

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Tuotekehitys

Tutkintotyö

Simo Saukko

AALTOHEILURIN RAKENTEELLINEN SUUNNITTELU

Työn ohjaaja  
Työn teettäjä  
Tampere 2006

DI Kari Järvinen  
Tampereen ammattikorkeakoulu, Koneosasto

# TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Tuotekehitys

Saukko, Simo                      Aaltoheilurin rakenteellinen suunnittelu

Tutkintotyö                      29 sivua + 45 liitesivua

Työn ohjaaja                      DI Kari Järvinen

Työn teettäjä                      Tampereen ammattikorkeakoulu, koneosasto

Huhtikuu 2006

Hakusanat                      aaltoenergia, aaltovoima

## TIIVISTELMÄ

Vain pieni osa maailman sähköenergiasta tuotetaan uusiutuvia energiamuotoja käyttäen. Puhtaampia tapoja tuottaa energiaa etsitään jatkuvasti.

Maapallon merissä, sen aalloissa ja vuorovesissä piilee valtava energiavaranto. Ongelmana on ollut löytää riittävän tehokkaita menetelmiä aaltoenergian hyödyntämiseksi. Tällä hetkellä aaltoenergiaa hyödynnetään maailmalla vain paikallisesti.

Usein aaltoenergian mekaanisessa hyödyntämisessä käytetään hyväksi vain aaltoliikkeen pysty- tai vaakasuuntaista liike-energiaa. Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella prototyyppi mekanismille, jonka avulla voitaisiin testata menetelmiä saada aaltoliikkeestä mahdollisimman paljon liike-energiaa kelluvaan ponttoniin liitetyn mekanismin avulla. Perustana tässä työssä suunnitellulle mekanismille on patentoitu mekaaninen tasasuuntaaja, jonka avulla aaltoliikettä mukailevan mekanismin oskilloiva liike saataisiin muunnettua tasaiseksi pyörimisliikkeeksi esimerkiksi generaattorin akselille.

Työssä on esitelty mekanismin suunnittelun vaiheita ja sen toiminnan kannalta oleellisia näkökohtia. Työssä käsitellään aaltoliikkeen dynamiikan perusluonnetta ja sen mekaanisen hyödyntämisen mahdollisuuksia vedessä kelluvan ponttonin avulla. Työn liitteinä ovat prototyypin valmistamiseksi tarvittavat piirustukset.

TAMPERE POLYTECHNIC

Mechanical and Production Engineering

Product Development

Saukko, Simo                      Aaltoheilurin rakenteellinen suunnittelu

Engineering Thesis            29 pages + 45 appendices

Thesis Supervisor              Kari Järvinen (MSc)

Comissioning Company Tampere Polytechnic

April 2006

Keywords                         Wave energy, Ocean energy

## ABSTRACT

Only a small fragment of the world's electric energy is produced by using renewable energy sources. More environmental ways to produce energy are being searched continuously.

An extensive energy potential lies in the world's ocean waves and tides. It has been found problematic to utilize this energy efficiently. At the moment, ocean energy sources are used in energy production only locally.

Usually mechanisms used utilizing wave energy, are using only horizontal or vertical kinetic energy of the wave motion. The subject of this thesis was to design a prototype for a mechanism that can be used to study methods to gather as much kinetic energy of orbital wave motion as possible using link mechanism connected to a pontoon. As a backbone of this prototype, is a patented device which can be used in 'rectification' of the oscillating movement produced by mechanism following the wave motion. Furthermore, this 'rectified' motion can be used e.g. rotating an electric generator.

In this thesis, the phases of the design process and the technical viewpoints behind this mechanism are being represented. Dynamic nature of the wave motion in water and possibilities of utilizing it by using link mechanism connected to a pontoon are being studied. Technical drawings of the designed prototype can be found in the appendix of this thesis.

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO .....	4
1. JOHDANTO .....	5
2. AALTOLIIKE JA ENERGIA .....	6
2.1 Aaltoenergiasta .....	6
2.2 Aalto .....	6
2.3 Veden aaltoliike .....	8
2.4 Aaltosorvi.....	11
3. AALTOSORVIN SUUNNITTELU .....	11
3.1 Ideointi.....	12
3.1.1 Ratkaisumalli ”nuijapää” .....	13
3.1.2 Ratkaisumalli ”polvi” .....	15
3.2 Suunnittelu .....	16
3.2.1 Laakerointi .....	18
3.2.2 Nivelsysteemi ja mekanismin liikerata.....	20
3.2.3 Ponttoni.....	23
3.2.2.1 Ponttonin mitoitus.....	24
4. TULOSTEN TARKASTELUA .....	25
5. LÄHDELUETTELO .....	29
6. LIITTEET.....	29

## 1. JOHDANTO

Maapallon merissä, sen aalloissa ja vuorovesissä piilee valtava energiavaranto. Ihminen on tuntenut aaltoenergian jo aikojen alusta sen lähinnä tuhoisan voiman ansiosta. Aaltoenergian varsinainen hyödyntäminen aloitettiin tieteen keinoin kuitenkin vasta 1970-luvulla, kun öljykriisi herätti maailman valtiot etsimään uusiutuvia energialähteitä muualta kuin fossiilisista polttoaineista ja ydinvoimasta.

Vain 5 % maailman energiasta tuotetaan uusiutuvia energiamuotoja käyttäen. Vain pieni osa tästä on merien aalloista ja vuorovesistä tuotettua energiaa.

Puhtaampia ja taloudellisempia tapoja tuottaa energiaa etsitään jatkuvasti. Aaltoenergian hyödyntämistapoja ja mahdollisuuksia on kartoitettu ja tutkittu huomattavan vähän. Tulevaisuudessa tutkimuksen määrä kuitenkin lisääntyy, sillä kiinnostus uusiutuvia energiamuotoja kohtaan kasvaa jatkuvasti.

Tämän työn tarkoituksena on määritellä prototyyppi nivelmekanismille sekä aaltoseuraimelle, joiden avulla aallon liike-energian hyödyntämistä voitaisiin tutkia ja kehittää edelleen. Mekanismi keskittyy vapaan veden aaltoihin, eli se pyrkii hyödyntämään syvässä vedessä etenevän aaltoliikkeen ympyrämaisesti oskilloivien vesipartikkelien liike-energiaa.

Työn perustana on patentoitu mekaaninen tasasuuntaaja, jonka avulla aaltoliikettä mukailevan mekanismin oskilloiva liike saataisiin muunnettua tasaiseksi pyörimisliikkeeksi jatkokäyttöä varten. Tampereen ammattikorkeakoulu on mukana projektissa, jossa etsitään ratkaisua tämän keksinnön hyödyntämiseksi aaltoenergian tuotossa. Projektiin tehdään tutkimusta oppilaitoksen henkilökunnan ja oppilaiden voimin.

Työssä on esitelty mekanismin suunnittelun vaiheita ja sen toiminnan kannalta oleellisia näkökohtia. Työssä käsitellään aaltoliikkeen dynamiikan perusluonnetta ja sen mekaanisen hyödyntämisen mahdollisuuksia vedessä kelluvan ponttonin avulla. Työn liitteinä ovat prototyypin valmistamiseksi tarvittavat piirustukset.

## 2. AALTOLIIKE JA ENERGIA

### 2.1 Aaltoenergiasta

Aaltoenergia voidaan luokitella aurinkoenergian tiivistyneemmäksi muodoksi. Tuulet ja ilmavirtaukset jotka syntyvät maankuoren epätasaisesta lämpiämisestä, liikkuvat suurien vesipinta-alojen päällä ja siirtävät osan energiastaan veteen. Ilman ja vedenpinnan välinen kitka saa veden pintakalvon venymään ja ”rypistymään”, ja kun vastaavasti veden pintajännitys ja painovoima pyrkivät palauttamaan pintakalvon perustilaansa, syntyy värähtelyä eli aaltoja. Tuulen on entistä helpompi tarttua epätasaiseen vedenpintaan ja voimistaa aaltoja. Mitä epätasaisemmaksi vedenpinta tulee, sitä enemmän tuulen energiaa siihen siirtyy. /1/

Tämä energia saa siis aikaan sekä aaltoja että merivirtoja. Energian määrä, ja siitä syntyvien aaltojen koko, riippuu puhaltavan tuulen nopeudesta, sen kestosta ja pyyhkäisyalasta. Välittyvä energia tiivistyy jokaisessa vaiheessa siten, että alkuperäisen auringon lämpöenergian ollessa tyypillisesti n.  $100 \text{ W /m}^2$ , on sitä edellä mainitun prosessin kautta syntyvien aaltojen energia yleisesti 10-50 kW metrin levyistä aaltorintamaa kohden. /1/

### 2.2 Aalto

Aaltoliike on väliaineessa etenevä säännöllinen häiriö, joka kuljettaa energiaa. Jotta aaltoliike olisi mahdollinen, väliaineen tulee muodonmuutoksessa pystyä aikaansaamaan elastisia palautusvoimia. Käytännössä tämä tarkoittaa aineen värähtelyä. /2/

Väliaineessa kulkiessaan aallot voivat kuljettaa energiaa paikasta toiseen ilman, että yksikään väliaineen hiukkasista siirtyy pysyvästi pois alkuperäiseltä paikaltaan. Sen sijaan väliaineen hiukkaset oskilloivat kiinteän pisteen ympärillä.

Aaltoliikettä on yksinkertaisinta kuvata matemaattisesti. Tällöin käytössä ovat yleiset muuttujat jaksonaika, taajuus, aallonpituus, amplitudi, aallonkorkeus, jyrkkyys ja aallon nopeus (kuva 1).

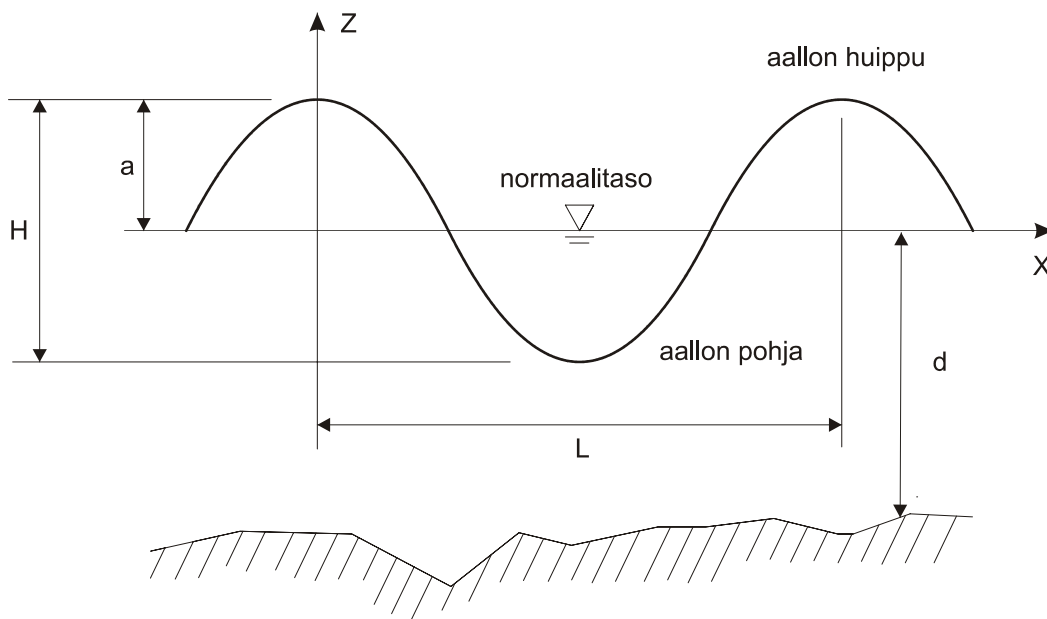
Jaksonaika ( $T$ ) on aika, joka kuluu yhden säännöllisen periodin kulkuun. Taajuus ( $f$ ) kuvaa, kuinka monta periodia mahtuu yhteen ajan yksikköön. Sen mittayksikkö on hertsi (Hz).

$$f = \frac{1}{T}$$

Jos aaltoliike esitetään kulmataajuutta ( $\omega$ ) käyttäen, yksikkönä on radiaani/sekunti ( $\frac{rad}{s}$ ).

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Esimerkiksi jaksonajan ollessa 0.3 sekuntia, taajuus on:  $f = \frac{1}{0.3s} = 3.333Hz$ .



**Kuva 1. Aaltoliikkeen määreitä. Aallon korkeus (H), aallonpituus (L), amplitudi (a), veden syvyys (d).**

Aallonpituus ( $L$ ) esittää yhden periodin pituuden, etäisyys aallon huipusta seuraavaan on aallonpituus. Amplitudi ( $a$ ) on aallossa tapahtuvan poikkeaman maksimiarvo mitattuna normaalitasosta. Aallon korkeudella ( $H$ ) kuvataan aallon koko poikkeamaa normaalitasosta. Se mitataan aallon pohjasta aallon huippuun. Veden syvyys ( $d$ ) kuvaa veden syvyyttä pohjasta pinnan normaalitasoon. Veden

syvyyden ja aallonpituuden suhteella on vaikutus aaltoliikkeen luonteeseen (taulukko 1).

**Taulukko 1. Aallon nopeuden, pituuden ja jaksonajan laskentakaavat eri syvyydessä vedessä. /3/**

	Matalan veden aalto $d/L < 1/20$	Syvän veden aalto $d/L > 1/2$
Aallon nopeus	$c = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$c = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$
Aallon pituus	$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
Jaksonaika	$T = \frac{L}{\sqrt{gd}}$	$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}}$

Aallon jyrkkyys (engl. steepness) esiintyy usein englanninkielisessä kirjallisuudessa. Sillä tarkoitetaan aallonpituuden ja aallonkorkeuden suhdetta ( $\frac{H}{L}$ ). On havaittu, että kun vedessä kulkevan aallon jyrkkyys ylittää suhteen  $\frac{1}{7}$ , se tulee epästabiiliksi ja aalto kaatuu eli murtuu. Tämä ilmenee vedessä kuohuvina aaltoina, vaahtopäinä.

Aallon nopeus (c) on matka, jonka aalto kulkee tietyssä ajassa. Aallon nopeus on siis aallonpituuden ja jaksonajan suhde.

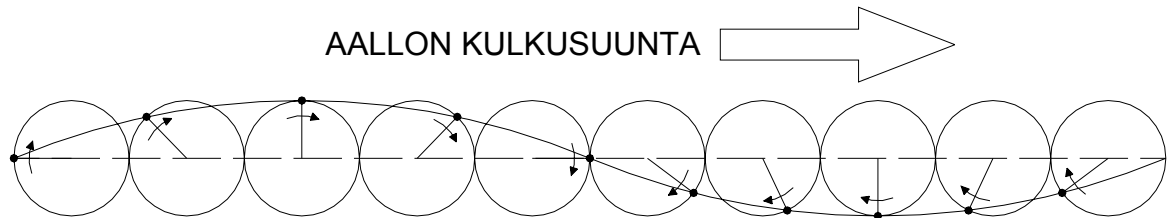
### 2.3 Veden aaltoliike

Aaltoliikettä on olemassa monessa muodossa, ja siksi aaltojen, eli värähtelyjen, fyysiseen kuvaamiseen voidaan ympäristöstä riippuen käyttää monia eri yksiköitä. Esimerkiksi ääniaaltoja kuvataan paineena pascaleissa ja sähkömagneettisia aaltoja jännitteenä volteissa. Tässä työssä käsitellään veden aaltoliikettä, joten aaltojen dimensioiden kuvauksessa käytetään mittayksikkönä metriä.

Kuten aaltoliikkeessä yleisestikin, veden aaltoliikkeessä veden partikkelit liikkuvat ympyrämäistä rataa, oskilloivat, kiinteän pisteen ympäri. Yhden aallonpituuden



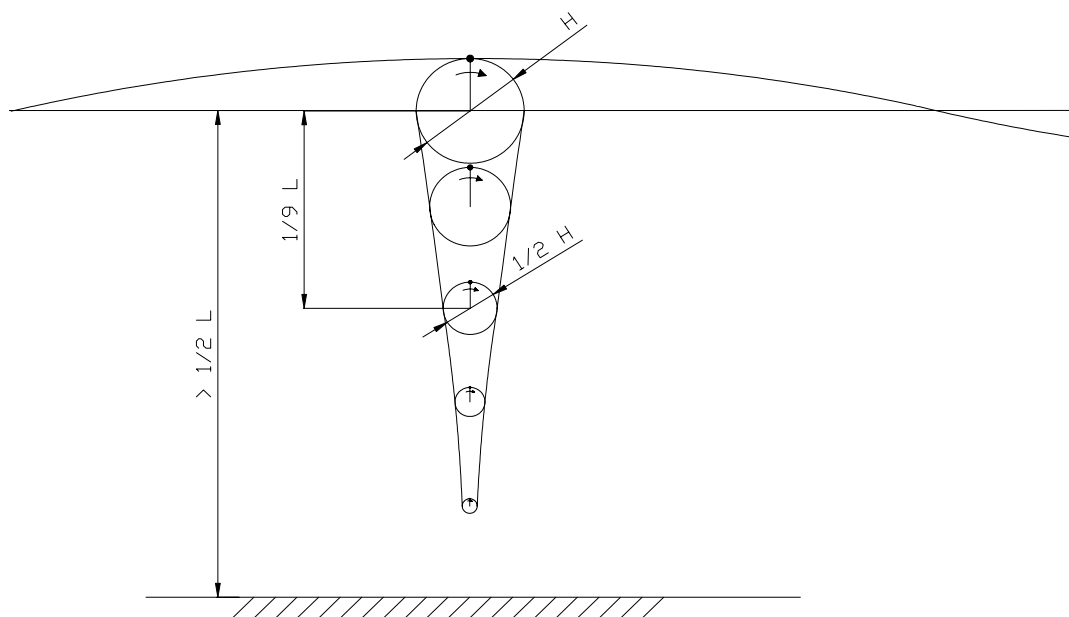
aikana väliaineen hiukkanen, tässä tapauksessa siis vesipartikkeli, oskilloi yhden kokonaisen kierroksen oman rotaatiopisteensä ympäri (kuva 2).



Kuva 2. Vesipartikkelin asema aaltoliikkeen eri vaiheissa.

Veden aaltoliikkeessä vesipartikkelien oskillointi on suurimmillaan veden pinnassa. Mitä suurempi on aallokon taajuus, sitä nopeampaa on partikkelien oskilloiva liike. Pintakalvon partikkelien liikerata on ympyrä, jonka halkaisija on aallonkorkeus. Sama partikkeli on ylimmässä asennossa aallon harjalla ja alimmillaan aallon pohjassa. Pinnasta syvemmälle siirryttäessä partikkelien liike pienenee.

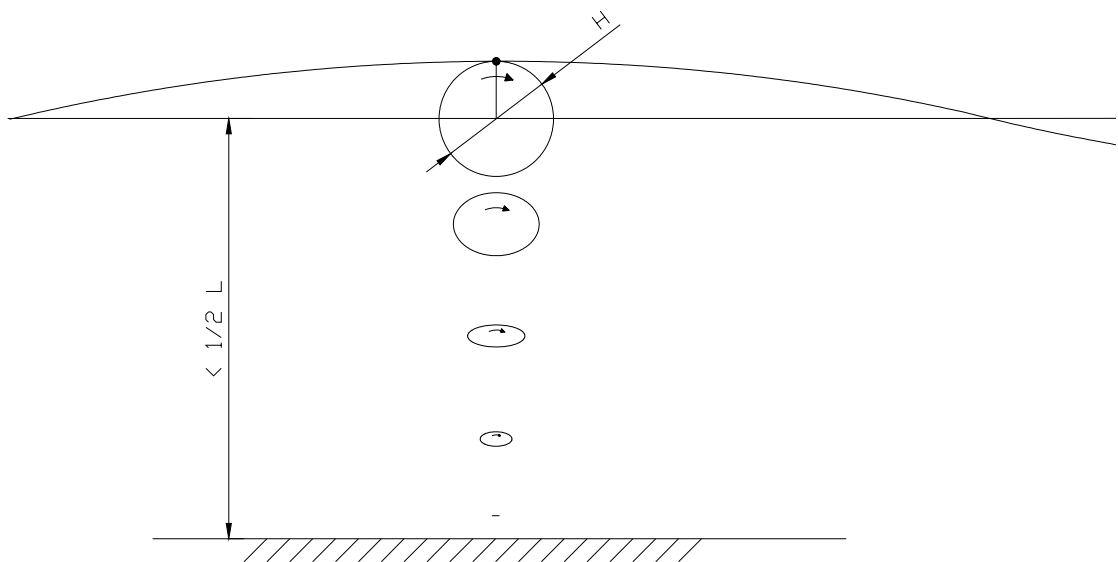
Syvemmälle siirryttäessä partikkelien oskillointi pienenee siten, että kun syvyys on  $\frac{1}{9}$  aallonpituudesta, partikkelien ympyräradan halkaisija on puolittunut. Syvyyden ollessa noin puolet aallonpituudesta oskillointi on enää häviävän pientä edestakaista liikettä. Puhutaan aallon pohjasta (kuva 3).



Kuva 3. Syvän veden aallossa partikkelien liikerata puolittuu  $\frac{1}{9}$  aallonpituuden syvyydessä.

Aaltoliikkeen aiheuttama liike vesipartikkeleissa on ympyrämäistä niin kauan kuin tietyt ehdot täyttyvät. Aaltoliike vedessä muuttaa muotoaan, jos veden syvyys on pienempi kuin puolet aaltoliikkeen aallonpituudesta. Tällöin partikkelien liike ei ole vapaata, vaan tilanahtaus pakottaa liikkeen elliptiseksi (kuva 4). Todellisuudessa tämä tapahtuu jo aiemmin, mutta tulokset ovat todella havaittavia vasta kun veden syvyys on alle puolet aallonpituudesta. Vapaasti ympyrämäisenä oskilloivista aalloista saatetaankin puhua vapaan tai syvän veden aaltoina.

Aaltoliike muuttuu myös, jos se ei pääse etenemään vedessä ilman että se joutuu muuttamaan suuntaansa esteistä tai toisista aalloista eli heijastumaan. Tämä muuttaa aallon käyttäytymistä ja myös vesipartikkelien liikettä monimutkaisemmaksi.



**Kuva 4. Matalan veden aallossa partikkelien oskillointi on elliptistä.**

Vapaan veden aaltoliikkeessä vesipartikkelit tekevät siis yhdenmukaista oskilloivaa liikettä miltei täydellisen ympyränmuotoista rataa noudattaen. Vaikka teoriassa värähtely tapahtuu ilman partikkelien siirtymistä paikaltaan, pientä siirtymistä tapahtuu. Vesipartikkelin liikerata onkin todellisuudessa hieman spiraalimainen, sillä joka jaksolla se liikkuu hyvin pienen määrän aaltorintaman kulkusuuntaan. Tämä toteutuu varsinkin suurissa, syvässä vedessä kulkevissa aalloissa. Eteneminen on kuitenkin niin pientä partikkelien muuhun liikkeeseen verrattuna, että sitä en ole tässä työssä katsonut aiheelliseksi käsitellä.

## 2.4 Aaltosorvi

Koska aaltoenergia on mekaanista liike-energiaa, sitä voidaan pyrkiä hyödyntämään mekanismilla, aaltoheilurilla, joka muuntaa sen mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella käyttökelpoiseen muotoon. Mekanismin tulisi siis kerätä aaltojen energia ja muuntaa se muotoon, jossa se voidaan parhaiten hyödyntää. Aaltovoimaprojektin lähtökohtana oli sähköenergian tuottaminen pyörivällä generaattorilla. Generaattoria pyörittäisi aaltojen nivelmekanismin avulla tuottama oskilloiva liike, jonka patentoitu mekaaninen tasasuuntaaja muuntaisi väännöksi esimerkiksi generaattorin akselille.

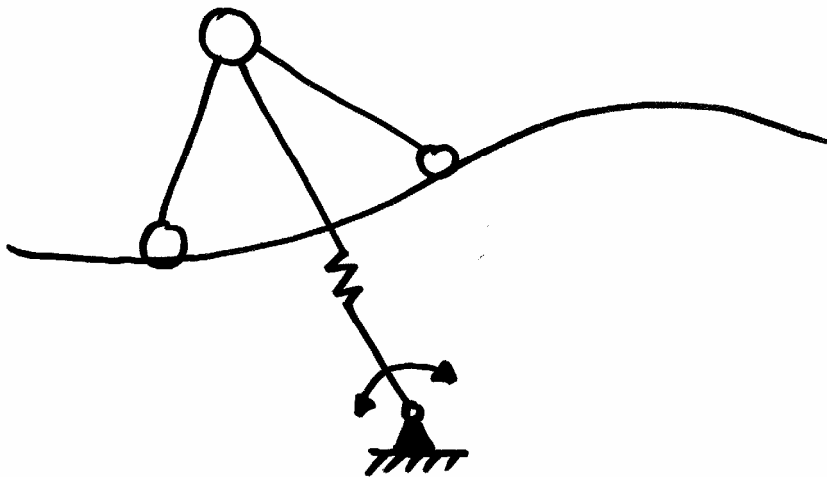
Tämän työn tarkoituksena on määrittellä tämä nivelmekanismi sekä aaltoseurain, jonka avulla aallon liike-energia saataisiin kerättyä. Mekanismi keskittyisi vapaan veden aaltoihin, eli se pyrkisi hyödyntämään syvässä vedessä etenevän aaltoliikkeen ympyrämaisesti oskilloivien vesipartikkelien liike-energiaa. Työ määrittelisi mahdollisen prototyypin mitat ja sisältäisi tarvittavat piirustukset sen valmistamiseksi. Prototyypin tulisi kestää allastestien lisäksi myös testaus luonnonoloissa. Luonnosteluvaiheessa mekaniismi sai nimen Aaltosorvi.

## 3. AALTOSORVIN SUUNNITTELU

Aaltosorvin tehtävänä olisi siis muuntaa aaltoenergia muotoon jossa sitä voitaisiin helposti hyödyntää. Laitetta voitaisiin käyttää esimerkiksi luodoilla olevien merimerkkien tai tuulivoimalan merkkivalojen tarvitseman energian tuottoon. Vedessä pinnan alla kelluvaan ponttonisäiliöön kytketty nivelmekanismi antaa säiliölle sen tarvitseman liiketilan, mutta samalla rajoittaa sen liikkuvuuden optimialueelle aallon liike- ja nopeusjakaumaa ajatellen. Aaltorintaman liike on yksittäisten vesipartikkelien harmonista oskilloivaa liikettä, ja vedessä kelluvan seuraimen läpi kulkeva aaltoliike pyrkii liikuttamaan mukanaan myös seurainta. Se mukailee aaltoliikettä välittäen liikkeen nivelien kautta tasasuuntaajan akselille.

### 3.1 Ideointi

Lähtökohtana Aaltosorville pidettiin sen veden alla pysyvää rakennetta. Tarvittaessa se voitaisiin indikoida poijulla tai muulla vastaavalla, jotta esimerkiksi vaaratilanteilta veneliikenteen kanssa välttyttäisiin. Rakenteen itsessään tuli kuitenkin olla kokonaan piilossa maisemoinnillisistakin syistä. Tämä vaatimus tietysti karsi pois kaikki vedenpäälliset rakennevaihtoehdot. Alkuvaiheessa luonnoksena mukana ollut "vesikirppu" (kuva 5) jouduttiin hylkäämään.



Kuva 5. Periaatekuva "vesikirppu" aaltoseuraimesta.

Vedenalaisten rakennevaihtoehtojen ideointi jatkui. Ideaalinen ratkaisu aallon liike-energian poimimiseen olisi virtausseurain, joka pystyisi myötäilemään aaltoliikettä sekä aaltorintaman liikkeen suunnassa että väliaineen, eli veden, liikkeen suunnassa. Seurain ikään kuin uisi vedessä ympäriinsä palaten kuitenkin neutraaliasentoon, jolloin se voisi ottaa tehokkaimmin vastaan seuraavan rintaman, ajautumatta ääriasentoonsa tai joutumatta pohjaan makaamaan.

Tällainen seurain vaatisi kuitenkin nerokkaan virtausteknisen muotoilun ja olisi rakenteellisesti sopiva vain tietyn kokoiselle aallolle. Seuraimen tulisi siis olla jollain tavalla yleisluontoinen, jotta sen toimintaa voitaisiin soveltaa erilaisiin ympäristöihin ja olosuhteisiin. Vapaassa vedessä rullaavan mainingin sisäinen liike on muodoltaan pyöreä, kun taas pohjaan tai muuhun vedenalaiseen rakenteeseen törmäävä vesimassa pakottaa partikkelien liikkeen elliptiseen muotoon.

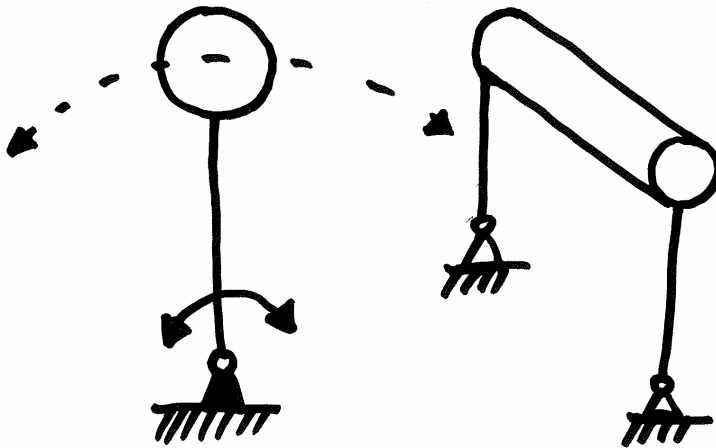
Eräänä ratkaisuna aaltoliikkeeseen tarttumiseen oli levy, ikään kuin airo, jonka liikkeen kanssa kohtisuora pinta-ala koostui mekaanisesti säädeltävästä säleiköstä, eräänlaisista ”kaihtimista”. Airo olisi katapulttia muistuttavan puomimekanismin päässä, ja ”kaihtimia” ohjattaisiin puomin kallistuskulman mukaan. Kaihtimet estäisivät läpiliikkeen suljettuina, mutta avattuina ne antaisivat liikkuvien partikkelien läpäistä säleikön. Tällä tavoin aallon kiihtyvyydeltään paras osa saataisiin hyödynnettyä, mutta loppuosa voitaisiin päästää läpi ja antaa seuraimen palata keskiasentoon. Mekanismia voitaisiin myös käyttää erisuuntaisten virtausten kulloiseenkin hyödyntämiseen. Ehkäpä ne olisivatkin parempi vaihtoehto kaatuvan aallon hyödyntämisessä?

Valitettavasti kaihtimien mekaaninen säätäminen olisi melkoista tarkkuutta vaativa prosessi. Samoin mekanismi itsessään vaatisi puhtaat ja korroosiovapaat olosuhteet, ja olisi silti luultavasti melko vikaantumisherkkä. Koska laitteen tulisi voida toimia varmasti ja huoltovapaasti pitkiäkin aikoja, vikaantumisherkän mekanismin käyttäminen ei olisi viisasta.

Myös elastisen kalvon mahdollisuutta seuraimessa tutkittiin. Joustava elementti mukautuisi kulloisiinkin olosuhteisiin, ja tarvittaessa pystyisi ”tarttumaan” lujemmin voimakkaamman virtauksen aikana.

### **3.1.1 Ratkaisumalli ”nuijapää”**

Pystyssä olevan varren päässä kelluva ponttoni on nivelöity vaakatasoon, ja poikkisuuntaisesti aallon liikesuuntaan nähden. Varren päässä on suljettu sylinterinmuotoinen ponttoni, jonka kellumispyrkimys nostaa vedessä pystyasentoon. Näin se on normaalitilassaan ja valmis ottamaan aallon vastaan. Mekanismin virtaviivaistettu muoto muistuttaa hieman sammakonpoikasta eli nuijapäätä (kuva 6). Kun ponttoni kohtaa aaltorintaman, aaltoliike liikuttaa ponttonia mukanaan ja kallistaa mekanismia liukuessaan sen yli. Varsi kallistuu, ja nousee ponttonin nosteesta jälleen yläasentoon, mahdollisesti kallistuen hieman ylikulmaan kohti seuraavaa saapuvaa aaltoa.



Kuva 6. Luonnos ”nuijapää” seuraimesta.

Ponttonin koolla ja ilmatäytön suuruutta säätämällä voidaan nosteen voimakkuuteen vaikuttaa. Voimakas noste antaa nopean palautuksen yläasentoon, mutta vähentää seuraimen reaktiivisuutta. Epäherkkyys vaikuttaa myös pienentävästi liikealueen kokoon, ja näin ollen koko laitteen toimivuuden heikentymiseen. Vastaavasti ponttonin liian pieni noste tekee siivestä hyvin aaltoon reagoivan, mutta palautusnopeus ja -voimakkuus heikkenevät.

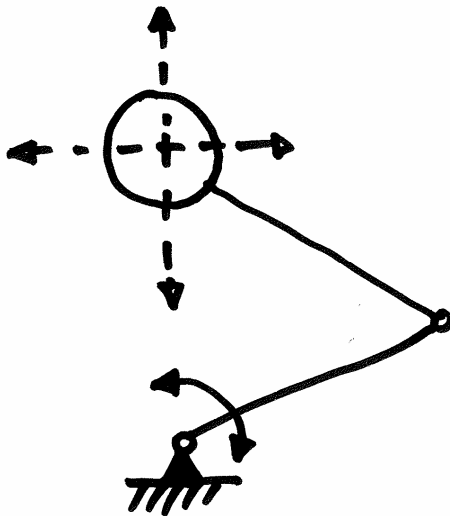
Kaiken kaikkiaan mekanismin liikealue olisi melko suppea tehokkaalla palautuksella, enimmilläänkin noin  $\pm 45^\circ$  pystyasennosta. Koska siiven liike on suoraan kytketty tehon ulosottoon, on liikkeen määrä ulosoton akselilla sama. Tämä ei aivan riitä. Ponttonin reaktiivisuus aaltoliikkeeseen on hyvä, mutta tehoa menetetään, mikäli vain aallon liikkeen suuntainen osa aallosta käytetään. Aaltoliike on oskilloiva, ja siinä mukana olevat partikkelit liikkuvat sekä pysty- että vaakasuunnassa. Jos pienikin osa muun suuntaisesta liikkeestä voitaisiin hyödyntää, se merkitsisi tuntuvaa lisäystä aallosta saatavaan hyötyyn.

Koska vesipartikkelin tai vedessä kelluvan kappaleen liike vapaan veden aaltoliikkeessä on ympyrä, voitaisiin vapaasti kelluvalla seuraimella, ponttonilla, yrittää hyödyntää tämä liike kokonaisuudessaan. Tämä tapahtuisi antamalla ponttonin seurata aaltoliikettä mahdollisimman luonnollisesti, rajoittaen ainoastaan sen ääriasentoja. Ponttonin vapaan pysty- ja vaakasiirtymän mahdollistaisi kaksiosainen nivelrakenne. Tällainen rakenne antaisi ponttonille kahden vapausasteen liikkuvuuden, joka on ilmeisen välttämätön aaltoliikkeen

tehokkaassa taltioimisessa. Mekanismin liikerata on siis vapaa, mutta sen kokoa ja rajoja voidaan säädellä nivelten mittasuhteilla ja mekaanisilla rajoittimilla.

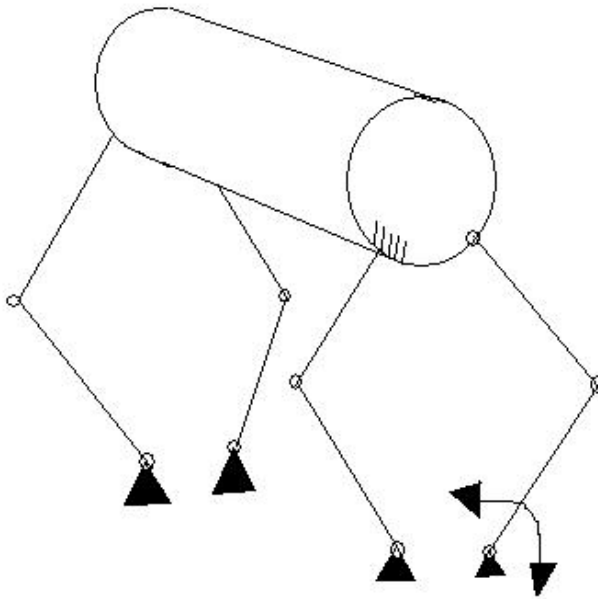
### 3.1.2 Ratkaisumalli ”polvi”

Ensimmäinen ideoitu vapaammin liikkuva mekanismi koostui keskeltä nivelöidystä jalasta, jonka päässä ponttoni sijaitsi. Jalka olisi perusasennossaan hieman taipunut ”polven” kohdalta (kuva 7). Jos mekanismi mitoitettaisiin oikein ja sijoitettaisiin sopivaan kohtaan aaltoa, ponttoni liikkuisi aaltoliikettä mukaillen sekä pysty- että vaakasuunnassa. Nivelöidyn jalan alanivelen akselilta saataisiin ponttonin liikkeen aikaansaama suuntaa vaihtava oskilloiva pyörimisliike. Oikeanlaisella mekanismilla tämä liikkeen määrä olisi huomattavasti suurempi kuin mitä ”nuijapäätä” voitiin saada ulos.



Kuva 7. Luonnos ”polvi” seuraimesta.

Polviratkaisun ongelma on sen huono stabiiliteetti. Yksipuolisesti tuettu ponttoni saattaa helposti ajautua ääriasentoon, jossa sen toiminta lakkaa. Vakautta saadaan kasvatettua lisäämällä ”jalat” myös toiselle puolelle ponttonia (kuva 8). Molemmilta puolin tuettuna ponttoni olisi edelleen kykenevä liikkumaan vaaka- ja pystysuunnissa, mutta vakaus lisääntyisi ja sen ääriasentojen rajoittaminen olisi helpompaa.



Kuva 8. Luonnos molemmin puolin tuetusta mekanismista.

Uusi rakenneratkaisu avasi lukuisia kehitysmahdollisuuksia. Ja mikä tärkeintä, näytti vihdoinkin siltä että mekanismin ideointi tuottaa tulosta. Koska kaksiosainen nivelrakenne ei saanut tarpeeksi kehityskelpoista vastaehdokasta, se jäi yksin työpöydälle. Tarkemman konstruktion kehittäminen saattoi alkaa.

### 3.2 Suunnittelu

On selvää, että yksi kiinteä konstruktio ei voi toimia kaikissa mahdollisissa aallo-olosuhteissa. Mekanismi on prototyyppivaiheessa pyrittävä optimoimaan tietyille aallokille, jonka aallonkorkeus ja taajuus tunnetaan. Tässä ympäristössä tulee suorittaa myös testaus. Vasta kun mekanismin käyttäytyminen ja sen muuttujat on kunnolla kartoitettu ja niiden vaikutus testeissä todettu, voidaan mekanismista alkaa hioa yleisluontoisempaa.

Ideointivaiheessa päädyttiin rakenteeseen, jossa poikittaiseen ympyrälieriön muotoiseen ponttonisäiliöön olisi kytkettynä nivelmekanismi, joka sallisi säiliön liikkeen pysty- ja vaakasuunnassa. Jotta nivelmekanismin tarkempia dimensioita voitaisiin alkaa selvittää, tulisi laitteelle päättää maksiminimellisaallokko, johon sen toiminta sovitettaisiin: sopivaksi aallonkorkeudeksi päätettiin 2 metriä. Laitteen tulisi siis kyetä toimimaan 2 metriä korkeassa aallokossa, joskin sen tulisi toimia myös tätä pienemmässä aallokossa. Koska mekanismin aiottu käyttökohde on



avoimen veden aallokko, aallon muoto päätettiin loivaksi sinimuotoiseksi mallintaen tuulen aikaansaamia maininkeja, joiden aallonpituus saattaa avomerellä olla helposti kymmeniäkin metriä.

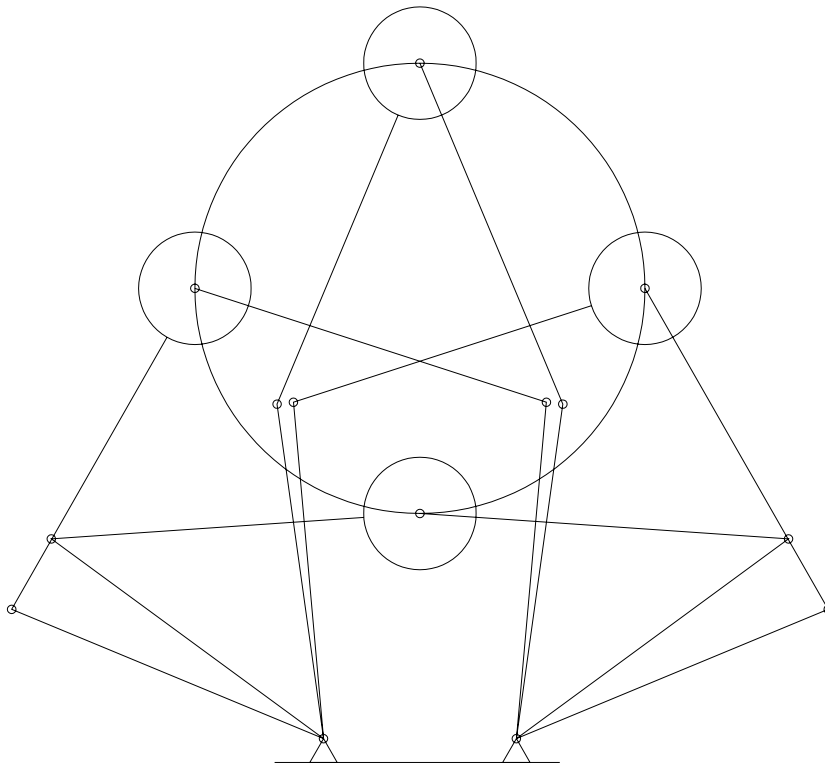
Ratkaistaan korkeudeltaan 2-metrinen ja aallonpituudeltaan 30-metrinen syvän veden aallon jaksonaika.

Jaksonaika: 
$$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} = \sqrt{\frac{2\pi(30m)}{(9,81 \frac{m}{s^2})}} = 4,38s$$

Yhden aaltosyklin läpikäynti kestää siis 4,4 sekuntia. Kyseisessä aallokossa mekanismi siis tekisi yhden työkierron tuossa ajassa.

Jotta linkkeihin ja niveliin kohdistuva kiertymä olisi mahdollisimman pieni, on ponttoni syytä tukea molemmista päistään. Samoin molempien puolten on oltava symmetriset.

Muutamien rakenneratkaisujen pohtimisen jälkeen päädyttiin rakenteeseen, jossa nivelpuomit kiinnittyvät toiselta puolelta ponttoniin ja toiselta puolelta ponttonin suhteen laakeroituun akseliin (kuva 9). Näin nivelöinti olisi mekanismin kannalta symmetrinen, ja samalla se sitoisi eri päissä olevat nivelet toisistaan riippuviksi. Tällä pyritään yhdenmukaistamaan molempien päiden liike ja vähentämään poikittaissuuntaista vääntöä nivelissä. Tilanne jossa ponttoni kallistuu pituussuunnassaan, toisen pään ollessa ylempänä toista, olisi luultavasti laitteen toiminnan sekä laakeroinnin keston kannalta huono asia.



**Kuva 9. Periaatekuva nivelöinnistä ja mekanismin asennoista.**

Koska ponttonin vaakatasossa pysyminen on oleellista laitteen toiminnalle, pitää tämä huomioida myös laitteen tasapainotuksessa ja kuormituksessa. Laitteen painopisteen on oltava keskiakselilla, ja alanivelille tulevan kuormituksen on oltava symmetrinen molempiin puoliskoihin nähden.

### **3.2.1 Laakerointi**

Mahdollisimman hyvän mekaanisen hyötysuhteen aikaansaamiseksi mekanismissa esiintyvät kitkavaikutukset tulee minimoida. Tämä pätee erityisesti niveliin, ja tarkemmin ottaen niiden laakerointiin.

Meriveteen upotettava nivelmekanismi asettaa laakeroinnille melkoisen haasteen. Laakeroinnin tulee kestää suolaveden korroosiovaikutukset sekä vedessä olevien partikkelien aiheuttamat haitat. Lika tunkeutuu veden mukana laakerivällykseen edistäen korroosiota sekä aiheuttaen kitkan kasvua ja kulumista.

Koska kaikenlaiset mekaaniset vierintälaakerit ja öljyvoiteluun perustuvat ratkaisut ovat vedenalaisessa käytössä kestäättömiä, on selvää että laakeroinnin on

oltava toimintaperiaatteeltaan itsevoiteleva liukulaakeri. Käytännössä tämä tarkoittaa muovilaakeria, johon liukukitkaa alentavat ainesosat on seostettu materiaalin tekovaiheessa.

Muovilaakerin etuihin vedenalaisessa käytössä kuuluu oleellisesti sen kyky sietää vettä. Olettaen että akselimateriaali on vedenlaiseen käyttöön sopiva, vesi ei aiheuta laakerissa korroosiota, jolloin suurin ongelma on voitettu. Tietyt polymeerilaadut kuitenkin sallivat veden imeytymisen itseensä, jolloin se pääsee vaikuttamaan haitallisesti laakerin toimintaan. Siksi on valittava laakerityyppi, joka ei salli veden imeytymistä perusmateriaaliinsa.

Sopiva laakeri tehtävään on esimerkiksi Igus iglide H370. Sen perusmateriaalina käytetty polymeeri ei ime lainkaan vettä itseensä, jolloin laakerin muut ominaisuudet säilyvät vedenalaisissa käyttökohteissa muuttumattomina. Itse asiassa nivelessä läsnä oleva vesi jopa jossain määrin edesauttaa laakerin toimintaa. Laakerilla on hyvä kulumiskestävyys, ja pienet lämpötilan aikaansaamat muodonmuutokset meriolosuhteissa. Koska laakereihin jatkuvasti kohdistuvat kuormat ja liikenopeudet ovat mekanismissa melko pieniä, laakeroinnin kitkakerroin asettuu 0,1 tuntumaan. Tämä on aaltoheilurin herkkyyttä ajatellen hieman korkea luku, mutta sopivalla akselin pinnankarkeudella saadaan myötävaikutettua pienemmän kitkakertoimen saavuttamiseksi. Kun akselin liukupinnan pinnankarheus Ra on välillä 8-15, on laakerin kitkakerroin alimmillaan. Jos akselin pinta on liian sileä, sen vaikutus kitkakertoimeen voi olla jopa kolminkertaistava: kitkakerroin voi nousta lähelle 0,3:a. Liian karhealla pinnalla kitakerroin luonnollisesti kasvaa, ja lisäksi laakerin elinikä lyhenee merkittävästi nopean kulumisen johdosta.

Kuten aiemmin totesin, nivelessä käytettävän akselin tulee olla materiaaliltaan hyvin korroosionkestävä. Tähän käyttöön sopii AISI 303 mukainen ruostumaton ja haponkestävä akseliteräs korroosionkestävyytensä, lujuutensa sekä hyvän koneistettavuutensa ansiosta. Tarvittava pinnankarheus on helppo saavuttaa kyseisellä materiaalilla.

Laakerin suojaaminen vedeltä on dynaamisessa vedenalaisessa ympäristössä hyvin vaikeaa tai mahdotonta. Koska käytettävä laakeri ei ole herkkä vedelle, ei tällainen suojaaminen ole edes tarpeen. Sen sijaan laakeri pitäisi pystyä suojaamaan vedessä mahdollisesti liikkuvilta liialta ja hiekalta, joiden joutuminen laakeriin haittaa ymmärrettävästi sen toimintaa. Laakeri pystyy sitomaan itseensä pienen määrän ulkopuolisia partikkeleita, mutta liiallinen määrä aiheuttaa laakerin rikkoutumisen.

Laakeritilan tiivistämiseen on tehokkainta ja helpointa käyttää DIN 3760 mukaista yksi- tai kaksihuulista säteisakselitiivistettä (tyypit A ja AS). Säteisakselitiivisteiden akselille aiheuttama kitkavaikutus on pieni, ja se tiivistää laakeritilan kaikesta ulkopuolisesta liasta. Nitrilikumin mekaaniset ominaisuudet ovat hyvät, se on hyvin kulutusta kestävä ja sietää merivettä sekä on helppo asentaa. Tiivisteiden asennusta varten sille koneistetaan pesä laakeripesän molempiin suihin.

Nivelrakenteessa päädyttiin ratkaisuun, jossa toinen nivelpuolisko asettuu toisen sisään ja molemmista läpikulkeva akseli liittyy osapuolek toisiinsa. Jotta nivelten sisäkkäiset puolikkaat eivät hankaisi toisiaan ja aiheuttaisi ei-haluttua kitkaa, puolikkaat erotettiin toisistaan muovisilla liukurenkailla. Tarkoitukseen sopiva rengas on Iigus Iglide L280 tai vastaava. Likaiseen ympäristöön tarkoitettu liukurengas asennetaan eri nivelpuolikkaiden väliin hieman ylisuurella välyksellä, jolloin se vain tarvittaessa helpottaa ja ohjaa liikettä sekä poistaa kitkaa ja vähentää kulumista.

### **3.2.2 Nivelsysteemi ja mekanismin liikerata**

Mekanismin suunnittelun alkuvaiheessa päätettiin nimellisaallonkorkeus, jota hyödyntämään prototyyppi mitoitettaisiin. Aallonkorkeudeltaan 2 metrin aallokko on yleinen meriolosuhteissa, ja mahdollinen saavuttaa suuremmilla testilaitteistoilla. Koska kaksimetrisen aallokko on kuitenkin mekanismin toiminnan yläraja, järkevin testausympäristö lienee hieman tämän alapuolella. Aallonkorkeudeltaan 1 metrin aallokko onkin yleisin testiympäristö useimmissa

meriolosuhteiden tutkimiseen tarkoitetuissa testauslaitoksissa, ja soveltuu hyvin Aaltosorvin toiminnan tutkimiseen.

Nivelsysteemien linkkien asentojen tulee mekanismin normaaliliikeradalla olla sellaiset, etteivät nivelet pääse ojentumaan täysin suoriksi tai kääntymään yli liikealueensa puolelta. Tällä lisätään mekanismin toimintavarmuutta, sillä nivelen yliojentuminen saattaisi aiheuttaa sen joutumisen lukkotilaan, mikä voisi helposti estää koko mekanismin liikkumisen. Liikkeen pysähtyminen aiheuttaisi laitteen toimimattomuuden ja luultavasti myös sen rikkoutumisen. Edellä mainitusta syystä myös mekanismin fyysiset ääriasennot tulee ottaa huomioon. Mikäli mekanismi ajautuu normaaliliikealueensa ulkopuolelle, sen nivelten yliojentuminen olisi hyvä estää rajoittimilla tai muilla vastaavilla mekanismeilla.

Systeemistä ulos saatavan hyödyn kannalta oleellisin seikka on alemman linkin liikealue. Mitä laajempi linkin kiertokulma on, sitä enemmän liikettä välittyy mekaaniselle tasasuuntaajalle. Oikealla linkkien mittasuhteilla mekanismista saatava hyöty voidaan maksimoida.

On selvää, että parhaan mahdollisen mittasuhteratkaisun etsiminen olisi matematiikan keinoin mahdollista. Tämä kuitenkin kasvattaisi työn laajuutta melkoisesti, ja päätettiinkin, ettei mekanismin mittasuhteita pyrittäisi optimoimaan matemaattisesti. Sen sijaan hyvää ratkaisua voitaisiin haarukoida tietyltä alueelta laskentataulukon avulla ja suorittaa valinta parhaimpien ominaisuuksien perusteella. Laadittiin laskelma MathCAD-ohjelmistolla, joka laskee mekanismin toiminnan kannalta oleellisiksi päätetyjä kulmia (liite 1) lähtötietoina annettujen mekanismin dimensioiden perusteella.

Nivelmekanismin ensimmäisessä versiossa kokeiltiin laitteen liikealuetta yhtä pitkällä ala- ja ylälinkeillä. Molempien linkkien pituudeksi asetettiin 1630 mm (liite2.1). Tämä oli pienin mahdollinen molempien linkkien tasapituus, jos haluttiin pitäytyä alkuehtoina annetuissa liikealueen halkaisijassa sekä sen keskipisteen asemassa. Alkuehtojen muuttamiseen ei ollut mitään perusteltua syytä. Laskuista todettiin, että vaikka nivelten asennot pääosin ponttonin liikeradalla vaikuttivat hyviltä, ala-asento ”niiasi” liian syvään. Pienimmästäkin heilahduksen

voimistumisesta mekanismi kääntyisi yli ponttonin keskiakselin ympäri ja ajautuisi lukkotilaan, jossa sen toiminta pysähtyisi. Samoin alalinkin liikealue oli selvästi liian kapea. Pienellä parannuksella saataisiin enemmän liikettä välittymään alakselille.

Ala-asennon ylimeroriskiä saataisiin pienennettyä lisäämällä ylemmän linkin pituutta suhteessa alalinkiin. Samalla alalinkin liikealue laajenisi. Päätettiin kokeilla alalinkin lyhentämistä. Alalinkin pituus lyhennettiin mittaan 1410 mm. Jälleen tämä oli pienin mahdollinen pituus alalinkille ylälinkin pituuden pysyessä ennallaan. MathCADin antamista tuloksista huomattiin, että yläasento muuttui näin hyvin kapeaksi, vain 25 astetta (liite 2.2). Vaikka alalinkin liikealue kasvoikin tämän muutoksen seurauksena 10 astetta, todettiin yläasento liian kapeaksi ja nivelen ylinurjahdusriski liian suureksi. Järkevintä olisi kasvattaa alalinkin pituutta sen verran, että yläasennon nivelien ylikääntymisriski pienenesi.

Muutaman laskukierroksen jälkeen todettiin, että kun alalinkin pituus nostetaan yli 1463 mm:n, alalinkin liikealue alkaa pienentyä. Koska kyseisessä mitassa yläasennon leveys on jo 38 astetta, katsottiin, että kyseinen mitta voitaisiin hyväksyä (liite 2.3).

Nivelratkaisu suunniteltiin liikettä rajoittavaksi siten, että nivel ei pääse taittumaan alle 34 asteen kulmaan. Liike on rajoitettu mekaanisesti nivelen rakenteessa. Tämä estää mekanismin ala-asennossa ponttonin nivelöinnin yli kääntymisen. Vaikka rakenne estääkin ala-asennon ylikääntymisen, tulee mekanismi mitoittaa siten, ettei laite toimiessaan jatkuvasti "nojaa" mekaanisiin rajoihin. Tämä ei olisi kestävyys kannalta oikea ratkaisu. Linkkien putkiprofiiliksi valittiin 60x60x3 ja 60x40x3 RHS-profiilit. Kyseiset putkipalkkiprofiilit ovat kevyitä, mutta silti riittävän jäykkiä tarkoitukseen ja helppoja hitsata. Prototyypikäyttöä ajatellen RHS profiilit ovat tarvittaessa helposti muunnettavissa "teleskooppirakenteisiksi", jolloin voidaan helposti suorittaa kokeita eripituisilla mekanismin osilla.

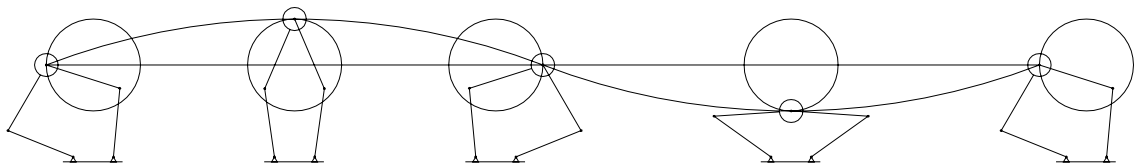
Mikäli Aaltosorvia haluttaisiin käyttää syvemmillä pinnan alapuolella, tulisi mekanismilla olla myös jonkinlainen mekaaninen yläraja. Mekanismi voisi hyvin

yliojentua nosteen vaikutuksesta, esimerkiksi veden noustessa vuoroveden aikaan. Tämä vaikuttaisi huonontavasti laitteen toimintaan.

Yksinkertaisin ratkaisu osoittautui käyttökelpoisimmaksi. Suhteellisen jäykkä vaijeri asetettaisiin ponttonin alapinnan ja alustan välille. Vaijerin tulisi olla jäykkä siksi, ettei se ajautuisi nivelien väliin ja sotkeentuisi niihin. Koska ponttonin noste optimoitaisiin asennuksessa minimiinsä, ei vaijeriin syntyisi varsinaisia rasituksia. Se vain estäisi ponttonin nousun yli sallitun asemansa, eikä vaikuttaisi laitteen muuhun toimintaan mitenkään.

### 3.2.3 Ponttoni

Ponttoni on mekanismin toiminnan kannalta tärkein osa. Sen avulla mekanismi poimii aallon liike-energian ja siirtää sen nivelten kautta eteenpäin. Ponttonin tehtävä on kellua sopivassa syvyydessä pinnan tuntumassa ja liikkua oskilloivien partikkelien mukana. Koska eri syvyyksissä liikkuvilla partikkeleilla on erilaiset liikeradat, tämä asettaa vaatimuksen ponttonin koolle. Ponttoni ei saa olla ulkomitoiltaan niin suuri, että se olisi nopeuksiltaan radikaalisti eroavissa aallon osissa yhtä aikaa. Tämä varmasti heikentäisi mekanismin toimintaa. Koska ponttoni oli jo aiemmissa vaiheissa ideoitu ympyrälieriön muotoiseksi, tulisi se sopivan ponttonitilavuuden selvityksessä säätää niin pitkäksi, että sen halkaisija ei olisi yli puolta metriä. Tällöin ehto varmasti täyttyisi.



**Kuva 10. Havainnollistus Aaltosorvin liikeradasta aaltoliikkeen mukana.**

Peruslähtökohtana mekanismin toiminnalle on ponttonin noste, jonka pitää pystyä lähtökohtaisesti kannattelemaan koko nivelmekanismin painoa vedessä liikkeessaan aaltoliikkeen mukana pois lukien alustan massa (kuva 10). Ponttonin noste keventää ja herkistää mekanismin siten, että se helposti liikkuu aaltoliikkeen mukana. Kun tiedetään, että ponttoni varmasti kantaa koko nivelistön, vältetään

mahdollisuudelta, että prototyypin ponttonin liian pieni tilavuus todettaisiin vasta testausvaiheessa sen upotessa pohjaan tai toimiessa huonosti. Oikea menettely olisi siis ylimitoittaa ponttoni ja suunnitella se niin kevytrakenteiseksi, että sen toiminta voitaisiin säätää testausvaiheessa halutuksi kuormaamalla ponttonia lisäpainoilla.

Jotta ponttonin liikeominaisuudet vedessä eivät muuttuisi, ulkopuolisten lisäpainojen käyttö on pois suljettu vaihtoehto. Loogisin paikka lisäkuormalle on ponttonin sisällä, lähellä ponttonin rotaatiokeskipistettä. Näin saadaan minimoitua lisäkuorman vaikutus mekanismin liikkeisiin ja painopisteeseen.

Sopivimmaksi ratkaisuksi osoittautui menettely, jossa lisäkuorma sijoitetaan ponttonissa kiinteästi oleviin putkiin. Tätä tehtävää varten ponttonin sisään lisättiin neljä sisähalkaisijaltaan 50 mm putkea. Putkiin voitaisiin asentaa kuormaksi esimerkiksi teräs- tai kivisauvoja, jotka keskitettäisiin ja sidottaisiin paikoilleen kevyemmällä vettä imemättömällä täyteaineella, kuten polyeteenilla tai uretaanilla. Kuormatilan tulee kuitenkin olla vesitiivis, jotta sitä voidaan tarvittaessa käyttää tyhjänäkin osana ponttonitilavuutta.

Lopullinen hienosäätö ponttonin nosteen säätämiseksi sopivaksi tehdään veden alla laskemalla vettä päätypropusta ponttonin sisään. Varsinaisen kuorman täytyy kuitenkin olla niin hyvin mitoitettu, ettei vettä tarvitsisi käyttää paljon. Vesi on liikkuvuutensa aiheuttamien värähtelyjen ja painopisteen siirtymisen kannalta huono kuorma-aine, mutta helppo lisätä ja poistaa (paineistus) portaattomasti laitteen ollessa paikallaan veden alla.

### **3.2.2.1 Ponttonin mitoitus**

Arkhimedeen laki määrittelee nosteen: ”Kappaleen noste on sama kuin sen syrjäyttämän nesteen paino”. Vedessä kelluvaan ponttoniin siis vaikuttaa noste, joka vastaa sen syrjäyttämän vesimäärän painoa. Jotta saataisiin selville, minkä kokoinen Aaltosorvin ponttonin tulisi olla, pitää tietää mekanismin massa.



Nosteen laskennassa ei ole huomioitu jalkojen ja nivelien nostetta. Kuten aiemmin totesin, on tarkoituksenmukaisempaa mitoittaa ponttoni hieman ylisuureksi, ja kuormaa lisäämällä säätää sen massa oikeaksi vasta testivaiheessa.

**Taulukko 2. Mekanismin osien massat.**

Jalka x 4	Ylävarsi á	7 kg
	Alavarsi á	8 kg
Ponttoni	Vaippa	44 kg
	Päätylevy x 2	11 kg
	Kuormaputki x 4	15 kg
	Sisäputki	3 kg
	Holkki x 2	1 kg
	Akseli	8 kg
	Yhteensä :	142 kg

Mekanismi siis painaa noin 145 kg (taulukko 2). Sopiva ponttoni on nosteeltaan 30-50 kg kantavampi, jolloin sen kuormaaminen on helposti hoidettavissa.

Halkaisijaltaan 400 mm ponttonin noste:

$$(\pi \cdot (0,2m)^2) \cdot 1,5m \approx 0,188m^3$$

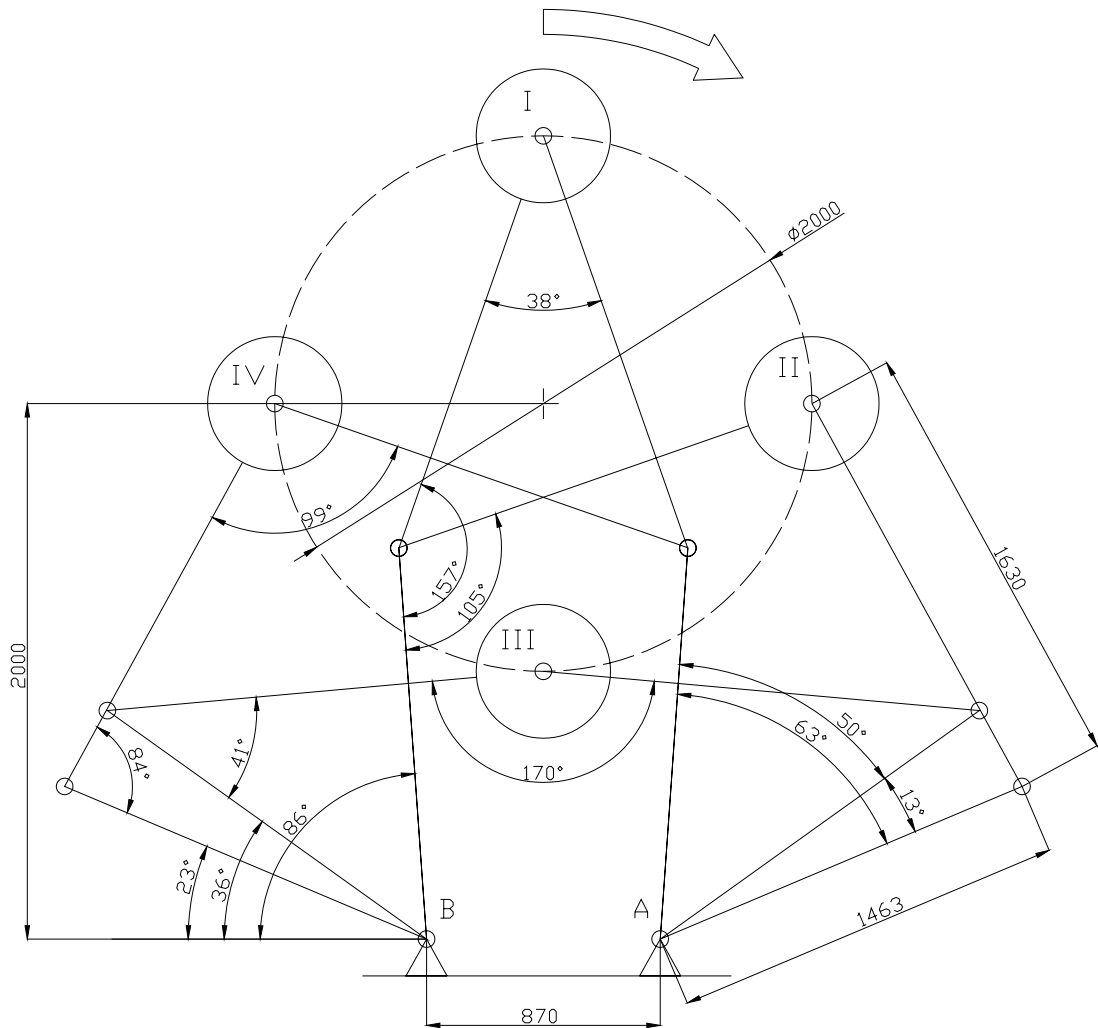
Veden tiheys  $998 \frac{kg}{m^3}$ , joten ponttonin noste:

$$998 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,188m^3 \approx 186kg$$

186 kg noste riittää mekanismille. Hyväksytään ponttonin halkaisijaksi 400 mm.

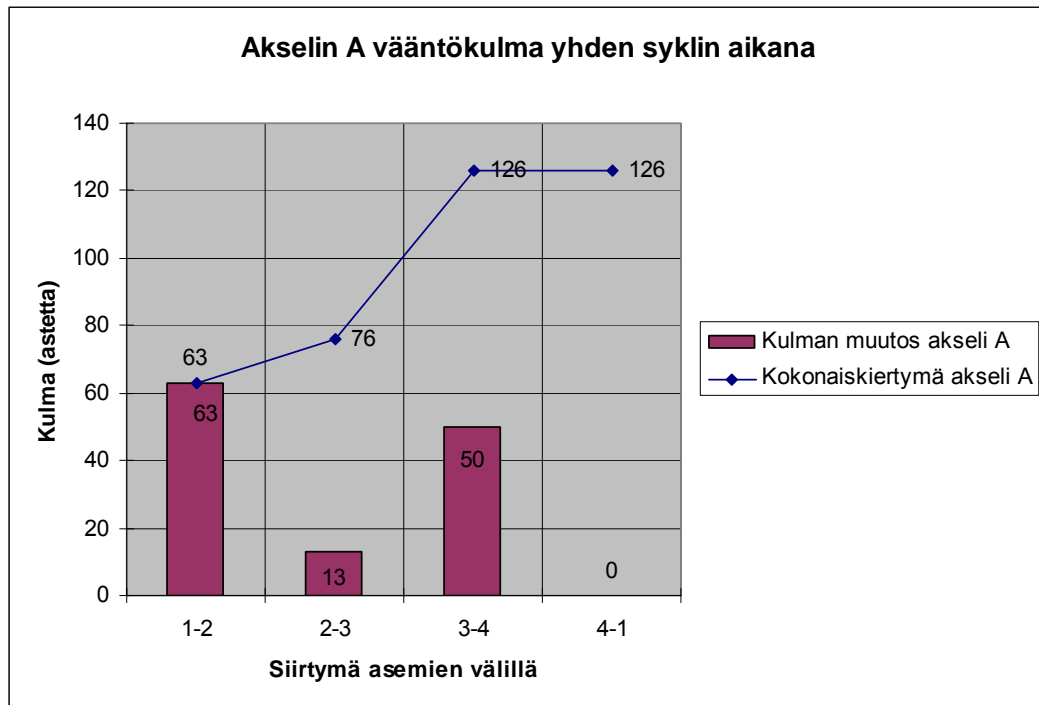
#### 4. TULOSTEN TARKASTELUA

Valitun nivelratkaisumallin dimensioita tarkastellessa huomataan, että ponttonin tehdessä täyden kierroksen liikerataansa pitkin ala-akselille välittyvän liikkeen määrä ei ole tasainen syklin aikana (kuva 11). Tehon ulosotossa käytettävän mekaanisen tasasuuntaajan etuihin kuuluu, ettei siihen syötettävän liikkeen tarvitse olla tasaista. Mekanismin kuormituksen tasaisuuden kannalta tällä kuitenkin on merkitystä. Havainnollisinta on tutkia mekanismista ulos saatavaa tulosta ulosoton akselin kääntymiskulman avulla.



**Kuva 11. Valitun nivelratkaisun linkkien liikealueiden dimensiot**

Jos tarkastellaan ulosoton akselia A mekanismin ollessa syklin eri vaiheissa (kuva 12), havaitaan että asemien 1 ja 2 välillä syntyy suurin osa akselilta syklin aikana saatavasta liikkeestä, 63 astetta. Asemien 2 ja 3 välillä kiertoa on vain 13 astetta, kun taas asemien 3 ja 4 välillä kiertoa tulee 50 astetta. Asemien 4 ja 1 välillä kiertoa ei enää synny. Akselilta saadaan siis ulos 126 astetta kiertoa yhden syklin aikana. Mekanismin syklin aikana on kuitenkin alueita, jotka eivät tuota liikettä. Tämä ei ole välttämättä huono asia. Kun liikettä ei välitetä eteenpäin, ei myöskään mekanismi ole kuormitettuna.

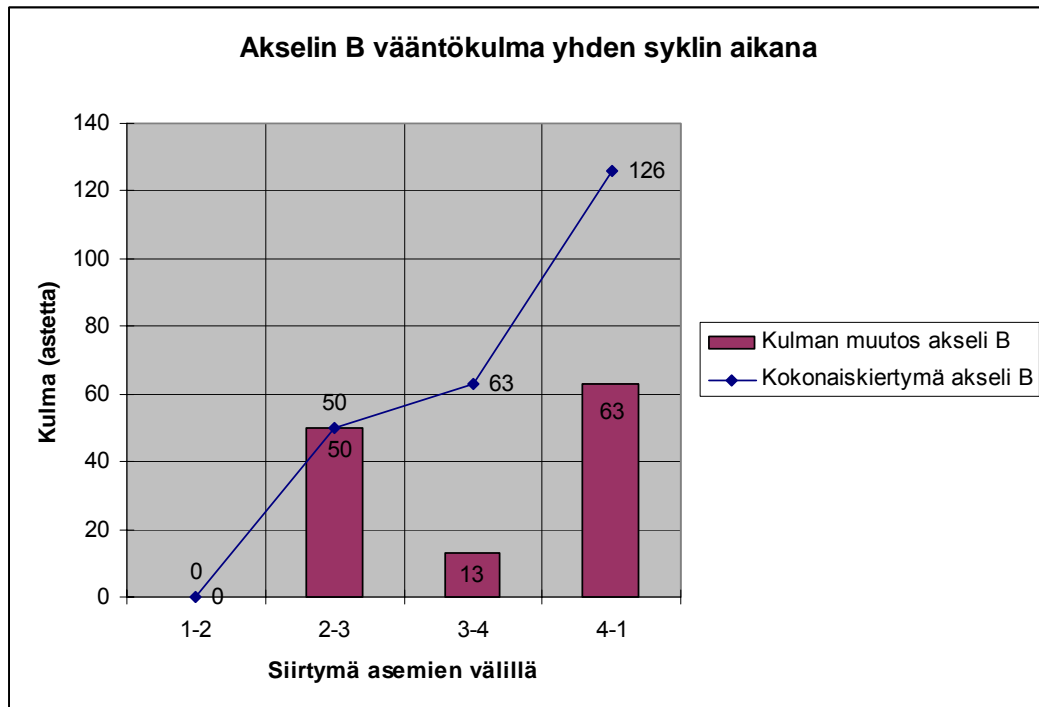


**Kuva 12. Akselilta A ulosotettava kiertoliike.**

Kuvassa 13 nähdään akselin B vastaavat tiedot yhden kierroksen ajalta. Kuvaajista huomataan, että kahden eri akselin tuotot ovat täysin toistensa peilikuvat. Liikkeen epätasaisesta jakautumisesta syklin eri osiin seuraa, että akselit A ja B ovat kukin kuormitettuna miltei kokonaan eri ajankohtina. Ainoastaan vaiheiden 2-3 ja 3-4 välillä tapahtuu vähäistä yhtäaikaista kuormitusta. Suurin liikemäärä syntyy akselille toisen ollessa kokonaan paikallaan.

Prototyyppiä ei ole suunniteltu siten, että molempia akseleita käytettäisi tehon ulosottoon. Loppujen lopuksi prototyypin tarkoituksena onkin vain saada kokeellista tietoa ja mittaustuloksia mekanismin toimivuudesta. Rakenteellisesti se olisi kuitenkin täysin toteutettavissa oleva vaihtoehto. Kuvista 12 ja 13 nähdään, että mekanismin kuormitus ei merkittävästi muutu, vaikka molemmilta akseleilta otettaisiinkin tehoa. Kiertoa syntyy siis yhden halkaisijaltaan 2 m aaltosyklin aikana 252 astetta.

Jos esimerkkinä käytetään kappaleen 2.2 alussa laskettua aallokkoa, liikettä saataisiin yhdeltä akselilta 4.8 kierrosta minuutissa.



**Kuva 13. Akselilta B ulosotettava kierto liike asettuu vastakkaisesti akselin A kiertoon.**

Vaikka ensiajatus aaltoenergian mekaanisesta keräämisestä tuntuikin erittäin vaativalta tehtävältä, olen huomannut vaativilta tuntuvien tilanteiden ratkaisemisen helpottuvan, kun ongelma jaetaan riittävän pieniin osiin. Työn edetessä olen myös huomannut luovan, analyyttisen ja ennakkoluulottoman ajattelun olevan avain monen vaikealta tuntuvan ongelman ratkaisussa.

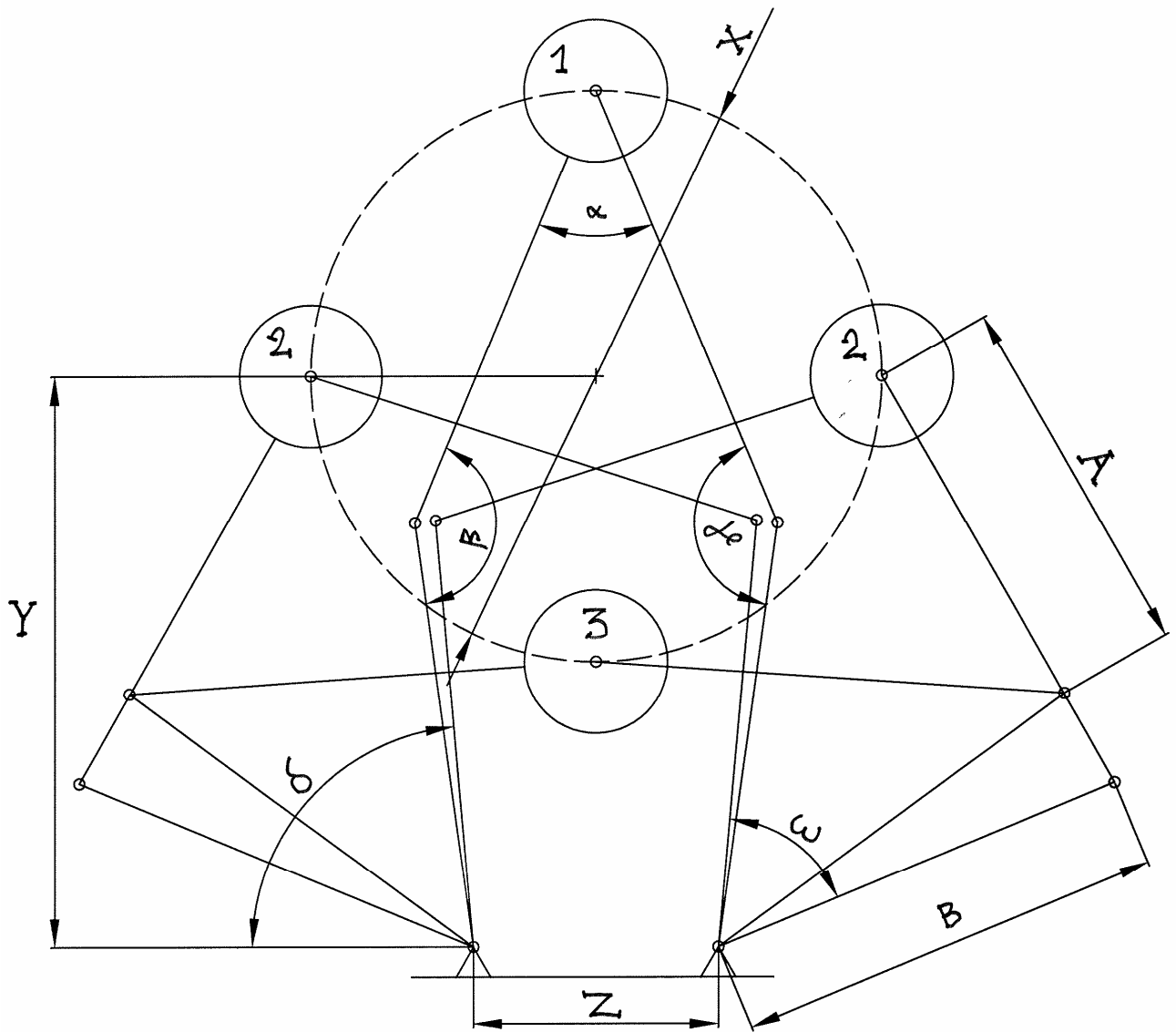
Työn tarkoituksena oli ideoida mekanismi, kartoittaa sen toiminnan asettamat vaatimukset ja laatia näiden perusteella suunnitelma sekä piirustukset prototyypin rakentamiseksi (Liitteet 2 ja 3). Tästä olen mielestäni suoriutunut kunnialla. Mekanismin dimensioiden tarkempaan matemaattiseen optimointiin ei tämän työn puitteissa ollut mahdollisuutta. Tämä olisi kuitenkin mielestäni sopiva jatkokehitysnäkymä.

## 5. LÄHDELUETTELO

1. Boud, Richard, Status and research and development priorities 2003; wave and marine current energy. United Kingdom Department of Trade and Industry 2002, report FES-R-132, s. 9-21.
2. Wikipedia. Vapaa tietosanakirja. Aaltoliike - aalto, fysiikka. 2006.  
<http://fi.wikipedia.org>
3. Sheppard, Max D., Regular Ocean Waves. University of Florida, Coastal Engineering program. Luentomoniste. 2005.

## 6. LIITTEET

1. Laskennassa käytettyjen symbolien selvennys
2. Linkkien mittasuhteiden laskenta
  - 2.1 Tapaus 1
  - 2.2 Tapaus 2
  - 2.3 Tapaus 3
3. Aaltosorvin rakennetaulukko
4. Piirustukset



Aaltosorvin nivelöinnin geometrian MathCAD-laskuissa käytetyt symbolit.

Simo Saukko 9900954

Aaltoheilurin nivelmekanismin kulmien ratkaiseminen, dimensiot = [mm,deg]

Lähtöarvot :

Toiminta-alueen halkaisija	$\overline{X := 2000}$
Toiminta-alueen keskipisteen y-asema	$\overline{Y := 2000}$
Alaniveliin välinen etäisyys	$\overline{Z := 870}$
Ylälinkin pituus	$\overline{A := 1630}$
Alalinkin pituus	$\overline{B := 1630}$

Asento I:

Pythagoraan lause: 
$$h1 := \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \cdot Z\right)^2 + \left[Y + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right)\right]^2}\right]}$$

Kosinilause : 
$$\gamma1 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h1^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma1 = 136.8\text{deg}}$$

$$\mu1 := \arccos\left(\frac{A^2 + h1^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h1}\right)$$

Sinilause : 
$$\eta1 := \arcsin\left(\frac{\frac{1}{2} \cdot Z}{h1}\right)$$

$$\alpha1 := 2 \cdot \mu1 + 2 \cdot \eta1 \quad \overline{\alpha1 = 59.7\text{deg}}$$

$$\zeta1 := \arccos\left(\frac{h1^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h1 \cdot B}\right)$$

$$v1 := \arcsin\left[\frac{Y + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right)}{h1}\right]$$

$$\delta1 := \pi - \zeta1 - v1 \quad \overline{\delta1 = 76.7\text{deg}}$$

Asento III:

Pythagoraan lause: 
$$h_3 := \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \cdot Z\right)^2 + \left(Y - \frac{1}{2} \cdot X\right)^2\right]}$$

Kosinilause : 
$$\gamma_3 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h_3^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma_3 = 39.1 \text{ deg}}$$

$$\mu_3 := \arccos\left(\frac{A^2 + h_3^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h_3}\right)$$

Sinilause : 
$$\eta_3 := \arcsin\left(\frac{\frac{1}{2} \cdot Z}{h_3}\right)$$

$$\alpha_3 := 2 \cdot \mu_3 + 2 \cdot \eta_3 \quad \overline{\alpha_3 = 187.9 \text{ deg}}$$

$$\zeta_3 := \arccos\left(\frac{h_3^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h_3 \cdot B}\right)$$

$$v_3 := \arcsin\left(\frac{Y - \frac{1}{2} \cdot X}{h_3}\right)$$

$$\delta_3 := \pi - \zeta_3 - v_3 \quad \overline{\delta_3 = 43.1 \text{ deg}}$$

Asento II:

$$H := \left| \left(\frac{1}{2} \cdot Z\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot X\right) \right|$$

$$H_2 := \left| \left(\frac{1}{2} \cdot Z\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right) \right|$$

Pythagoraan lause: 
$$h_2 := \sqrt{H^2 + Y^2}$$

Kosinilause : 
$$\gamma_2 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h_2^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma_2 = 79.2 \text{ deg}}$$

$$\mu_2 := \arccos\left(\frac{A^2 + h_2^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h_2}\right)$$

$$h_4 := \sqrt{H_2^2 + Y^2}$$



$$\eta_2 := \arccos\left(\frac{h_2^2 + h_4^2 - Z^2}{2 \cdot h_2 \cdot h_4}\right)$$

$$\tau_2 := \arccos\left(\frac{h_4^2 + A^2 - B^2}{2 \cdot h_4 \cdot A}\right)$$

$$\alpha_2 := \mu_2 + \eta_2 + \tau_2$$

$$\overline{\alpha_2 = 111.2\text{deg}}$$

$$\rho_2 := \arccos\left(\frac{h_2^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h_2 \cdot B}\right)$$

$$\sigma_2 := \arccos\left(\frac{Z^2 + h_2^2 - h_4^2}{2 \cdot Z \cdot h_2}\right)$$

$$\delta_4 := \pi - \rho_2 - \sigma_2$$

$$\overline{\delta_4 = 23.8\text{deg}}$$

$$\beta_2 := \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 - h_4^2}{2 \cdot A \cdot B}\right)$$

$$\overline{\beta_2 = 98.1\text{deg}}$$

$$\zeta_2 := \arccos\left(\frac{B^2 + h_4^2 - A^2}{2 \cdot B \cdot h_4}\right)$$

$$v_2 := \arccos\left(\frac{h_4^2 + Z^2 - h_2^2}{2 \cdot h_4 \cdot Z}\right)$$

$$\delta_2 := \pi - \zeta_2 - v_2$$

$$\overline{\delta_2 = 84.7\text{deg}}$$

Tulokset, dimensioilla :

Toiminta-alueen halkaisija  $X = 2 \times 10^3$

Toiminta-alueen keskipisteen y-asema  $Y = 2 \times 10^3$

Alaniveliin välinen etäisyys  $Z = 870$

Ylälinkin pituus  $A = 1.6 \times 10^3$

Alalinkin pituus  $B = 1.6 \times 10^3$

	Asento I	Asento II	Asento III
Kulma $\alpha$ :	$\alpha_1 = 59.7\text{deg}$	$\alpha_2 = 111.2\text{deg}$	$\alpha_3 = 187.9\text{deg}$
Kulma $\beta$ :	$\beta_1 := \gamma_1$	$\beta_2 = 98.1\text{deg}$	$\beta_3 := \gamma_3$
Kulma $\gamma$ :	$\gamma_1 = 136.8\text{deg}$	$\gamma_2 = 79.2\text{deg}$	$\gamma_3 = 39.1\text{deg}$
Kulma $\delta$ :	$\delta_1 = 76.7\text{deg}$	$\delta_2 = 84.7\text{deg}$	$\delta_3 = 43.1\text{deg}$
Alalinkin liikealue:	$\omega := \delta_2 - \delta_4$	$\overline{\omega = 60.9\text{deg}}$	

Simo Saukko 9900954

Aaltoheilurin nivelmekanismin kulmien ratkaiseminen, dimensiot = [mm,deg]

Lähtöarvot :

Toiminta-alueen halkaisija	$\overline{X := 2000}$
Toiminta-alueen keskipisteen y-asema	$\overline{Y := 2000}$
Alaniveliin välinen etäisyys	$\overline{Z := 870}$
Ylälinkin pituus	$\overline{A := 1630}$
Alalinkin pituus	$\overline{B := 1410}$

Asento I:

Pythagoraan lause: 
$$h1 := \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \cdot Z\right)^2 + \left[Y + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right)\right]^2}\right]}$$

Kosinilause : 
$$\gamma1 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h1^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma1 = 171.3\text{deg}}$$

$$\mu1 := \arccos\left(\frac{A^2 + h1^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h1}\right)$$

Sinilause : 
$$\eta1 := \arcsin\left(\frac{\frac{1}{2} \cdot Z}{h1}\right)$$

$$\alpha1 := 2 \cdot \mu1 + 2 \cdot \eta1 \quad \overline{\alpha1 = 24.5\text{deg}}$$

$$\zeta1 := \arccos\left(\frac{h1^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h1 \cdot B}\right)$$

$$v1 := \arcsin\left[\frac{Y + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right)}{h1}\right]$$

$$\delta1 := \pi - \zeta1 - v1 \quad \overline{\delta1 = 93.6\text{deg}}$$

Asento III:

Pythagoraan lause: 
$$h3 := \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \cdot Z\right)^2 + \left(Y - \frac{1}{2} \cdot X\right)^2\right]}$$

Kosinilause : 
$$\gamma3 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h3^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma3 = 41.3\text{deg}}$$

$$\mu3 := \arccos\left(\frac{A^2 + h3^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h3}\right)$$

Sinilause : 
$$\eta3 := \arcsin\left(\frac{\frac{1}{2} \cdot Z}{h3}\right)$$

$$\alpha3 := 2 \cdot \mu3 + 2 \cdot \eta3 \quad \overline{\alpha3 = 164\text{deg}}$$

$$\zeta3 := \arccos\left(\frac{h3^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h3 \cdot B}\right)$$

$$v3 := \arcsin\left(\frac{Y - \frac{1}{2} \cdot X}{h3}\right)$$

$$\delta3 := \pi - \zeta3 - v3 \quad \overline{\delta3 = 33.3\text{deg}}$$

Asento II:

$$H := \left| \left(\frac{1}{2} \cdot Z\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot X\right) \right|$$

$$H2 := \left| \left(\frac{1}{2} \cdot Z\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right) \right|$$

Pythagoraan lause: 
$$h2 := \sqrt{H^2 + Y^2}$$

Kosinilause : 
$$\gamma2 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h2^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma2 = 85.9\text{deg}}$$

$$\mu2 := \arccos\left(\frac{A^2 + h2^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h2}\right)$$

$$h4 := \sqrt{H2^2 + Y^2}$$

$$\eta_2 := \arccos\left(\frac{h_2^2 + h_4^2 - Z^2}{2 \cdot h_2 \cdot h_4}\right)$$

$$\tau_2 := \arccos\left(\frac{h_4^2 + A^2 - B^2}{2 \cdot h_4 \cdot A}\right)$$

$$\alpha_2 := \mu_2 + \eta_2 + \tau_2 \quad \overline{\alpha_2 = 95.5\text{deg}}$$

$$\rho_2 := \arccos\left(\frac{h_2^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h_2 \cdot B}\right)$$

$$\sigma_2 := \arccos\left(\frac{Z^2 + h_2^2 - h_4^2}{2 \cdot Z \cdot h_2}\right)$$

$$\delta_4 := \pi - \rho_2 - \sigma_2 \quad \overline{\delta_4 = 22.8\text{deg}}$$

$$\beta_2 := \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 - h_4^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\beta_2 = 107.9\text{deg}}$$

$$\zeta_2 := \arccos\left(\frac{B^2 + h_4^2 - A^2}{2 \cdot B \cdot h_4}\right)$$

$$\nu_2 := \arccos\left(\frac{h_4^2 + Z^2 - h_2^2}{2 \cdot h_4 \cdot Z}\right)$$

$$\delta_2 := \pi - \zeta_2 - \nu_2 \quad \overline{\delta_2 = 86.6\text{deg}}$$

Tulokset, dimensioilla :

Toiminta-alueen halkaisija  $X = 2 \times 10^3$

Toiminta-alueen keskipisteen y-asema  $Y = 2 \times 10^3$

Alaniveliin välinen etäisyys  $Z = 870$

Ylälinkin pituus  $A = 1.6 \times 10^3$

Alalinkin pituus  $B = 1.4 \times 10^3$

	Asento I	Asento II	Asento III
Kulma $\alpha$ :	$\alpha_1 = 24.5\text{deg}$	$\alpha_2 = 95.5\text{deg}$	$\alpha_3 = 164\text{deg}$
Kulma $\beta$ :	$\beta_1 := \gamma_1$	$\beta_2 = 107.9\text{deg}$	$\beta_3 := \gamma_3$
Kulma $\gamma$ :	$\gamma_1 = 171.3\text{deg}$	$\gamma_2 = 85.9\text{deg}$	$\gamma_3 = 41.3\text{deg}$
Kulma $\delta$ :	$\delta_1 = 93.6\text{deg}$	$\delta_2 = 86.6\text{deg}$	$\delta_3 = 33.3\text{deg}$
Alalinkin liikealue:	$\delta_1 > \delta_2$	$\omega := \delta_1 - \delta_2$	$\overline{\omega = 70.9\text{deg}}$

Simo Saukko 9900954

Aaltoheilurin nivelmekanismin kulmien ratkaiseminen, dimensiot = [mm,deg]

Lähtöarvot :

Toiminta-alueen halkaisija	$\overline{X := 2000}$
Toiminta-alueen keskipisteen y-asema	$\overline{Y := 2000}$
Alaniveliin välinen etäisyys	$\overline{Z := 870}$
Ylälinkin pituus	$\overline{A := 1630}$
Alalinkin pituus	$\overline{B := 1460}$

Asento I:

Pythagoraan lause: 
$$h1 := \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \cdot Z\right)^2 + \left[Y + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right)\right]^2}\right]}$$

Kosinilause : 
$$\gamma1 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h1^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma1 = 157.1 \text{deg}}$$

$$\mu1 := \arccos\left(\frac{A^2 + h1^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h1}\right)$$

Sinilause : 
$$\eta1 := \arcsin\left(\frac{\frac{1}{2} \cdot Z}{h1}\right)$$

$$\alpha1 := 2 \cdot \mu1 + 2 \cdot \eta1 \quad \overline{\alpha1 = 38.2 \text{deg}}$$

$$\zeta1 := \arccos\left(\frac{h1^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h1 \cdot B}\right)$$

$$v1 := \arcsin\left[\frac{Y + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right)}{h1}\right]$$

$$\delta1 := \pi - \zeta1 - v1 \quad \overline{\delta1 = 86.1 \text{deg}}$$

Asento III:

Pythagoraan lause: 
$$h_3 := \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \cdot Z\right)^2 + \left(Y - \frac{1}{2} \cdot X\right)^2\right]}$$

Kosinilause : 
$$\gamma_3 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h_3^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma_3 = 40.8 \text{deg}}$$

$$\mu_3 := \arccos\left(\frac{A^2 + h_3^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h_3}\right)$$

Sinilause : 
$$\eta_3 := \arcsin\left(\frac{\frac{1}{2} \cdot Z}{h_3}\right)$$

$$\alpha_3 := 2 \cdot \mu_3 + 2 \cdot \eta_3 \quad \overline{\alpha_3 = 169.7 \text{deg}}$$

$$\zeta_3 := \arccos\left(\frac{h_3^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h_3 \cdot B}\right)$$

$$v_3 := \arcsin\left(\frac{Y - \frac{1}{2} \cdot X}{h_3}\right)$$

$$\delta_3 := \pi - \zeta_3 - v_3 \quad \overline{\delta_3 = 35.7 \text{deg}}$$

Asento II:

$$H := \left| \left(\frac{1}{2} \cdot Z\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot X\right) \right|$$

$$H_2 := \left| \left(\frac{1}{2} \cdot Z\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot X\right) \right|$$

Pythagoraan lause: 
$$h_2 := \sqrt{H^2 + Y^2}$$

Kosinilause : 
$$\gamma_2 := \arccos\left(\frac{B^2 + A^2 - h_2^2}{2 \cdot A \cdot B}\right) \quad \overline{\gamma_2 = 84.2 \text{deg}}$$

$$\mu_2 := \arccos\left(\frac{A^2 + h_2^2 - B^2}{2 \cdot A \cdot h_2}\right)$$

$$h_4 := \sqrt{H_2^2 + Y^2}$$

$$\eta_2 := \arccos\left(\frac{h_2^2 + h_4^2 - Z^2}{2 \cdot h_2 \cdot h_4}\right)$$

$$\tau_2 := \arccos\left(\frac{h_4^2 + A^2 - B^2}{2 \cdot h_4 \cdot A}\right)$$

$$\alpha_2 := \mu_2 + \eta_2 + \tau_2$$

$$\overline{\alpha_2 = 99.3\text{deg}}$$

$$\rho_2 := \arccos\left(\frac{h_2^2 + B^2 - A^2}{2 \cdot h_2 \cdot B}\right)$$

$$\sigma_2 := \arccos\left(\frac{Z^2 + h_2^2 - h_4^2}{2 \cdot Z \cdot h_2}\right)$$

$$\delta_4 := \pi - \rho_2 - \sigma_2$$

$$\overline{\delta_4 = 22.9\text{deg}}$$

$$\beta_2 := \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 - h_4^2}{2 \cdot A \cdot B}\right)$$

$$\overline{\beta_2 = 105.3\text{deg}}$$

$$\zeta_2 := \arccos\left(\frac{B^2 + h_4^2 - A^2}{2 \cdot B \cdot h_4}\right)$$

$$v_2 := \arccos\left(\frac{h_4^2 + Z^2 - h_2^2}{2 \cdot h_4 \cdot Z}\right)$$

$$\delta_2 := \pi - \zeta_2 - v_2$$

$$\overline{\delta_2 = 86\text{deg}}$$

Tulokset, dimensioilla :

Toiminta-alueen halkaisija  $X = 2 \times 10^3$

Toiminta-alueen keskipisteen y-asema  $Y = 2 \times 10^3$

Alaniveliön välinen etäisyys  $Z = 870$

Ylälinkin pituus  $A = 1.6 \times 10^3$

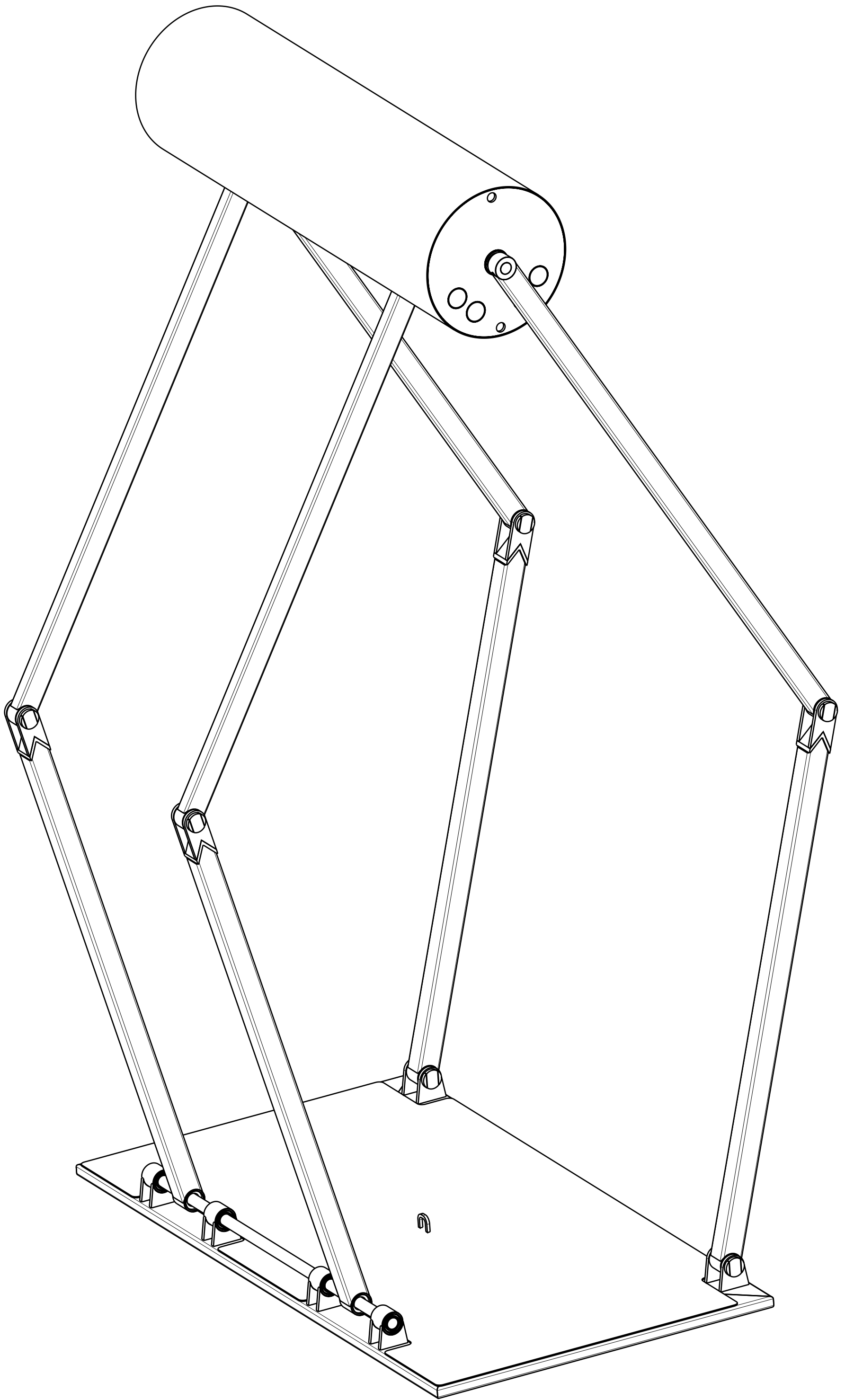
Alalinkin pituus  $B = 1.5 \times 10^3$

	Asento I	Asento II	Asento III
Kulma $\alpha$ :	$\alpha_1 = 38.2\text{deg}$	$\alpha_2 = 99.3\text{deg}$	$\alpha_3 = 169.7\text{deg}$
Kulma $\beta$ :	$\beta_1 := \gamma_1$	$\beta_2 = 105.3\text{deg}$	$\beta_3 := \gamma_3$
Kulma $\gamma$ :	$\gamma_1 = 157.1\text{deg}$	$\gamma_2 = 84.2\text{deg}$	$\gamma_3 = 40.8\text{deg}$
Kulma $\delta$ :	$\delta_1 = 86.1\text{deg}$	$\delta_2 = 86\text{deg}$	$\delta_3 = 35.7\text{deg}$
Alalinkin liikealue:	$\omega := \delta_2 - \delta_4$	$\overline{\omega = 63\text{deg}}$	

Rakenne  
Aaltosorvi

Päätaso	I	II	III	kpl	Lisätieto
<b>Aaltosorvi</b>				1	<b>Pääkokoonpano</b>
	<b>Ponttoni</b>			1	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Ponttonisäiliö</b>		1	<b>Kokoonpano</b>
			<b>Päätylevy</b>	2	S=8, S355
			<b>Holkki 4</b>	2	AISI 303
			<b>Vaippa</b>	1	400x3x1500, S355
			<b>Sisäputki</b>	1	66x3x1500, S355
			<b>Kuormaputki</b>	4	54x2x1500, S355
			<b>Silmukka</b>	1	8x8, S355
		<b>Ponttonin laakerointi</b>		1	<b>Kokoonpano</b>
			<b>Akseli 2</b>	1	AISI 303
			<b>Laakeri</b>	2	Igus Iglide H370
			<b>Tiiviste</b>	4	Din 3760A
		<b>Putki 3</b>		2	RHS 60x40x3
		<b>Holkki 4</b>		2	AISI 303
	<b>Ylävarsi 1</b>			2	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Putki 2</b>		1	RHS 60x40x3
		<b>Holkki 3</b>		1	S355
		<b>Holkki 4</b>		1	AISI 303
	<b>Alavarsi 1</b>			2	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Putki 1</b>		1	RHS 60x60x3
		<b>Holkki 1</b>		1	AISI 303
		<b>Nivel 1</b>		1	<b>Kokoonpano</b>
			<b>Levy 1</b>	1	S=10, S355
			<b>Levy 2</b>	1	S=10, S355
			<b>Levy 3</b>	1	S=8, S355
	<b>Alavarsi 2</b>			2	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Putki 1</b>		1	RHS 60x60x3
		<b>Holkki 2</b>		1	S355
		<b>Nivel 1</b>		1	<b>Kokoonpano</b>
			<b>Levy 1</b>	1	S=10, S355
			<b>Levy 2</b>	1	S=10, S355
			<b>Levy 3</b>	1	S=8, S355
	<b>Alusta</b>			1	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Alustalevy</b>		1	S=4, S355
			<b>Silmukka</b>	1	8x8, S355
		<b>Korvake 1</b>		2	S=10, S355
		<b>Korvake 2</b>		2	S=10, S355
		<b>Kannake</b>		4	<b>Kokoonpano</b>
			<b>Holkki1</b>	1	AISI 303
			<b>Levy 5</b>	2	S=10, S355
		<b>Kehikko</b>		1	RHS 100x30x3
	<b>Jalan nivelen laakerointi</b>			4	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Akseli 1</b>		1	AISI 303
		<b>Laakeri</b>		1	Igus Iglide H370
		<b>Liukurengas 1</b>		1	Igus Iglide L280
		<b>Liukurengas 2</b>		1	Igus Iglide L281
		<b>Tiiviste</b>		2	Din 3760A
	<b>Jalan laakerointi alustaan</b>			2	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Laakeri</b>		1	Igus Iglide H370
		<b>Tiiviste</b>		2	Din 3760A
		<b>Akseli 1</b>		1	AISI 303
	<b>Kannakkeen laakerointi</b>			1	<b>Kokoonpano</b>
		<b>Laakeri</b>		4	Igus Iglide H370
		<b>Tiiviste</b>		8	Din 3760A
		<b>Akseli 3</b>		1	AISI 303





Aaltosorvi  
Mittasuhde 1:9

Ponttonin täyttö-  
ja tyhjennysaukot  
suljetaan M24  
kierretulpalla

Ponttoni

Ponttonin  
laakerointi

Ylävarsi lukitaan  
akseliin 10mm putkisokalla

Kuormasijat tulpataan  
50mm muovitulpilla

Ylävarsi

1629

Alavarsi 2

Alavarsi 1

Tarvittaessa  
asennetaan  
yläasennon  
rajoitinvaijeri

Alusta

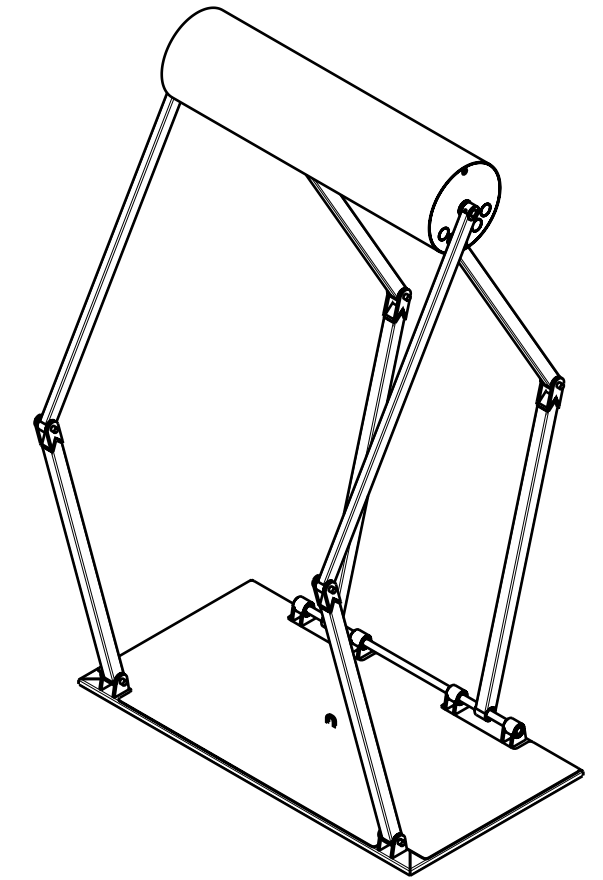
Alavarsi lukitaan  
akseliin 10mm putkisokalla

Kannakkeen  
laakerointi

Alusta kiinnitetään kohteeseen pulteilla kehikon läpi

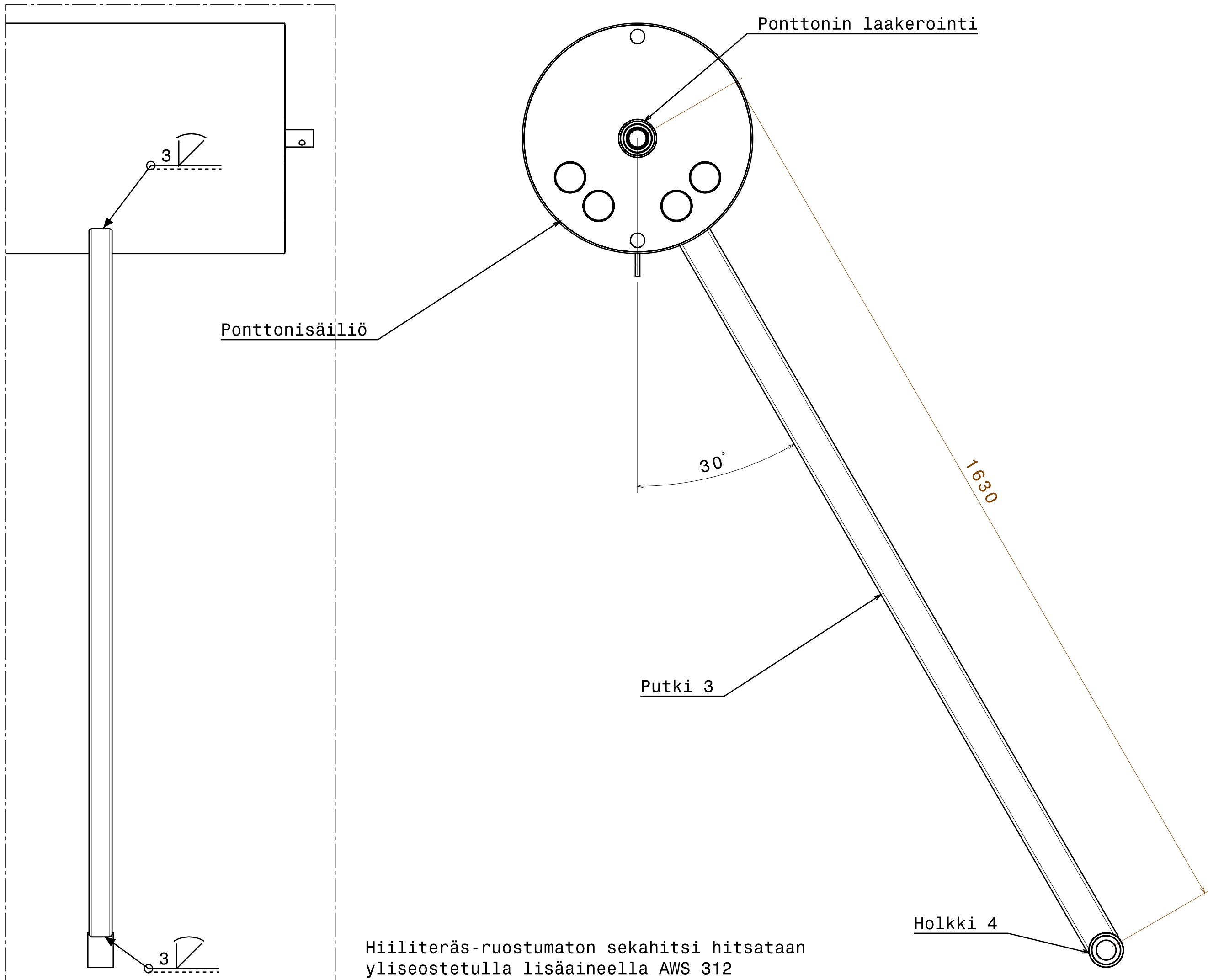
Jalan laakerointi  
alustaan

Jalan nivelen  
laakerointi



2825

Kokoonpano  
Aaltosorvi  
Mittasuhte 1:15



Ponttonin laakerointi

Ponttonisäiliö

Putki 3

Holkki 4

Hiiliteräs-ruostumaton sekahitsi hitsataan yliseostetulla lisäaineella AWS 312

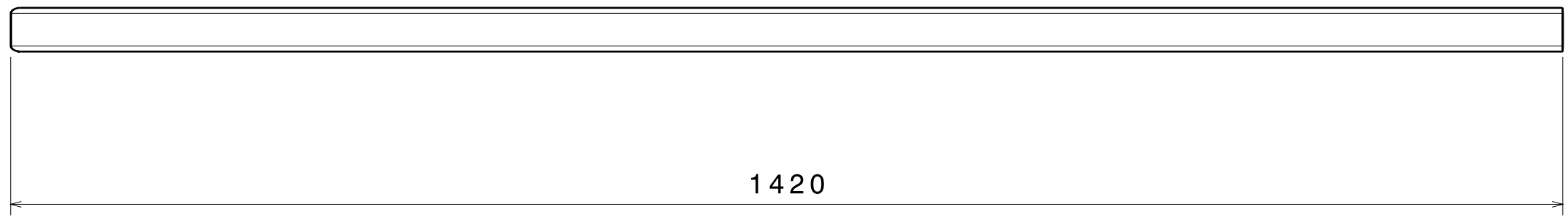
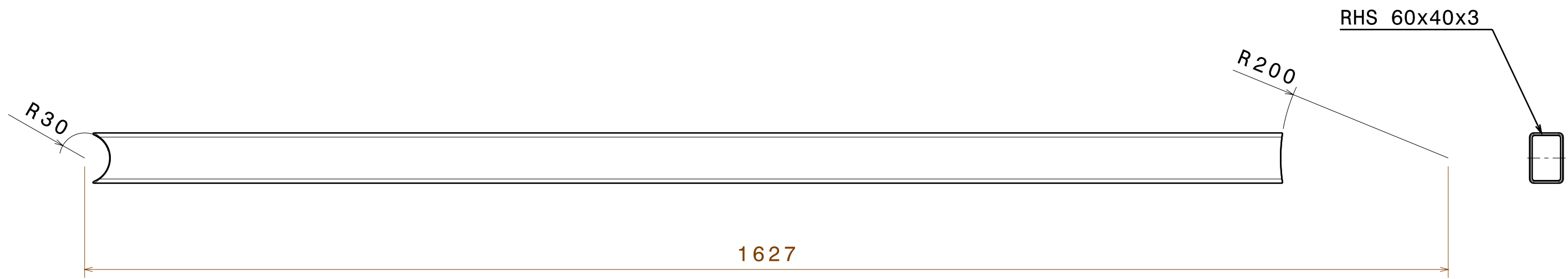
Kokoonpano  
Ponttoni  
Mittakaava 1:6

3

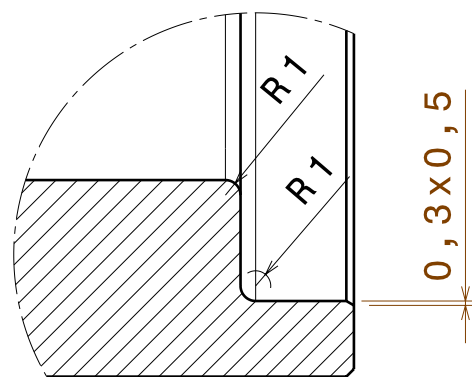
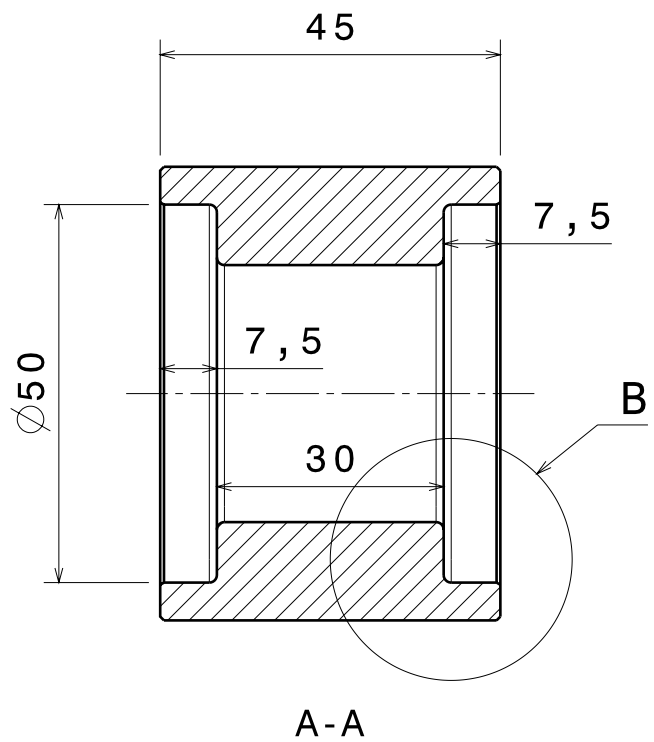
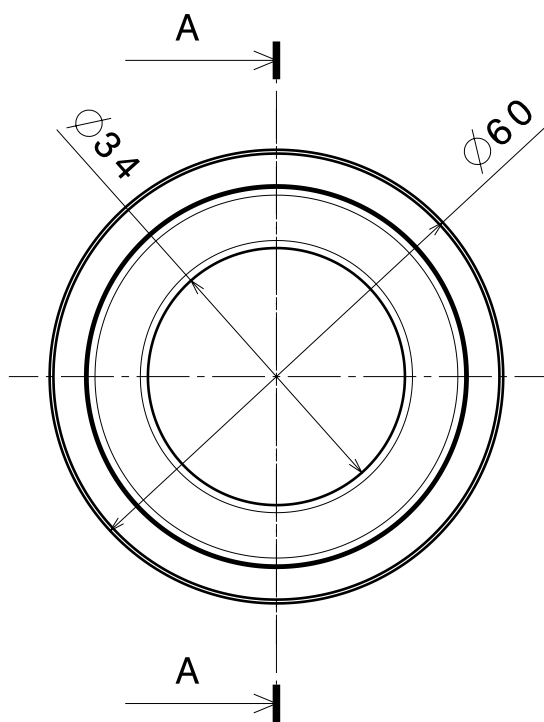
3

30°

1630



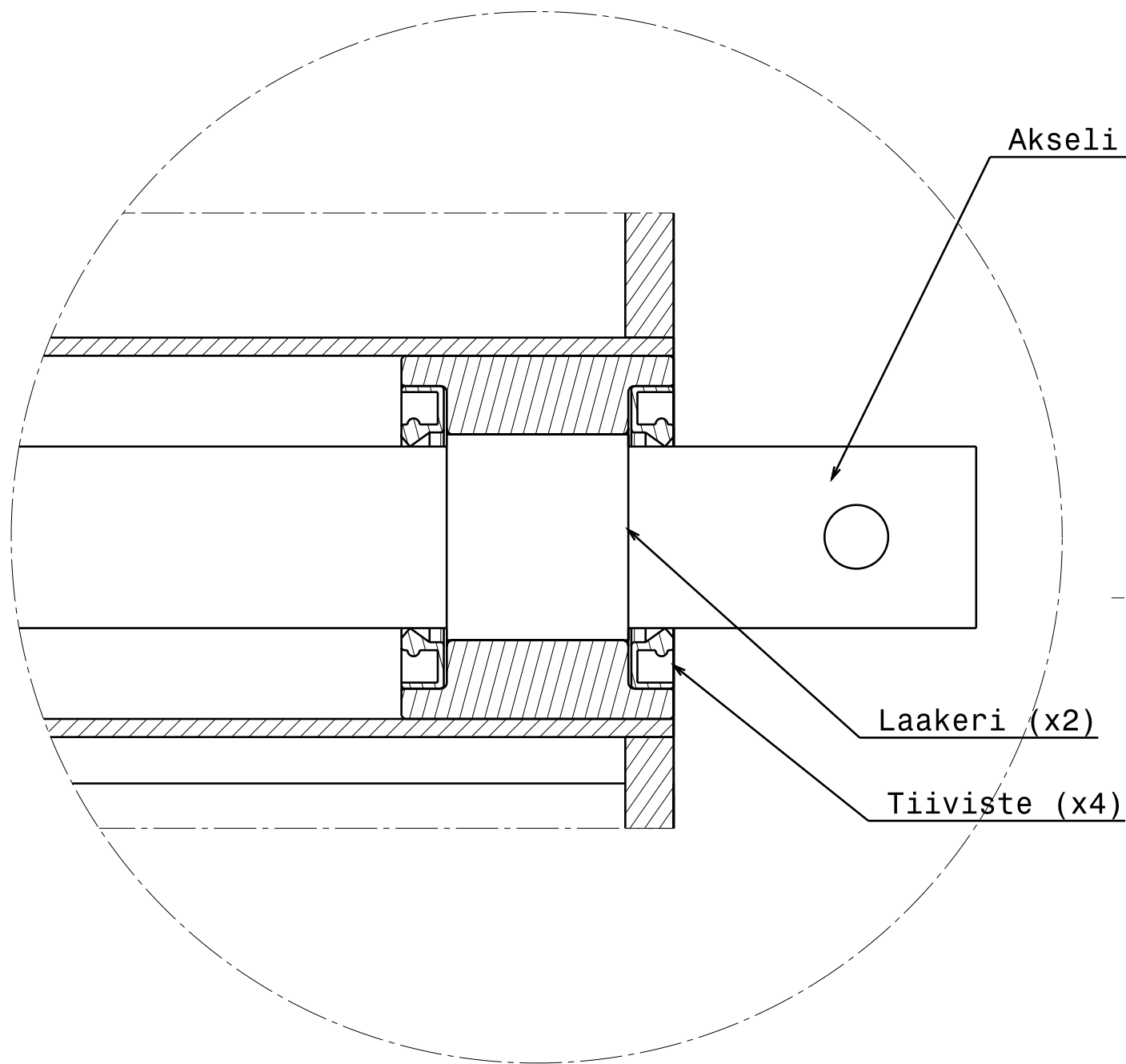
Putki 3  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:5



Yksityiskohta B  
Mittasuhte 2:1

Holkki 4  
Materiaali AISI 303  
Mittasuhte 1:1

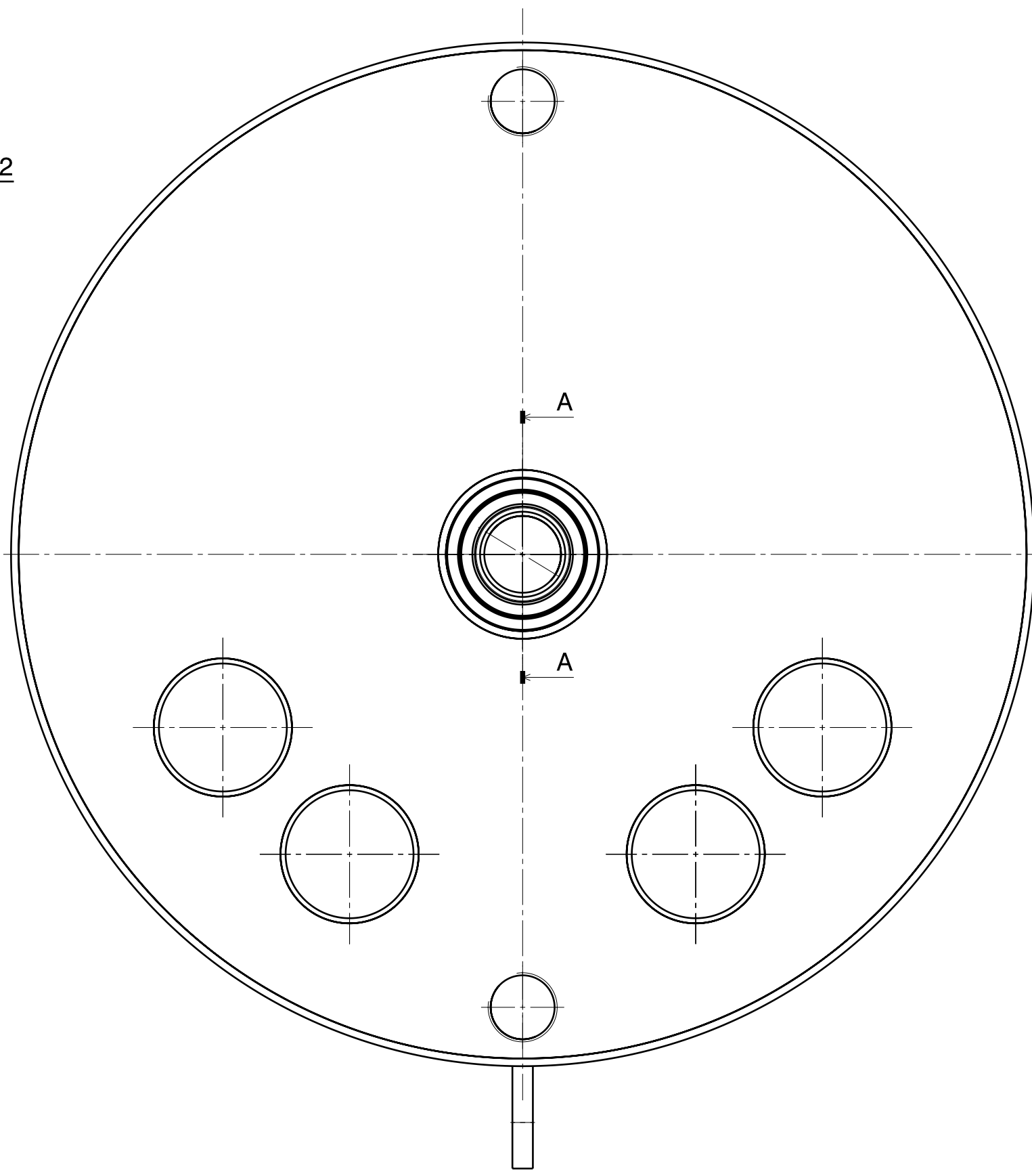
A-A



Akseli 2

Laakeri (x2)

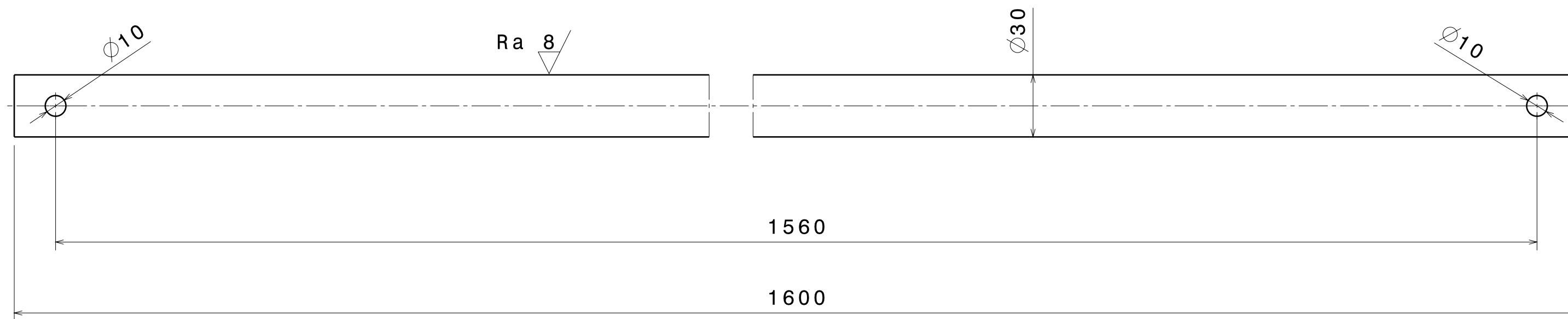
Tiiviste (x4)



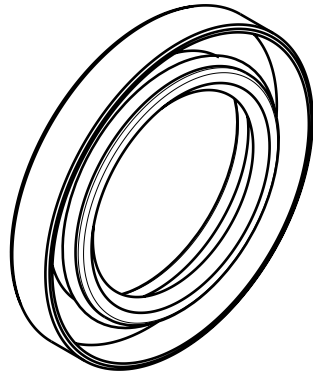
A

A

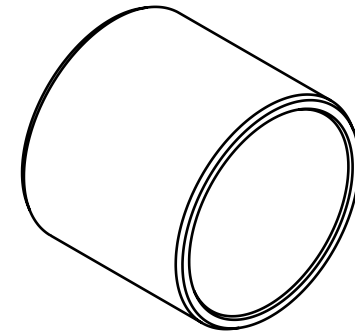
Kokoonpano  
Ponttonin laakerointi  
Laakeri Igus H370  
Tiiviste DIN 3760 A  
Mittasuhte 1:2



Akseli 2  
Materiaali AISI 303  
Mittasuhte 1:2

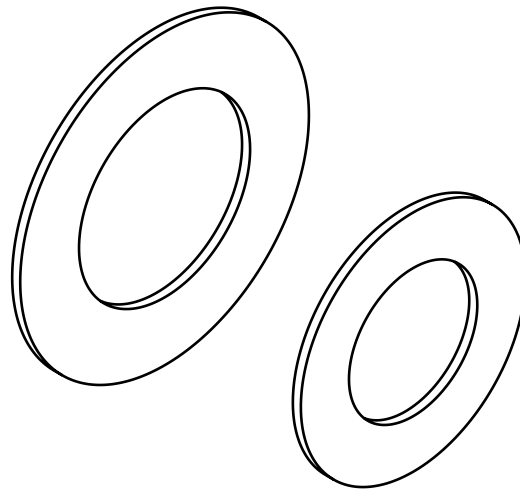


Tiiviste  
Din 3760  
Tyyppi A  
Ø50mm  
Syvyys 7mm  
Nitrillikumi



Laakeri  
Iigus Iglide H370  
Ulko Ø 34mm  
Sisä Ø 30mm  
Pituus 30mm

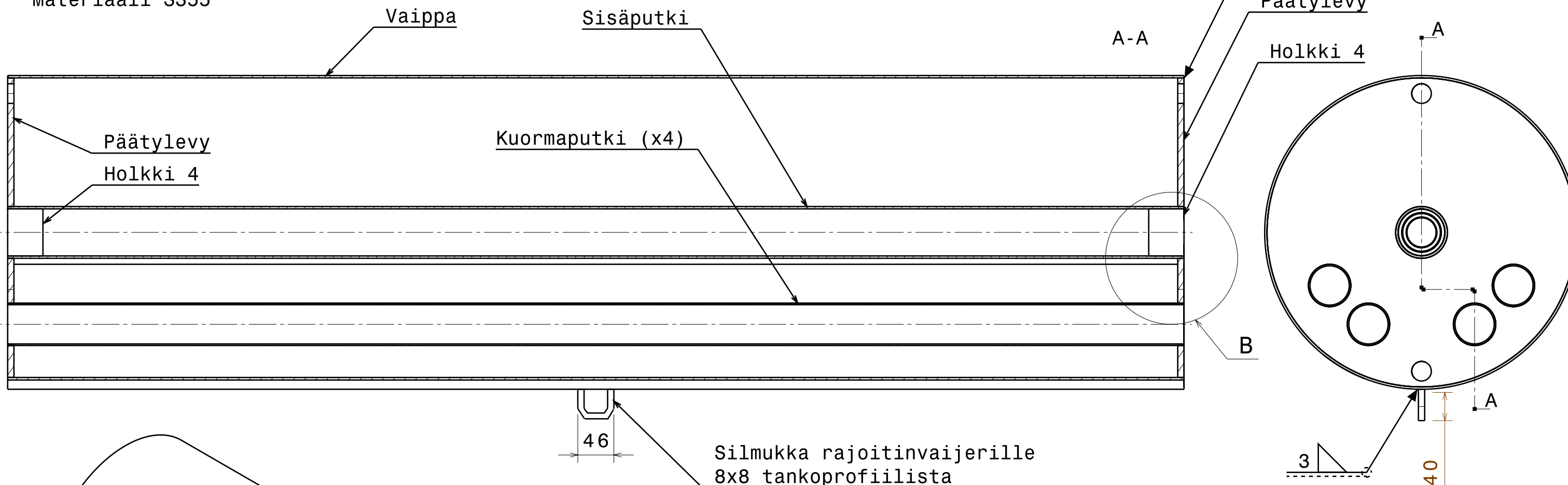
Liukulevyt  
Iigus Iglide L280  
Ø54x32x1,5  
Ø42x24x1,5



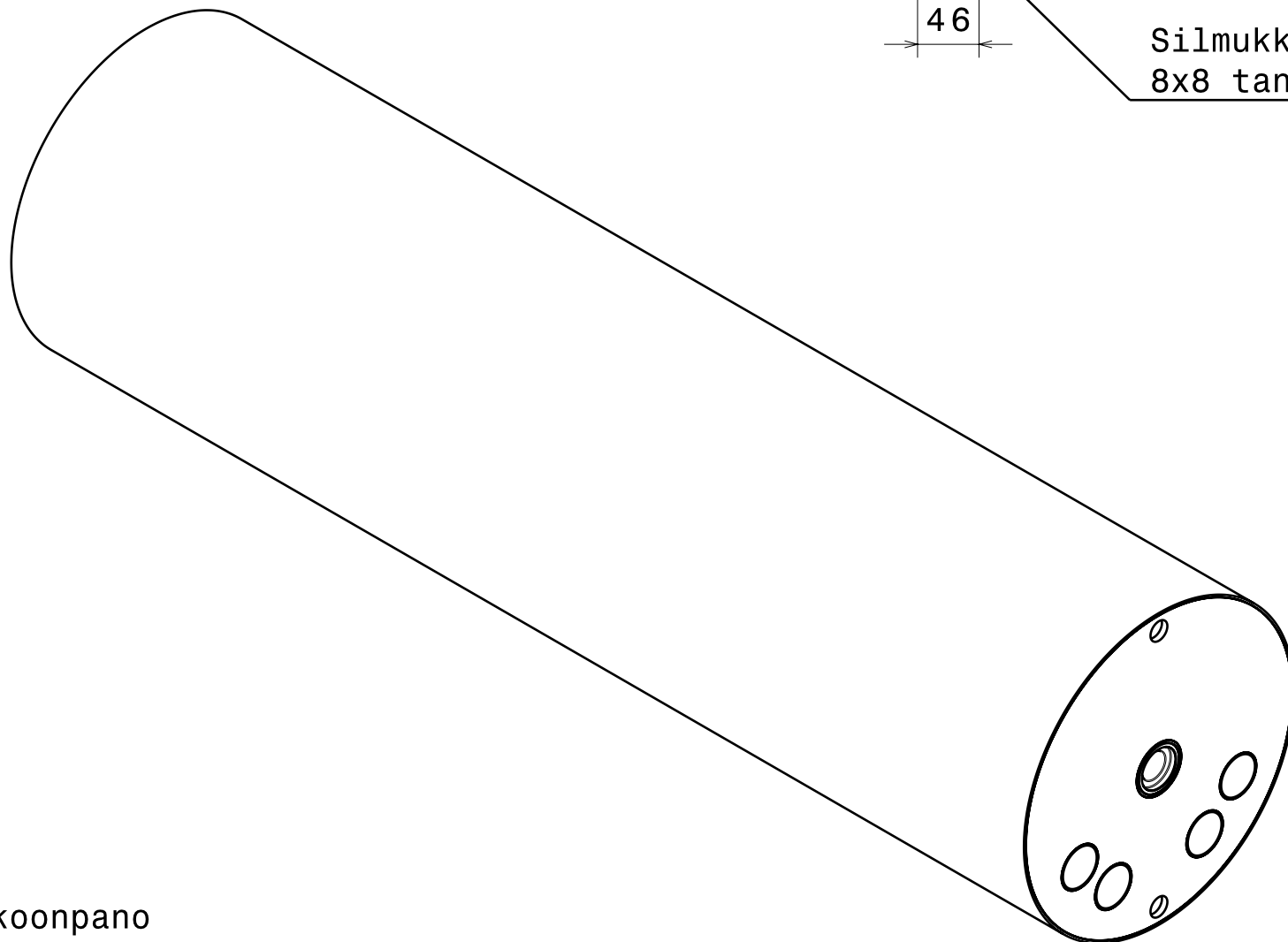
Laakeroinnin osia  
Mittasuhte 1:1



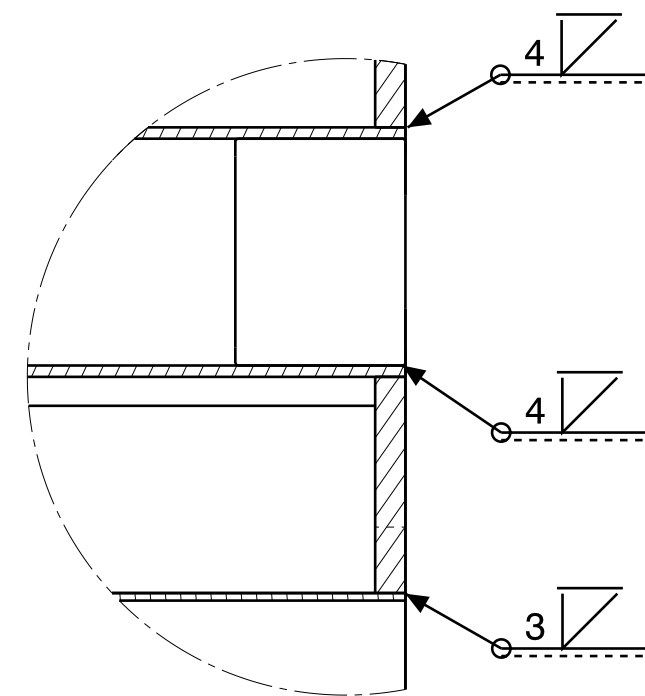
Vaippa 400x3x1500  
 Sisäputki 66x3x1500  
 Kuormaputki 54x2x1500  
 Materiaali S355



Silmukka rajoitinvaijerille  
 8x8 tankoprofiilista

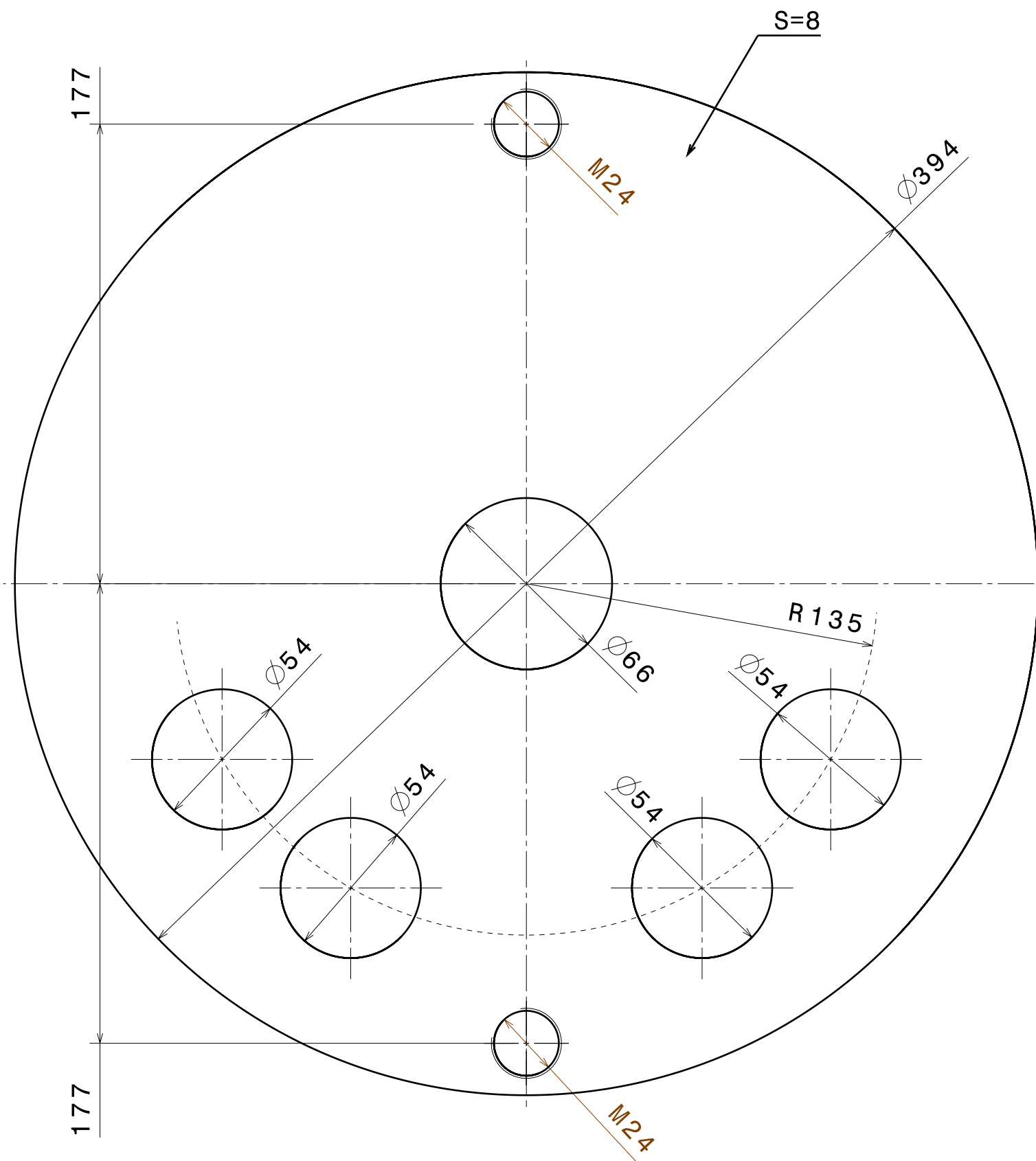


Yksityiskohta B  
 Mittasuhte 1:2

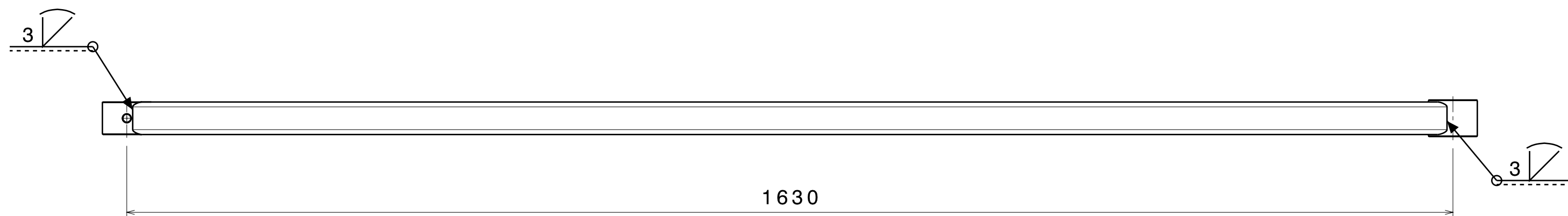
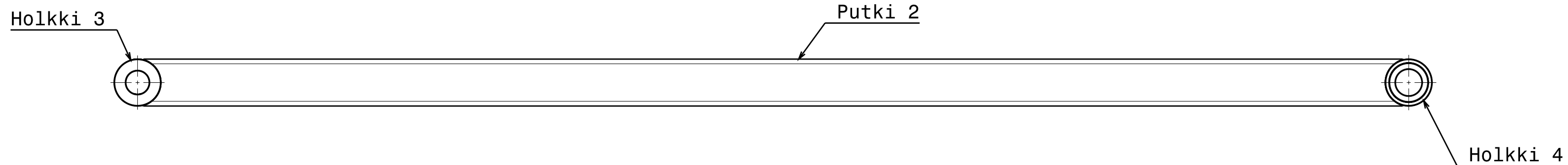


Ponttonin toinen pääty  
 hitsataan samalla tavalla.

Kokoonpano  
 Ponttonisäiliö  
 Mittasuhte 1:5

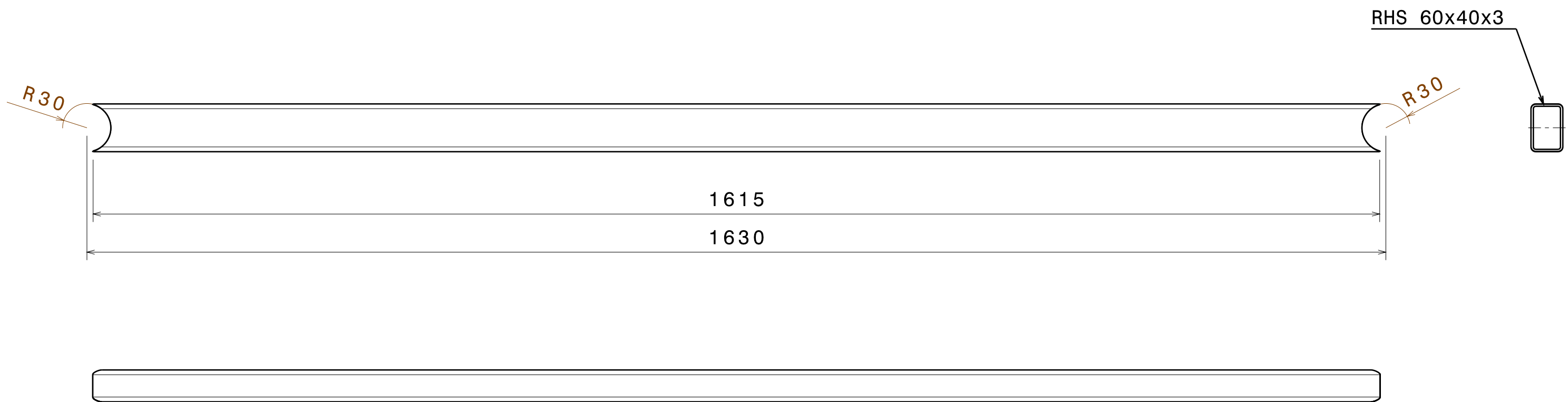


Päätylevy  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:2

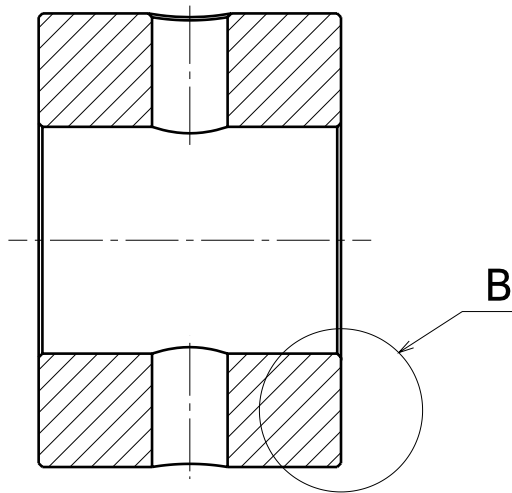
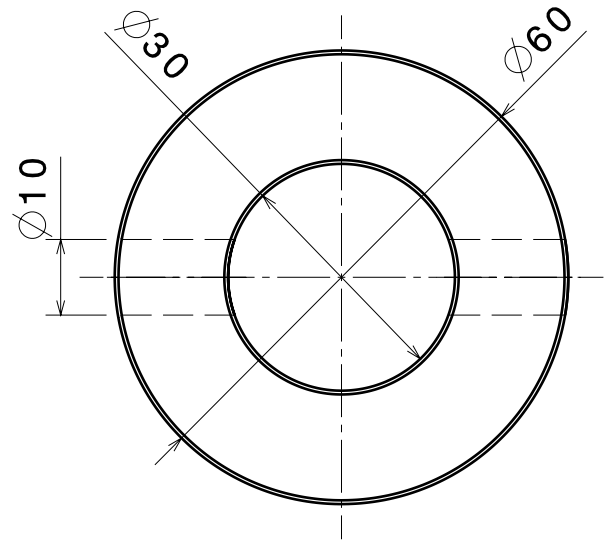
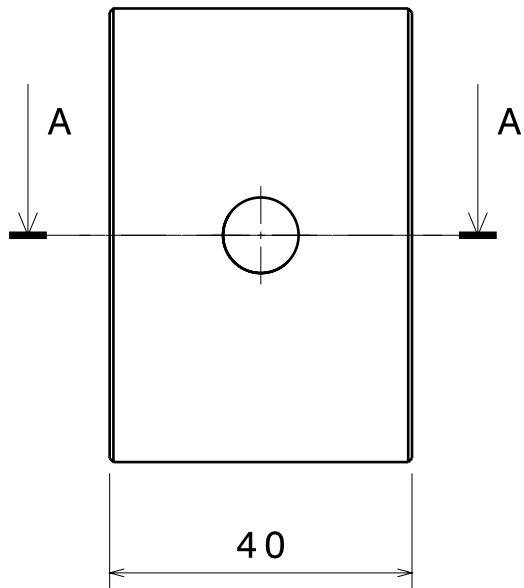


Hiiliteräs-ruostumaton sekahitsi hitsataan  
yliseostetulla lisäaineella AWS 312

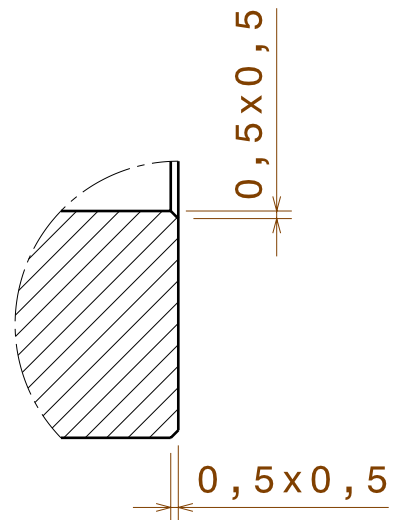
Kokoonpano  
Ylävarsi  
Mittasuhte 1:5



Putki 2  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:5

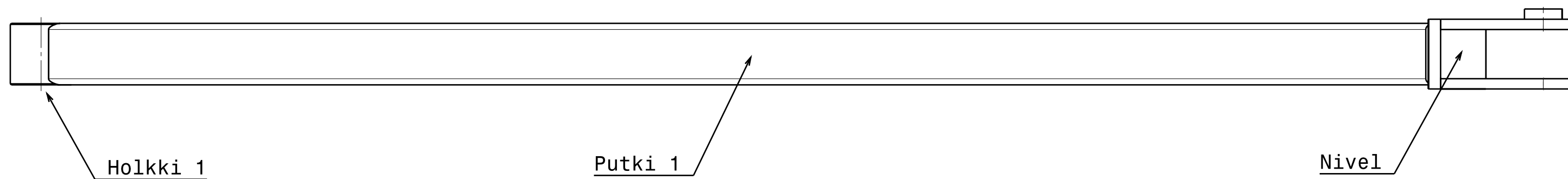
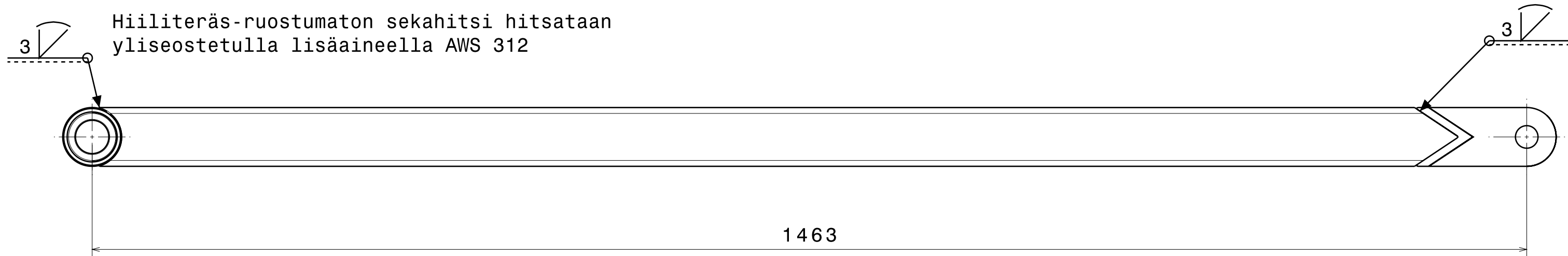


A-A

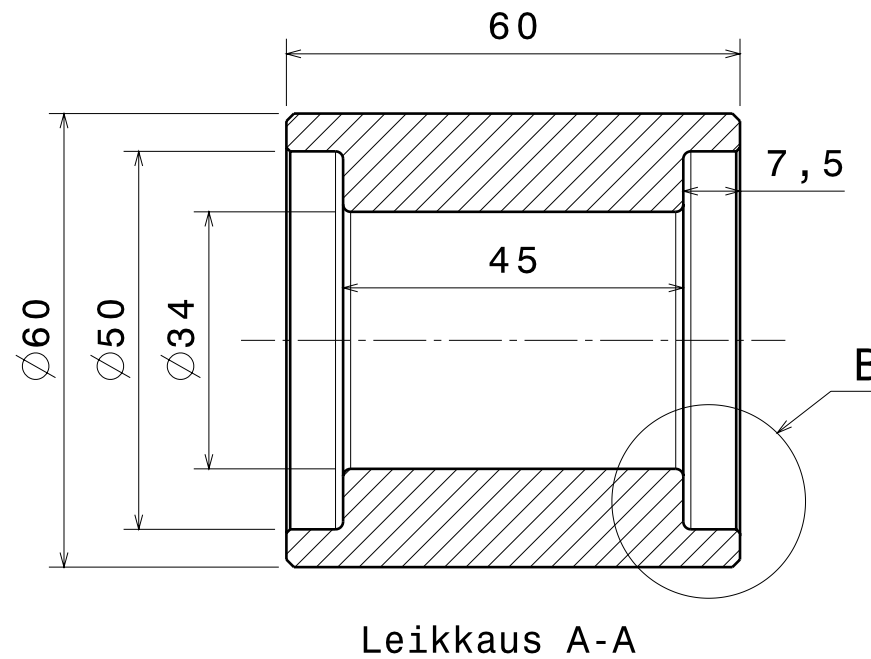
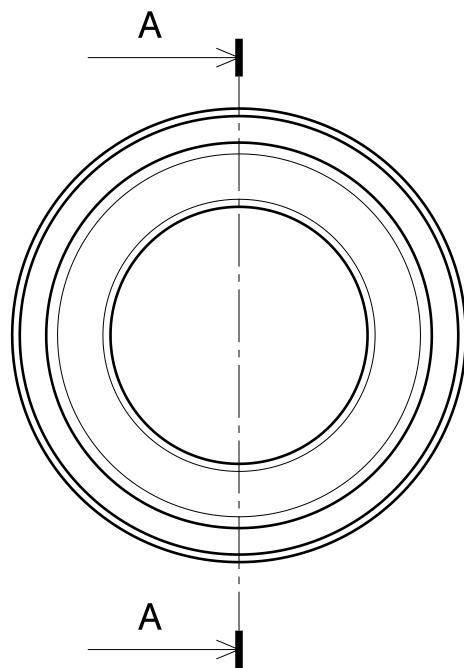


Yksityiskohta B  
Mittasuhte 2:1

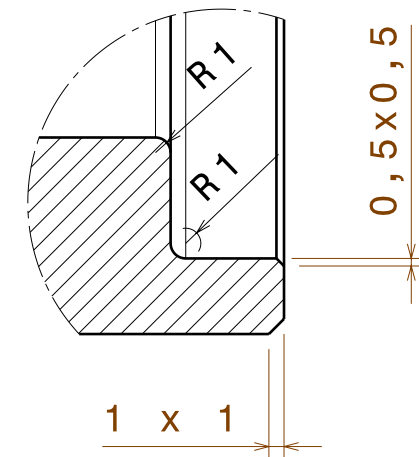
Holkki 3  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:1



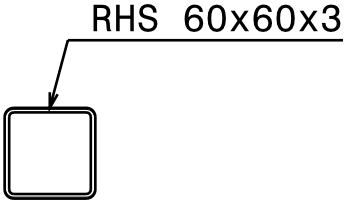
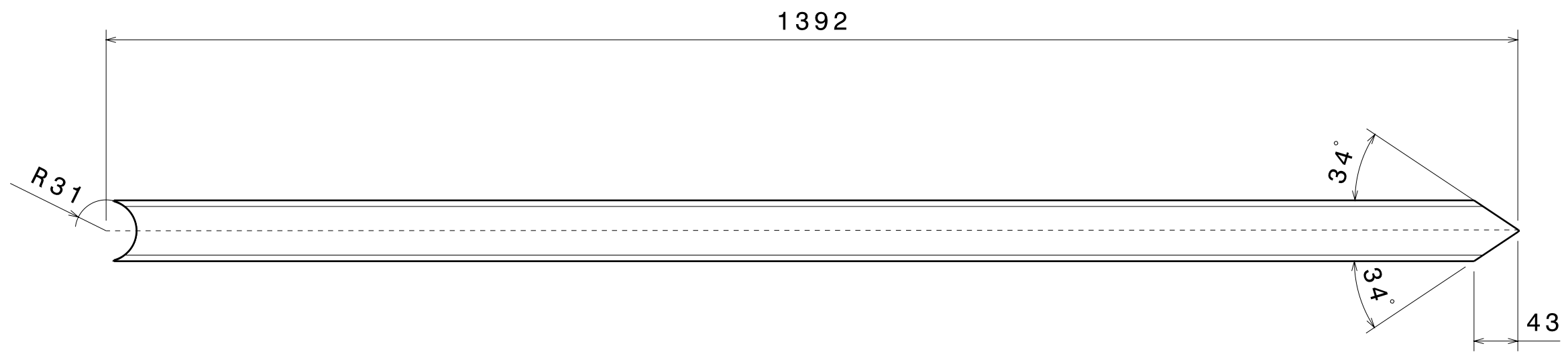
Kokoonpano  
Alavarsi 1  
Mittasuhte 1:4



Yksityiskohta B  
Mittakaava 2:1

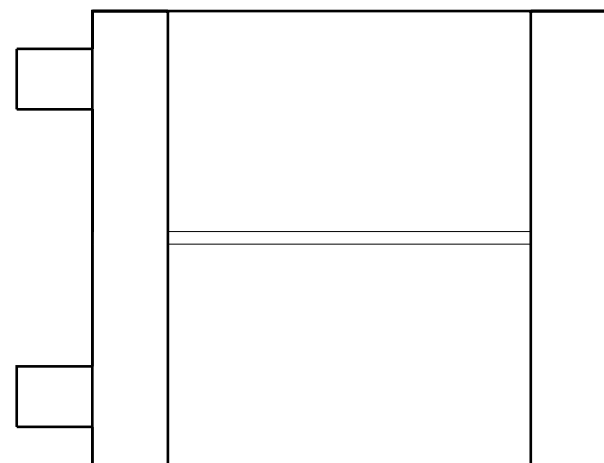
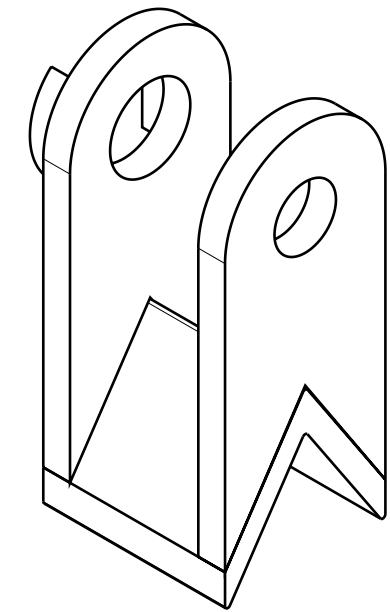
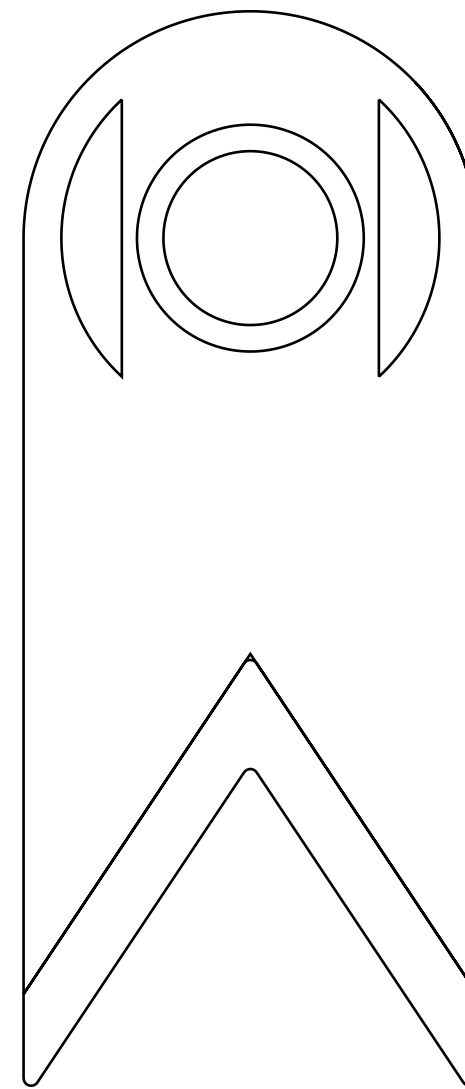
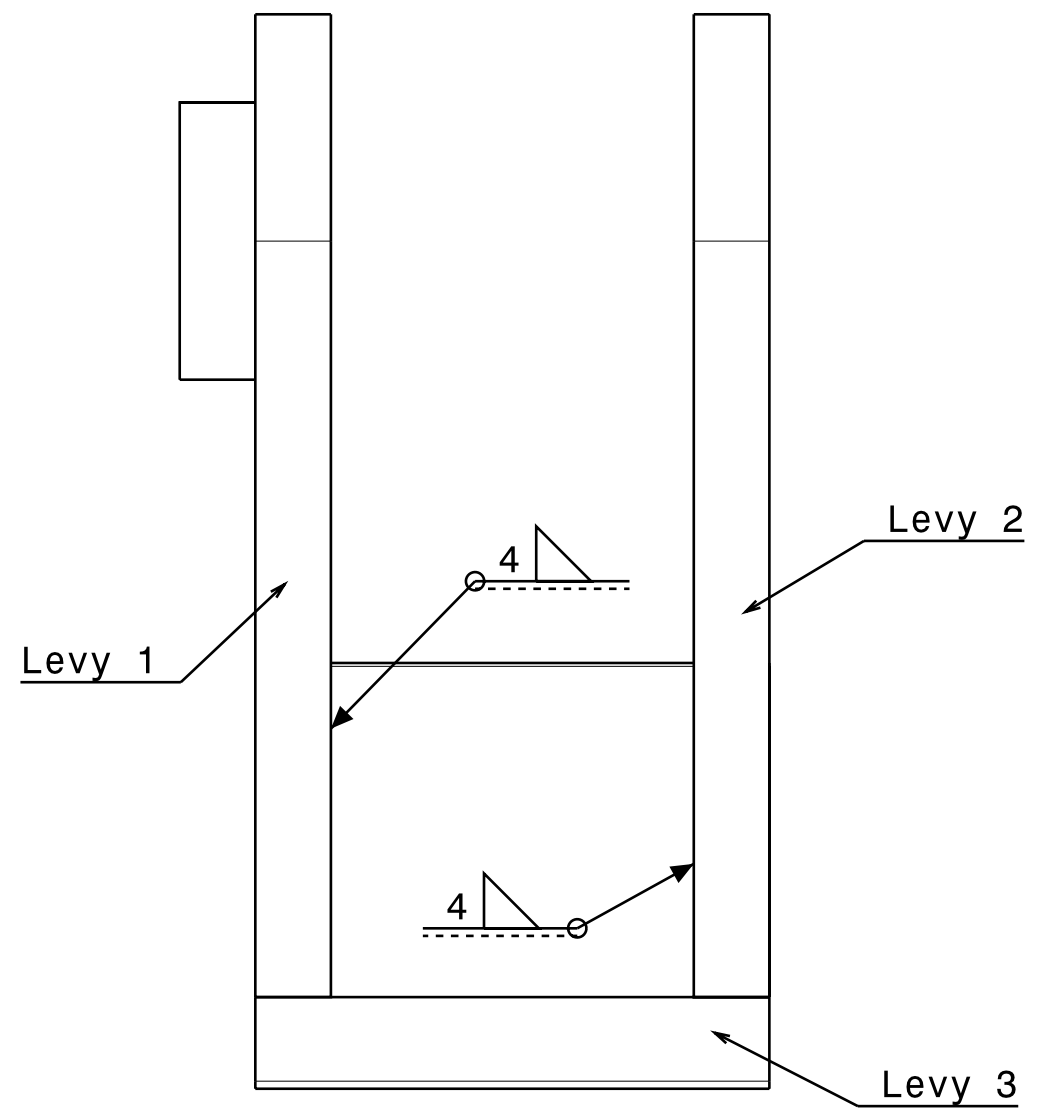


Holkki 1  
Materiaali AISI 303  
Mittasuhte 1:1

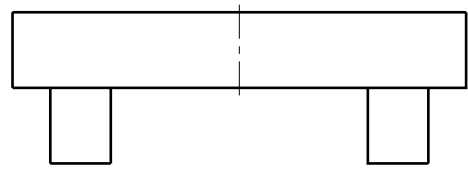
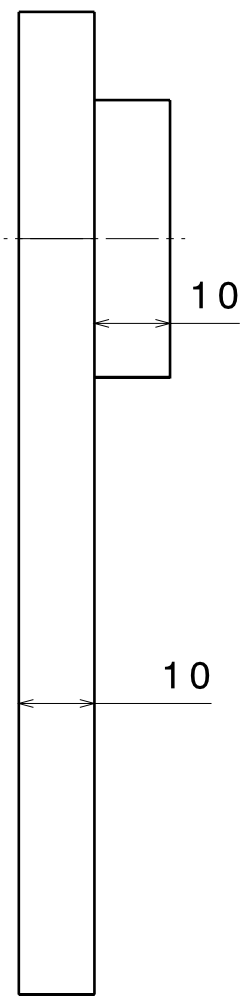
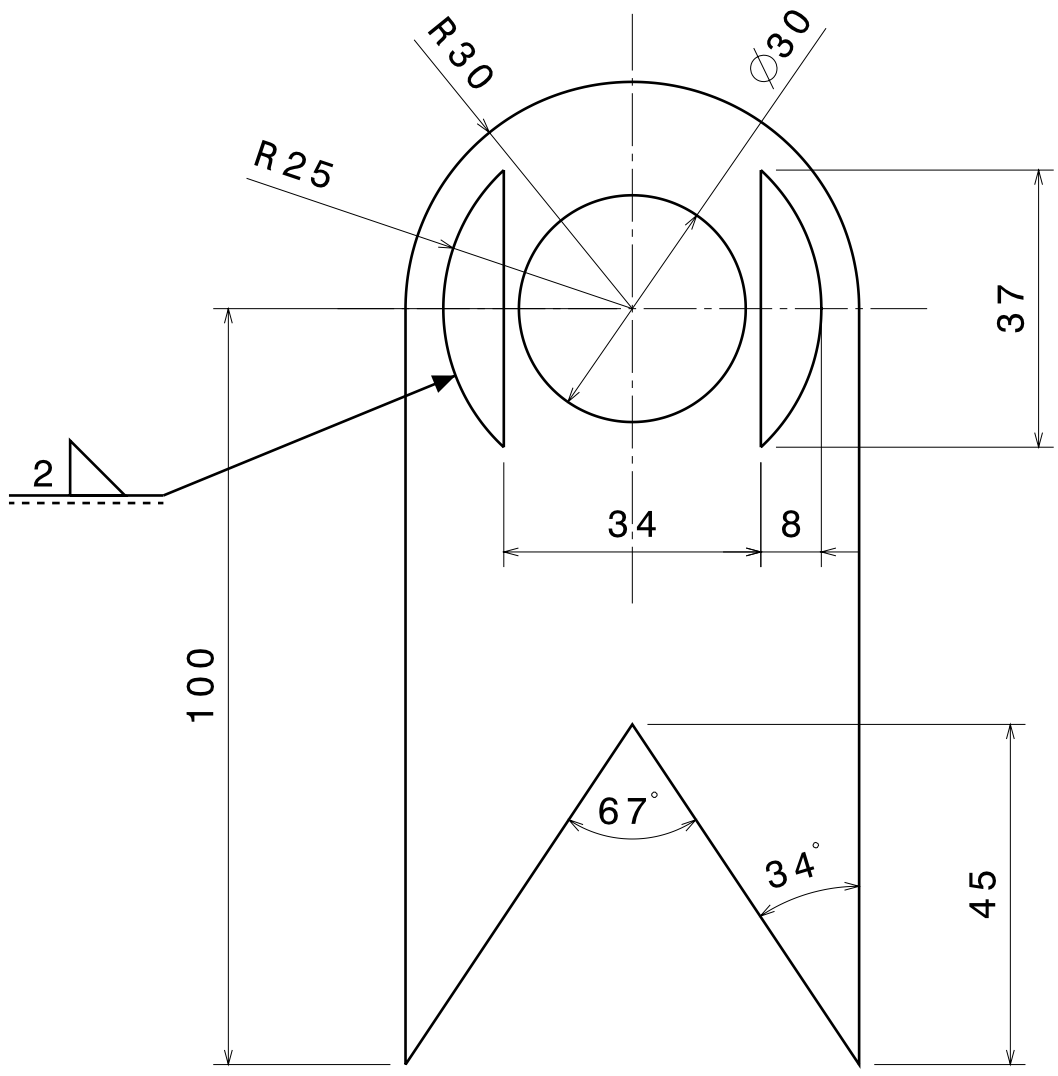


Putki 1  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:5

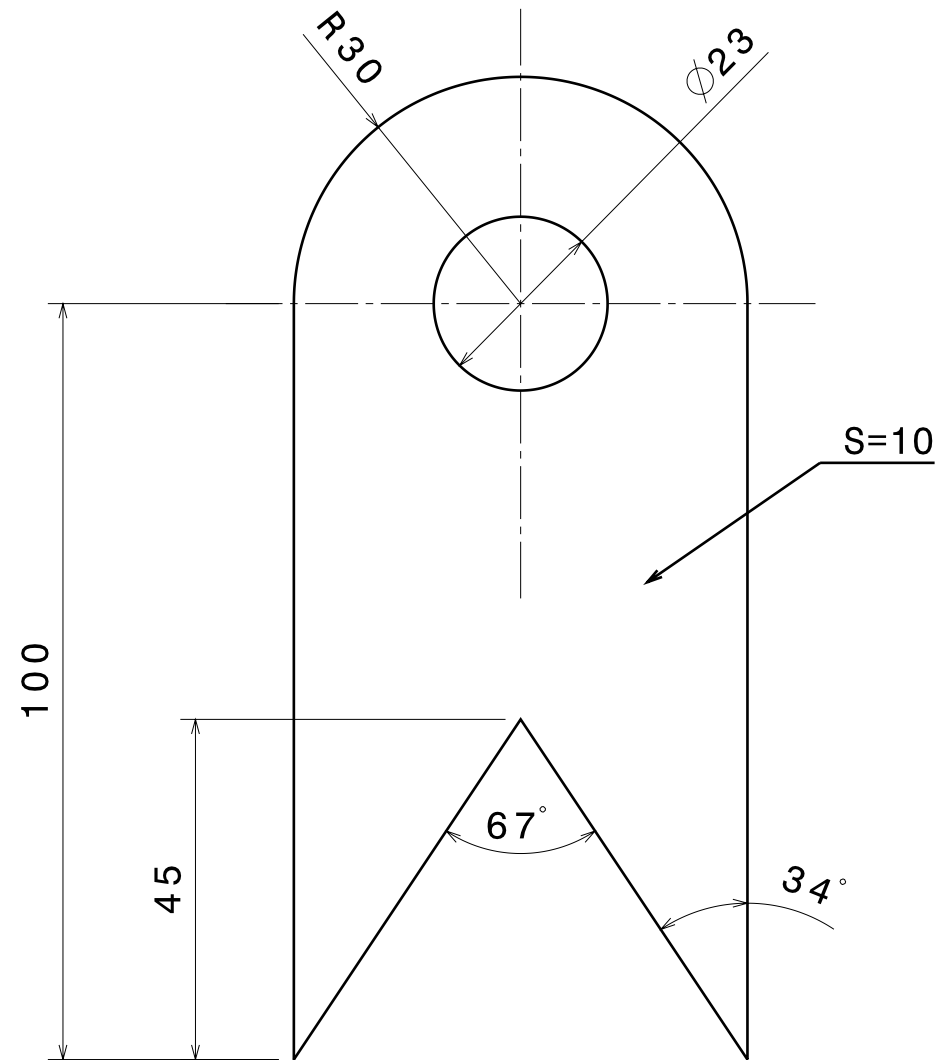




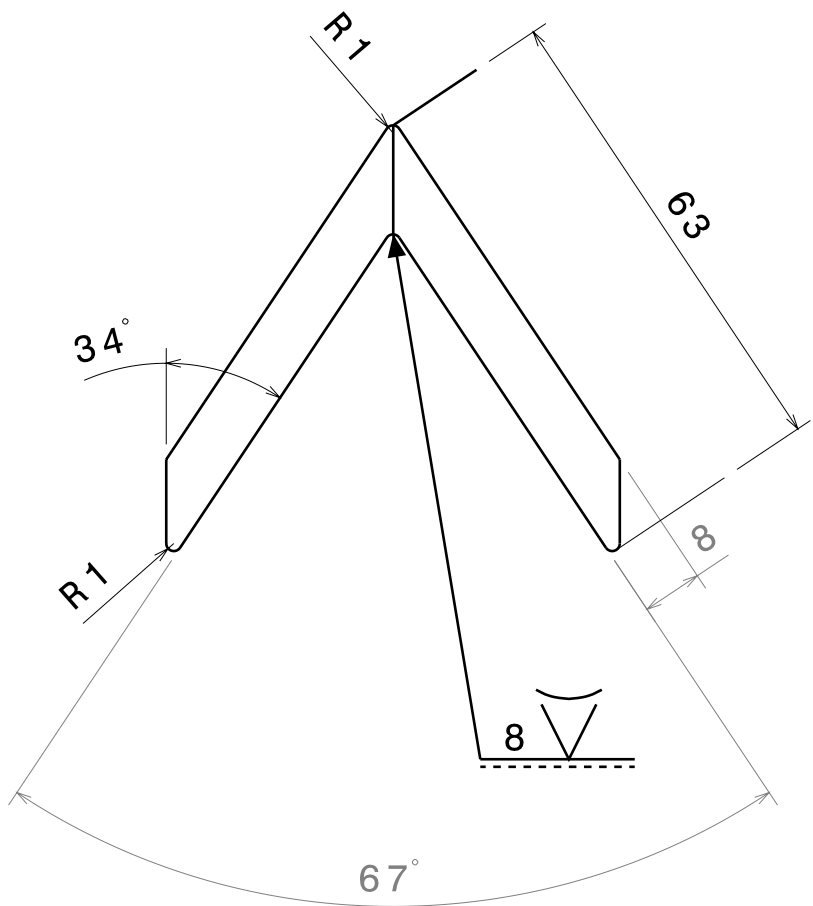
Kokoonpano  
 Nivel  
 Materiaali S355  
 Mittasuhte 1:1



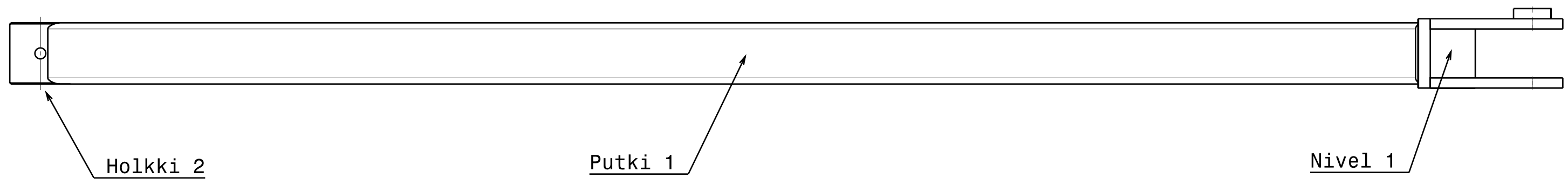
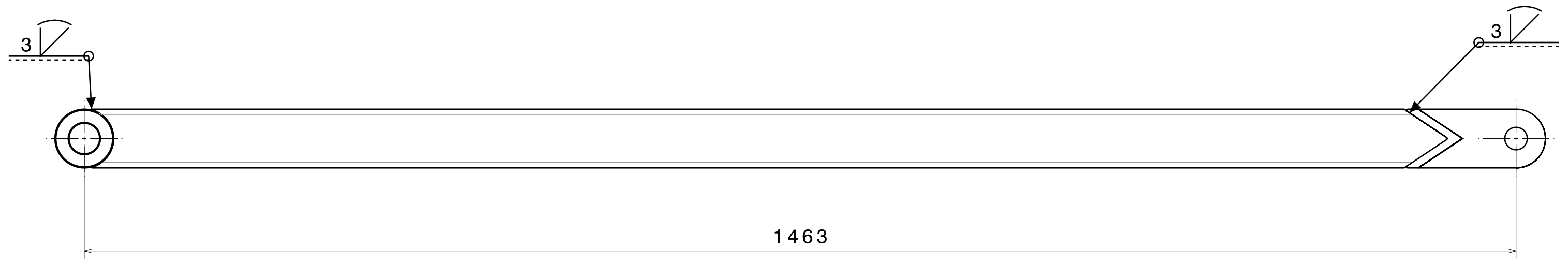
Levy 1  
 Materiaali S355  
 Mittasuhte 1:1



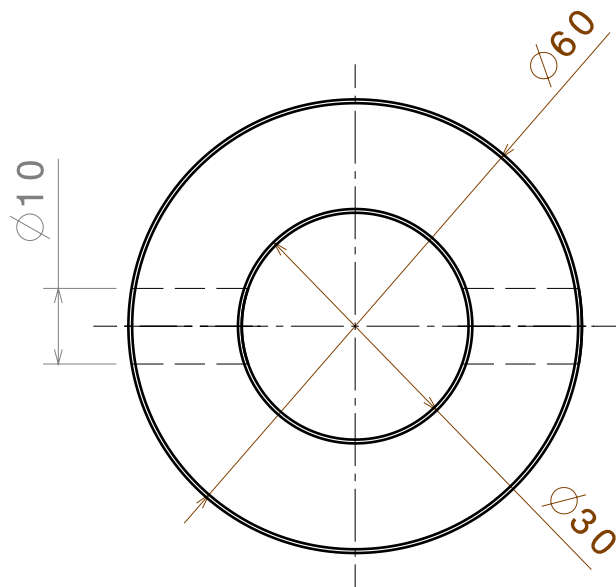
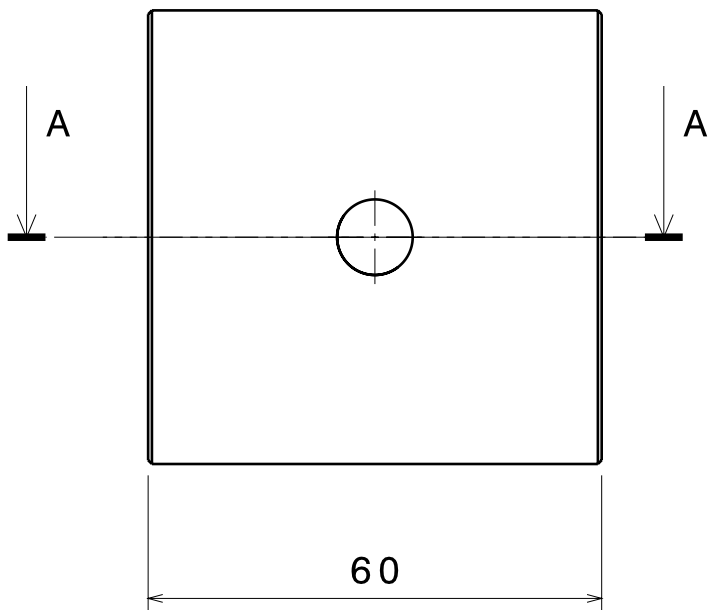
Levy 2  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:1



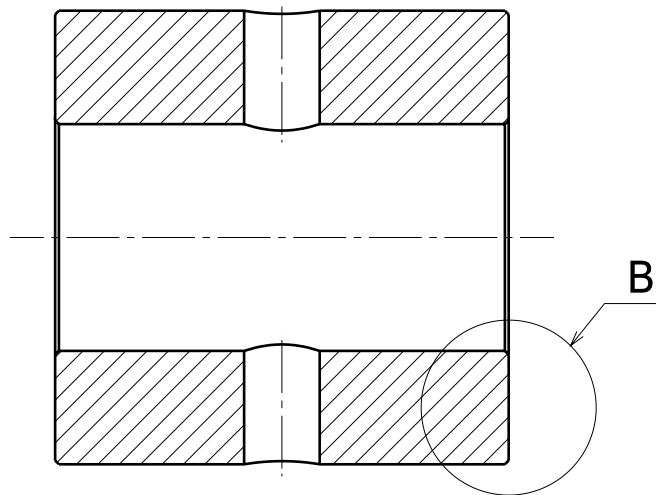
Levy 3  
 Materiaali S355  
 Mittasuhte 1:1



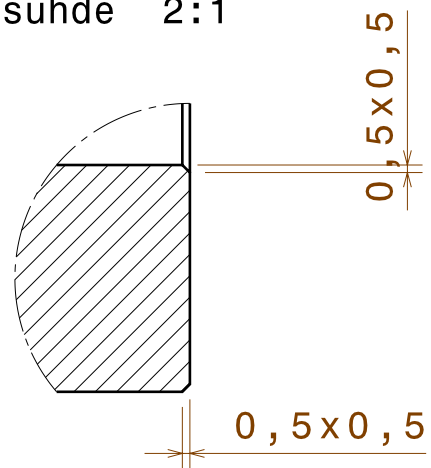
Kokoonpano  
Alavarsi 2  
Mittasuhde 1:4



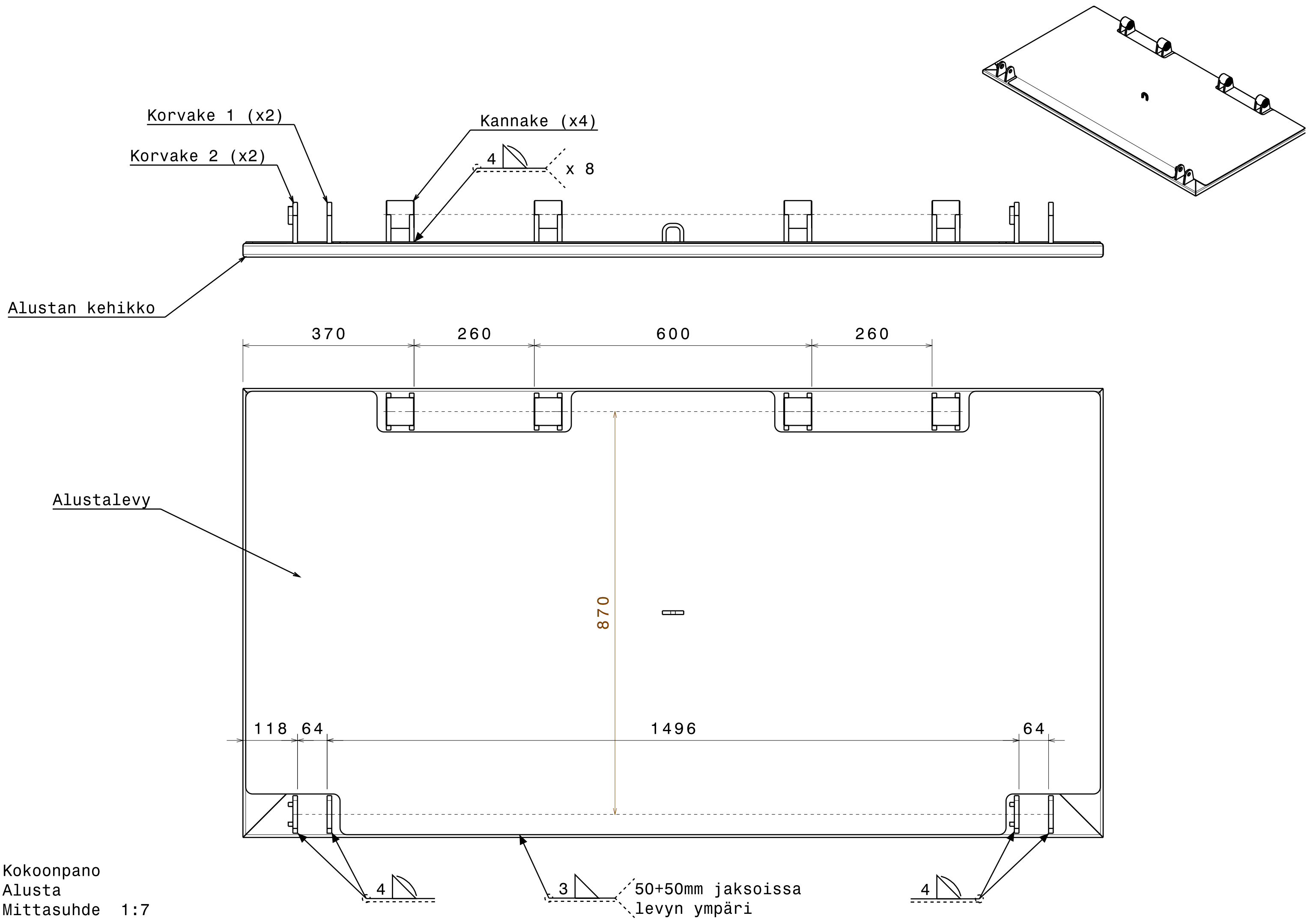
A-A

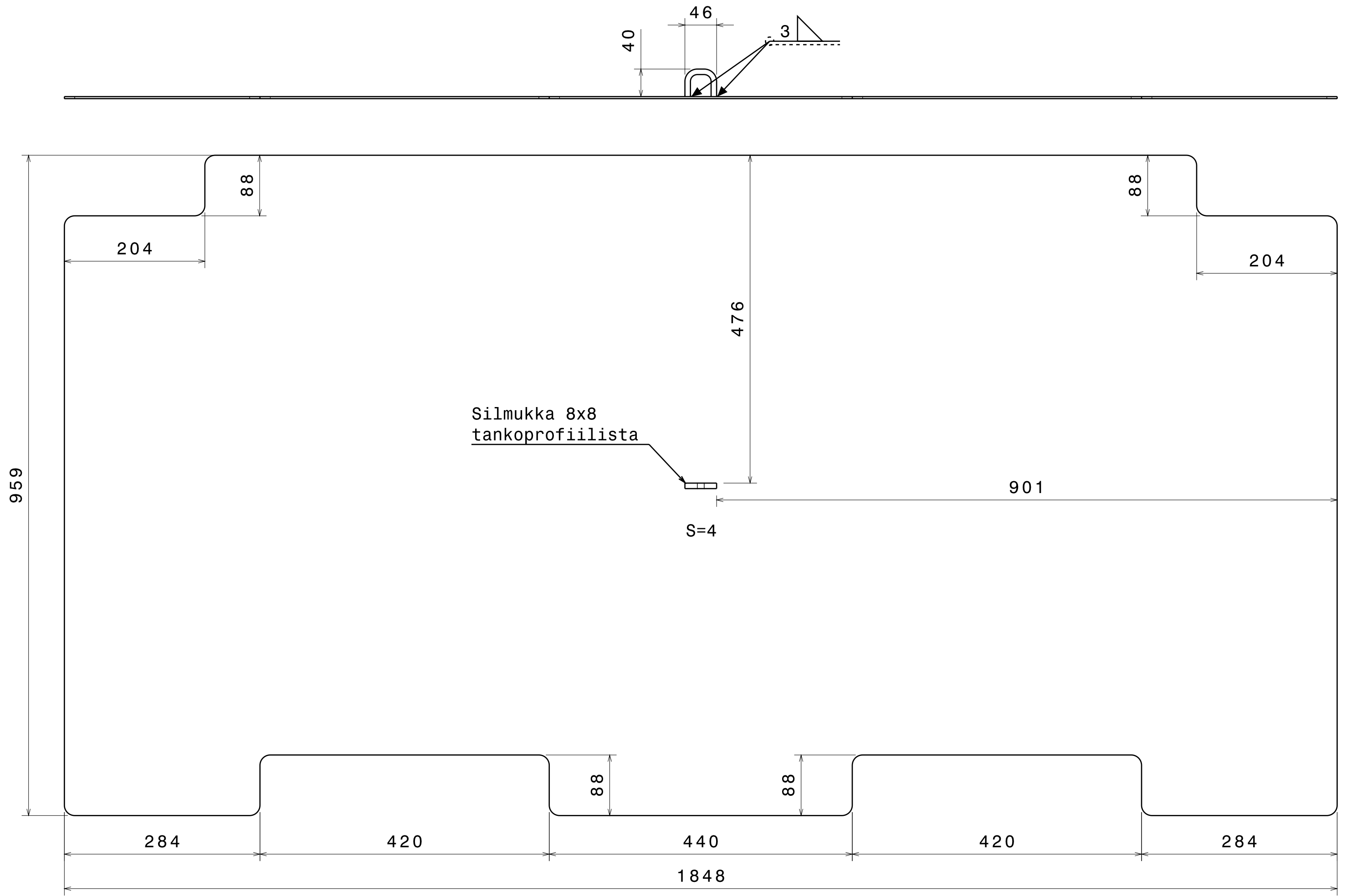


Yksityiskohta B  
Mittasuhte 2:1



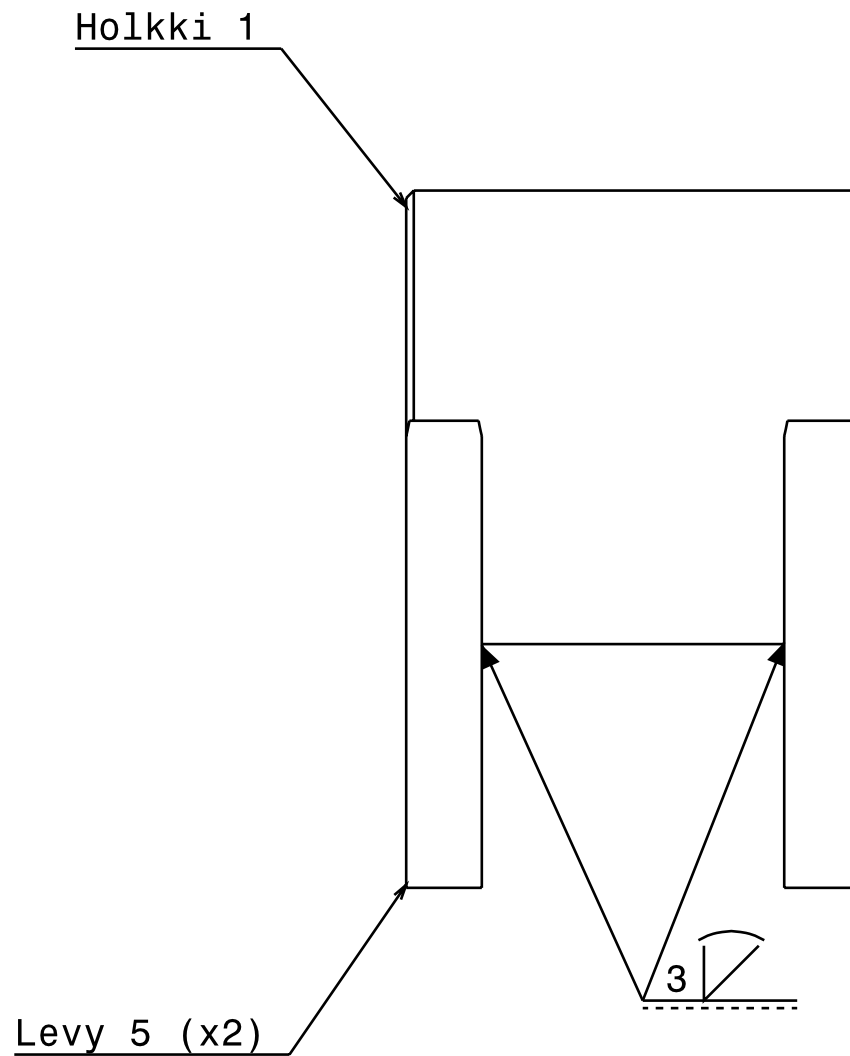
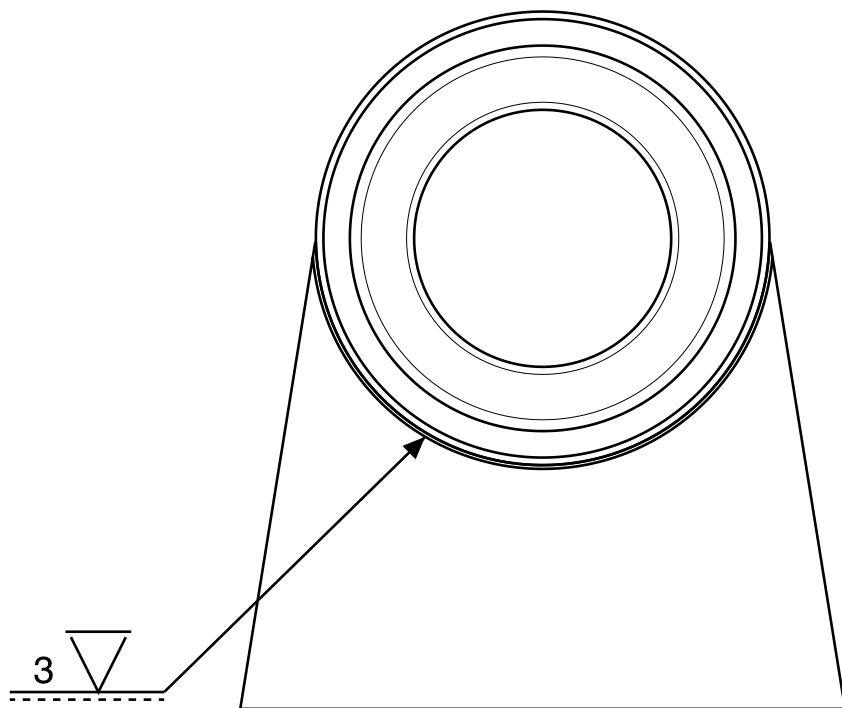
Holkki 2  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:1





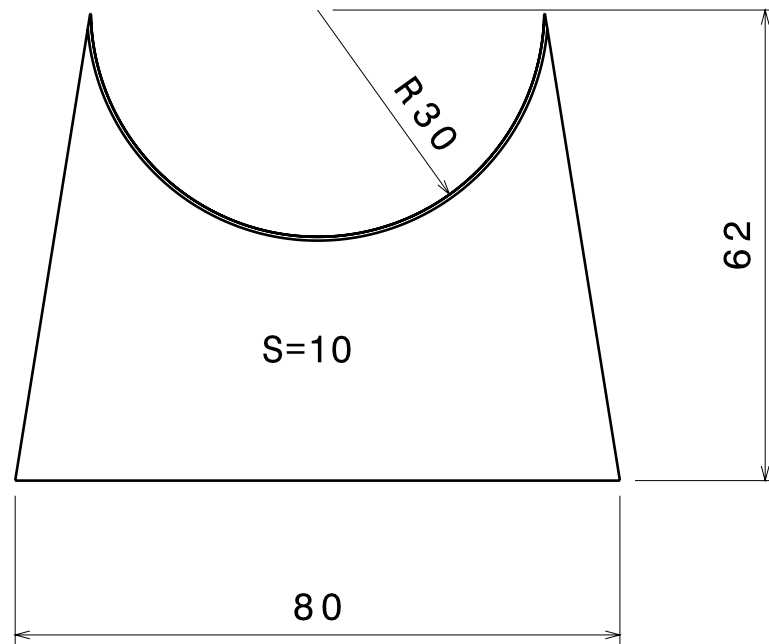
Alustalevy  
 Materiaali S355  
 Mittasuhte 1:5



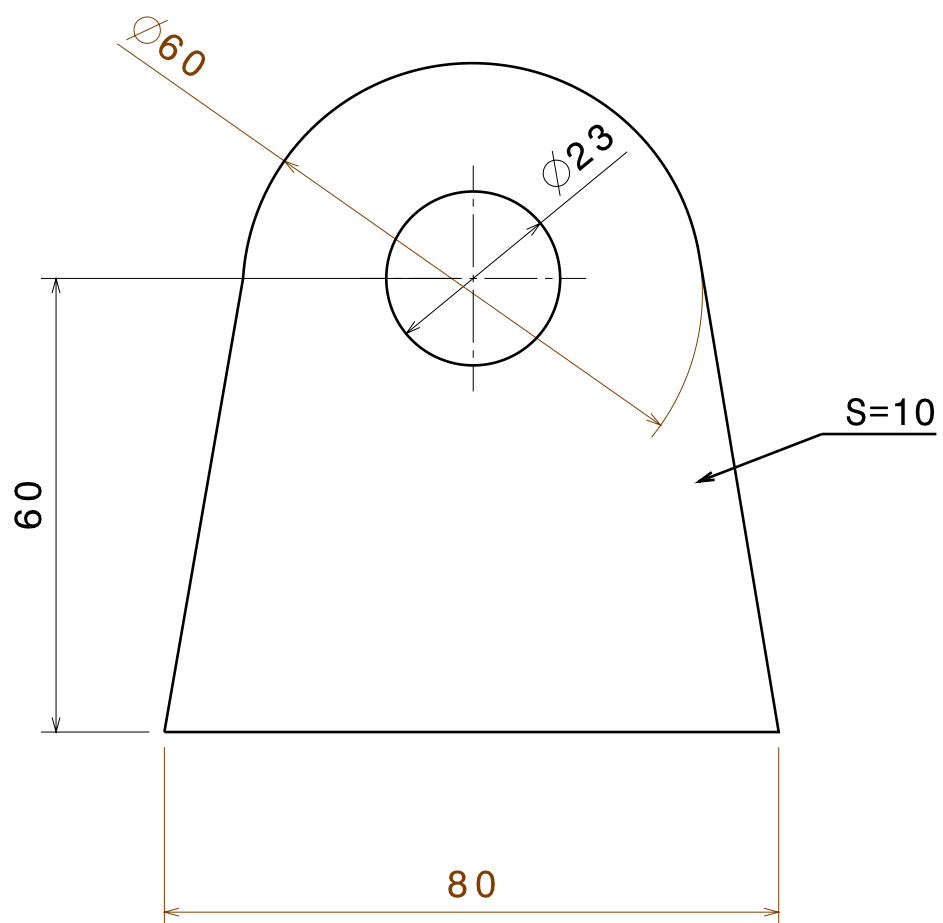


Kokoonpano  
Kannake  
Mittasuhte 1:1

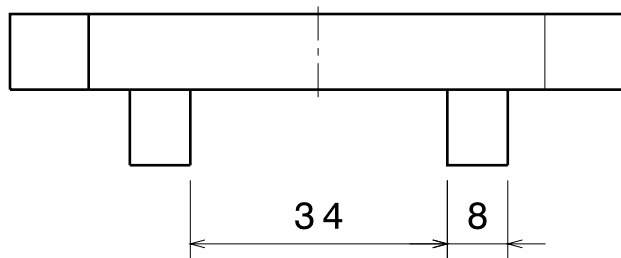
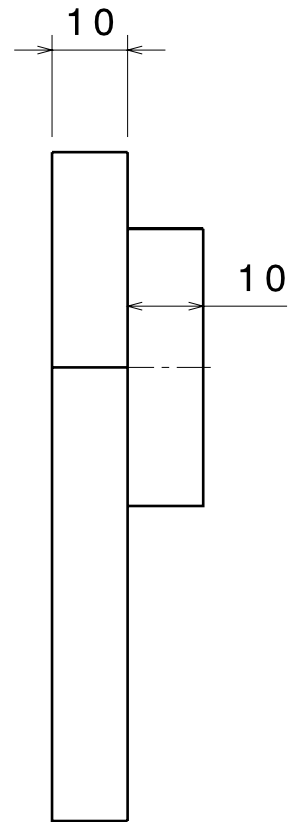
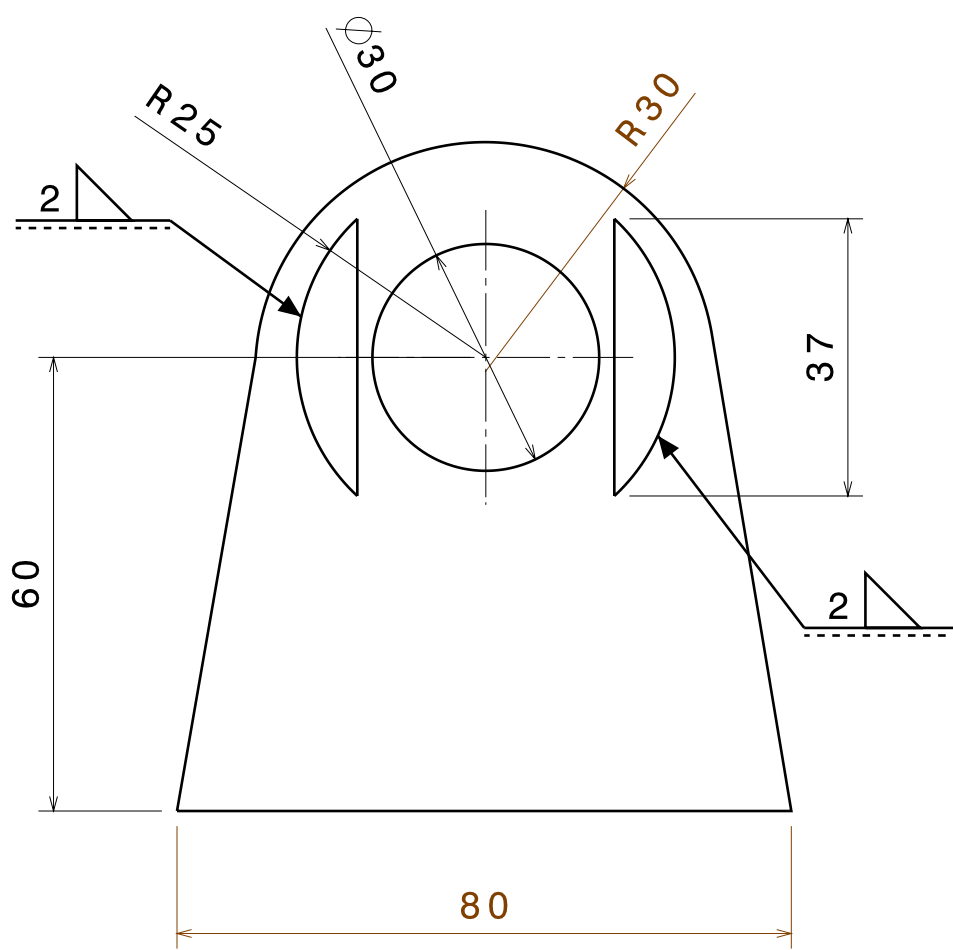
Hiiliteräs-ruostumaton sekahitsi hitsataan  
yliseostetulla lisäaineella AWS 312



Levy 5  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:1



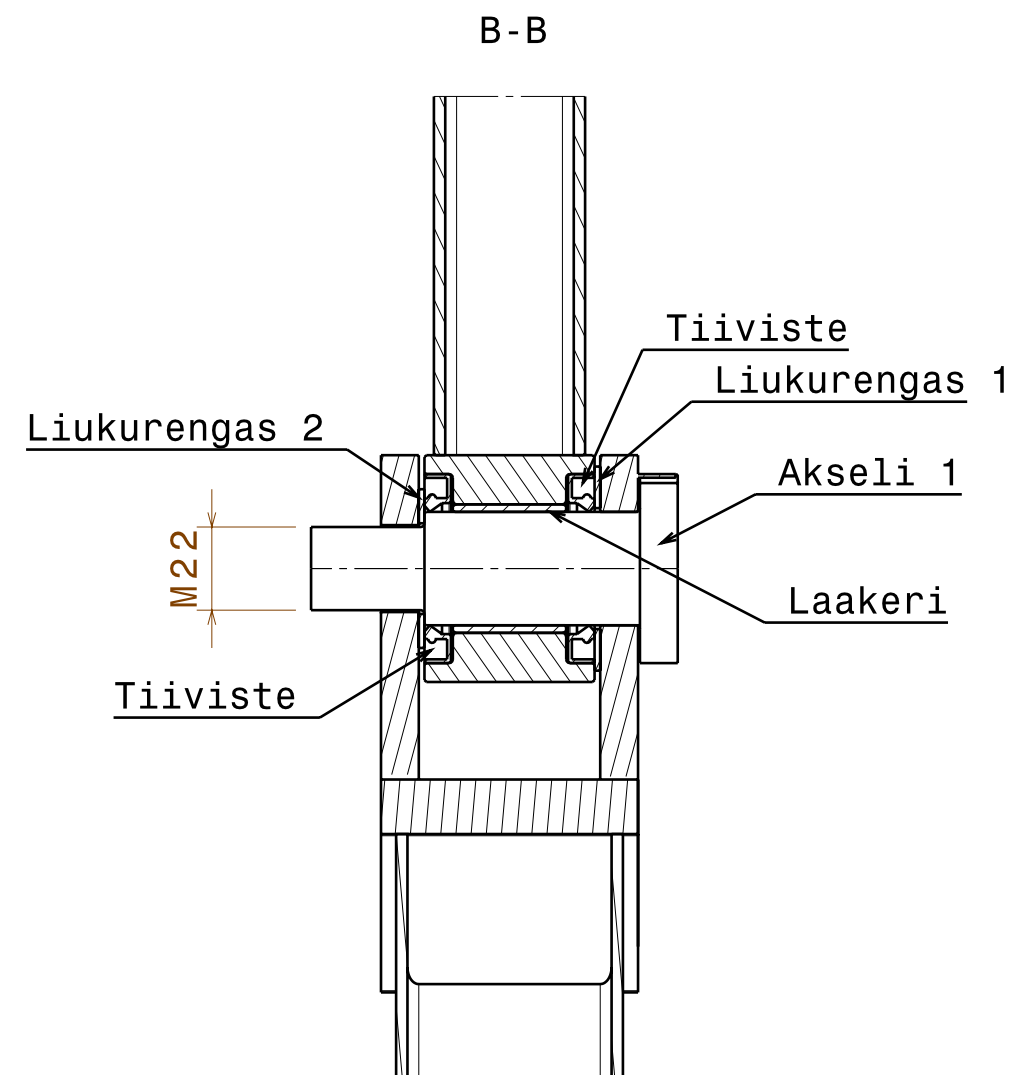
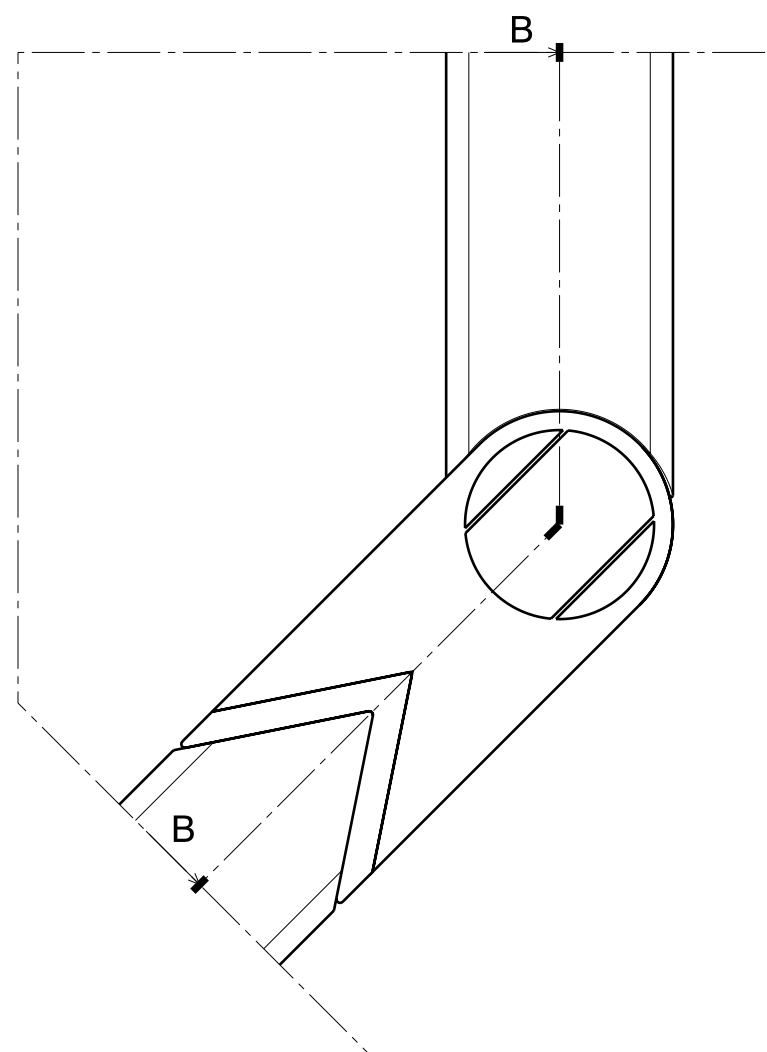
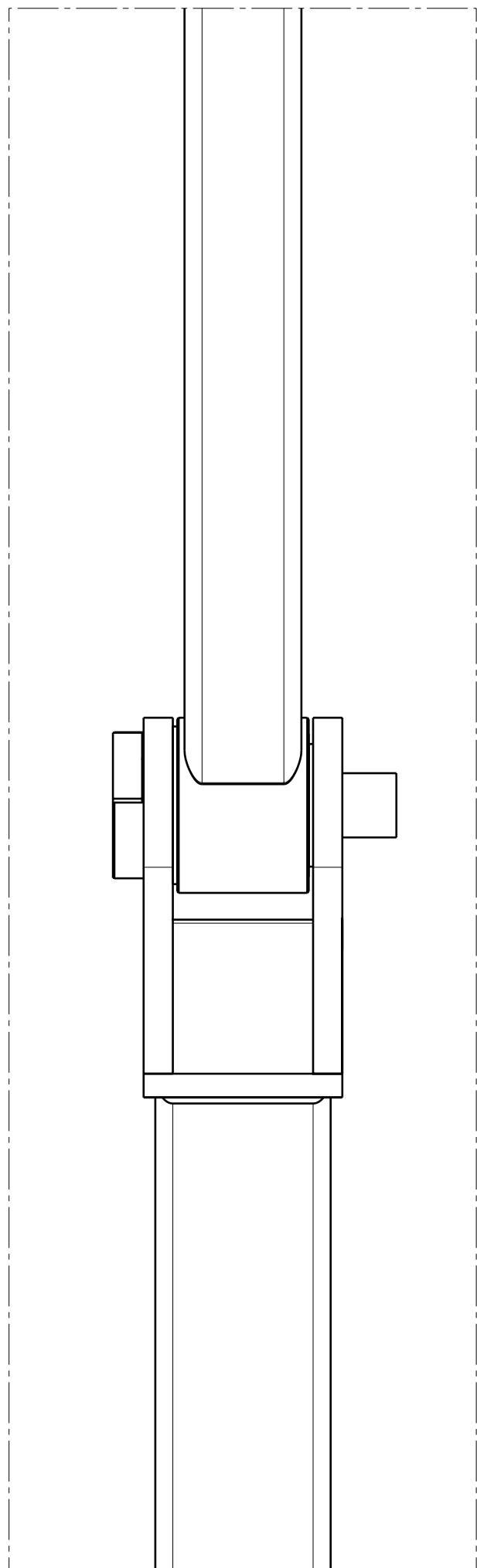
Korvake  
Materiaali S355  
Mittasuhte 1:1



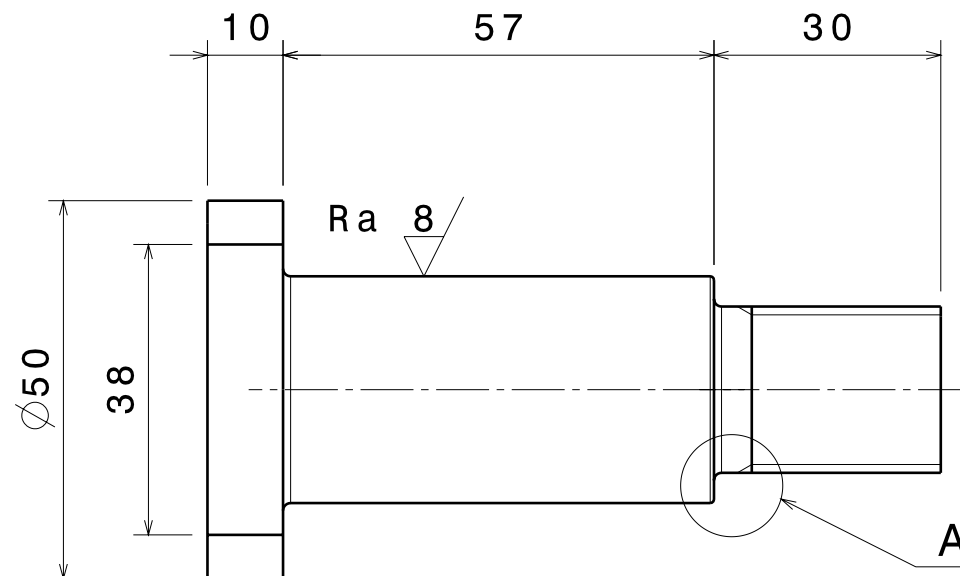
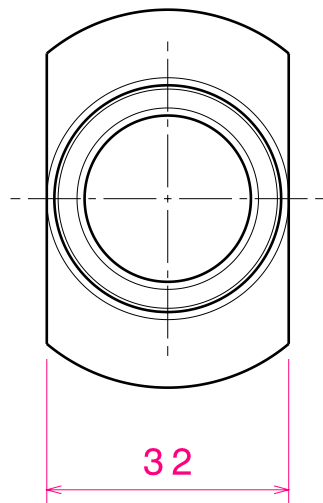
Korvake 2  
 Materiaali S355  
 Mittasuhte 1:1



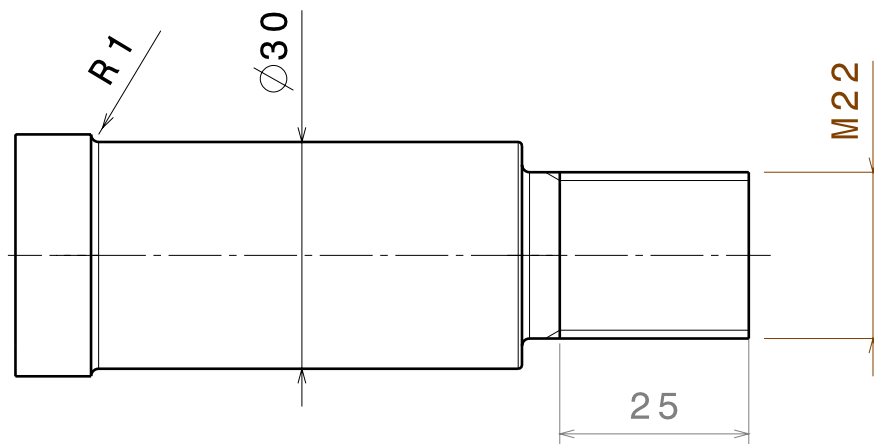
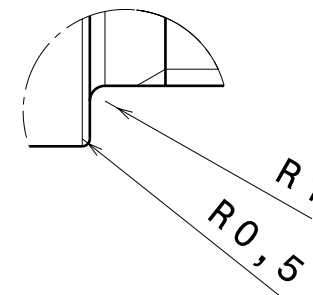
Kokoonpano  
Jalan nivelen laakerointi  
Laakeri Iigus H370  
Liukurengaat Iigus L280  
Tiiviste DIN 3760 A  
Mittasuhde 1:2



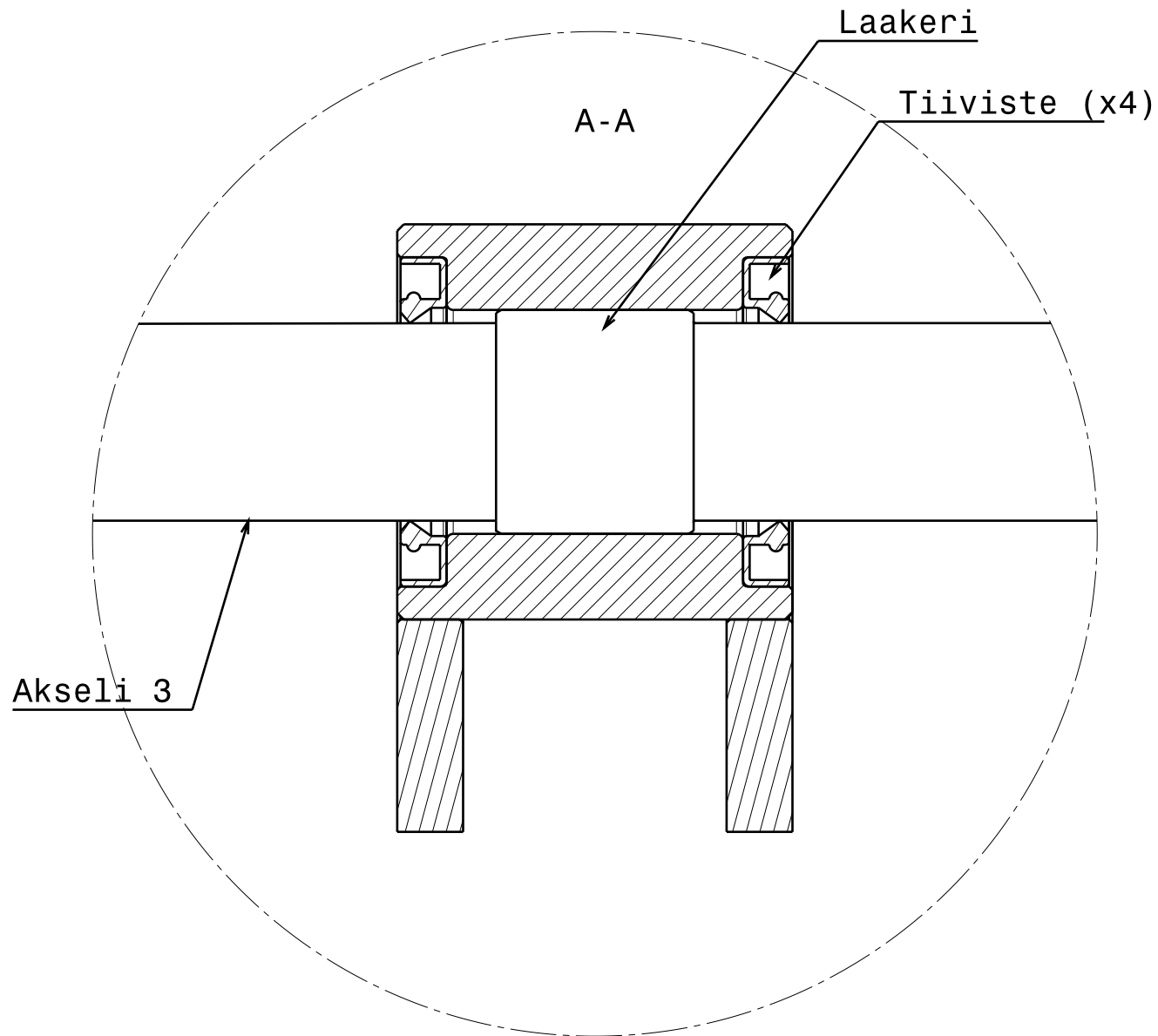
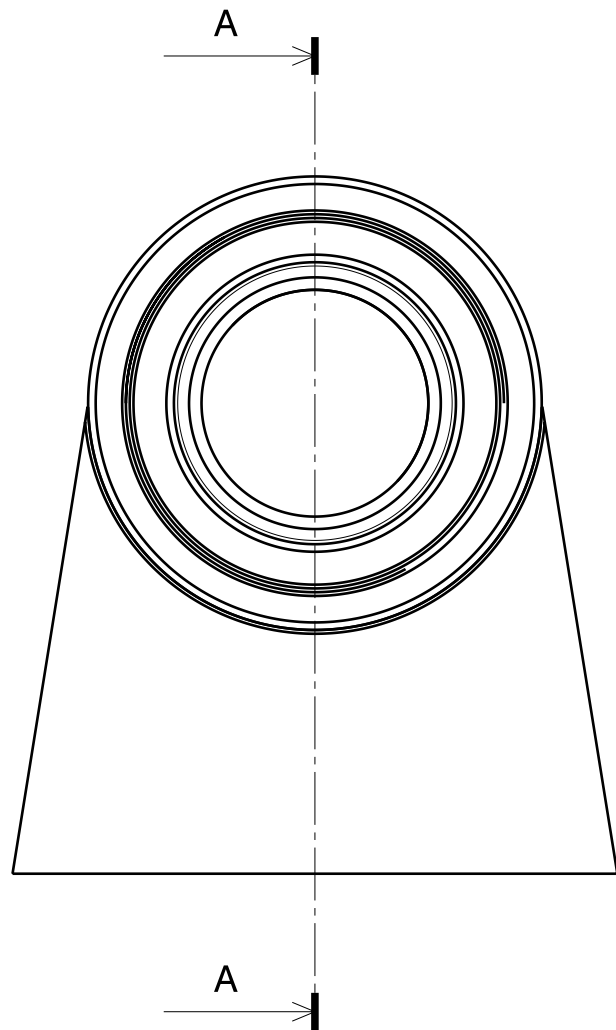
Akseli lukitaan paikalleen M22  
Nylock-mutterilla ja aluslevyllä.



Yksityiskohta A  
Mittasuhte 2:1

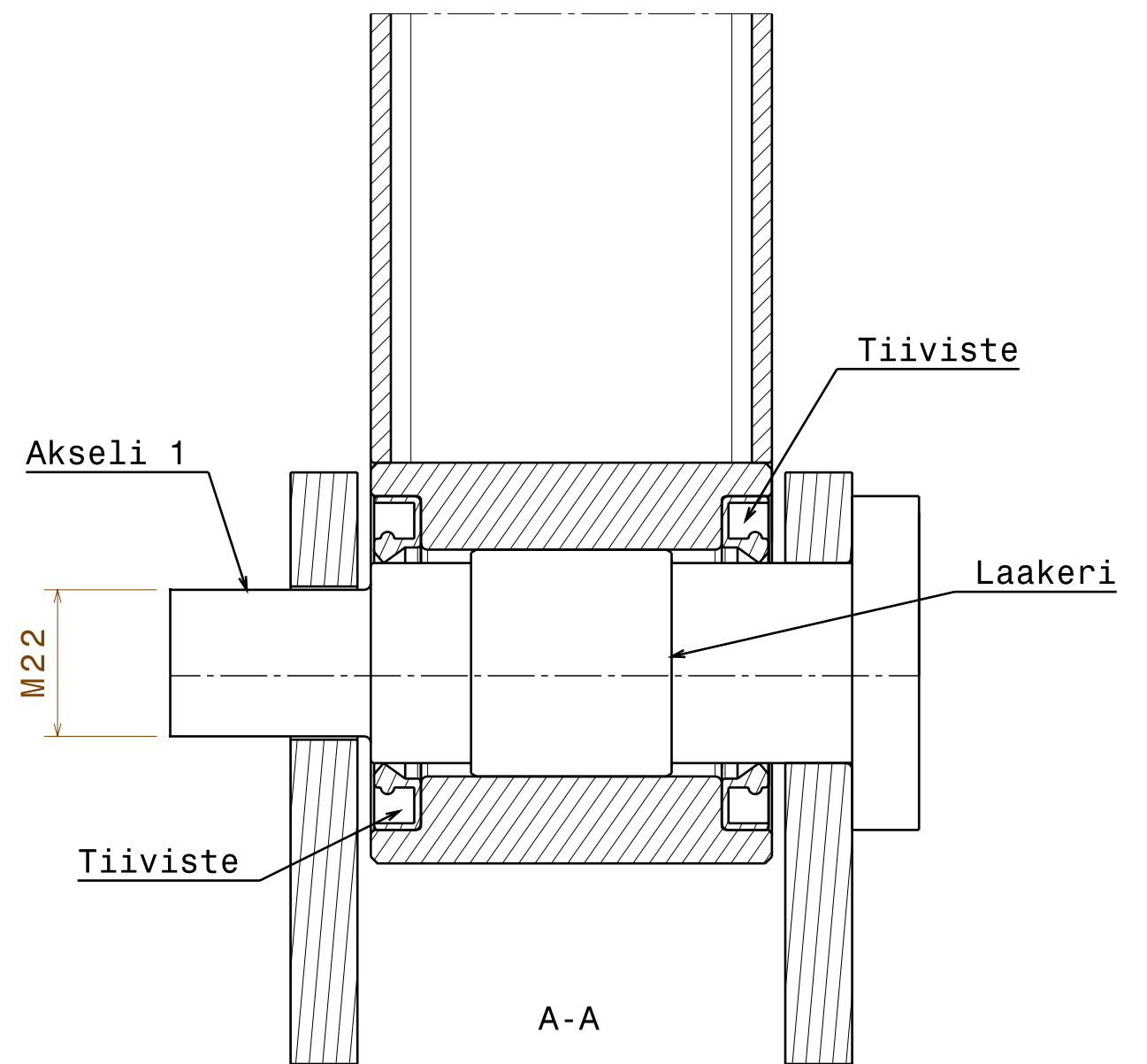
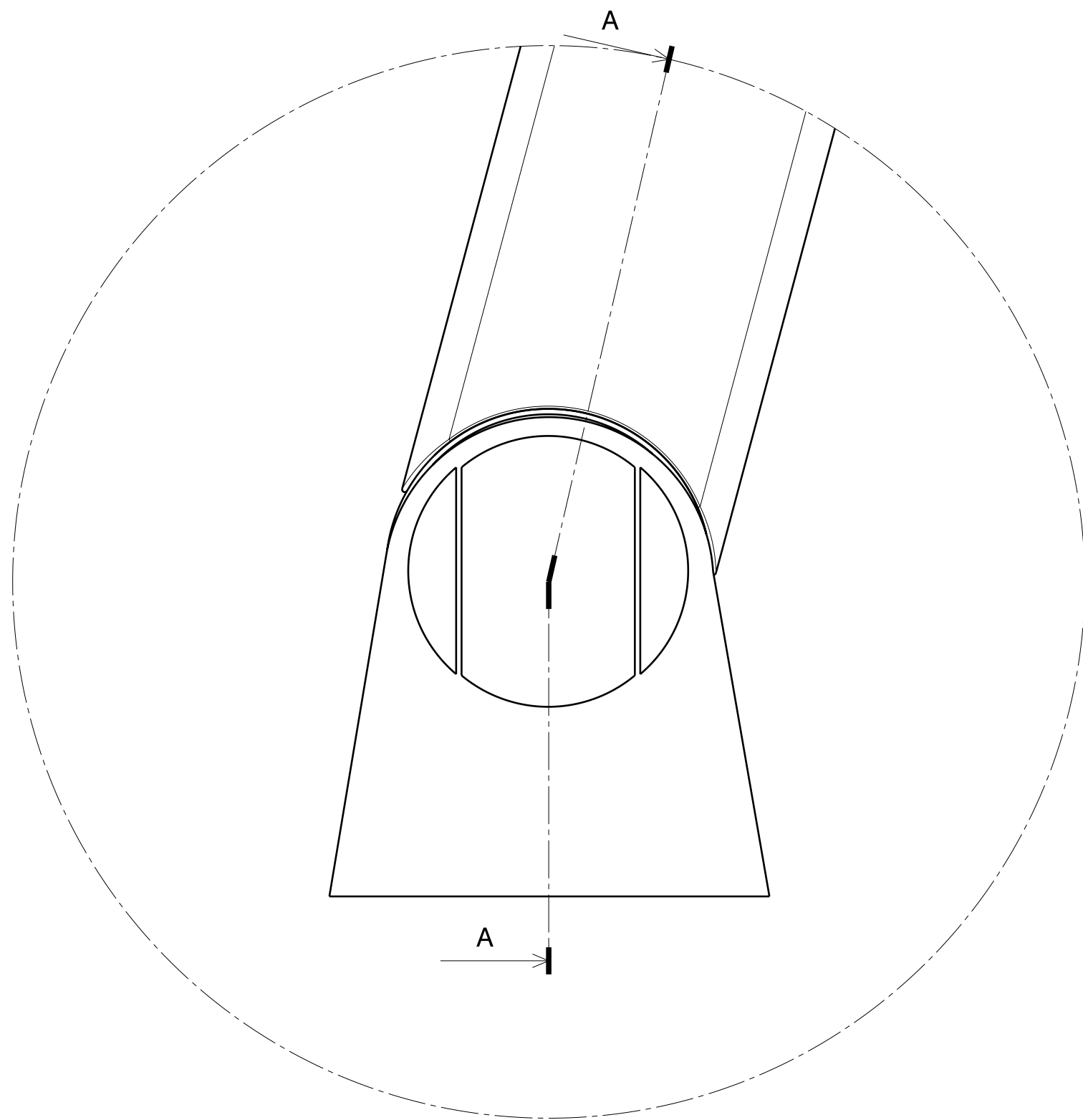


Akseli 1  
Materiaali AISI 303  
Mittasuhte 1:1



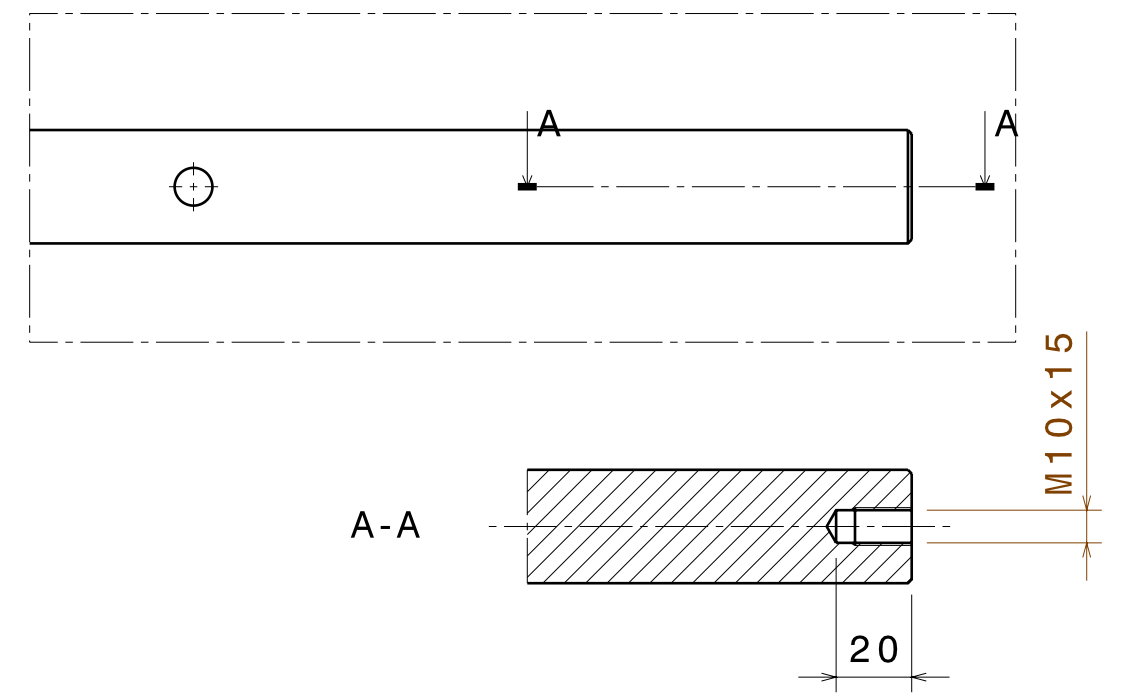
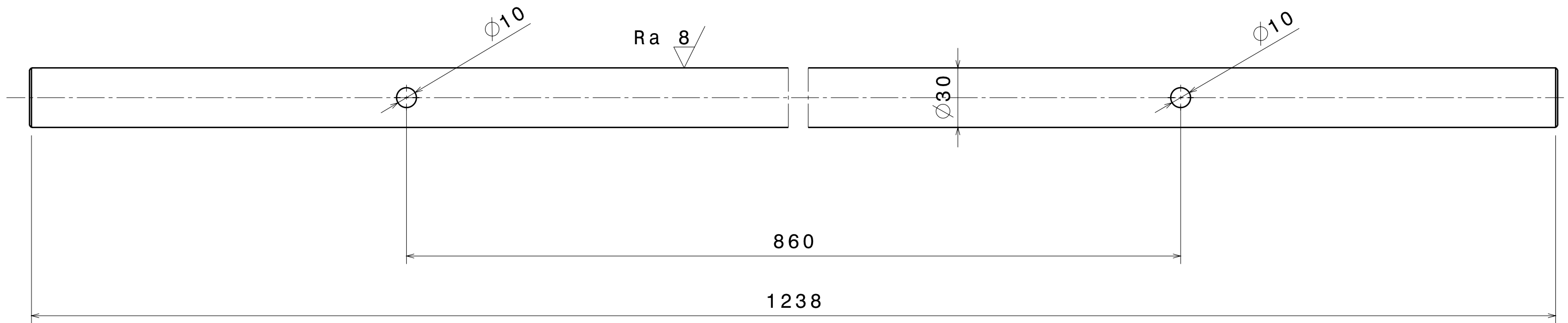
Kokoonpano  
Kannakkeen laakerointi  
Laakeri Igus H370  
Tiiviste DIN 3760A  
Scale: 1:1





Akseli lukitaan paikalleen M22  
Nylock-mutterilla ja aluslevyllä.

Kokoonpano  
Jalan laakerointi alustaan  
Laakeri Igus H370  
Tiiviste DIN 3760A  
Mittasuhte 1:1



Akseli 3  
 Materiaali AISI 303  
 Mittasuhte 1:2

Lukitusruuvien poraus molemmissa päissä akselia