.



Kuvio 1. Aallokon korkeuden todennäköisyysjakauma Rayleigh`n mukaan

Silti niin Sorensenin (2006, 183) kuin Naessin (1985, 56) mukaan teknisiin tarkoituksiin käytetään yleensä kuitenkin rajoitetuilla merialueilla Jonswapin spektriä (kuvio 2) vastaamaan paremmin alueen havaintoja. Sen etuna on rakenteisiin kohdistuvan energian eli kestävyyskannalta olennaisien taajuuksien mukainen painotus. Jonswapin spektri näyttää aallokon energiajakauman  $S(\omega)$  taajuuden funktiona muutamalla monotonisuutta kuvaavan hajontaparametrin  $\gamma$  arvolla. (Den Norske Veritas 2011, 15.)



Kuvio 2. Jonswapin spektri eli aallokon energiajakauma taajuuden funktiona.

## 2.2 Aallokon synty

Aallokko syntyy tuulen vaikutuksesta. Ilmavirtauksen ja vedenpinnan välinen kitka tuottaa pintaan pieniä korkeuseroja, väreitä. Epätasaisuus haluaisi tasoittua ympäröivään veteen, mutta tuuli pakottaa sen tapahtumaan vain yhteen suuntaan. Samalla hetkellä, kun pintaan muodostuu epätasaisuus, alkaa ilmavirtaus syöttämään siihen lisää energiaa ja syntyy etenevä aalto. Ilman virtaus tuottaa ylipaineen aallon harjan tuulen puolelle ja alipaineen sen suojan puolelle. Nämä yhdessä kasvattavat aaltoa ja sen kulkunopeutta. Kasvava aalto kulkee luonnollisesti aina sen synnyttävää tuulta hitaammin, samalla nopeudella paine-erot katoisivat eikä energiaa siirtyisi.

Syntyvä aallokko on sekalainen, joukko erikorkuisia ja -suuntaisia aaltoja, tuulen epätasaisuuden vuoksi. Synnyttyään aallokko jatkaa matkaansa muotoutuen syvässä vedessä ns. gravitaatioaallosi, jonka *etenemisnopeus* =  $C_0$  [m/s] (Celerity syvässä vedessä) ja *aallonpituus* =  $L$  [m] ovat riippuvaisia vain *aallon jaksoajasta* =  $T$  [s] ja *maan vetovoiman kiihtyvyydestä*  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>:

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (\text{kaava 1})$$

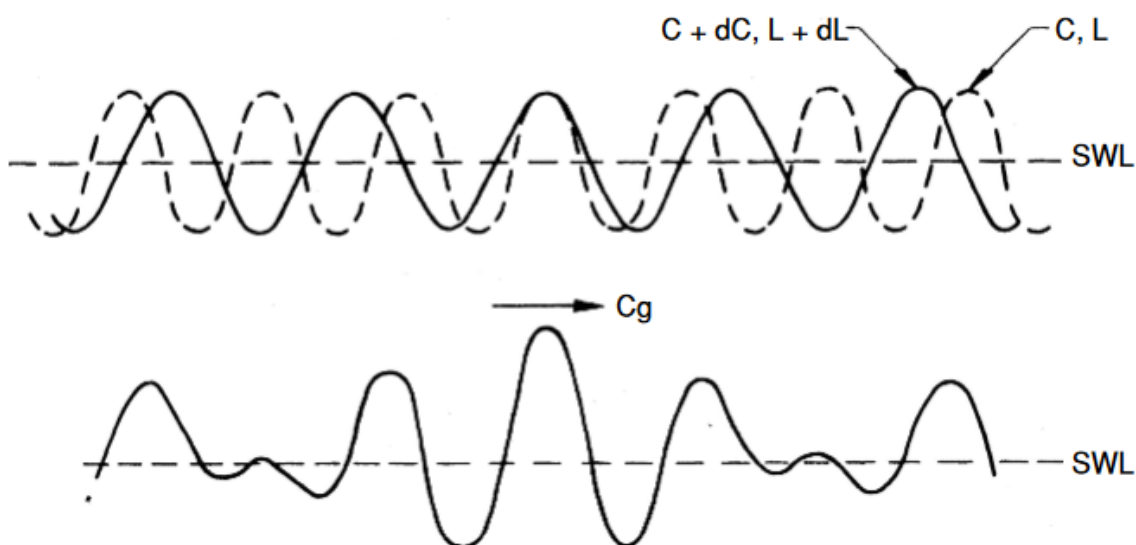
$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (\text{kaava 2})$$

joten etenemisnopeus  $C_0$  aallonpituuden  $L$  funktiona on:

$$C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}} \quad (\text{kaava 3})$$

Gravitaatioaallon englanninkielinen termi on sama kuin tähtitieteilijöiden käyttämä, mutta asialla ei ole tässä mitään tekemistä avaruuden gravitaatioaaltojen kanssa

Aallokko alkaa tasaantumaan poistuessaan syntymäalueeltaan, eli kun siihen vaikuttaneen tuulen vaikutus lakkaa. Tavallisesti merialueella on useammasta lähteestä kotoisin olevia aaltoryhmiä etenemässä samanaikaisesti, jolloin niiden yhtymisen tuloksena on jonkinasteinen ristiaallokko. (Sorensen 2006, 157.) Eri korkuiset aallot myös etenevät eri nopeuksilla, jolloin hetkellä, kun ne yhtyvät, syntyy hyvinkin vaihteleva aallokko. Kuvion 3 (Sorensen 2006, 39) mukaan kaksi eri nopeudella etenevää aallokkoa samassa paikassa muodostavat varsin epäsäännöllisen pinnanmuodon.

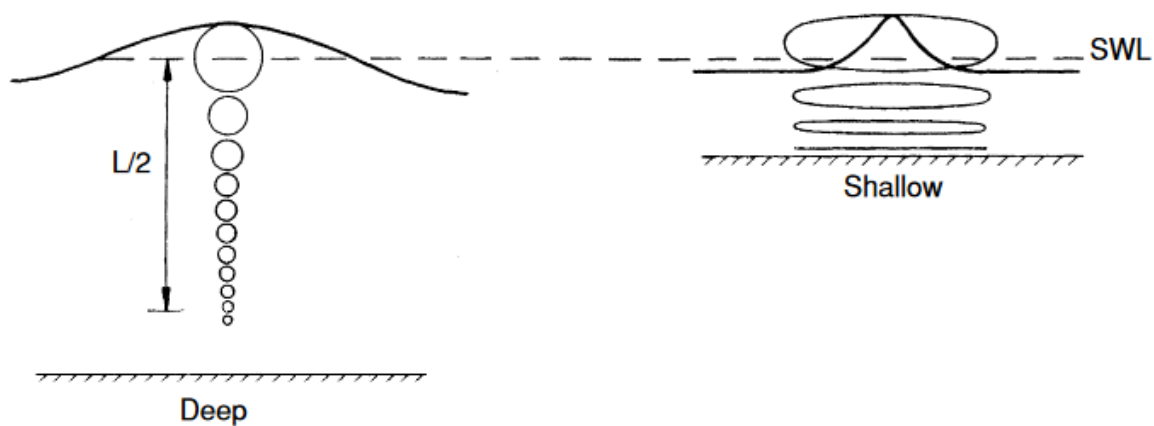


Kuvio 3. Kohtaavien aaltojen muodostama ristiaallokko, yksinkertaistettu tilanne.

## 2.3 Aallokon energia

Veden syvyyden ollessa yli puolet aallonpituudesta ei pohjalla ole vaikutusta aallokon ominaisuuksiin. Tämä johtuu siitä, että aallossa vesipartikkelit kulkevat ympyrää kohtisuorassa pystytasossa aallonharjaa vastaan. Vesi ei etene virtausta ja turbulenssia lukuun ottamatta aaltojen vaikutuksesta vaan kukin partikkeli kiertää omaa kehäänsä. Kuten kuvioista 4 (Sorensen 2006, 29) näemme, pinnalla vesipartikkelit luonnollisesti kiertävät aallon korkeuden kokoista kehää mutta syvemälle mentäessä kehä pienenee niin että puolen aallonpituuden syvyydellä liike lakkaa.

(Sorensen 2006, 20.)



Kuvio 4. Vesipartikkelien liike aallossa

Aallon energia jakautuu kahteen osaan ja on kokonaisuudessaan näiden summa:

1. Potentiaalienergia  $E_p$ , joka näkyy pinnankorkeuden vaihteluina.
2. Kineettinen energia  $E_k$ , jota edustaa vesipartikkeleiden liike.

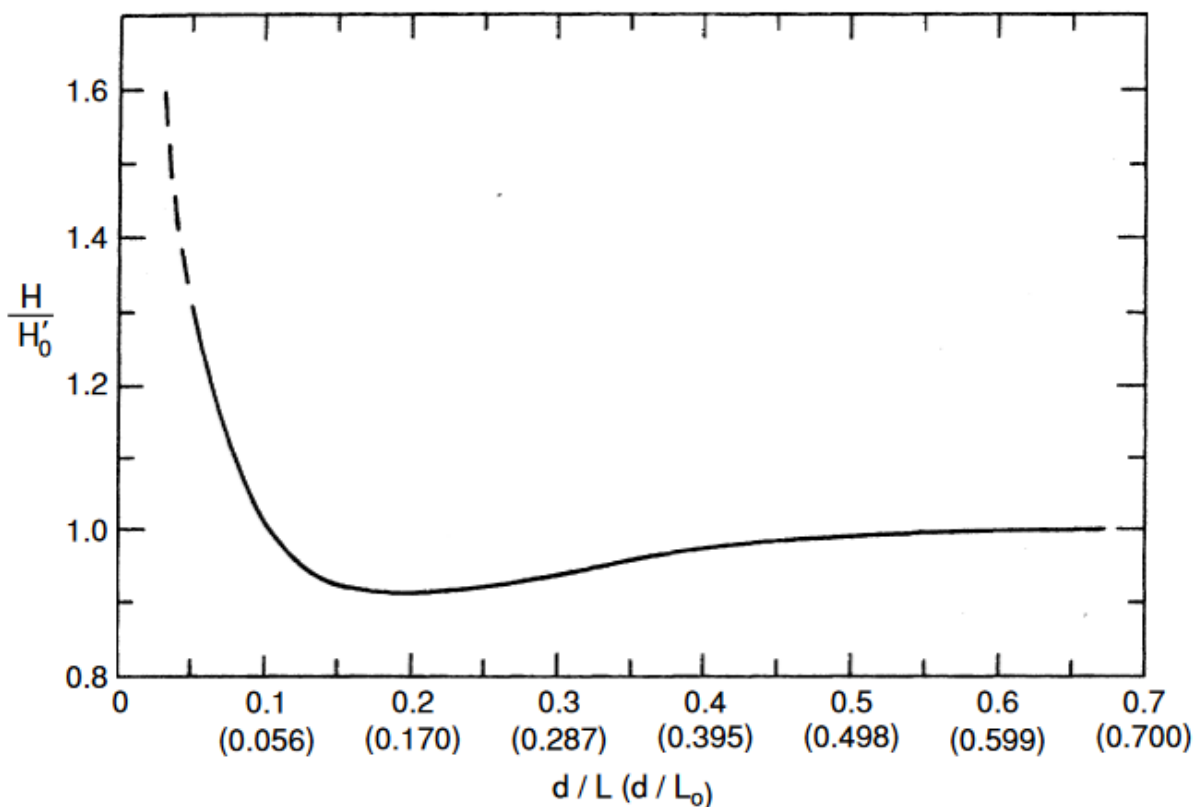
Kuten Sorensenin (2006, 23) johtamissa kaavoissa  $E_k$  ja  $E_p$ , kummassakin päädytään samaan kaavaan sillä, "Thus the kinetic and potential energies are equal and the total energy in a wave per unit crest width  $E$  is":

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad \left[ \frac{J}{m} = \frac{Nm}{m} = N \right]$$

jossa:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$      $\rho = \text{veden tiheys (makea } 1000, \text{ suolainen } 1025) \text{ kg/m}^3$

$H = \text{aallon korkeus laaksosta harjalle}$      $L = \text{aallonpituus (m)}$

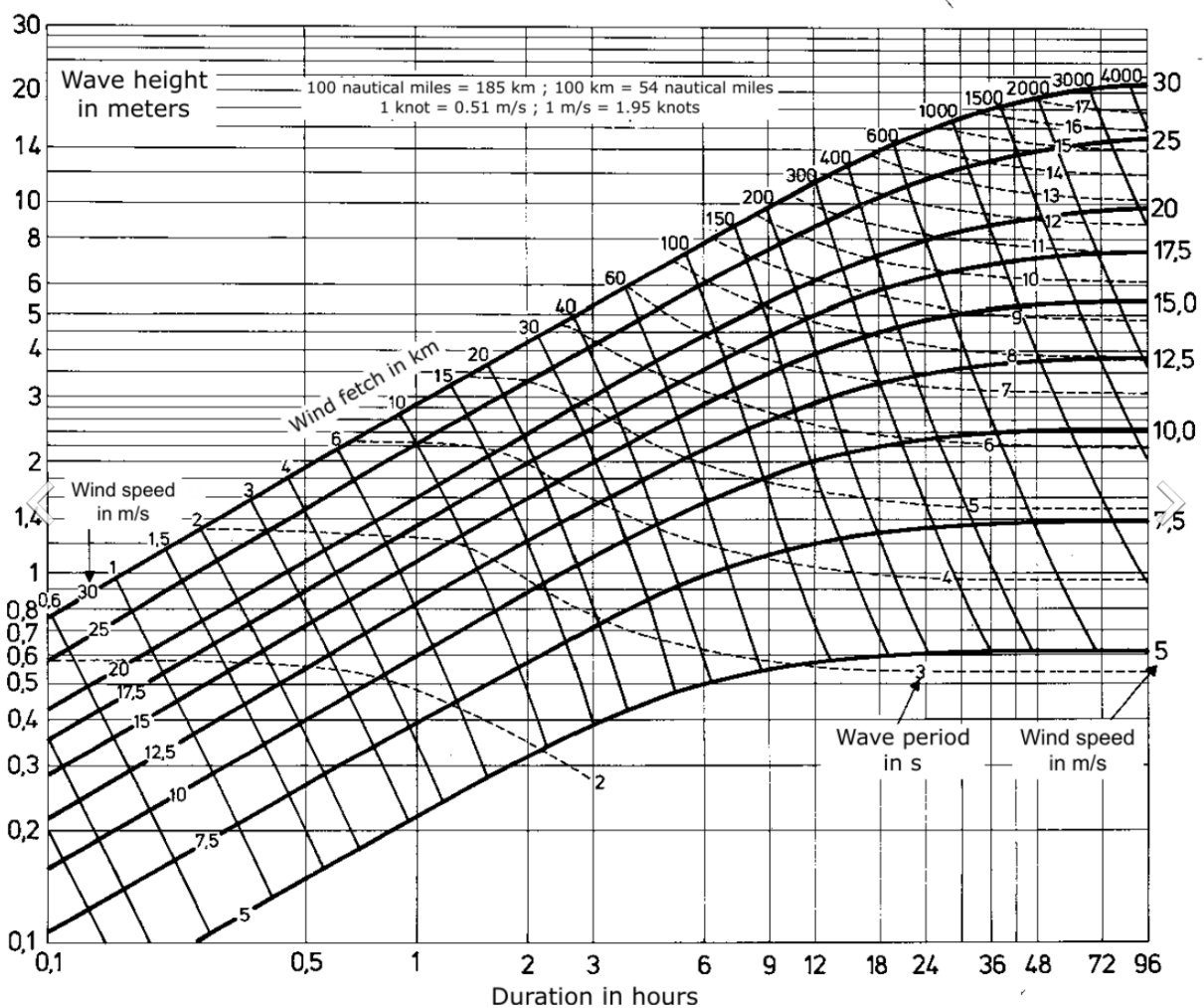
Vedessä vaikuttavan syvyyden ollessa alle 0.5 mutta yli 0.05 aallonpituutta, puhutaan suomeksi harhaanjohtavasti matalan veden aallokosta. Käytämme siis tässä työssä termiä *väliveden aalto* vastaamaan paremmin englanninkielistä termiä *intermediate* tai *transitional wave*. Matala on siten *shallow water* jossa  $\frac{d}{L} < 0,05$ . Välivedessä pohja rajoittaa vesipartikkelien pystysuuntaista liikettä, jolloin liikeradat muodostuvat litteiksi. Välivedessä madaltuva syvyys myös hidastaa aallon etenemisnopeutta (jaksoaika pysyy vakiona), mistä aiheutuu aallonkorkeuden kasvaminen. Aallon energia ei katoa mihinkään, vaan kineettinen energia muuntuu potentiaalienergian muotoon. Aallon korkeus ei kuitenkaan pysty kasvamaan loputtomasti, vaan aalto muuttuu muotoaan myös pohjakitkan seurauksesta ja lopulta murtuu jyrkkyyden kasvaessa epästabiiliksi. Kuviossa 5 näemme aallon korkeuden muutoksen sen saapuessa syvästä vedestä ( $\frac{d}{L} > 0.5$ ) (oikealta) matalaan veteen (vasemmalle). Murtuminen tapahtuu suhteella ( $\frac{d}{L} = 0.05$ ), joka on väliveden minimisyvyys. (Sorensen 2006, 26.)



Kuvio 5. Aallon korkeuden muutos rantaa lähestyttäessä

## 2.4 Aallon korkeus, jaksoaika ja tuuli

Tuulen kasvattaessa aaltoja niiden etenemisnopeus suurenee suorassa suhteessa jaksonaikaan (kaava 1 yllä). Aallonpituus taas kasvaa suhteessa jaksoajan toiseen potenssiin (kaava 2 yllä). Kaikilla näillä tekijöillä on tietysti yläraja, koska kuten aiemmin mainittiin, aallon etenemisnopeus on aina tuulen nopeutta pienempi. (Sorensen 2006, 15.) Aallokko pystyy hyvin harvoin kehittymään tuulen mahdollistamaan, täyteen kokoonsa johtuen puhallusmatkan lyhyydestä ja tuulen vaihteiluista. Kaaviossa 6 asiaa havainnollistetaan. Kaaviossa oletetaan syvyyden olevan riittävä esteettömälle kehitykselle. (Groen & Dorrestein, 1976, 131.)



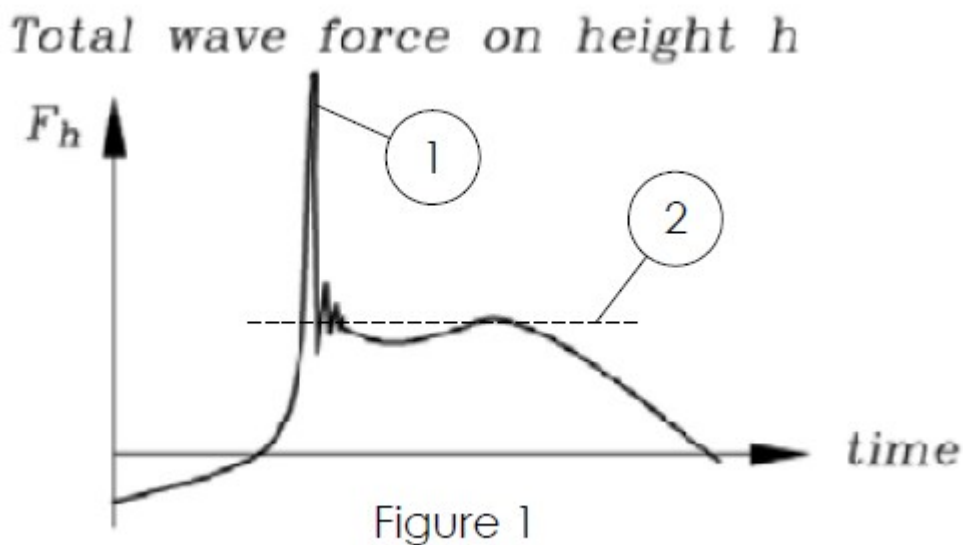
Kuvio 6. Aallonkorkeuden ja jaksonajan riippuvuus tuulen nopeudesta ja puhallusmatkasta.



## 2.5 Aallokon painevaikutus

Rantaan osuessaan aallokolla on painevaikutus kahdesta eri syystä. Ensinnäkin pinnankorkeuden takia veden alle jääviin rakenteisiin kohdistuu aivan tavallinen hydrostaattinen paine  $P_s = \rho gh$ , missä  $P$ =paine [Pa],  $\rho$  = veden tiheys 1000(makea) ... 1025(suolainen)  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $g$  = gravitaatiovakio  $\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}$  ja  $h$  = nestepatsaan korkeus [m], jonka lisäksi aallon harjalla nopeasti liikuvien vesipartikkeleiden kineettinen energia muuttuu rakenteeseen törmätessä dynaamiseksi paineeksi  $P_d = 0.5\rho v^2$ , missä  $v$ =partikkelien liikenopeus [m/s]. Tällainen viattoman oloinen lyhytkestoinen impulssi voi saada hyvinkin merkittäviä paineita aikaiseksi. Kuviossa 7 (US Army Corps of Engineers, 2002, 147) havainnollistetaan tätä aallon kokonaisvaikutusvoimaa.

1 = dynaaminen impulssi 2 = hydrostaattinen paine



Kuvio 7. Aallon painevaikutus rantarakenteeseen.

## 2.6 Eroosio

Eroosio itsessään on luonnollinen prosessi, jossa maa-aines kulkeutuu ja kerrostuu uudelleen ulkoisten voimien, kuten tuulen, sateen, jään tai veden virtauksen vaikutuksesta. Aaltoeroosiossa luonnollisesti keskeisessä roolissa on vesimassojen liike. Kun aallot iskevät rantaviivaan, ne kuluttavat ja siirtävät hiekkaa, soraa ja muuta maa-ainesta, mikä voi johtaa merkittäviin rannikon maaperän muutoksiin. Tämä prosessi voi olla jatkuvaa tai syklistä, riippuen esimerkiksi myrskyistä, sääilmiöistä ja paikasta. (Coastal Erosion, 2021. Coastal erosion 2023)

Aaltoeroosion voimakkuus riippuu monista tekijöistä, kuten aaltojen voimakkuudesta, rantaviivan topografiasta sekä meren- ja maapohjan koostumuksesta. Luonnolliset tekijät, kuten tuuli, vuorovedet ja merenpinnan nousu, ja lämpötilavaihtelut (pakkanen), voivat voimistaa aallokon eroosiovaikutusta. Lisäksi ihmisen toiminta, kuten rantaviivan muokkaaminen ja rakentaminen, voi kiihdyttää eroosiota ja lisätä tarvetta eroosion vastaisille toimille, erityisesti tiheään asutetuilla rannikkoseuduilla. Rantojen rakentaminen saattaa estää luonnollisen sedimenttikertymän ja lisätä eroosion riskiä. (Coastal Erosion, 2021. Webb, 2019, 309–313.)

Eri aaltoluokkien merkitys rantojen eroosion suhteen on selkeä. Tsunameja vastaan ei pystytä tekemään mitään, joten ainoa keino niiden osalta on rakentaa talot ja infrastruktuuri niin korkealle merenpinnan yläpuolelle, että pienemmät tsunamit eivät aiheuta tuhoa. Suurempien tsunamien osalta voidaan vain varautua evakuoointeihin. Sama koskee suurten myrskyjen aiheuttamia vedenpinnan nousuja; vuosisadan myrskyt ja tulvat kuuluvat samaan kategoriaan tsunamien kanssa. Maaperän vettyminen johtaa maa-aineksen nesteytymiseen, jolloin tuho on maaperän rakenteesta riippuen väistämätön.

Vuorovesivaihtelu on ollut olemassa jo ennen ihmiskuntaa, ja sen aiheuttama eroosio on tapahtunut jo ammoisina aikoina. Vuoroveden kannalta kriittiset paikat tunnetaan, ja niihin rakentamista on osattu välttää.

Tuulen aiheuttaman aallokon rantoja kuluttava vaikutus on merkittävä. Tuulisilla vyöhykkeillä rantaan osuu vuosittain 2–3 miljoonaa aaltoa. Luonnolliset rannat ovat muotoutuneet kestäviksi ajan

myötä, mutta ihmisen rakentamat rannat ovat ongelmallisempia, koska niihin ei ole pystytty kehittämään täysin kestäviä rakenteita. Pahin tilanne syntyy, kun useampi ilmiö esiintyy samanaikaisesti: korkein vuorovesi yhdistettynä suureen matalapaineeseen ja ennätysmyrskyyn.

### **2.6.1 Aaltoeroosion tyypit**

Rannikkoja kuluttavaa aaltoeroosiota on useaa eri laatua ja niiden vaikutustavat poikkeavat toisistaan seuraavalla tavalla:

Hydraulista eroosiota tapahtuu, kun aaltojen voima puristaa ilmaa rannikon kivien halkeamiin ja rakoihin. Toistuva puristaminen ja paineen vapautuminen voivat aiheuttaa mikrosäröjen kasvamisen kautta kivien ja rakenteiden murtumisen ja hajoamisen. Tämä ilmiö on erityisen merkittävä voimakkaan merenkäynnin ympäristöissä, joissa aallot iskevät jatkuvasti kallioihin tai betonirakennelmiin.

Iskeytymiseroosiossa aallokon sisältämä voima rantaa vasten iskeytyessään kohdistaa merkittävää painetta kiviin tai rannikkorakenteisiin saaden nämä liikkeelle ja mahdollistaen esim. hankaus ja kulutuseroosion jatkossa. Tämäkin on erityisen voimakasta myrskyjen ja korkean energian aaltojen aikana.

Hankauseroosiossa aallokko kuljettaa kiviainesta aina isommista paloista aina pikkukiviin ja hiekkään saakka. Tämä aallokossa kulkeutuva maaperän aines toimii kuin hiekkapaperi kuluttaen kalliota, rannikkoa ja merenpohjaa aallokon liikuttaessa sitä prosessin myötä. Tämä taas aiheuttaa lisää materiaalin irtoamista ja kulkeutumista.

Kulutuseroosiossa aallokossa kulkeutuva materiaali kuten kivet ja hiekka kolhiintuvat ja iskeytyvät toisiaan vasten aiheuttaen materiaalien kulumista ja tasoittumista sekä pyöristymistä. Tällä tavoin esimerkiksi täysin sileät ja pyöreät rantakivet muodostuvat. (Coastal Process 2019)

## 2.6.2 Eroosion seuraukset

Seuraukset mittavasta eroosiosta voivat olla vakavia. Aaltoeroosio usein johtaa rannikon vetäytymiseen, joka on omiaan uhkaamaan infrastruktuuria, kuten teitä, rakennuksia ja infraa rannikon läheisyydessä. Kuten esimerkiksi Conathan ja kumppanit painottavat, pelkästään vuosina 2004–2009 Yhdysvallat menettivät Meksikonlahden rannikkoalueilla 124 000 hehtaaria maa-alueita aaltoeroosiolle. Vuoden 2004 NOAA:n (Yhdysvaltain liittovaltion sää- ja valtamerentutkimusorganisaatio) raportin mukaan Yhdysvallat menettävät kokonaistasolla 59 000:n hehtaarin vuosivauhtia maa-alaansa eroosiolle. Yhdysvaltain hallituksen (Coastal Erosion, 2021) arvion mukaan vastaava luku olisi jo yli 80 0000 hehtaaria vuositasolla. (Conathan, Buchanan & Polefka, 2014, 5–7. Coastal Erosion, 2021.)

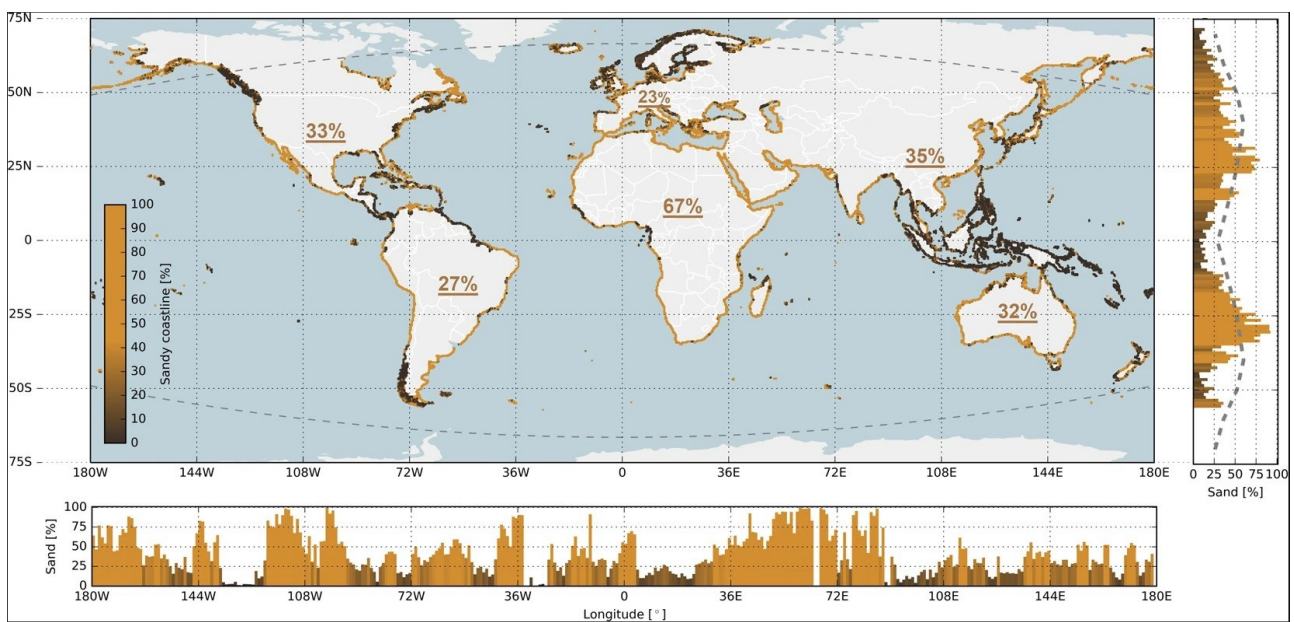
Aaltoeroosion aiheuttamat ongelmat ovat siis laaja-alaisia ja aiheuttavat pahimmillaan mittavaa vahinkoa. Infrastruktuurivahingot ovat paikoin todella kalliita, ellei jopa mahdottomia korjata ja vaativat mittavia resursseja. Rannikkoeroosion kauaskantoiset taloudelliset haittavaikutukset konkretisoituvat BBC:n mukaan Englannissa vuoteen 2100 mennessä £584 miljoonan verran pelkinä asuinkiinteistöinä, jotka huuhtoutuvat mereen rannikkoeroosion takia. (BBC, 2023). Yhdysvaltain hallituksen mukaan (Coastal Erosion, 2021) joka ikinen vuosi aaltoeroosio aiheuttaa maassa yli puolen miljardin dollarin omaisuusvahingot kiinteistöjen, infran ja menetetyn maa-alueen muodossa.

Eroosiolla on myös hankalammin rahassa mitattava luonnon ekosysteemejä vahingoittava vaikutus, esimerkiksi dyynien tuhoutuminen ja elintilan katoaminen monilta kasvi- ja eläinlajeilta. Ekologiset vaikutukset voivat olla peruuttamattomia, kun kriittiset elinympäristöt eliöille tuhoutuvat. (Coastal Erosion, 2021.)

Yhteenvetona, aaltoeroosio on merkittävä taloudellinen, ekologinen sekä sosiaalinen ympäristöongelma, joka vaatii huolellista hallintaa ja monitieteistä lähestymistapaa. Ymmärtämällä eroosion mekanismit ja syyt sekä soveltamalla tehokkaita hallintakeinoja, voi sen aiheuttamia haittoja vähentää ja turvata rannikkoalueiden tulevaisuuden.

### 2.6.3 Eroosion esiintyvyys

Eroosion esiintyvyys on luonnollisesti voimakkainta maapallon pohjoisella ja eteläisellä tuulivyöhykkeellä alueilla, joilla *“fetch”* eli aaltoon vaikuttava tuulen puhallusmatka on riittävän pitkä merkittävän aallokon muodostumista varten. Erityisen voimakasta eroosio on siis seudulla, jossa yhdistyy hiekkaperäiset rannikko ja mannerseudut sekä pitkät puhallusmatkat valtamerien kuten Atlantin, Tyynen Valtameren ja Intian Valtameren rannikoilla. (Luijendijk ja kumppanit 2018.)



Kuvio 8. Hiekkaperäisten rannikoiden osuus maanosittain

Kuviossa 8 kartan värilliset pisteet osoittavat hiekkarantojen paikallisen prosentuaalisen osuuden. Kellertävä väri edustaa hiekkaa, tummanruskea muita maaperän aineksia. Oikeanpuoleisessa pienessä kuvaajassa esitetään hiekkarantojen suhteellinen esiintyminen leveyspiireittäin, missä katkoviiva osoittaa hiekkarantojen leveyspiirijakauman. Alemmassa pienessä kuvaajassa esitetään hiekkarantojen suhteellinen esiintyminen pituuspiireittäin. Alleviivatut prosenttiluvut osoittavat kunkin maanosan keskimääräisen hiekkarantojen osuuden prosentteina. (Luijendijk ja kumppanit 2018.)

## 2.7 Seawall

Aaltoeroosion hallintaan on kehitetty maailmalla erilaisia menetelmiä. Yksi yleinen ratkaisu on rakentaa suojarakenteita, kuten aallonmurtajia ja penkereitä, jotka vähentävät tai uudelleen suuntaavat aaltojen energiaa ja siten hillitsevät paikallisesti eroosiota varsinkin rakennetuilla alueilla. Näitä eroosiolta suojaavia rakennelmia kutsutaan englanniksi yhteisellä termillä ”*seawall*” joka siis käytännössä on aina jokin rakennettu, yleensä passiivinen aallonmurtajajärjestelmä, jolla pyritään suojaamaan rannikkoa ja sen rakenteita jatkuvalta dynaamiselta aallokon kuormitukselta. Näillä rakennetuilla seawall-ratkaisuilla pyritään suojaamaan nimenomaan maa-alueita rakennelman mantereen puolella, ei niinkään rannikkoa sen veden puolella.

Seawall rakenteiden sekä ratkaisujen kysyntä ja tarve maailman avomeren eroosioherkillä rannikkoseuduilla on ehdottoman kova, sillä esimerkiksi Holdenin (2019) sekä McCarthyn (2019) mukaan pelkästään Yhdysvaltoihin vaadittavien seawall-suojarakenteiden ja menetelmien tuottamisen kokonaishintalappu tulee kiipeämään yli 400 miljardin dollarin vuoteen 2040 mennessä. Vaadittavat toimet tulee olemaan suuria ja markkinoiden koko todella merkittävä. (The Guardian 2019, Statista 2019.)

## 2.8 Seawall tyypit

Eri rannikolle rakennettavien seawallien periaatetason ratkaisuiden ymmärtäminen oli avainasemassa kehitystyön tekemisessä, joten eritellään niitä myös tähän. (Sadeghi ja kumppanit 2018.)

### Riprap

Riprap on eroosiosuojausmenetelmä, jossa rantaviivalle asetetaan epäsäännöllisiä kiviä tai betoni-lohkareita sattumanvaraiseen järjestykseen. Nämä kivet hajottavat aaltoenergiaa ja vähentävät eroosion vaikutusta estämällä aaltojen suoran osuman rantaviivaan.

### Steps

Steps-seawall ratkaisu koostuu portaittain asennetuista tasoista, jotka hajottavat aaltoenergiaa ja vähentävät aaltojen voimaa. Tämä rakenne mahdollistaa myös veden virtauksen takaisin mereen ilman, että se aiheuttaa merkittävää eroosiota.

**Curved**

Kaareva aallonmurtaja on suunniteltu ohjaamaan aaltojen energia takaisin mereen kaarevan pinnan avulla. Tämä rakenne vähentää aaltojen iskua ja eroosivoimaa suojattavalla alueella, suojeleen tehokkaasti rantaviivaa.

**Upright seawall**

Pystyseinäinen aallonmurtaja on suora, pystysuuntainen rakenne, joka on tarkoitettu estämään aaltojen iskut suoraan rantaviivaan. Tämä ratkaisu heijastaa aaltoenergiaa voimakkaasti takaisin mereen, mutta on altis suuremmille eroosivoimille rannikoilla ja perustuksissaan.

**Gravity steel pile**

Teräspaaluseinäjä koostuu syvälle maahan jantatuista, särmätyistä teräslevyistä muodostuvista teräspaalutuksista, jotka tukevat ja vakauttavat seinämää. Tämä rakenne hyödyntää painovoimaa ja teräksen lujutusta kestämään aaltojen iskuja ja suojaamaan rantaviivaa eroosiolta

**Concrete block seawall**

Betonilohkareista rakennettu aallonmurtaja koostuu suurista betonilohkareista, jotka on pinottu päällekkäin rantaviivan suojaamiseksi. Tämä rakenne hajottaa aaltoenergiaa ja tarjoaa vankan suojan eroosiota vastaan.

### **3 Tutkimusmenetelmät ja -ote**

Tutkimusote on eräänlainen laajempi lähestymistapa tutkittavaa ilmiötä tai asiaan tarkasteltaessa. Tutkimusote antaa tietyllä tapaa filosofiset ääriajat ja työkalut tutkittavalle ilmiölle. Toisin sanoen tutkimusote on kokoelma analysoinnin ja aineistonkeruun menetelmiä, joilla pyritään parantamaan tai ratkaisemaan kulloinenkin tutkimusongelma. (Kananen 2015, 63–64.) Lähestymistavat eli tutkimusotteet Kananen (2012) jaottelee yleisesti laadullisiin eli kvalitatiiviseen ja määrälliseen eli kvantitatiiviseen tutkimukseen. Näiden menetelmien edustaessa tutkimusotteiden ääripäitä on

olemassa myös niin sanottuja moniotteisia tutkimuksia eli tutkimusstrategioita kuten case-, kehittämis- ja toimintatutkimus, joissa yhdistellään määrällisen sekä laadullisen tutkimuksen menetelmiä. (Kananen 2012, 25–27.)

Tämä opinnäytetyö on tyypiltään tutkimuksellinen kehittämistyö, sillä aihe liittyy vahvasti käytäntöön ja tutkimusotteena tullaan käyttämään monimenetelmäistä kehittämistutkimusta. Kehittämistutkimus sopii tutkimusotteeksi, sillä työssä on tarkoitus kehittää ratkaisua olemassa olevaan ongelmaan ja täten saada aikaan muutos tilanteeseen konkreettisella ratkaisulla. Jotta työ olisi tutkimusta eikä vain yleistä asioiden kehittämistä tulee se perustumaan vahvasti myös teoriaan ja omaa tutkimuksellisen otteen kehitys- ja valmistustyössä. (Kananen 2012, 43).

## 4 Työn vaatimukset suunnittelun ja toteutuksen osalta

Koelaitteelle ja sen vaatimuksille sekä rajoituksille oli toimeksiantajan puolesta selvitetty vaatimustilaa kiinteiden- ja vähimmäisvaatimusten osalta. Lisäksi toiveita oli esitetty tiettyjen suunnitteluparametrien suhteen. Tilaajan esittämät lähtöarvot asettivat suunnittelulle myös reunaehdoja, joiden mukaan työ toteutettiin. Laitteessa käytettävän perustoimintaperiaatteen määrittely oli jo tehty aikaisemman virtauslaskentaluonnostelun (CFD:n) pohjalta. Tämän laskennan perustella määräytyi mm. koelaitteen mittakaava, joka on  $\frac{1}{3.5}$  jolloin esimerkiksi veden viskositeetti ei muutu suhteessa täysikokoiseen toteutukseen vielä niin että se vaikuttaisi koelaitteelle suoritettaviin koeajoihin. Koelaitteen tulosten avulla voidaan skaalata virtauslaskennan tuloksia luotettavammin täysikokoiseen toteutukseen nähden, sillä CFD:n ennustettavuus on dekadin verran heikompi verrattuna esim. FEM tuloksiin.

### Mitä koelaitteella halutaan saavuttaa:

1. Allon painepiikki-impulssin madaltaminen ja ajallinen pidentäminen
2. Eroosiohyödyn todentaminen
3. CFD laskennan tulosten todentaminen oikeiksi (soveltuvassa mittakaavassa 3.5)

### Suunnittelun osalta pystytään seuraavia seikkoja nostamaan esille:



1. Koelaitte tullaan ankkuroimaan merenpohjaan kiilattaviin D=140 porapaaluihin (2kpl)
2. Yksittäisiä kokoonpanoja pitää voida siirrellä ja käsitellä käsivoimin
3. Pitää toteuttaa kasattavissa ja purettavissa olevista kokoonpanoista
4. Koelaitetta tulee voida korkeus säätää vedenpinnan muutosten mukaan n. +/- 1 m
5. Koko koelaiteripustusta tulee voida kääntämällä säätää +/- 15° jotta eri suuntaisiin aallokoihin voidaan reagoida.
6. Kiinnityspaalujen epäyhdensuuntaisuuden mahdollistaminen n. 10° verran.
7. Kiinnityspaalujen etäisyyden muutos toisiinsa nähden +/- 100 mm
8. Vaimentimen kokonaisuuden säädön mahdollistaminen
9. Koko laitteen syvyys säätö varsilla +/- 1,5 m optimaalisen koelaitteen sijoittamisen mahdollistamiseksi rantaprofiiliin nähden
10. Muutaman asteen rihtausvirhe sallittava mekaniikan akselilinjan akselien, laakereiden ja tiivistysten kesken
11. Herkkä laakerointi pienien keliä kattamiseksi
12. Yli 500 000 sykliä kuukaudessa, koeaika 2 000 000 sykliä (4 kk)

#### **Valmistuksen ja tuotannon osalta:**

1. Tuotantotapa laserleikkuu ja särmäys tarvittaessa
2. Hyödynnettävä laserin tarkkuus konstruktiossa ja liitoksissa
3. Koneistettavat osat sovitettava tilaajan konekannalle DFMA tyyliin. Käytössä Jamkin protolabran kärkisorvi Titan HL-460x100 ja Bernardo BF 35 BDC manuaalijyrsin, sekä Kempin Kempact 323A MIG/MAG hitsauskone kaikkien muiden tavallisten metallintyöstömenetelmien lisäksi
4. Materiaalit pääosin kylmänä hitsattavaa rakenneterästä lujuusluokassa S355, kuormitus-kriittiset osat erikseen
5. Meriolosuhteisiin soveltuva, korroosiolta suojaava pintakäsittely

#### **Muuta:**

1. Käyttöaika luokkaa kesän verran, joten yksinkertaiset ratkaisut sillä koelaitteelle rajallinen budjetti
2. Opiskelijamenetelmin toteutettavissa olevia ratkaisuja laitteeseen

## 5 Toteutus/tulokset

### 5.1 Toteutuksen taustaa

Laitteen mallituksen työmäärän hahmottamiseksi on hyvä käydä läpi työssä mallitettujen osien määrää. Lopullisessa mallissa, jonka revisio on nro.14 on 133 erikseen mallitettua 3D osaa ja näistä on kasattu 34 alikokoonpanoa, joista on tehty 17 fyysisesti itsessään käsiteltävää valmistuskokoonpanoa. Niinpä osa näistä valmistuskokoonpanoista koostuu siis 2–4 ali- ja osakokoonpanosta muodostaen toiminnallisen osan koelaitetta. Työpiirustuksia kertyi kaiken kaikkiaan 85 kappaletta eri osista ja kokoonpanoista. Kaiken kaikkiaan yksittäisiä tiedostoja projektin tietojärjestelmässä on yli 760 kappaletta sisältäen piirustuksia, malleja, kokoonpanoja, vanhoja revisioita, leikkuuratoja, laskelmia ja niin edelleen. Sanomattakin on siis selvää, että tämän osuuden pysymiseksi kohtuullisen mittaisena vain osa kokoonpanoista sekä yksittäisistä osista tullaan käsittelemään läpi niin suunnittelun kuin valmistuksen osalta. Monia kokoonpanoja käsitellään vain pintapuolisesti, jos ollenkaan. Kuormitus tai toimintakriittisiä kappaleita sekä monimutkaisempia kokoonpanoja käsitellään kyllä.

Suunnittelun yhteydessä leikattavien kappaleiden ja raaka-aineiden materiaalivahvuuksia sekä kuormitusteknisiä mittoja ei lähdetty lujuuslaskemaan FEMillä (finite element method) järjestään jokaista ajansäästön ja sitä kautta kustannus säästön vuoksi, vaan vanhemman pääsuunnittelijan ohjeistuksia noudattaen mitoitettiin kyseiset kohteet. Muutamia jännitys- sekä kuormituskriittisiä kappaleita laskettiin PrePoMax 2.0.X FEM ohjelmistolla sopivien materiaalivalintojen ja kappaleiden mitoituksen tueksi.

Kaikki laakeri ja sovitepintoja sisältävät kappaleet on mustanitratu Sten:illä jolla saavutettiin huomattavasti parempi korroosionkesto sekä kappaleen pinnan mekaaninen kovuus sekä kulutuksenkesto paranee. Kaikki muut kappaleet on käsitelty epoksipohjamaalilla korroosionkesto lisäämiseksi, jonka päälle on maalattu monissa teollisuustoteutuksissa käytetty, joustava ja kulutusta kestävä polyuretaanimaali.

## 5.2 Paalutus

Koelaitteen ankkuroimiseksi rannikolla merenpohjaan päädyttiin kahteen pariin, tarpeeksi järeitä ja yleisesti hyväksi todettuja porateräspaaluja ( $L=3000$  mm  $D=140$  mm  $S=10$  mm). Kyseisiä paaluja kytkettiin kaksi yhteen, jotta riittävä upotussyvyys merenpohjassa saavutetaan ja päät yltyvät riittävästi merenpinnan yläpuolelle mahdollistaen koelaitteen monipuolisen yleisen korkeussäädön.

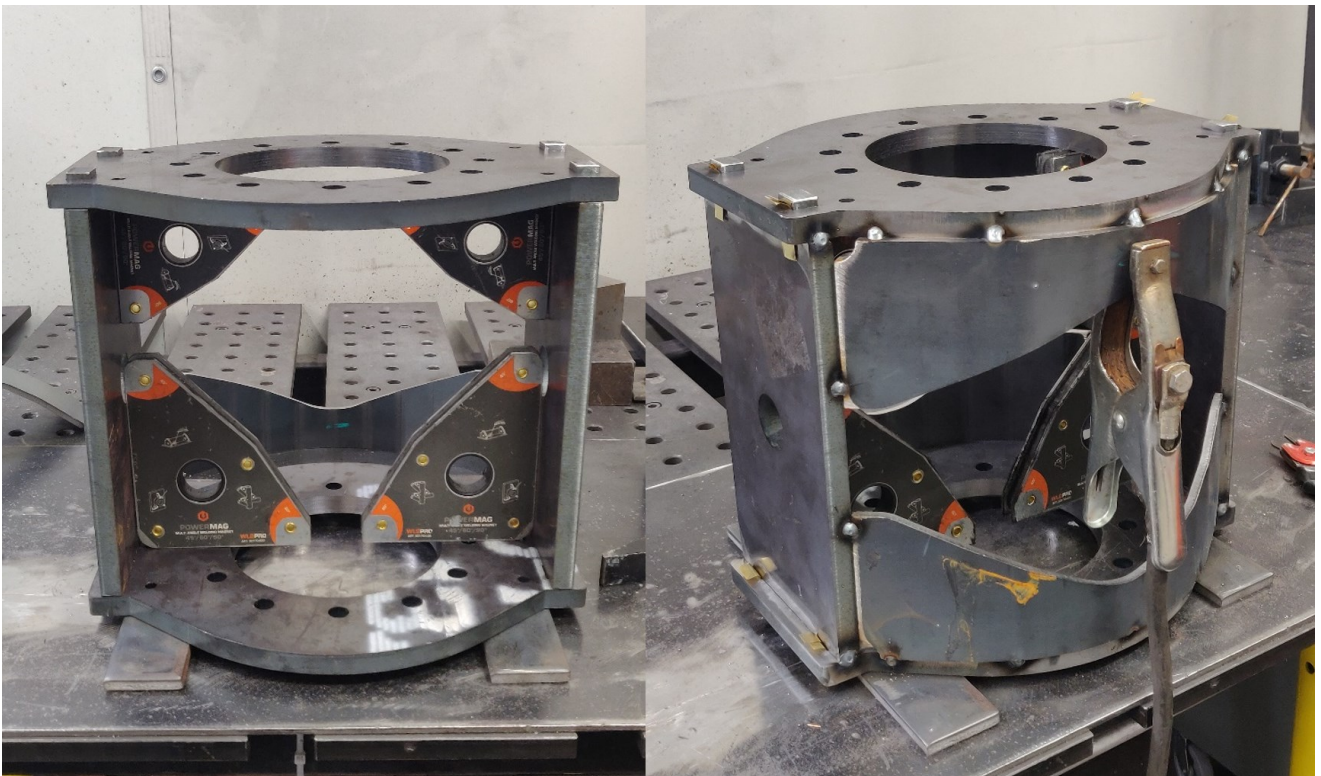
## 5.3 Paalukaulukset

Paalukaulukset mahdollistavat koelaitteen ja sen kannatusvarsien sekä pääorren kiinnittämisen paaluihin. Kauluksille haastavaa oli kehittää menetelmä millä korkeutta sileäpintaisessa tolpassa voidaan säätää sekä miten niihin on mahdollista kiinnittyä todella tukevasti kiinni. Kauluksen ylä- ja alapintojen reikiin koneistettiin jyrkimellä viisteellä, joihin vastakappaleiksi toteutettiin S355 ainesputkesta sorvattavat ja katkaistavat kiilapintaiset supistusholkit (kuvio 9), joita saadaan kiristettyä kiinni sekä auki. Kauluksien kiilapintojen ja supistusholkkien väliset toimintamittojen toleranssit olivat hyvin tarkat sillä kiristytessään kiilapintojen pitää sopia yhteen tiukasti.

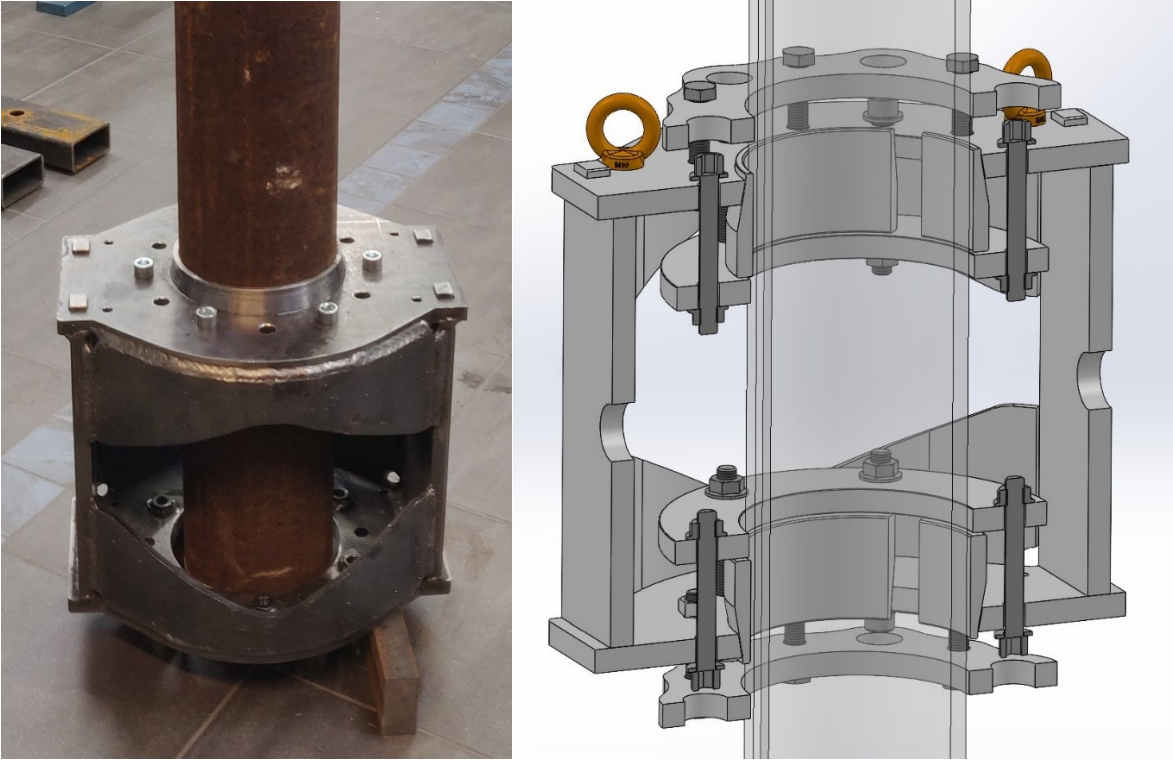


Kuvio 9. Kiilapintaiset supistusholkit

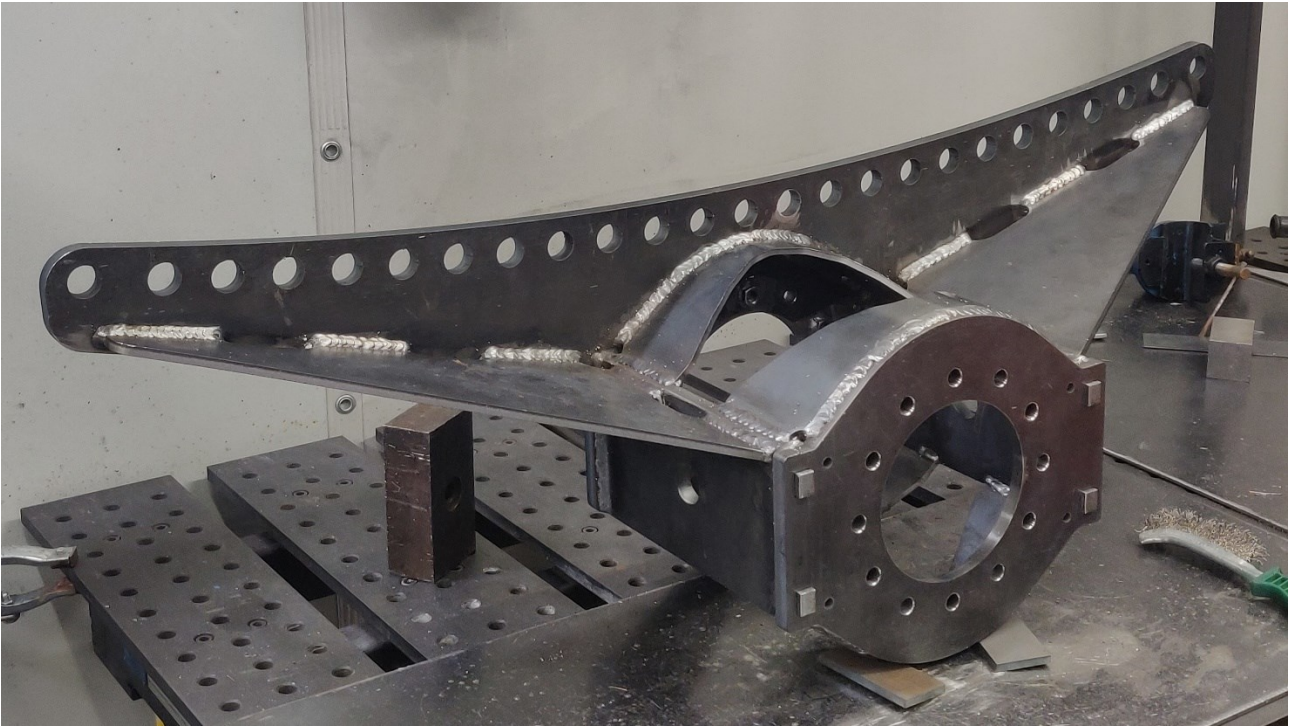
Kuten kuvista 10 voi havaita, leikkeihin on suunniteltu reilun kokoisia kokoonpano ohjureita/nastoja, jotka helpottavat kokoonpanoa DFA (Design for Assembly) periaatteiden mukaan, jolloin kappale on kohtuullisen hyvin linjassa jo pöydälle kasatessa. Kaulusten ylä- ja alapinnat olivat tärkeä saada yhdensuuntaisiksi sekä koko kokoonpanon kulmat suoriksi, jotta levyjen reikiin koneistetut kiilapinnat ovat toistensa kanssa keskeisiä ja samansuuntaisia. Ohjurinastojen ja päällylevyn reikien välykset nollattiin 0,1 mm ja 0,15 mm messinkisillä shimmeilyillä.



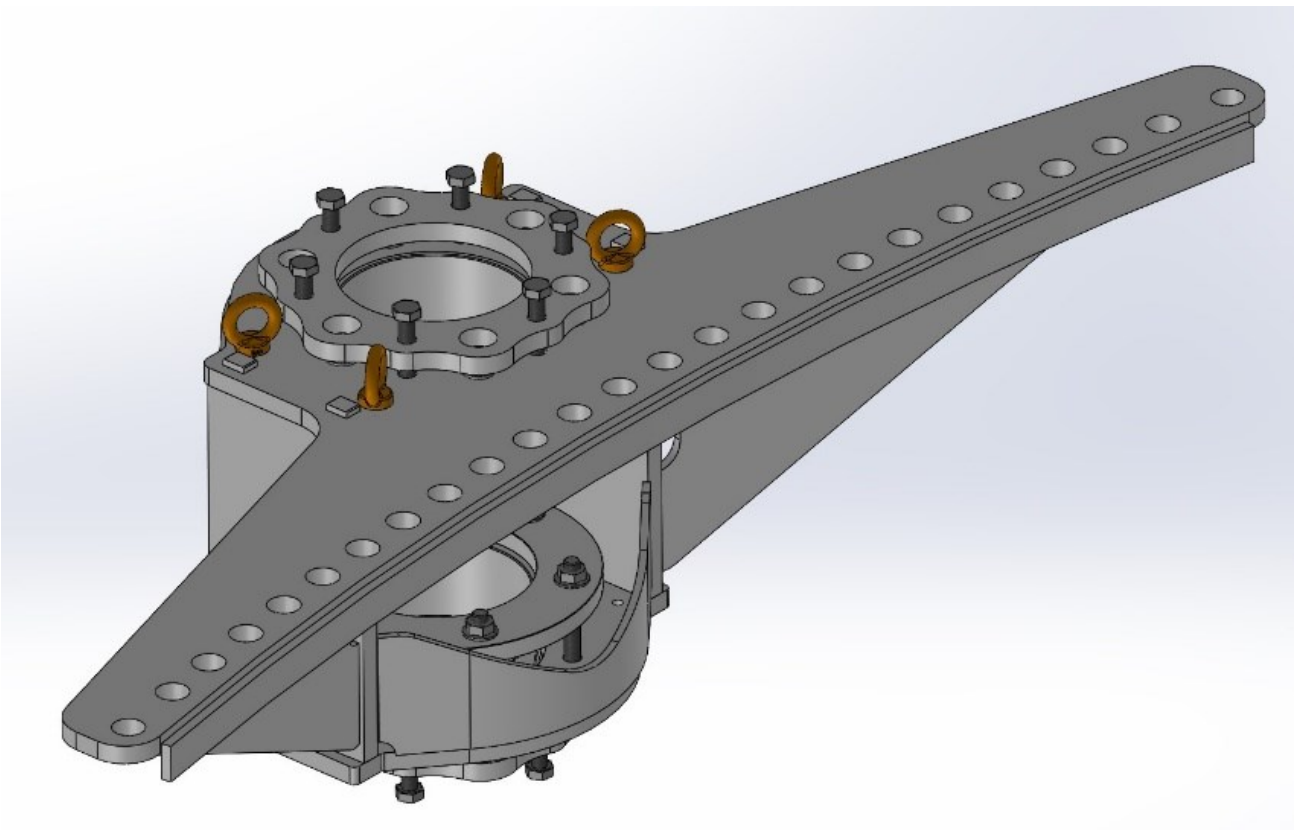
Kuvio 10. Paalukauluksen valmistusta



Kuvio 11. Paalukauluksen testaus yhdellä holkilla ja poikkileikkaus



Kuvio 12. Paalukauluksen valmistusta

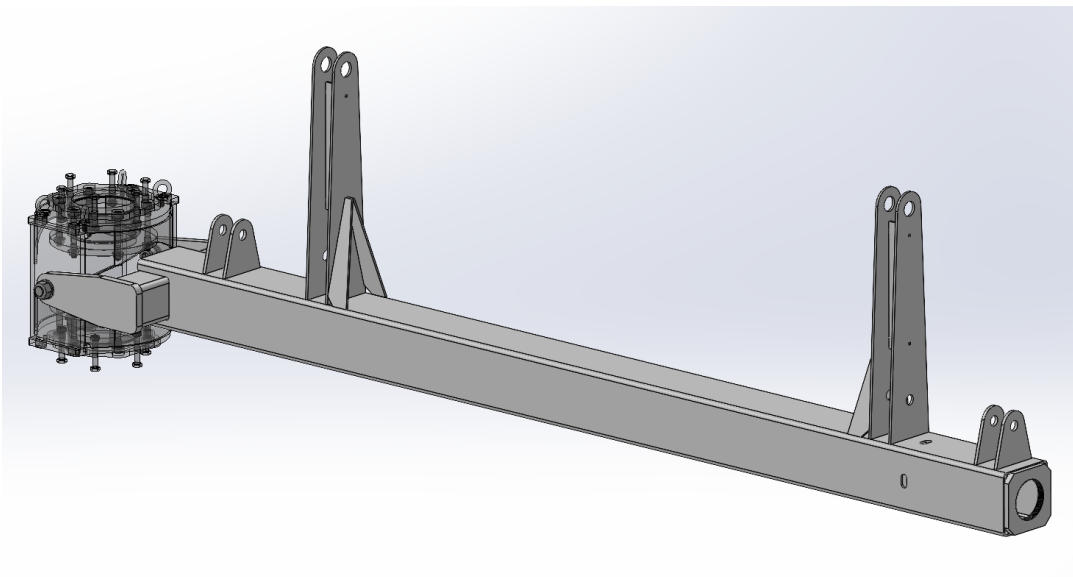


Kuvio 13. Paalukaulus kulmasäädöllä

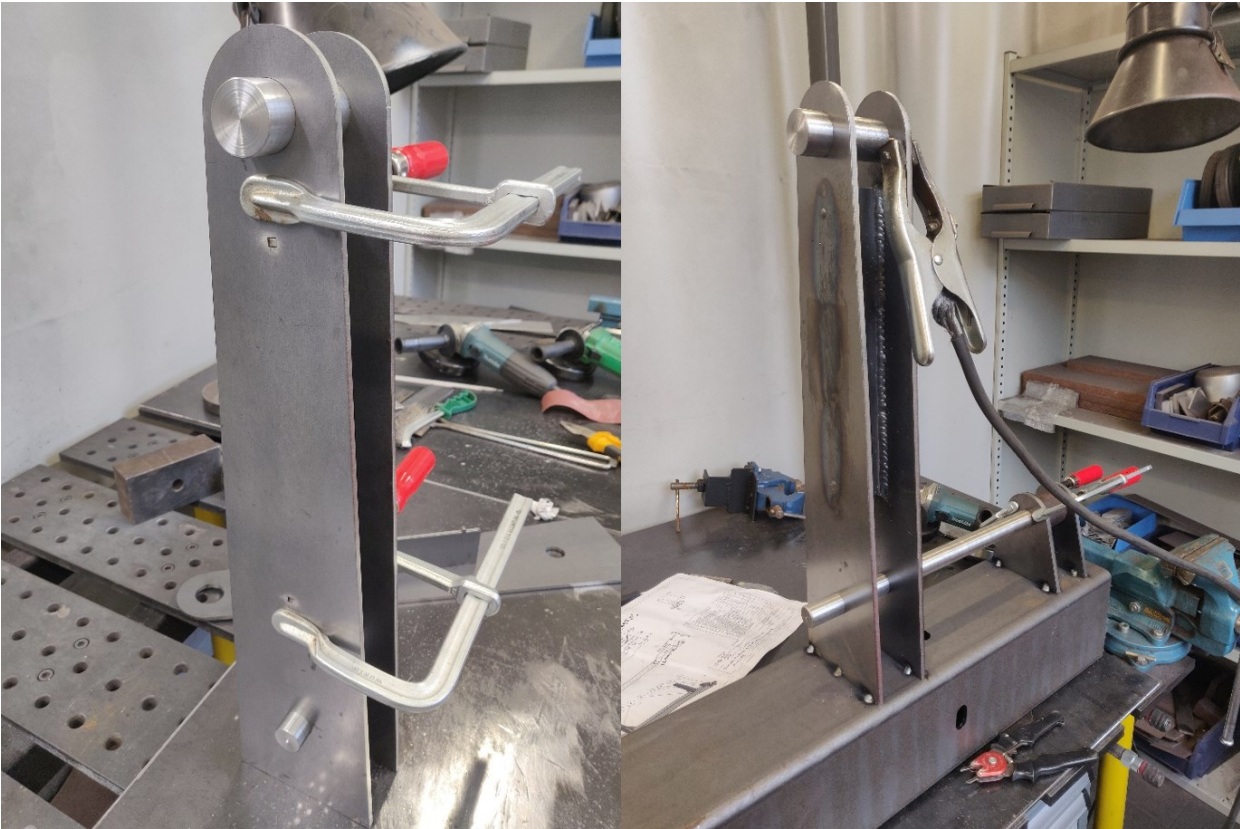
Aukaisu sekä paikalleen pakotus tapahtuu mutterinvääntimellä pulteista tasaisesti kiristämällä. Kiristyvät pultit pakottavat avaus- tai puristuslevyn työntymään haluttuun suuntaan. Toisen paulukauluksen yläpinnan reikäjonolla (kuvio 12) on mahdollistettu koko koelaiteripustuksen kulmasäätö  $\pm 18^\circ$ . Kun taas toisen kauluksen kylkiin kiinnitetään nivelletty koelaitteen pääripustus (kuvio 14) jonka tehtävän on varmistaa kauluksien täydellinen istuminen paalujen pinnalla, vaikka paalut eivät olisi toistensa kanssa yhdensuuntaisia. Kummassakin paulukauluksessa on käytetty mahdollisimman paljon samoja leikkeitä DFMA:n (design for manufacture and assembly) mukaan, vaikka toiminnot niille on erilaiset.

## 5.4 Orsikokoonpano

Orsikokoonpano eli ns. koelaitteen pääripustus kiinnitetään kummastakin päästään yllä esiteltyihin paulukauluksiin. Orsikokoonpanon korvakkeisiin kiinnitetään etäisyys ja kulmasäädettävät varsi-kokoonpanot, joihin taas itse koelaitte kiinnitetään. Orsikokoonpanon pääprofiilina toimii järeähkö, putkilaaserilla leikattu 150x150x5 RHS neliöputkiprofiili, johon muut kappaleet hitsattiin paikalleen. Kuten kuvista alla näkee, profiiliin hitsattiin korvakkeita, joihin tappiliitoksilla liitetään varsien kulmansäätökokoonpanot ja vinotuet. Tappiliitosten akselilinjojen samankeskisyys eri korvakkeissa varmistettiin sorvaamalla sopiva tangonpätkä tiukalla työntösovitteella (kuvio 15). Korvakkeiden kokoonpanoa on myös helpotettu suunnittelemalla ohjurinastoja sekä reikiä levyleikkeisiin.



Kuvio 14. Orsikokoonpano



Kuvio 15. Kannatuskorvakkeiden kokoonpanoa



Kuvio 16. Orsikokoonpanon nivelpäät



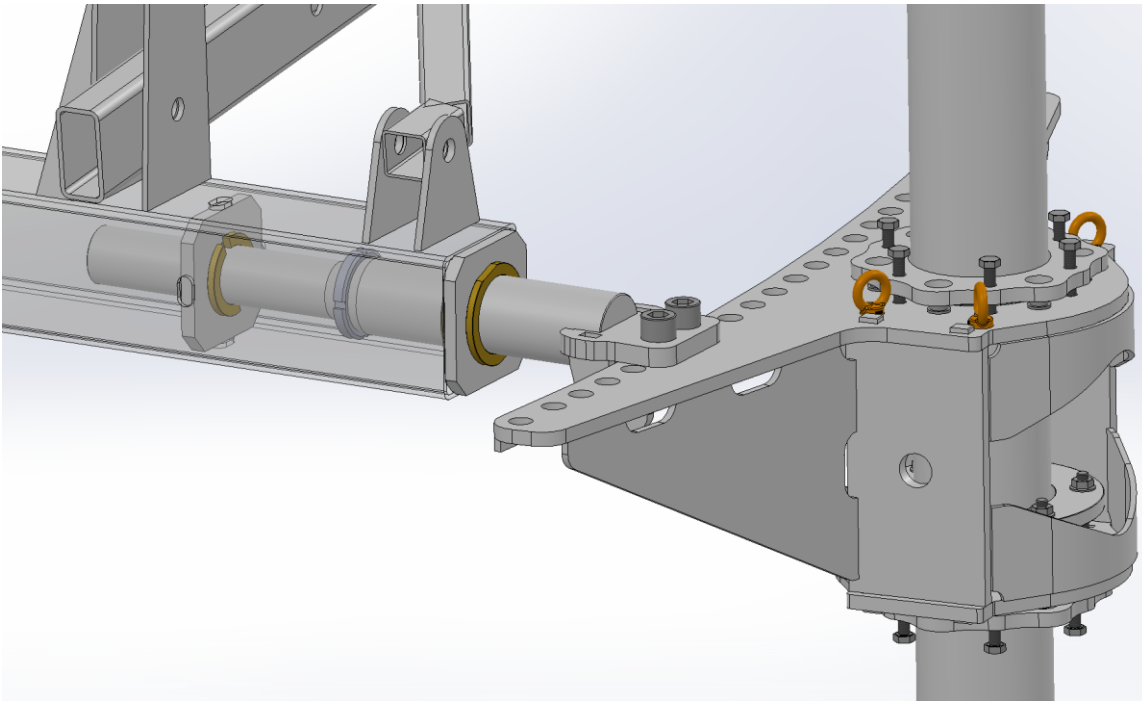
Kuviossa 16 nähdään kuormituskriittisten saumojen hitsausvalmistelut. Lyhyen RHS neliöputken päädyt on viistetty voimakkaasti kunnollisen tunkeman varmistamiseksi suoraan levypintaan. Kuviossa 17 orsikokoonpano on pintakäsitelty ja valmiina koekasausta varten.



Kuvio 17. Pintakäsitelty orsikokoonpano

## 5.5 Liukuakselikokoonpano

Orsikokoonpanon avonaisessa päädyssä on oma paikkansa liukuakselikokoonpanolle, joka mahdollistaa porauspaalujen etäisyyden muutoksen toisiinsa nähden  $\pm 125$  mm. Tämä oli tärkeä ominaisuus, sillä paaluja merenpohjaan juntatessa, on niitä hyvin haastava asettaa edes 100 mm tarkkuudella oikeaan paikkaan. Siksi paalujen välinen etäisyystoleranssi on mahdollistettava liukuakselin edestakaisella ( $\pm 125$  mm) liikkellä.



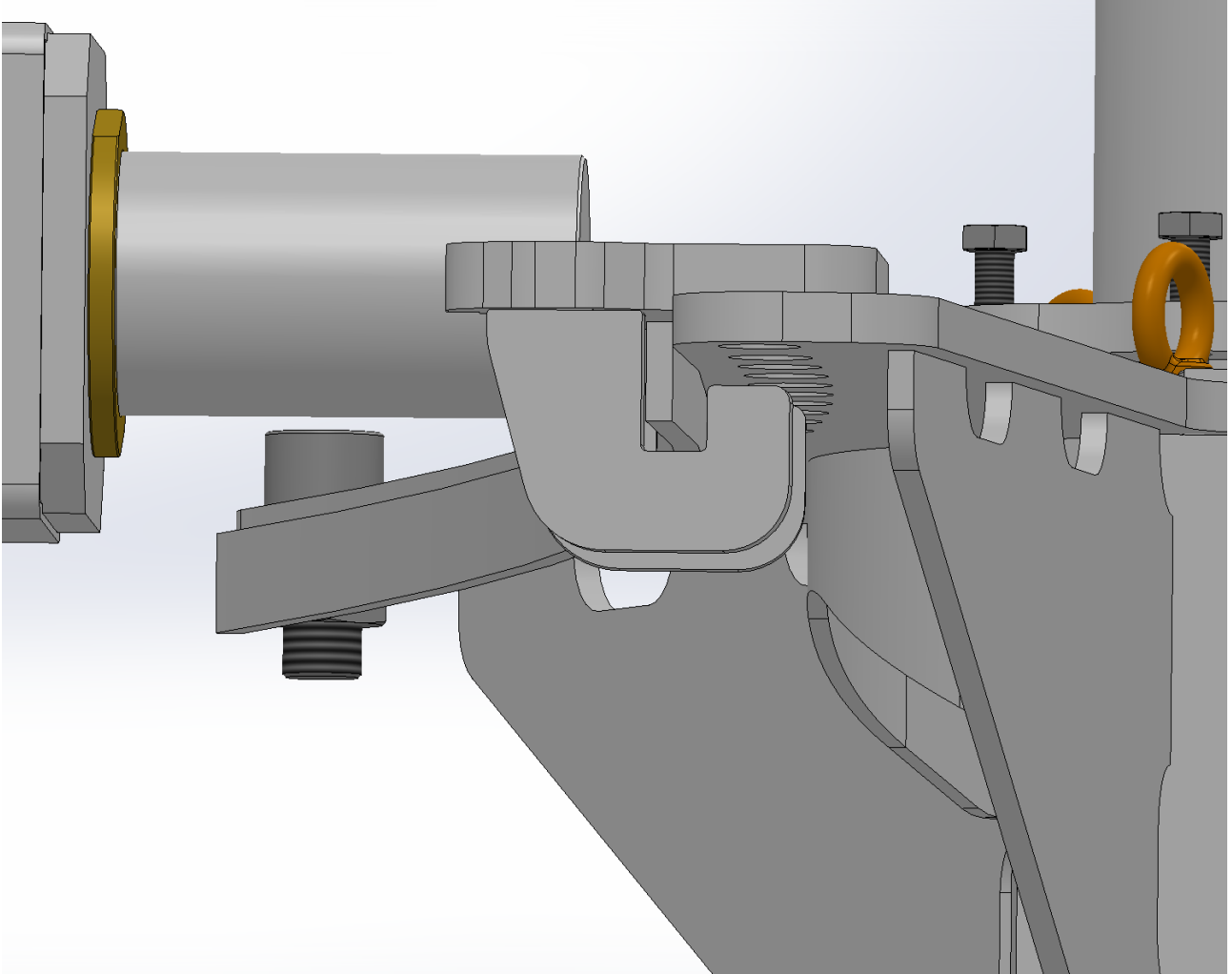
Kuvio 18. Liukuakselikokoonpano

Liukuakseli valmistettiin 25CrMoS4 nuorrutusteräksestä, joka on hyvin koneistettavaa laatua mutta hitsauksessa kappaleen seosaineiden vuoksi tulee se esilämmittää 200–300°C jotta estetään säröjen ja halkeamien syntymistä. Kappaletta lämmitettiin tasaisesti n.10 min nestekaasulla ja suurella suuttimella peltiputken sisällä tasaisesti. Digitaalisella lasermittarilla mitattiin mattapintaisista kohdista kappaleen riittävä lämpötila ennen hitsauksen aloittamista (kuvio 19).

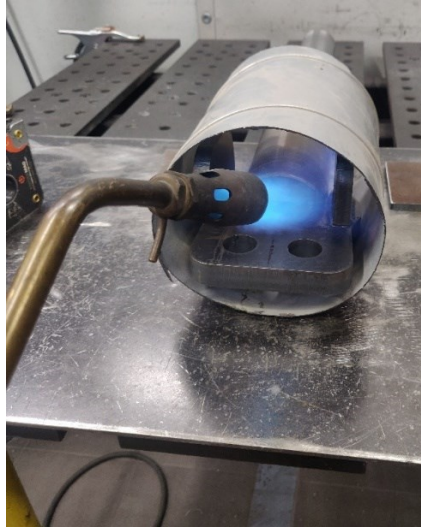
Koska akselin edestakaisesta liikkeestä haluttiin jouheva, piti se liukulaakeroida. Liukulaakereiksi valikoitui punametalliset eli pronssiset puolivalmiit laakeriähiöt, sillä niillä on hyvä korroosionkestävyys, helppo työstettävyys sekä erinomaiset liukuominaisuudet. Punametallia käytetäänkin laajasti merivesi toteutusten yhteydessä erilaisissa koneen osissa. Laakerinpitolevyjen kierteitykseen varauduttiin jo suunnitteluvaiheessa, sillä leikkeet leikattiin kuvion 21 mukaisilla ”ulokkeilla” jotta kierteytettävä reikä sopii kolmieleukapakan keskelle sorvissa. Ulokkeet rälläköitiin pois kierteityksen jälkeen.

Liukuakselin keskellä on varmistusruuvilla varustettu DIN 981 M70x2 akselimutteri, joka estää akselin ulos tippumisen. Sisäänpäin liikkeen rajoittimena toimii ulomman liukulaakerin ja akselin päätäkappaleen kontakti. Liukuakseli on kiinnitetty kauluskokoonpanoon M24 pultti- ja mutteriparilla,

jotta koko koejärjestelyä pääsee kääntämään reikäjonon mukaan. Liukuakselin päässä olevat ”koukut” varmistavat ettei akseli ja täten koko koelaitte pääse tippumaan kauluksen säätölevyn päältä. Päädyissä käytetään samoja pultti- ja mutteripareja varmistimena.



Kuvio 19. Liukuakselin kulmasäätö



Kuvio 20. Nuorrutusteräsakselin esilämmitys



Kuvio 21. Liukuakseli ja liukulaakerilevyt



Kuvio 22. Liukulaakerien ja levyjen kierteytys

## 5.6 Varsikokoonpanot

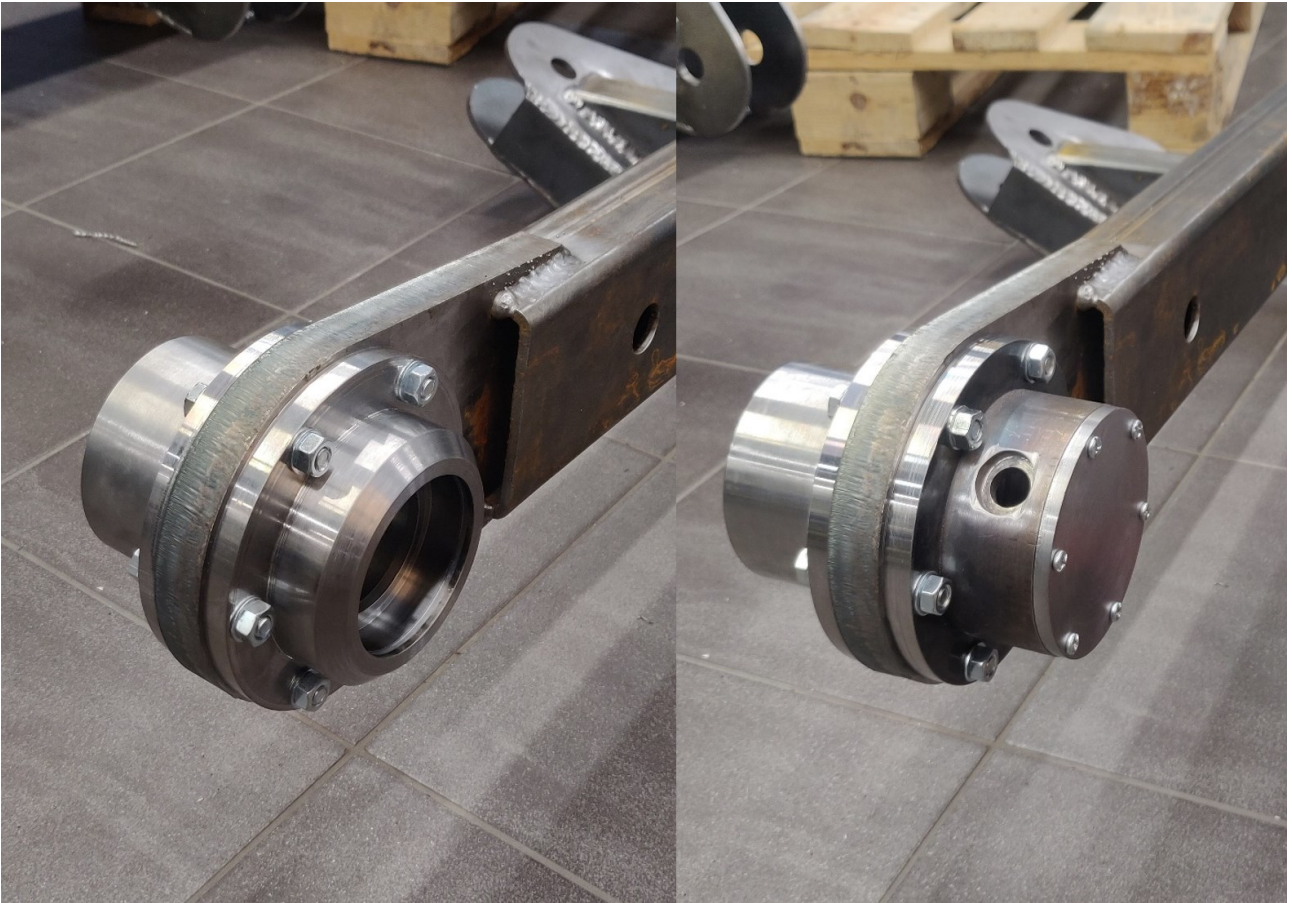
Varsikokoonpanot kiinnittyvät orsikokoonpanoon ja kannattelevat käytännössä koko koelaitetta vaimentimiseen ja aalto-ohjureineen. Varsikokoonpanoihin sisältyy paljon tarkkuuskoneistettuja osia kuten itse kannatuslaakerien laakeripesät sekä kaikki niiden vastinkappaleet. Varsien päässä olevat laakeripesät ja niihin sijoitettujen laakerin pitää sällia muutaman asteen rihtausvirhe eli epäyhdensuuntaisuus vaimentimen akselikokoonpanon akselien kesken.



Kuvio 23. Koneistetut laakeripesät varsien päässä



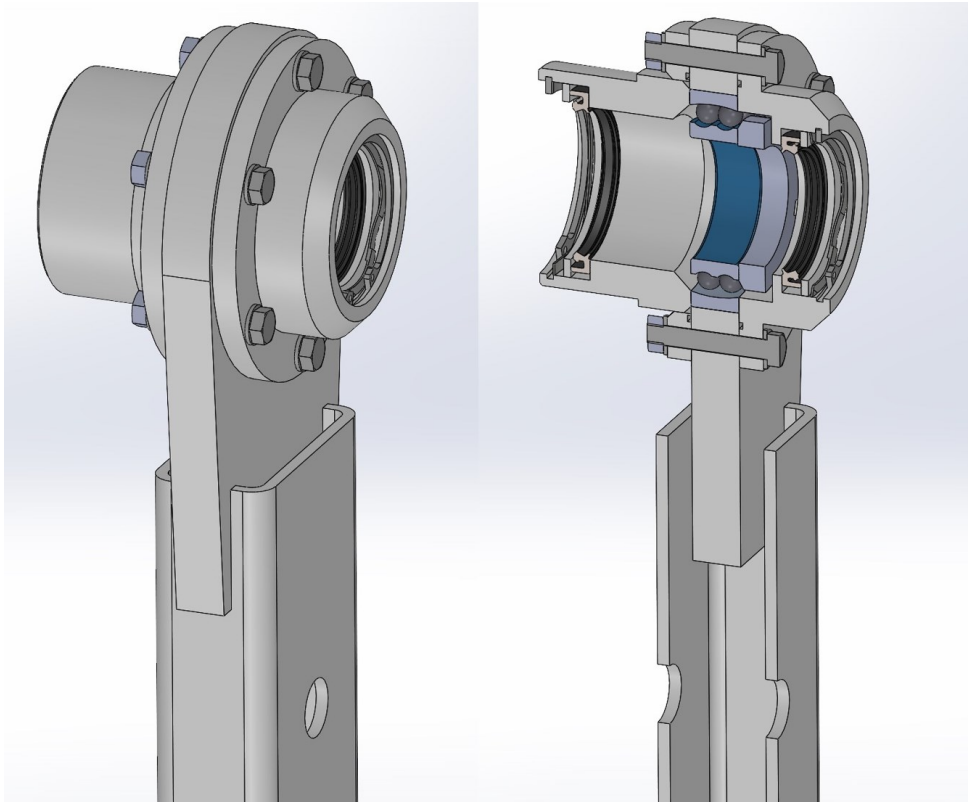
Kuvio 24. Varsien koestusta



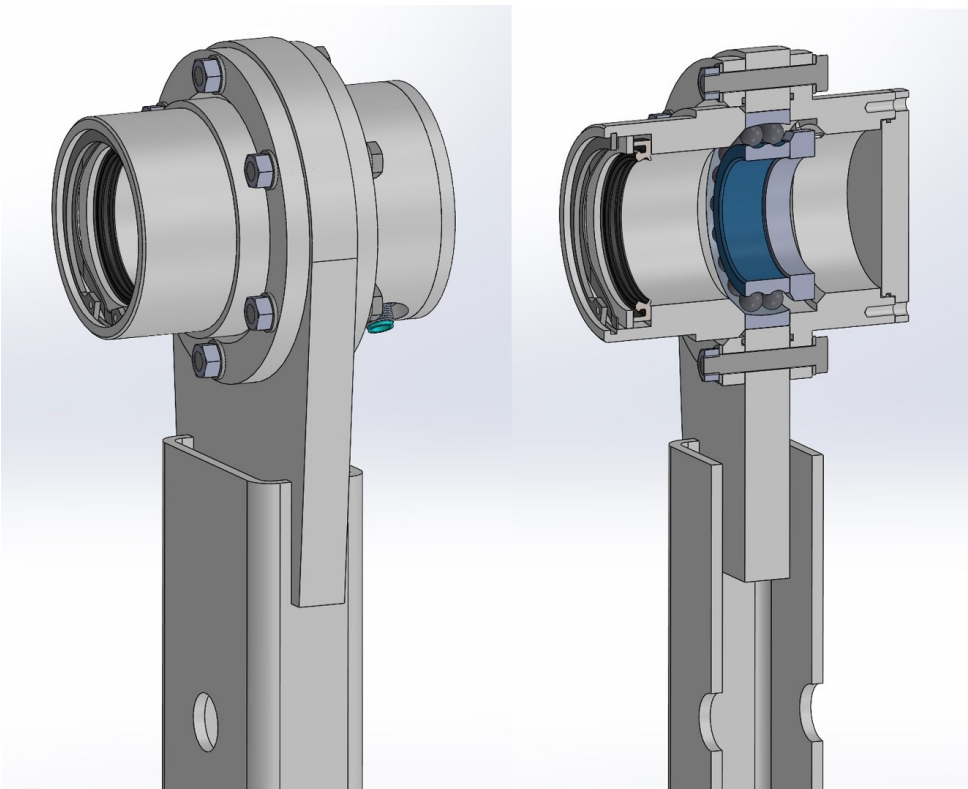
Kuvio 25. Erilaiset laakeripesät

Kuviossa 25 vasemmalla avoimena näkyvästä laakeripesästä välitetään nuorrutusteräsakselilla vaihtimen liikettä eteenpäin. Oikeanpuoleisessa kuvassa sylinteripinnassa on varaus anturoinnille millä kerätään data tarvittavista liikkeistä.

Kumpaakin varsikokoonpanoa yhdistää laitteen sisemmän puolen (kuvassa vasemman puolen) identtiset aalto-ohjurin rungon huuliholkit, joiden ympärille kokoonpano kiinnittyy. Kuten kuvioista 26 ja 27 havaittavissa on, holkin ulkopäähän on suunniteltu uivat/kelluvat akselitiivisteet ja niiden kiinnitystarvikkeet, jotka mahdollistavat akseliston vaaditun rihtausvirheen: DIN 472 mukaiset sisäpuoliset lukkorengaat koossa  $d=80$ , aaltojousiprikat jousivakiolla  $76 \frac{N}{mm}$ , muoviset prikot, joilla pidetään pölyhuulella varustettua akselitiivistettä paikallaan. Samanlainen toteutus on myös akselinpäädyn toisella puolella, josta akseli jatkaa kokoonpanon läpi. Anturipuolen kokoonpanossa on suojakansi anturikehikon päällä. Kuviossa 28 näemme edellä mainittujen kokoonpano osat sekä puolivalmiin akselin joka sorvauksen jälkeen on lähdössä jysyttäväksi.



Kuvio 26. Akselinpäädyn varsikokoonpano



Kuvio 27. Anturinpäädyn varsikokoonpano

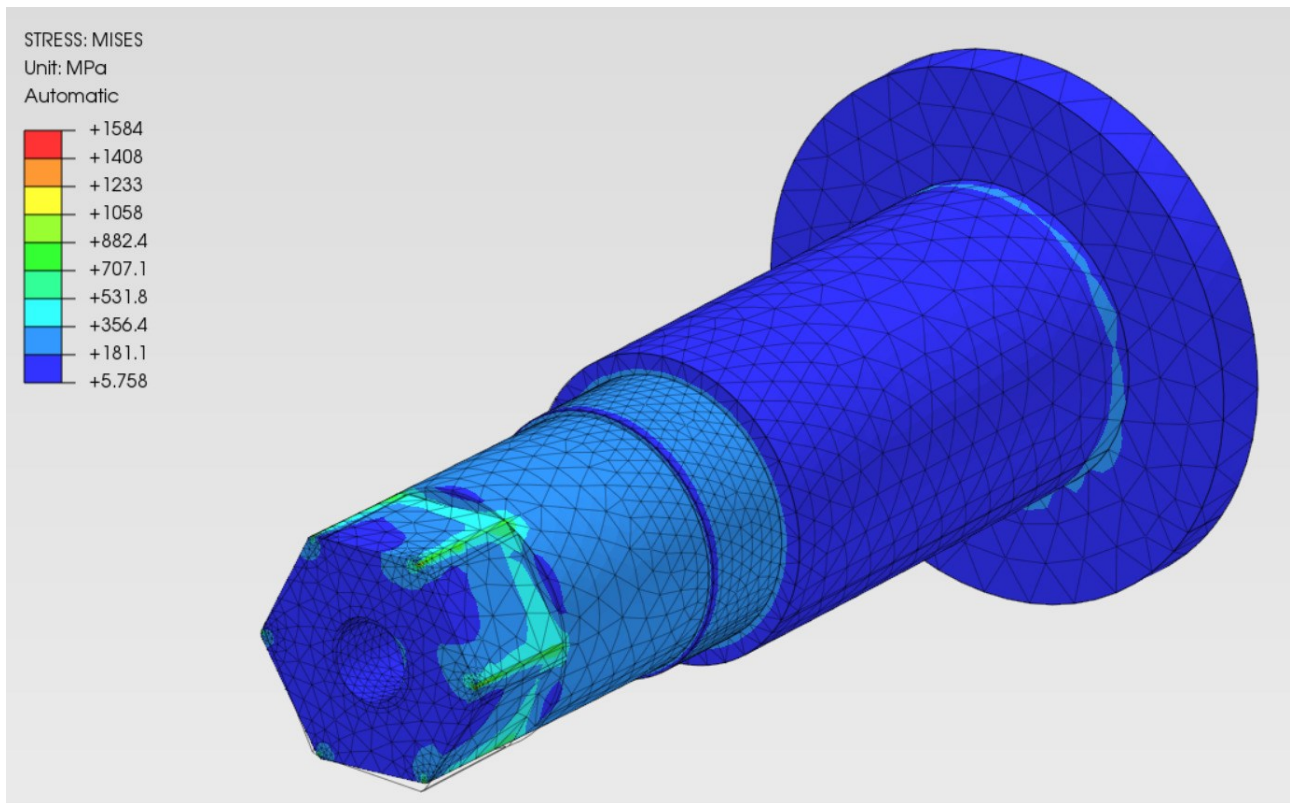


Kuvio 28. Varsikokoonpanon koneistetut osat

## 5.7 Vaimentimen akselikokoonpano ja FEM laskenta

Akselikokoonpanoon on kiinnitetty vaimentimen kokoonpano pystyssä olevien RHS neliöputkiprofiilien lävitse. Näin se on osa kokonaista laitetta ja sitä kannattelee varsikokoonpanot kummaltakin puolelta. Kuviossa 33 etualalla näkyvä akseli ja siihen yhdistetty voimavälitysvipu, joka on toisesta päästään kiinni hydraulisyliinterissä, oli erittäin kuormituskriittinen kappalepari. Alla FEM laskennan tuloksia kappaleista.

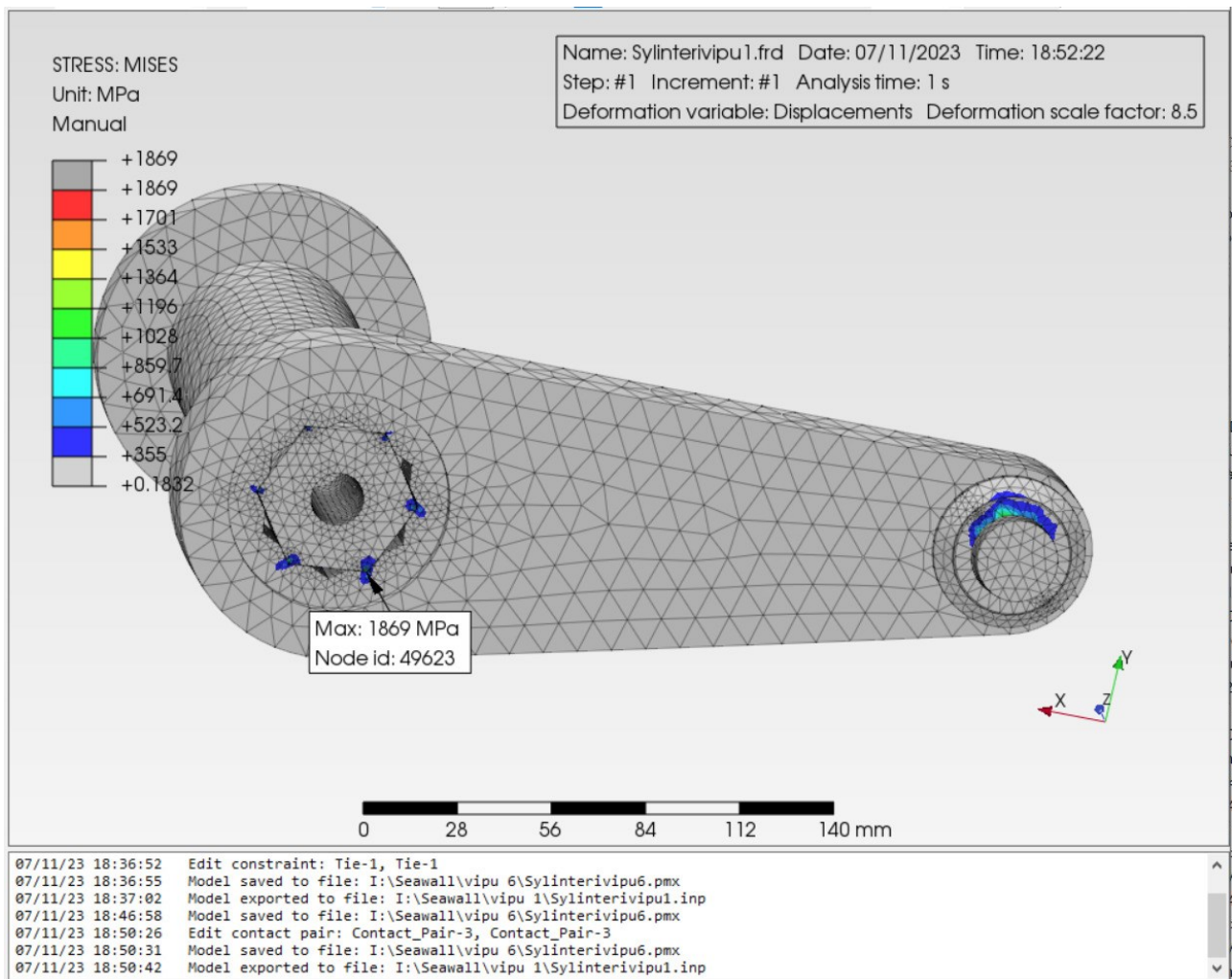




Kuvio 29. Akselitapin Von Mises jännitykset

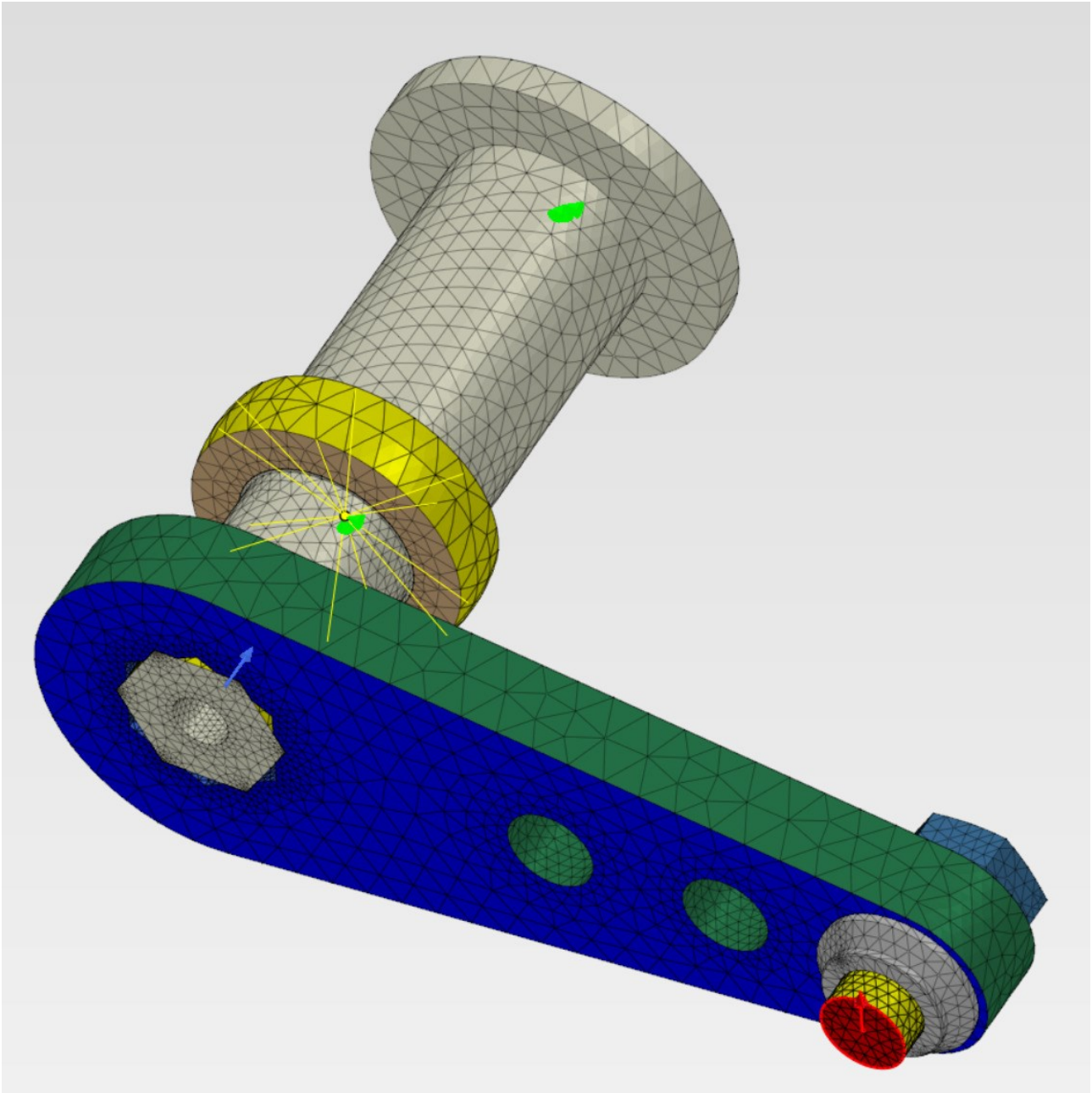
Kyseinen akseli (kuvio 29) on kuormitusteknisesti kriittinen yksittäinen osa. FEM laskennassa tulitiin tulokseen, että materiaalina klassinen S355 rakenneteräs ei tule akselissa kestäämään ilman, että jännitykset nousevat yli myötörajan. Tästä syystä kyseinen kappale toteutettiin 25CrMo4 nuorrutusteräksestä jolla  $Re = 600 \frac{N}{mm^2}$  ja  $Rm \geq 750 \frac{N}{mm^2}$  tässä halkaisija kokoluokassa ( $D \leq 100$ ).

Vivun laskennassa päästiin hyvin maltillisiin jännityksiin, muutaman kehitys kierroksen jälkeen. Vivun kontaktipinta-alaa kasvatettiin ainesvahvuutta lisäämällä ja täten suuret jännityspiikit saatiin eliminoitua, lukuun ottamatta mallin verkotusteknisistä syistä johtuvia yksittäisiä jännityspiikkejä terävissä kulmissa. Kehityskierrosten jälkeen päädyttiin tulokseen, jotta sylinterivipu (kuvio 30) kestää normaalilla S355 rakenneteräksellä ainespaksuuden lisäämisen myötä.

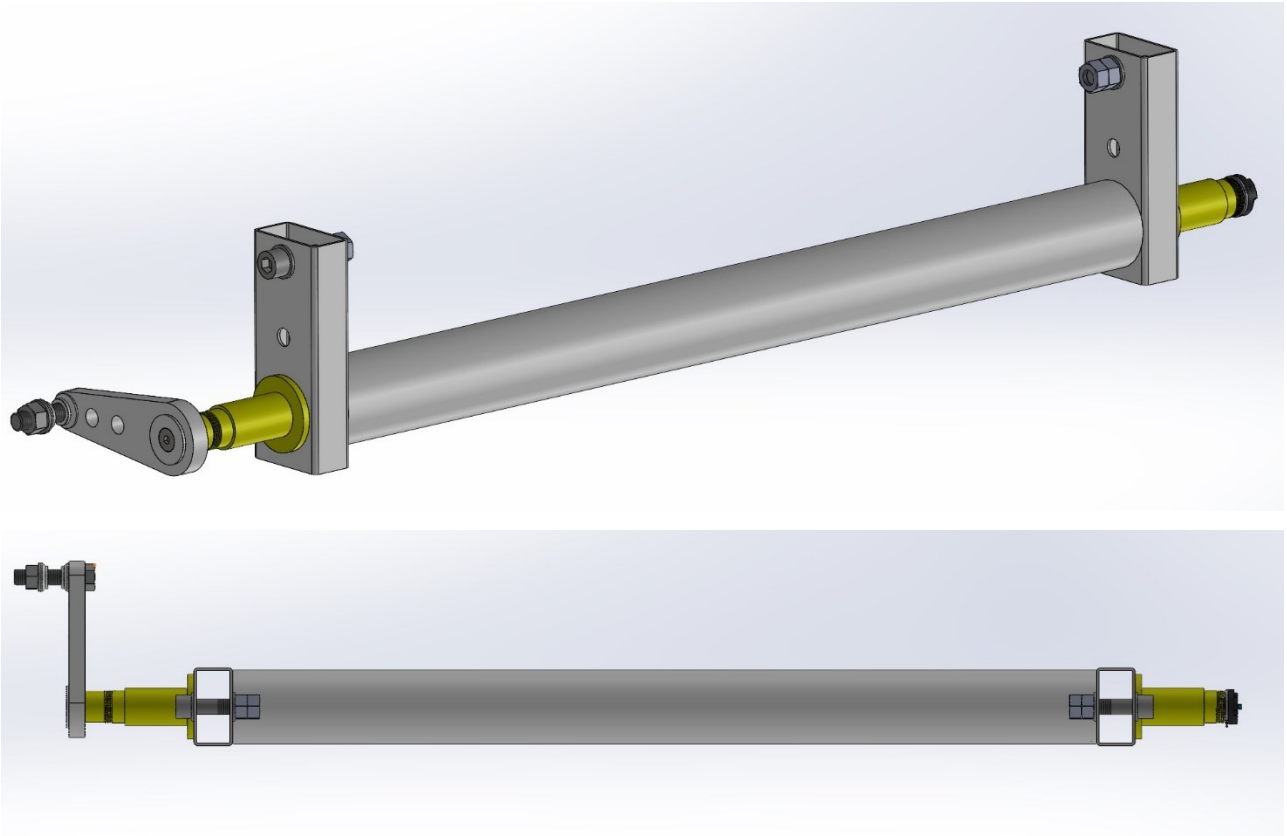


Kuvio 30. Sylinterivipu Von Mises jännitykset

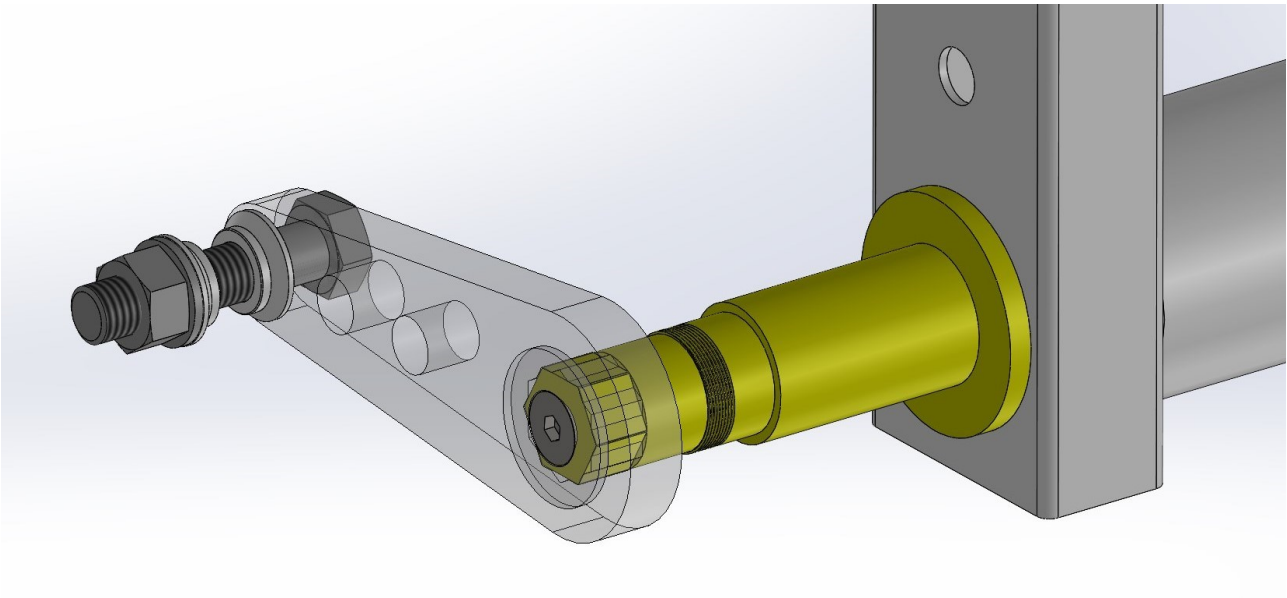
Kuormitusilanne osoitetaan kuviossa 31 jossa punaiseen tappiin kohdistuu 16 642N suuruinen voima ylöspäin sylinterin mäntälinjalla. Vipua painetaan lisäksi akselin kuusiopään sisäolaketta vasten 30kN pulttivoimalla. Keltainen ”rengas” mallissa on laakeri, jonka sisällä näkyy tukipiste, johon laakeri on kiinnitetty rotaatiot sallien. Akselin laippa on reunoiltaan ja osittain pohjasta jäykästi kiinni.



Kuvio 31. Kuormitustilanne FEM laskennassa



Kuvio 32. Vaimentimen akselikokoonpano



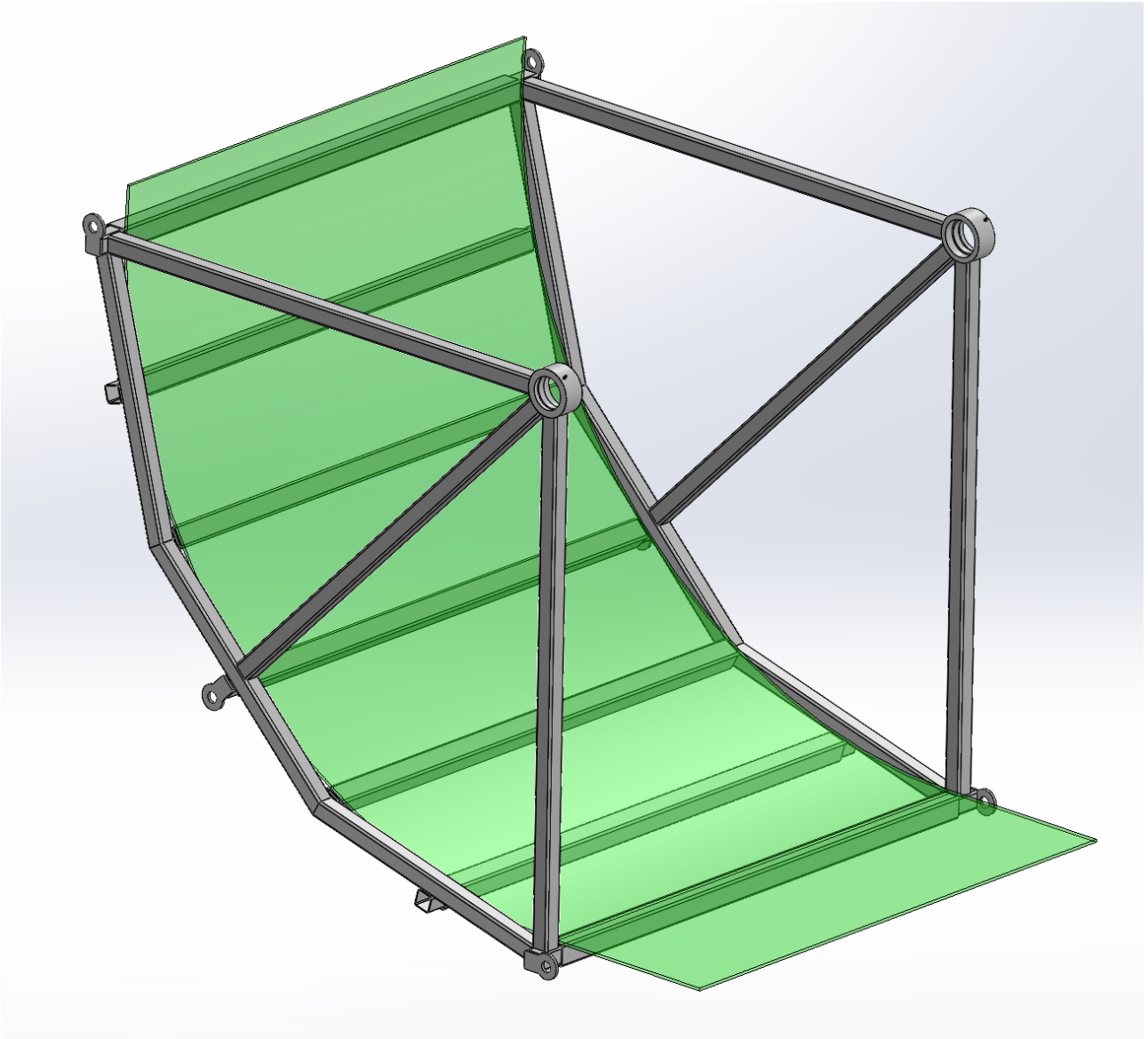
Kuvio 33. Vaimentimen akseli



Kuvio 34. Akselikokoonpanon valmistusta

## 5.8 Aalto-ohjuri

Koska aikaisempien CFD laskelmien perusteella päädyttiin seawall menetelmistä tutun ”Curved” tyyppisen koelaitteen peruseriaatteen käyttämiseen, lähdettiin hakemaan ratkaisua sen toteuttamiseksi myös koelaitteessa. Koska suuren kaarevan aalto-ohjurin toteuttaminen tukevasti mereen on haasteellista, päädyttiin laitteessa kuvio X mukaiseen ratkaisuun jossa 6 mm paksuinen hyvin kulutusta kestävä 3000x1500 PA muovilevy on tuettuna järeissä RHS- neliöputkipalkki kehikoissa. Nämä putkipalkkikehikot ovat nivelpisteistään työntösovitteella kuvioiden 26 ja 27 aalto-ohjurin huuliholkkien päällä. Kehikko ankkuroidaan lenkeistään ympäröivään merenpohjaan kiinni.



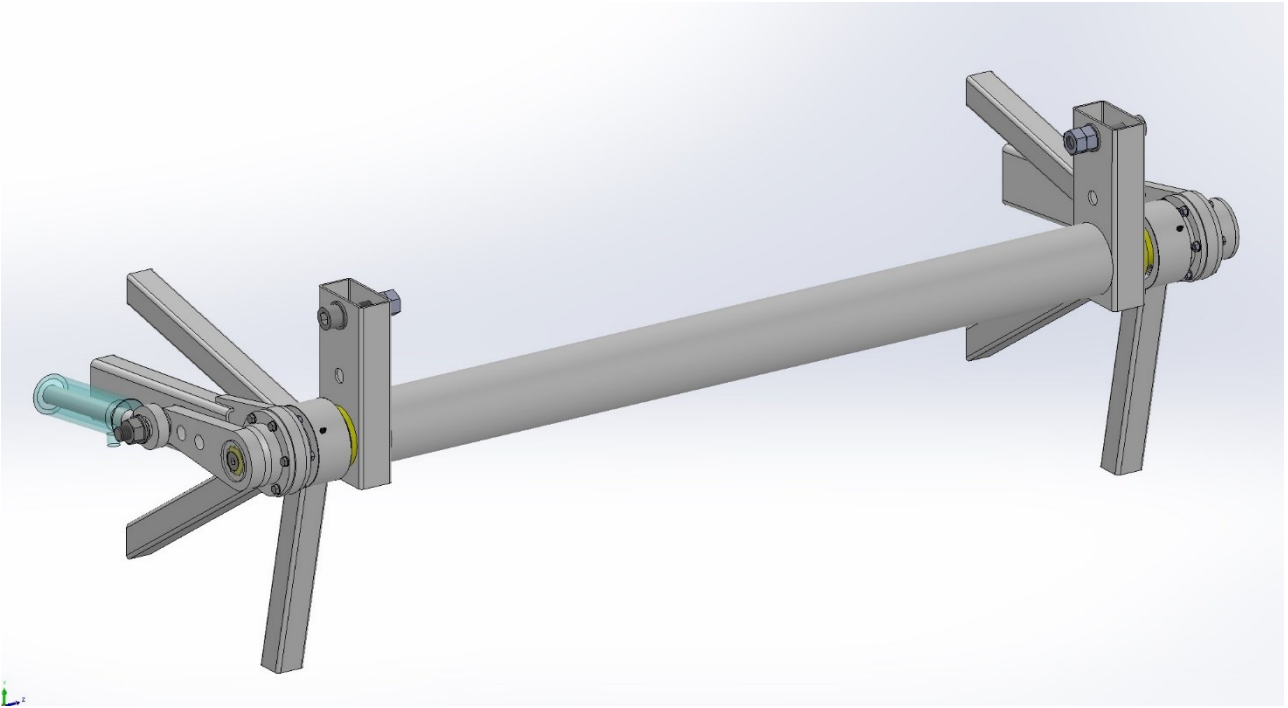
Kuvio 35. Aalto-ohjuri

## 5.9 Vaimennin

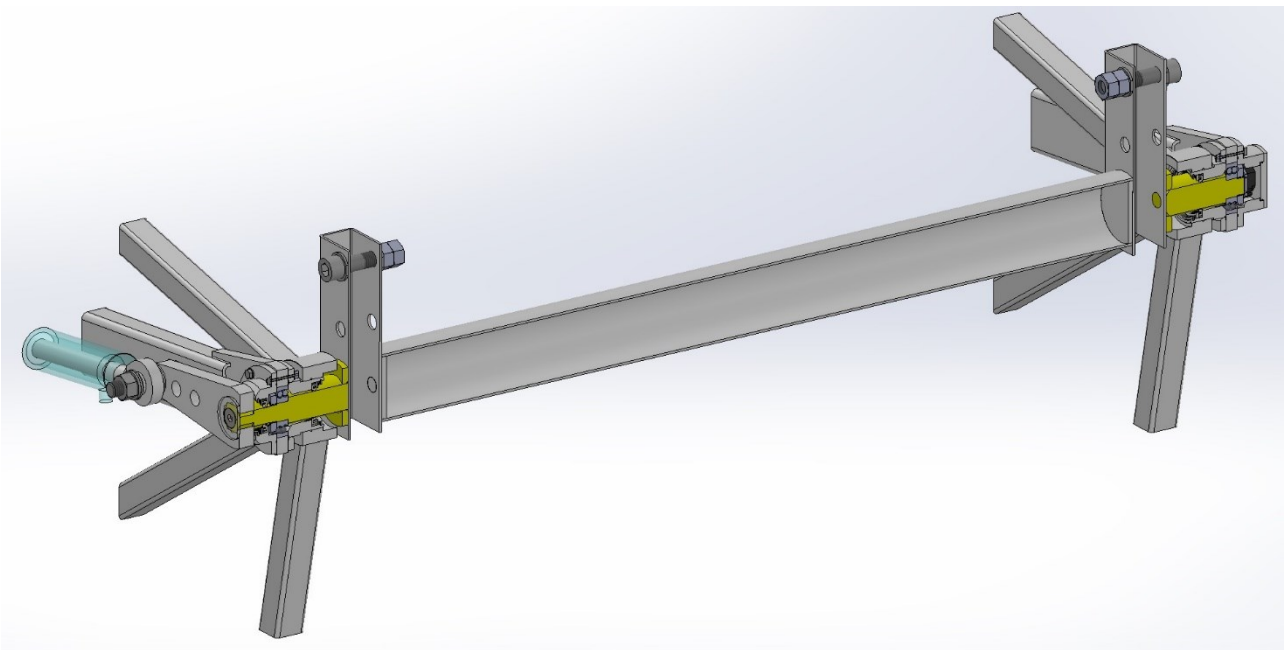
Vaimentimen siivistöratkaisu esitetty liitteessä 2.

## 5.10 Kokonaisuus

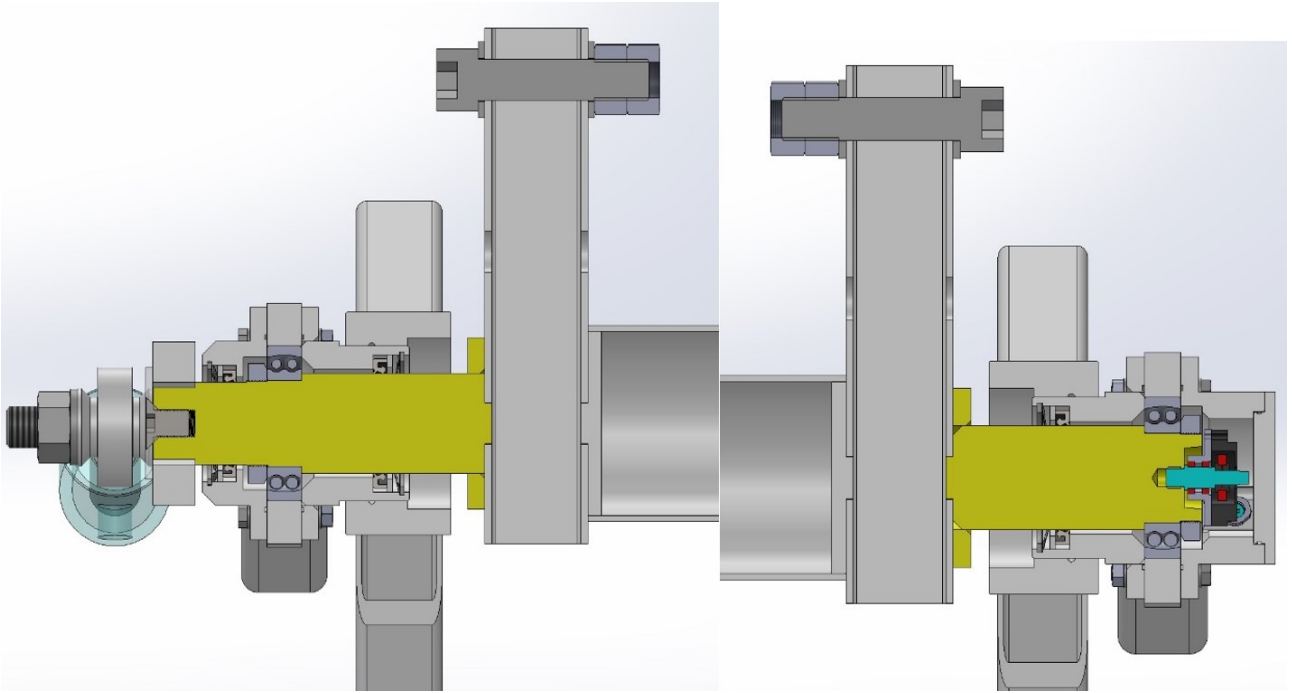
Kuten alla olevista kuvista näkee, oli kaikkien yllä olevien kokoonpanojen ripustaminen varsi-kokoonpanoihin todella haastava kokonaisuus. Tässä kuitenkin onnistuttiin hyvin, saavuttaen kaikki koelaitteelta vaaditut säätöparametrit. Pääkokoonpanokuvat esitetty ilman vaimenninta.



Kuvio 36. Kokonaisuus 1

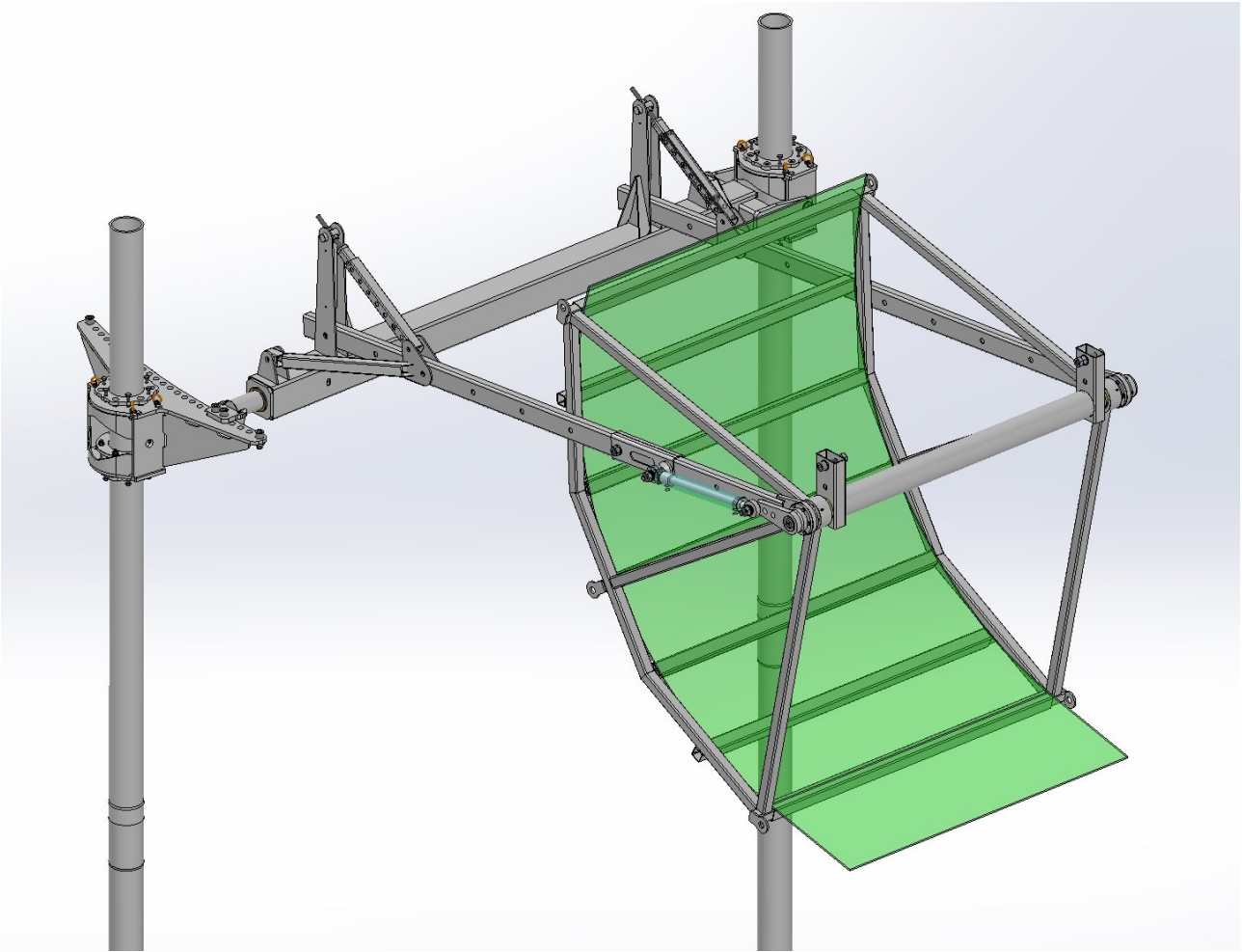


Kuvio 37. Kokonaisuus 2

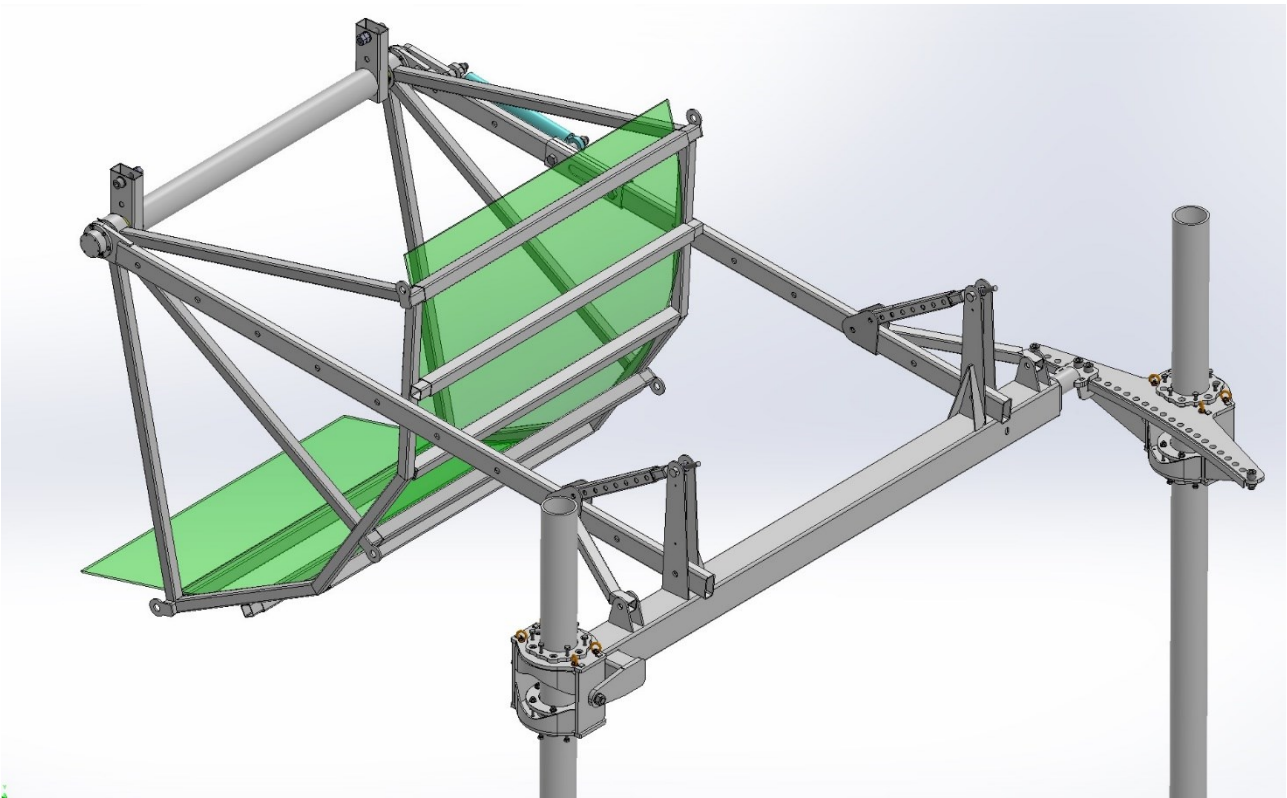
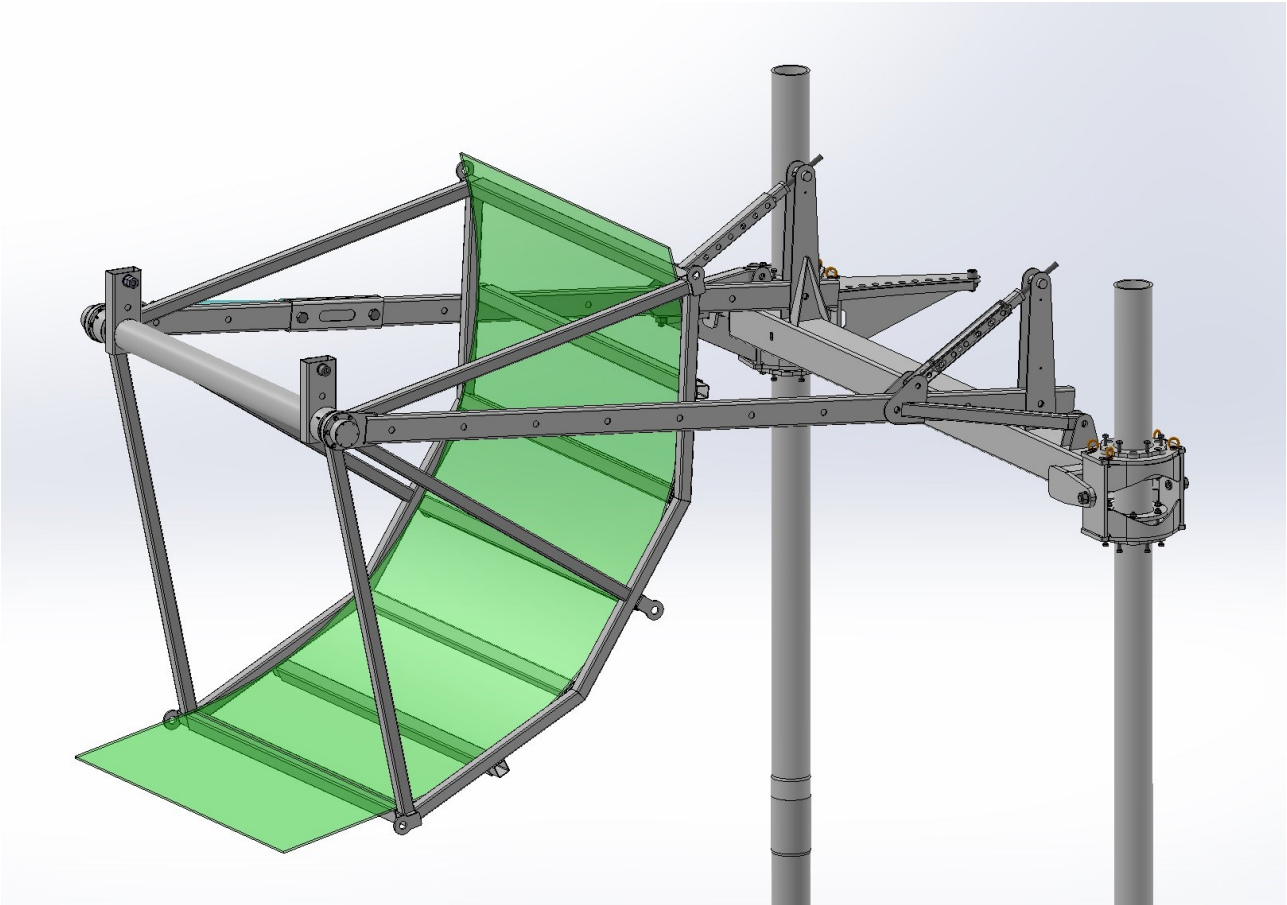


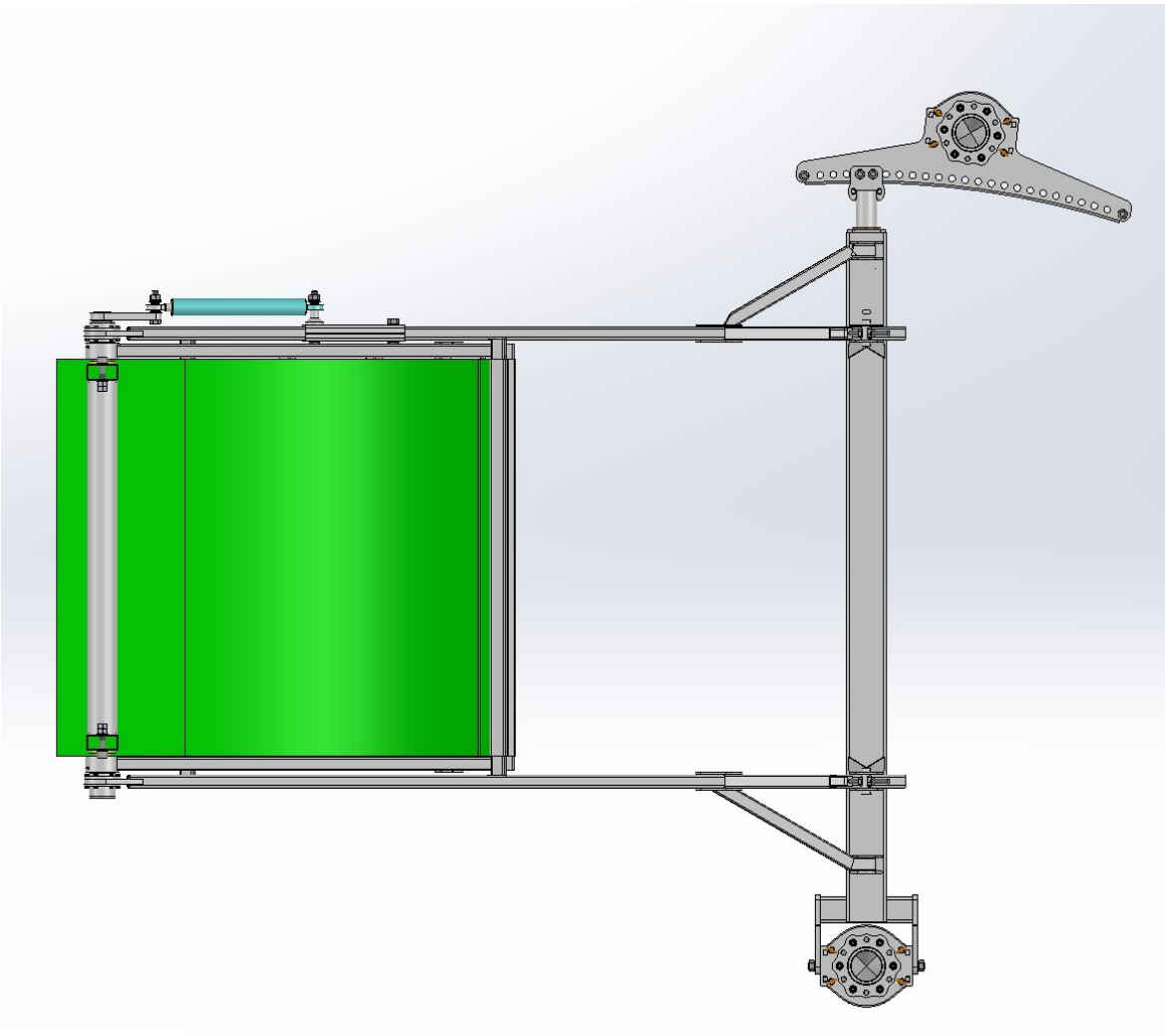
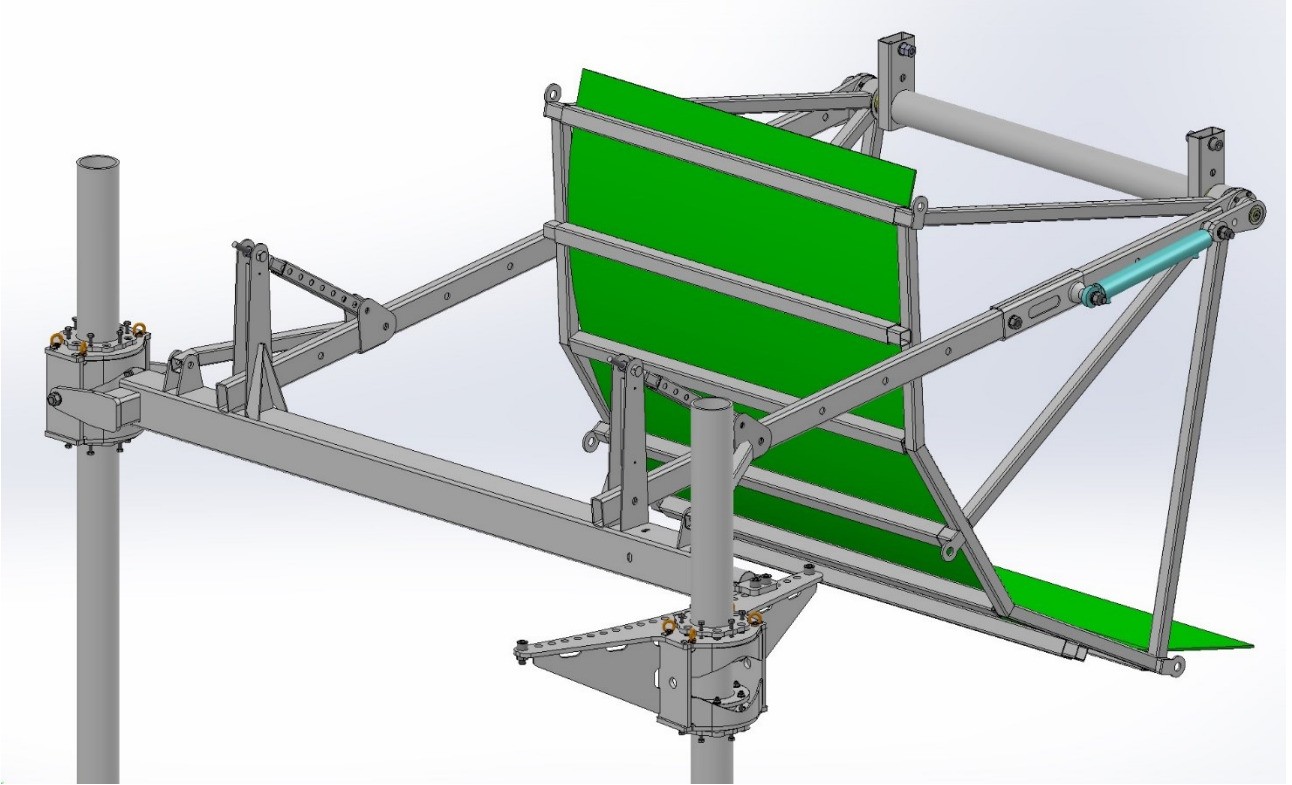
Kuvio 38. Kumpikin akselikokonaisuus





Kuvio 39. Pääkuvat 1-5.





## 6 Pohdinta

Konstruoidun laitteen suunnitteluvaatimukset saatiin täytettyä ilman merkittäviä puutteita. Näin ollen laitteen toiminta ja luotettavuus tulee niiden mukaan olemaan tasolla, johon tilaajakin on tähdännyt. Tunnetusti aaltovyöhykkeellä tapahtuu ennakoimattomia asioita, joihin on lähes mahdoton varautua. Koealueella todettiin keväällä aaltojen siirrelleen tonnien painoisia kivenjärkeleitä pitkin pohjaa, niitä vastaan on käytännössä mahdoton koelaitteita mitoittaa. Tällaisessa tapauksessa tulee kyseeseen helpon purettavuuden vaatimus, jotta laite saadaan huollettua. Tämä koskee myös mahdollisia havaintoja virheellisesti määritetyissä vaatimuksissa. Tämän kaltaisia laitteita yleensä kehitetään askeleittain löydösten perusteella, mihin joudutaan, jos konsepti osoittautuu toimivaksi ja projekti saa jatkoa tavalla tai toisella. Suurin osa laitteesta toimii siinäkin tapauksessa ja laite on purettavissa mielekkäisiin osiin rekkakuljetusta varten.

Mekaanisesti jotkut rakenteet tulivat ylisuuriksi jonkun yksittäisen liittyvän komponentin suorituskyvyn määrittäessä dimensiot, mutta annetulla aikataululla oli tyydyttävä tilanteeseen. Kyseessä on kuitenkin yksittäiskappale, jonka olennainen piirre on luotettava toiminta, ei sarjatuotteen tinnitty hinta, joten pieni ylimitoitus ei ole kriittistä.

Laitteen käyttötarkoitus on hyvinkin hyvä eetiikan mukainen, työssä ei kehitetty mitään hyödyttöä kuluttajatuotetta massamarkkinoille, vaan yritetään ratkaista todellinen ympäristöä kuormittava ongelma. Lisäksi tarjoutuu mahdollisuus tuottaa uusiutuvaa energiaa tai mitä tahansa tarvittavaa, mekaanisesta tehosta konversiolla aikaansaatavaa asiaa, mm. vaikka makeaa vettä. Työssä ei käsitelty henkilötietoja tai muita eettisten näkökulmien kannalta haasteellisia asioita, joten niistä ei huomioitavia tai työhön vaikuttavia seikkoja koitunut.

Laitteen toteutuksessa käytettiin romuttamolta pelastettuja teräspaaluja, ne sekä rakenneteräsosat ja polyeteenimuovi ovat täysin kierrätettävissä. Hydrauliikkakin muodostettiin pääosin kierrätyskomponenteista ja anturoinnin mekaniikka sekajätteenä hävitettävistä komponenteista. Elektroniikka voidaan hävittää elektroniikan kierrätyksen kautta niiltä osin, kuin niillä ei ole jatkokäyttöä muissa yrityksen tutkimusprojekteissa.

Hydrauliikan käyttönesteeksi valittiin elintarvikelaatuinen öljy ilman lisäaineita, joten pahakaan vuoto ei aiheuta kuin hetkellisen läiskän, joka hajoaa ympäristöön luonnollisesti.

Laitteen tehon absorbointikyky saatiin teorian mukaan riittäväksi yläveden myrskyä varten. Yksittäisen vuoden aallon sattuessa yläveden aikana kohdalle ylitetään tehoraja, mutta siihen on varauduttu sallimalla ylisuuri liike. Mitään ei hajoa, mutta tuloksissa se näkyy hetkellisenä ylivuotona seuraavaan aallonpohjaan asti. Toinen asia on tuollaisen sattumuksen vaikutus ympäristöön, kulkeeko joku kivi, osuuko joku irti päässyt vene tai esine koelaitteeseen. Joka tapauksessa pohjan muodossa tapahtuu hiekan siirtymää eli alueen geometria muuttuu mahdollisesti pysyvästi.

Teorian opettelussa käytiin läpi useita Coastal Engineering:iä käsitteleviä kirjoja ja julkaisuita. Sisältö oli varsin samaa, valitut lähdeteokset esittivät asian ja kaavat ehkä helpoimmassa mahdollisessa omaksuttavassa muodossa.

Mahdolliset kehitysehdotukset nousevat esiin vasta merikokeiden myötä. Mikäli jokin ei toimi, tehdään siihen tietysti korjaus, jotta alkuperäinen tavoite saavutetaan, mutta vaikea nähdä syytä toisen samamittakaavaisen laitteen rakentamiseksi.

## Lähteet

- BBC. 2023. Coastal erosion: Climate group warns communities of cost. Viitattu 22.5.2024. <https://www.bbc.com/news/uk-england-norfolk-64465877>
- Coastal Erosion. 2021. U.S. Climate Resilience Toolkit. Yhdysvaltain hallitus. Viitattu 15.5.2024. <https://toolkit.climate.gov/topics/coastal-flood-risk/coastal-erosion>
- Coastal erosion. 2023. Australian Government. Geoscience Australia. Viitattu 20.5.2024. <https://www.ga.gov.au/education/natural-hazards/coastal-erosion>
- Coastal Process – Erosion. 2019. National Park Service, Yhdysvaltain sisäministeriön yksikkö. Viitattu 15.5.2024. <https://www.nps.gov/articles/coastal-processes-erosion.htm>
- Conathan, M. Buchanan, J. Polefka, S. 2014. The Economic Case for Restoring Coastal Ecosystems. Center for American Progress. Oxfam America. Viitattu 20.5.2024. [https://cdn.americanprogress.org/wp-content/uploads/2014/04/CoastalRestoration\\_report2.pdf](https://cdn.americanprogress.org/wp-content/uploads/2014/04/CoastalRestoration_report2.pdf)
- Groen, P. Dorrestein, R. 1976. Zeegolven. Kuninkaallinen Alankomaiden säätiöinstituutti. Monia kopioita kaaviosta eri tutkimusjulkaisuissa. Viitattu 1.6.2024. Alkuperäinen: <https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmipubmetnummer/knmipub111-11.pdf>
- Holden, E. 2019. Seawalls to protect US against rising oceans could cost \$416bn by 2040. The Guardian. Viitattu 24.5.2024. <https://www.theguardian.com/environment/2019/jun/20/us-rising-seas-defense-seawalls-cost-report>
- Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas: näin kirjoitan opinnäytetyön tai pro gradun alusta loppuun. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu
- Luijendijk, A. Hagenaars, G. Ranasinghe, R ja muut. 2018. The State of the World's Beaches. Scientific Reports 8. Viitattu 31.5.2024. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-24630-6>
- McCarthy, N. 2019. U.S. Expected To Pay Over \$400bn On Seawalls Up To 2040. Statista. Viitattu 24.5.2024. <https://www.statista.com/chart/18457/estimated-expected-cost-of-seawall-construction/>
- Modelling and analysis of marine operations. 2011. Det Norske Veritas. Viitattu 26.5.2024 [https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab\\_files/Litteratur/DNV/rp-h103\\_2011-04.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/DNV/rp-h103_2011-04.pdf)
- Naess, A, A. 1985. Fatigue Handbook, Offshore Steel Structures. Norges tekniske høyskole. ISBN 82-591-0662-8.
- Sadeghi, K. Abdullahani, I, S. Allbab, H, F. 2018. Classification of seawalls and their failure: an overview. Nicosia. Near East University. Viitattu 24.5.2024. [https://www.researchgate.net/publication/323706367\\_Classification\\_of\\_seawalls\\_and\\_their\\_failure\\_An\\_overview](https://www.researchgate.net/publication/323706367_Classification_of_seawalls_and_their_failure_An_overview)

Sorensen, R.M. 2006. Basic coastal engineering: Third edition. Springer. ISBN-10: 0-387-23333-4.

US Army Corp of Engineers. 2002. Coastal Engineering Manual – Part 1. United States Government. Viitattu 29.5.2024. <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/u43544q/636F617374616C20656E67696E656572696E67206D616E75616C/>

Webb, P. 2019. Introduction to Oceanography. Roger Williams University. Viitattu 17.5.2024. <http://rwu.pressbooks.pub/webboceanography>

## **Liitteet**

### **Liite 1. Piirustuksia**



**Liite 2. Vaimennin (Salassapidettävä)**