



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Kuressaare kolledž

# **SÕUKRUVI PROJEKTEERIMINE IWR VESIJALGRATTALE**

## **PROPELLER DESIGN FOR IWR WATERBIKE**

LÕPUTÖÖ

Üliõpilane:	Erik Liim
Üliõpilaskood:	182604
Juhendaja:	Mihhail Afanasjev
Kaasjuhendaja:	Mikloš Lakatoš

Kuressaare 2023

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 20.....

Autor: Erik Liim

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: Mihhail Afanasjev

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees abiprofessor tenuuris Mihkel Kõrgesaar

/ allkirjastatud digitaalselt /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Erik Liim

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose, sõukruvi projekteerimine IWR vesijalgrattale, mille juhendajaks on Mihhail Afanasjev ja kaasjuhendajaks Mikloš Lakatoš.
    - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
    - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
  2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
  3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
- 

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## TalTech Inseneriteaduskond

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Erik Liim, 182604SDSR  
**Õppekava:** SDSR10/17 - Meretehnika ja väikelaevaehitus  
**Juhendaja:** Mihhail Afanasjev, programmijuht, +372 5836 2401  
**Kaasjuhendaja:** Mikloš Lakatoš, insener, +372 5385 0727

**Lõputöö teema: Sõukruvi projekteerimine IWR vesijalgrattale  
Propeller design for IWR waterbike**

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida konkreetse vesijalgratta jaoks kõige sobivamad sõukruvid.
2. Leida sobivaim moodus sõukruvide valmistamiseks.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmed ja taustauuring (Wageningen, Van Oossanen, polünoomid, parendid, PropCalc)	2.12.2022
2.	Takistuse leidmine (Holtrop – Mennen, PropCalc)	23.12.2022
3.	Väljundvõimsuse leidmine	13.01.2023
4.	Kõige efektiivsemate sõukruvide leidmine (PropCalc)	6.06.2023
5.	Sõukruvi disain (3D mudel)	15.09.2023
6.	Sõukruvi valmistamise võimalused	8.11.2023

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 04. detsember 2023. a

**Üliõpilane:** Erik Liim ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Mihhail Afanasjev ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** Mikloš Lakatoš ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Konsultant:** Mare Ansperi ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** Mihhail Afanasjev ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA.....	6
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
1.1 IWR võistlus.....	8
2. SOBIVA SÕUKRUVI LEIDMINE.....	10
2.1 Vesijalgratta kere takistus.....	10
2.2 Väljundvõimsus.....	12
2.3 Wageningen B-seeria sõukruvid.....	14
2.4 Sõukruvi efektiivsus.....	15
3. SÕUKRUVI DISAIN.....	18
4. SÕUKRUVI VALMISTAMINE.....	20
KOKKUVÕTE.....	22
SUMMARY.....	23
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	24
LISAD.....	25
Lisa A.....	25
Lisa B.....	29
Lisa C.....	31

## EESSÕNA

2021. aastal tutvustas TalTech Kuressaare kolledži õppejõud Mikloš Lakatoš tudengitele ideed osaleda IWR (*International Waterbike Regatta*) võistlustel enda ehitatud vesijalgrattaga. Sellest alates on disainitud mõned vesialgratta kered, kirjutatud mõned lõputööd antud teemal, reaalse ehitamiseni ei ole veel jõutud.

Käesoleva töö eesmärgiks oli leida kõige efektiivsemad sõukruvid ning uurida nende valmistamise võimalusi, lähtudes TalTech Kuressaare kolledži tudeng Priit Suluste poolt IWR võistluse jaoks projekteeritud vesijalgratta kerest ja sinna sobituvast jõuülekandest, mille oli projekteerinud sama kooli tudeng Alex Vainokivi.

Antud töö juhendajaks olid Mihhail Afanasjev ja kaasjuhendajaks Mikloš Lakatoš, aitäh mõlemale kannatlikkuse ja abi eest.

Võtmesõnad:

- Vesijalgratas
- Sõukruvi
- Takistus
- Tõukejõud
- Efektiivsus

## Lühendite ja tähiste loetelu

- B – laeva laius (ingl *molded breadth of ship*)
- CB – täidlustegur (ingl *block coefficient*)
- CFD - arvutuslik vedeliku dünaamika (ingl *computational fluid dynamics*)
- CM – ristlõike mooduli tegur (ingl *section modulus coefficient*)
- CP – prismategur (ingl *prismatic coefficient*)
- CWP – veepeegli pindala (ingl *waterplane coefficient*)
- D – laeva süvis (ingl *draught*)
- DISV – veeväljasurve (ingl *displacement*)
- ETAO ( $\eta_o$ ) – sõukruvi kasutegur vabas vees (ingl *propeller efficiency in open water*)
- FN – Froude'i number  $(V/(g*L)^{1/2})$
- J – edasiliikumise suhe (ingl *advance ratio*)
- KQ – pöördemomendi koefitsient (ingl *torque coefficient*)
- KT – tõukejõu koefitsient (ingl *thrust coefficient*)
- LCB – laeva pikisuunaline raskuskese (ingl *longitudinal centre of buoyancy*)
- LPP – laeva loodidevaheline pikkus (ingl *length of ship between perpendiculars*)
- LWL – veeliini pikkus (ingl *length waterline*)
- Q – sõukruvi pöördemoment (ingl *torque*)
- RT – kogu takistus (ingl *total resistance*)
- T – sõukruvi tõukejõud (ingl *propeller thrust*)[N]
- TA – laeva süvis ahtri loodi kohal (ingl *draft aft*)
- TF – laeva süvis vööri loodi kohal (ingl *draft forward*)
- VS – laeva kiirus (ingl *speed of a ship*)

# 1. SISSEJUHATUS

Sobiva sõukruvi leidmiseks on mitmeid erinevaid meetodeid. Alates 20. sajandist on teostatud hulganisti mudelkatseid erinevate sõukruvide ja laeva keredega. Saadud andmeid on analüüsitud, võrreldud sõukruvi efektiivsuse avavee tulemusi laeva all asuva sõukruvi tulemustega ning kogutud andmeid on põhjalikult analüüsitud ja sealt on tuletatud valemid, polünoomid ja nende parendid, mis võimaldavad aluse kere mõõtudest tuletada kere takistuse ja leida sobivate mõõtudega optimaalsed sõukruvid, mis kasutada oleva võimsusega tagaksid maksimaalse tõukejõu ja antud juhul suurima vesijalgratta kiiruse erinevatel IWR võistluse distantsidel.

Esmalt leiti vesijalgratta kere takistus analüütiliselt, kasutades *Holtrop-Mennen* [1] meetodit, mis on leidnud laialdast kasutust laeva disaini esmastes faasides. Seejärel tehti eeldus kahe meeskonnaliikme poolt toodetava võimsuse osas, kasutades jalgrattasporadis kogutud andmeid ja kolmandaks leiti kõige efektiivsemad *Wageningen B-seeria* [2] sõukruvid varasematest tulemustest ja eeldustest lähtuvalt. Viimasena loodi sõelale jäänud sõukruvidest 3D mudelid ning uuriti nende valmistamise võimalusi.

## 1.1 IWR võistlus

IWR nimelist võistlust korraldatakse alates aastast 1980 ja see on toimunud erinevates Euroopa linnades. Algselt osalesid võistlustel vaid Saksamaa ülikoolid, alates 1988. aastast on regatt muutunud rahvusvaheliseks.

Võistlustel on kokku on seitse distsipliini:

- sprint 100 m,
- slaalom 100 m,
- kiirendus 10 m,
- edasi - peatus – ahter ees tagasi 50 m,
- pika distantsi võistlus (1 tund või 10 km),
- pollari tõmme, mõõdetakse vesiratta keskmine tõmbejõudu 30 sekundi jooksul,
- üllatusvõistlus, mis ei lähe punktiarvestusse v.a. juhul kui kahel võistkonnal on võrdne arv punkte.

IWR võistlus toob igal aastal kokku paarsada üliõpilast Euroopa tehnikaülikoolidest, olles sellega suurepäraseks platvormiks teadmiste, kogemuste ja oskuste vahetamiseks ning arendamiseks. Tänapäevased vesirattad on kergetest ja vastupidavatest materjalidest ning saavutavad üle 10-e sõlme kiiruse. Vesijalgratas on omamoodi paat, kanuu,



katamaraan, trimaraan või midagi viiendat, mille jõuallikaks on kahe võistleja jalgade jõud. IWR reeglite kohaselt peavad vesijalgrattad olema projekteeritud, valmistatud ja juhitud õpilaste endi poolt. Välimuse kohta puuduvad konkreetseid reegleid ehk lahendused sõltuvad meeskonna kujutlusvõimest, teadmistest ja võimekusest.

IWR reeglid on järgmised:

- pardale on lubatud maksimaalselt kaks inimest;
- vesiratta maksimaalne pikkus on 6 meetrit;
- laius peab alati olema pikkusest väiksem;
- maksimaalne süvis on 1,5 meetrit;
- salvestatud energiat nagu patareid, vedrud, hoorattad jne. ei ole lubatud;
- vesijalgratta osasid on lubatud regati jooksul vahetada, näiteks sõukruvi.

2023 aasta võistluse koduleht: <https://www.iwr2023.de/>

## 2. SOBIVA SÕUKRUVI LEIDMINE

Üheks põhiliseks andmete analüüsimise töövahendiks oli õppejõud Mikloš Lakatoš poolt varem loodud Excel programmi põhine töövahend PropCalc (Lisa C) mis võimaldas muu hulgas arvutada kere takistust *Holtrop-Mennen* meetodil ja leida Wageningen B-seeria (*L.Troost, 1938, 1940, 1951*) sõukruvide tõukejõudu ja efektiivsust ning seeläbi leida sobivate mõõtudega sõukruvid antud vesijalgrattale.

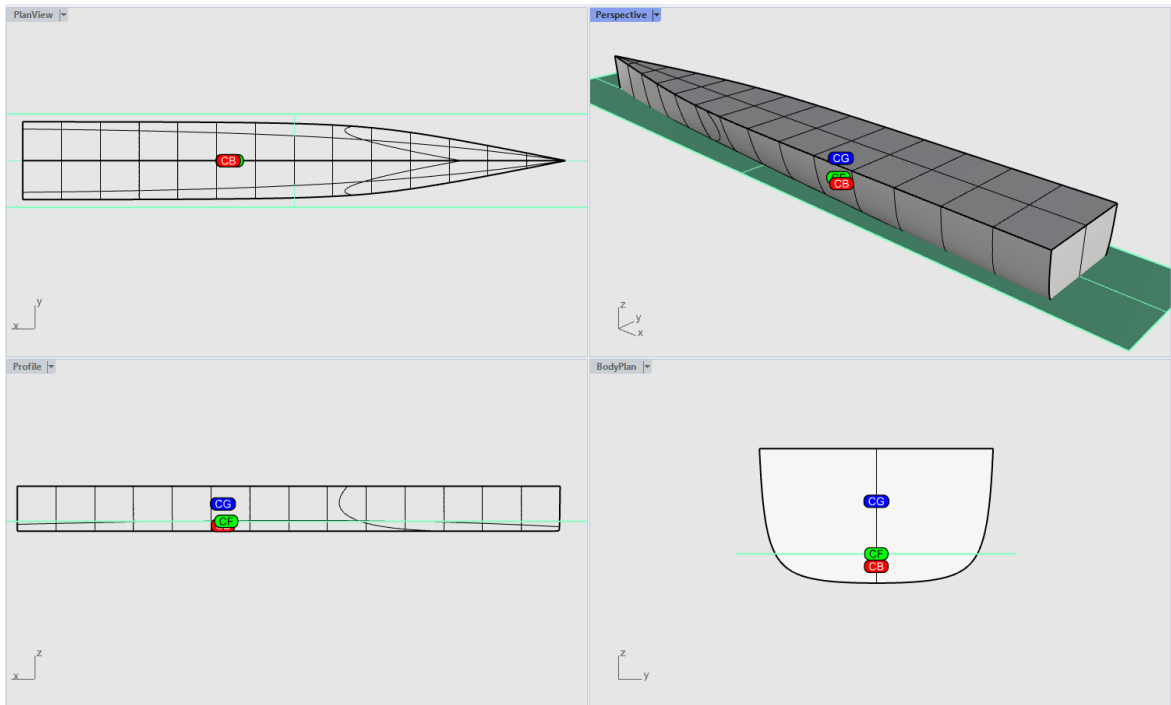
*Holtrop-Mennen* takistuse arvutamise meetod on praktiline ja laialdaselt kasutatav laevade disaini esialgses faasis. Valem  $RT = RF(1 + k_1) + RAPP + RW + RB + RTR + RA$  ehk kogutakistus (RT) võrdub hõõrdetakistus (RF) + lisade takistus (RAPP) näiteks roolilehe ja võllide kinnitused + laine takistus (RW) + vööripirni takistus (RB) + ahtri peegli veealuse osa takistus (RTR) + mudel-laeva korrelatsiooni takistus (AR) nagu kere karedus ja õhutakistus.

See võimaldab anda suhteliselt kiire hinnangu laeva kere takistusele projekteerimise varases staadiumis. Üksikasjalike ja väga täpsete analüüside jaoks tuleks kasutada täiendavaid meetodeid, nagu arvutuslik vedeliku dünaamika (CFD) või mudelkatsetused.

### 2.1 Vesijalgratta kere takistus

Vesijalgratta kere takistuse arvutamise aluseks võeti tudeng Priit Suluste poolt Rhino 3D programmis modelleeritud IWR vesijalgratta kere mille põhiaandmed on välja toodud Tabel 1). Takistuse arvutamiseks kasutati Excel'i põhise programmi PropCalc, mis muuhulgas võimaldab arvutada eelpool mainitud *Holtrop-Mennen* meetodil [1] kere takistust (RT) erinevatel kiirustel (VS), antud juhul 1-10 sõlme, sest 10 sõlme on see kiirus mis on vaja varem või hiljem võistlustel osaleval vesijalgrattal saavutada.

Konkreetse kere takistust oli varasemalt analüüsitud kiirustel 4, 5 ja 7 sõlme, kasutades arvutusliku vedeliku dünaamika (CFD) simulatsiooniprogrammi Simcenter Star CCM+ mis andis alust arvata, Tabel 2. Takistus *Holtrop vs CFD*, kiirustel 1-10 sõlme. et *Holtrop-Mennen* meetodi kasutamine antud juhul õigustas ennast, sest CFD programmi kasutamise oskus lõputöö kirjutajal puudus.



Joonis 1. Vesijalgratta kere (kuvatõmmis Rhino 3D programmist).

Tabel 1. Vesijalgratta kere põhiandmed.

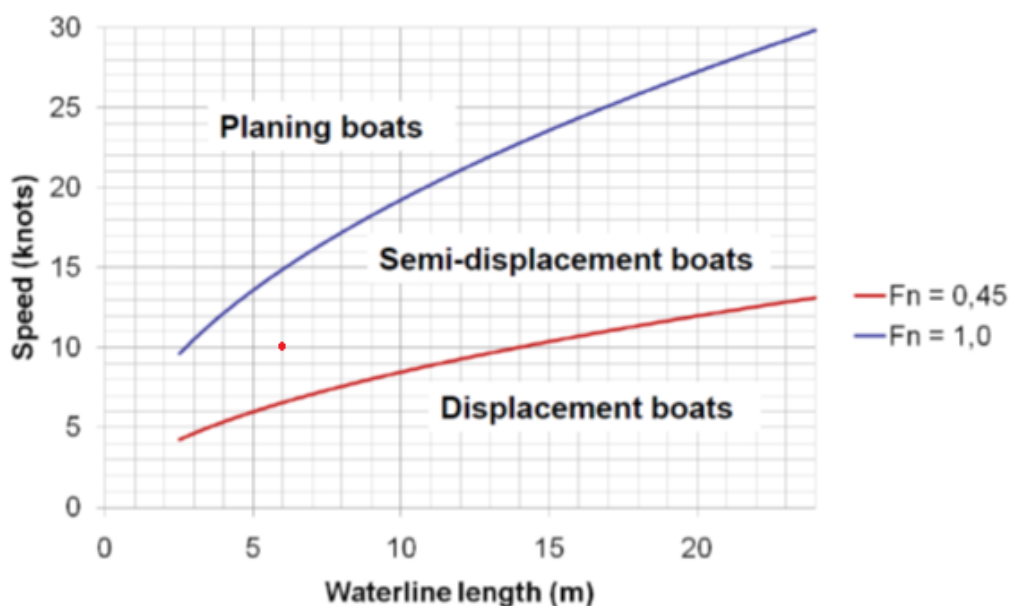
<i>Karakteristik</i>	<i>lühend</i>	<i>väärtus</i>	<i>mõõtühik</i>
Veeliini pikkus	LWL	5,97	[m]
Perpendikulaaride vaheline pikkus	LPP	5,97	[m]
Laius	B	0,86	[m]
Süvis	T	0,11	[m]
Ujuvuskese pikisuunas (keskkaare suhtes)	LCB	-12,10	[%]
Mahtveeväljasurve	DISV	0,24	[m <sup>3</sup> ]
Keskkaare täidlustegur	CM	0,75	[-]
Veeliini pindala täidlustegur	CWP	0,66	[-]
Täidlustegur	CB	0,43	[-]
Pikisuunalise ristlõike täidlustegur	CPL	0,58	[-]
Kere karedus	ks	1,50E-04	[m]
Ahtripeegli märgpindala	AT	0,065	[m <sup>2</sup> ]
Märgpindala	SW	3,453	[m <sup>2</sup> ]

Tabel 2. Takistus Holtrop vs CFD, kiirustel 1-10 sõlme.

VS	RT_Holtrop	RT_CFD	erinevus
kn	N	N	%
1	2,0		
2	7,4		
3	16,3		
4	30,2	23,2	30%
5	50,4	36,2	39%
6	79,8		
7	108,3	105	3%
8	138,1		
9	169,2		
10	202,7		

Froude'i numbrist  $FN = \frac{VS}{\sqrt{g \cdot LWL}} = 0,74$  võis järeldada, et tegemist on pool-glisseeriva

(ingl *semi displacement*) kerega ehk ka parima tahtmise juures ei tõuse see kere veest välja, kui just ei võeta kasutusele veeluseid tiibasid ehk foil'e.



Joonis 2. Froude'i numbri vahemikud.

## 2.2 Väljundvõimsus

Antud vesijalgratast viivad edasi kaks meeskonnaliiget kes väntavad pedaale ja väntajate asend on istuv ehk pedaalide/veohammasrataste tsenter on väntajate puusadest kõrgemal (ingl *recumbent cycle*). Hinnangu andmiseks väljundvõimsusele

lähtuti spordikellade ja -mõõteriistade tootja Polar FTP (*Functional Threshold Power*) testidega kogutud andmetest, tabel (3).

Tabel 3. Kehakaalu ja võimsuse suhtarvud [3]

Klass	FTP (W/kg)	
	Mehed	Naised
World-class	>5,69	>5,03
Exceptional	5,69-5,15	5,03-4,54
Excellent	5,14-4,62	4,53-4,05
Very Good	4,61-4,09	4,04-3,55
Good	4,08-3,47	4,03-2,98
Moderate	3,46-2,93	2,97-2,49
Fair	2,92-2,40	2,48-1,99
Untrained	<2,40	<1,99

Lähtutud sai eeldusest, et kumbki võistleja kaalub 85 kg ja kummagi võistleja FTP on 4,0 W/kg ehk tasemel hea (ingl *good*). Kuna IWR võistluse distantside pikkused ja kestvused on erinevad, siis sai lähtutud Hunter ja Coggan'i treening/võistlus tsoonidest Tabel 4).

Tabel 4. Treeningtsoonid [4]

Zone	Name	% of FTP	RPE	Description
1	Active Recovery	<55	<2	Easy spinning; active recovery
2	Aerobic Endurance	56-75	2-3	LSD. Age group athlete IM effort, 90 min – 2 hr
3	Tempo	76-90	4-5	Brisk group ride; elite IM, age group half-IM; 20-60 min steady
4	Lactate Threshold	91-105	6-7	Includes FTP. Time trial or Oly tri effort. Int train 6-20 min, ¼ recovery.
5 (5a)	VO2 Max	106-120	7-8	Bike race surge. Int train 2-6 min.
6 (5b)	Anaerobic Capacity	121-150	>8	Crit "bursts"; train 30" – 2 min; effort very high
7 (5c)	Sprint Power	>150	10	Short, very high intensity sprints

Selle info põhjal sai tehtud eeldus, et kahe väntaja väljundvõimsus kokku 1 h distantsil on 612 W, 100 m distantsil 816 W ja sprindi ja kiirenduse distantsil 1020 W. Kõige optimaalsemaks kadentsiks ehk väntamissageduseks loetakse 80-100 pöört minutis (RPM) [5]. Jõuülekanne oli varasemalt projekteeritud 1:5 ülekandega ja samuti arvestusega, et keskmiselt vändatakse 90 pöört minutis ehk sõukruvi völl pöörleb eeldatavasti keskmiselt kiirusega 450 pöört minutis.

Tabel 5. Eeldatav vesijalgratta väljundvõimsus

<i>IWR distsipliin</i>	<i>FTP</i>	<i>väärtus</i>
pikk distants (1 h või 10 km)	Tempo x 2	612 W
pollari tõmme (30 s)	Anaeroobne maht x 2	816 W
sprint 100 m (ca 20 s) ja kiirendus 10 m	Sprint x 2	1020 W

## 2.3 Wageningen B-seeria sõukruvid

Wageningen B-seeria sõukruvid töötati välja ja testiti 20. sajandi keskel *Netherlands Ship Model Basin* nimelises asutuses, tänase nimega MARIN. Analüüsiti 120-e sõukruvi avavee karakteristikuid ja teostati regressiooni analüüs, kus sõltumatu muutuja  $x$  ning sõltuva muutuja  $y$  seos avaldatakse, kui kaalutud summa  $x$  üheliikmelistest polünoomidest. Tuletatud polünoomid väljendavad tõukejõu ( $K_T$ ) ja pöördemomendi ( $K_Q$ ) koefitsiente:

- labade arvuna ( $Z$ ), mis varieerub vahemikus 2-7
- labade pindala (ingl *expanded area*) ( $AE$ ) ja sama diameetriga ketta pindala ( $A_0$ ) suhtena ( $AE/A_0$ ), mis varieerub vahemikus 0,3 – 1,05
- sõukruvi sammu ( $P$ ) ja sõukruvi diameetri ( $D$ ) suhtena ( $P/D$ ), mis varieerub vahemikus 0,6 – 1,4
- edasiliikumise suhtena (ingl *advance ratio*) ( $J$ ).

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (1)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (2)$$

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (3)$$

where

$T$  is the propeller thrust,

$Q$  is the propeller torque,

$\rho$  is the fluid density,

$n$  is the number of propeller revolutions per second,

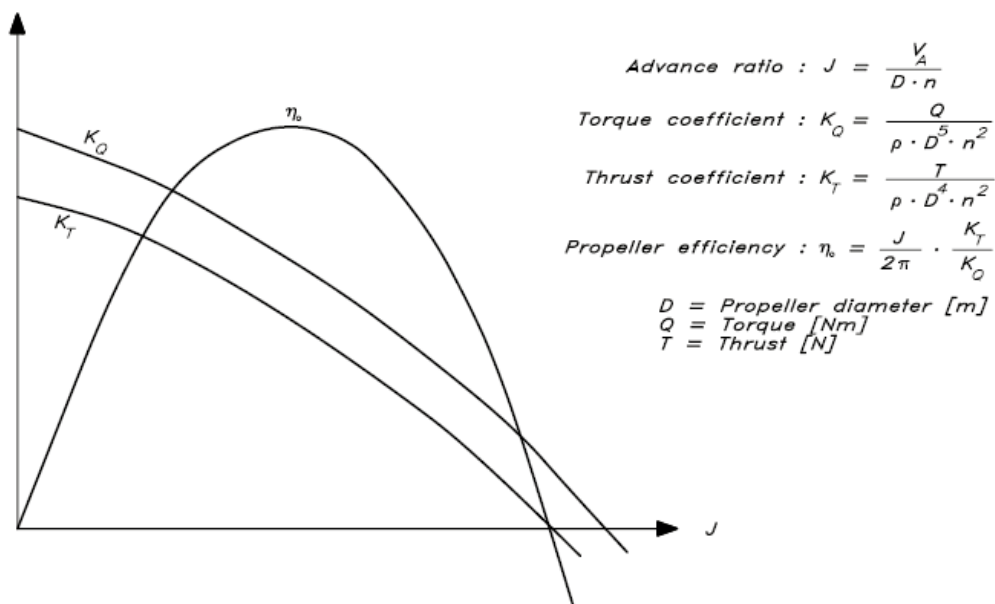
$D$  is the propeller diameter and

$V_A$  is the speed of advance.

The open-water efficiency of the propeller is

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (4)$$

Joonis 3.  $K_T$ ,  $K_Q$  ja  $J$  valemid [6].



Joonis 4.  $K_T$ ,  $K_Q$  ja  $J$  selgitus [7].

Edasilikumise suhe ( $J$ ) mõõdab sõukruvi liikumist suhtena laeva kiiruse ja sõukruvi pöörlemiskiirusesse. Selle väärtused varieeruvad sõltuvalt laeva kiirusest ja sõukruvi disainist. Intervalli jagamise meetodi abil saab rühmitada erinevad ( $J$ ) väärtused vastavalt sõidutingimustele ja seejärel analüüsida, kuidas sõukruvi käitub iga konkreetse intervalli korral.

## 2.4 Sõukruvi efektiivsus

Lisaks kere liikumistakistusele on teiseks oluliseks parameetrikks sõukruvi avavee efektiivsus ( $\eta_0$  ehk  $ETA_0$ ) ehk efektiivsus olukorras, kus sõukruvi ei ole kere all oma planeeritavas tööpositsioonis ehk kere ei mõjuta vee liikumist läbi sõukruvi. Efektiivsuse all on mõeldud seda, kui minimaalsete kadudega on võimalik muuta sõukruvi völliilt lähtuv pöördemoment ( $Q$ ) sõukruvi tõukejõuks ( $T$ ).

Vaadates IWR võistlustel osalenud vesijalgrataste sõukruvide pildi ja videomaterjale [8] ja [9] ning lugedes IWR võistlustel osalenud võistkondade artikleid [10], siis domineerivad IWR võistlustel 2-labalised, pigem saledate, lennuki propelleri laadsete labadega ehk väikese laba pindala suhtarvuga ( $AE/A_0$ ) sõukruvid. Mõningatel juhtudel (reeglina pollari tõmme 30 s, distsipliinil) ka 3-e, harvem 4-labalised laiemate labadega sõukruvid. Kuna paljud IWR võistkonnad on ehitanud vesijalgrattaid ja osalenud võistlustel enam kui 10 aastat, siis sellest johtuvalt said valimisse võetud 2-4 labalised

sõukruvid alates  $AE/A0 = 0,3$ , mis on vähim võimalik näitaja Wageningen B-seeria sõukruvidel.

Suurima avavee efektiivsusega (ETA0) sõukruvi leidmiseks kasutati sama Excel'i programmi/kalkulaatorit (VBA makro) mida takistuse arvutamisel, mis ette antud valikute põhjal, nagu diameetri vahemik (D), labade arve (Z), laba pindala suhe ( $AE/A0$ ), kere liikumise kiirus (VS), „mootori“ võimsus (PE) leidis kõige efektiivsema (ETA0) sõukruvi diameetri (D) ja laba pindala suhte ( $AE/A0$ ) kombinatsiooni etteantud tingimustel.

**Katse 1.** Labade arvu (Z) ja laba pindala suhet ( $AE/A0$ ) tuli muuta igal programmi läbimisel mille tulemusena genereerus 10 raportit (Lisa A), kahel juhul andis programm järjepidevalt veateate, üliõpilase teadmised VBA makrodest ei olnud piisavad vea parandamiseks.

Tabel 6. Katse 1 tulemused (D = 0.3-0.4 m).

Z \ AE/A0	2	3	4
0,3	<b>0,782</b>	0,726	0,696
0,4	0,734	0,715	0,697
0,5	error	0,704	0,696
0,6	error	0,690	0,689

Tulemused.

Z = 2 – kõige efektiivsem on sõukruvi mille  $P/D = 1,16 - 1,24$  ja läbimõõt D = 0,4 m

Z = 3 - kõige efektiivsem on sõukruvi mille  $P/D = 1,4$  ja läbimõõt D = 0,35 m

Z = 4 - kõige efektiivsem on sõukruvi mille  $P/D = 1,04$  ja läbimõõt D = 0,325 – 0,35 m

Järeldus.

Kõige efektiivsem on sõukruvi mille Z = 2;  $AE/A0 = 0,3$  (Wageningen B-seeria sõukruvide skaala miinimum); D = 0,4 m (valitud skaala maksimum);  $P/D = 1,16$  kuni 1,24 (Wageningen B-seeria sõukruvide skaala maksimum).

Hüpotees 1. Valitud sõukruvi maksimum D = 0,4 võib osutada piiravaks teguriks ja vajab kontrollimist.

**Katse 2.** Hüpotees 1 kontrollimiseks sai valimisse valitud sõukruvid mille Z = 2 ja 3;  $AE/A0 = 0,3$  ja 0,4; D = 0,425 – 0,525



Tabel 7. Katse 2 tulemused ( $D = 0,425 - 0,525$  m).

Z \ AE/A0	2	3
0,3	<b>0,782</b>	0,714
0,4	0,734	0,710

Tulemused.

Labade arvu (Z) ja laba pindala suhet (AE/A0) tuli käsitsi muuta igal programmi läbimisel mille tulemusena genereerus 4 raportit (Lisa B).

Z = 2 - kõige efektiivsem on sõukruvi mille P/D = 1,16 – 1,24 ja läbimõõt D = 0,425 m

Z = 3 - kõige efektiivsem on sõukruvi mille P/D = 1,4 ja läbimõõt D = 0,425 m

#### **Katse 1 ja 2 kokkuvõte.**

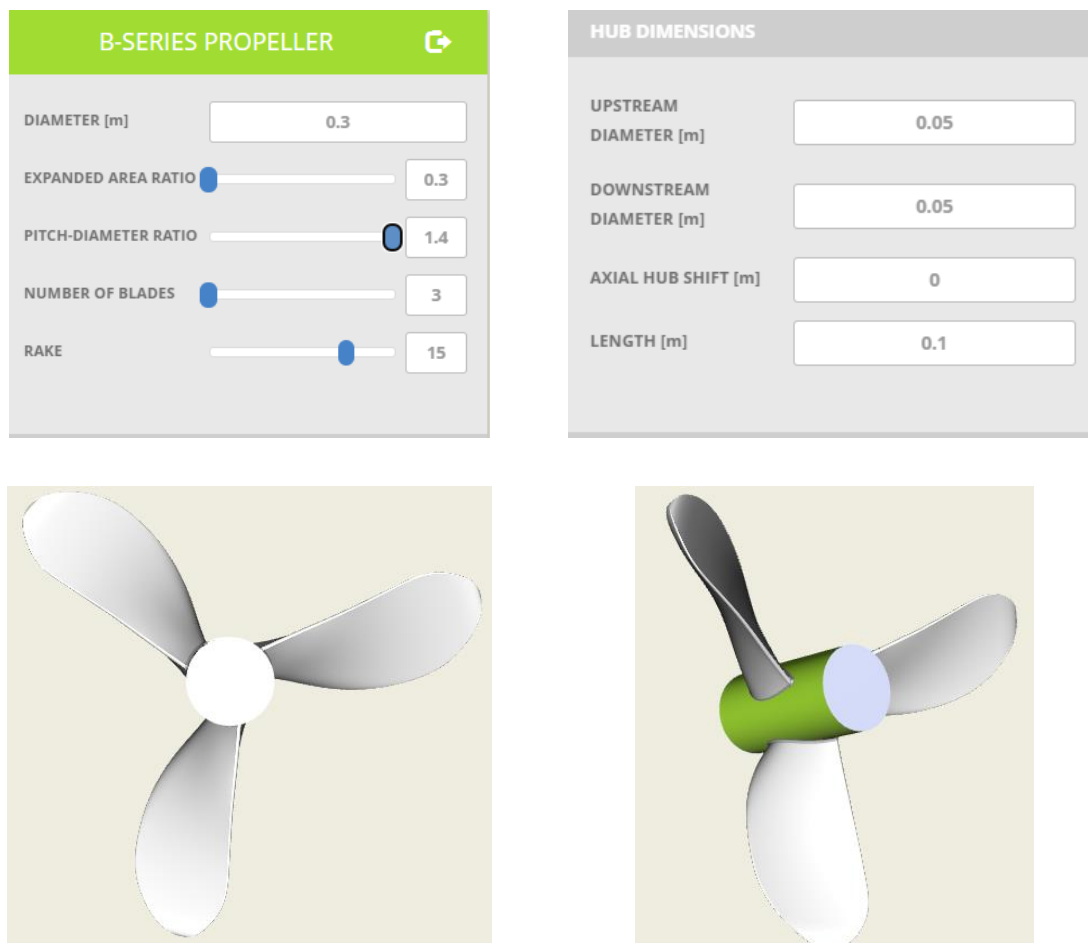
- 1) Z = 2; P/D = 1,16 – 1,24; D = 0,4 m; AE/A0 = 0,3; ETA0 = 0,782
- 2) Z = 2; P/D = 1,4 D = 0,4 m; AE/A0 = 0,4; ETA0 = 0,734
- 3) Z = 3; P/D = 1,4; D = 0,35 m; AE/A0 = 0,3; ETA0 = 0,726
- 4) Z = 3; P/D = 1,4; D = 0,35 m; AE/A0 = 0,4; ETA0 = 0,715

Kuigi kaks kõige efektiivsemat sõukruvi olid mõlemad Z = 2, siis sai otsustatud jätkata sõukruvidega nr. 1 (ETA0 = 0,782) ja nr. 3 (ETA0 = 0,726), et saada parem ülevaade labade geometriast ja kogeda disaini ja valmistamise faasis tekkida võivate erisustega tulenevalt sõukruvi labade arvust.

### 3. SÕUKRUVI DISAIN

Wageningen B-seeria sõukruvide disain on paljuski ette määratud ja siinkohal otseselt disainimisega tegelema ei pidanud. Küll oli aga soov realselt valmis teha üks parima efektiivsusega 3-e ja üks 2-e labaline sõukruvi.

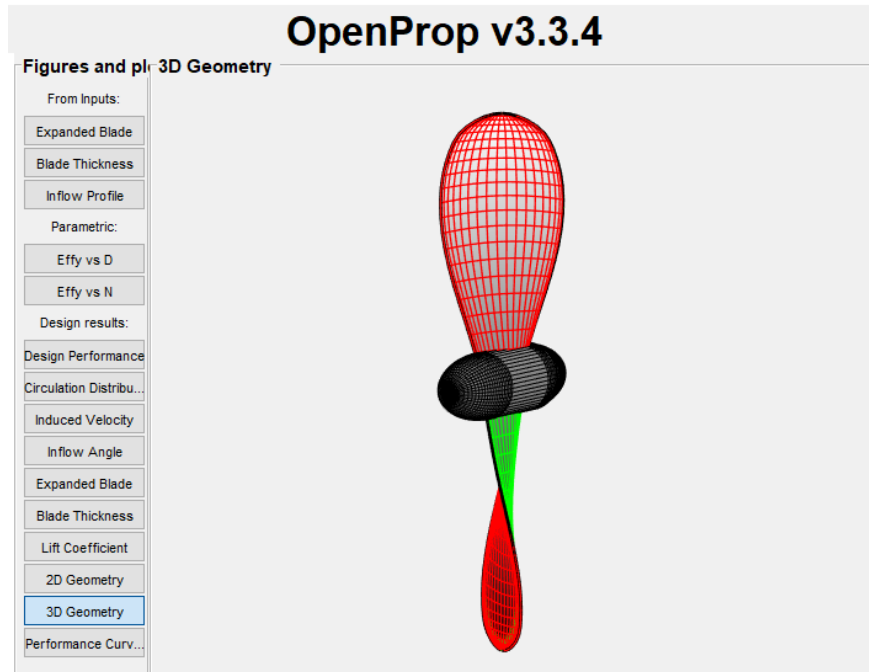
Vahemikus  $Z = 3$  kuni 5 sõukruvide 3D mudelite (.STL ja .STEP fail) loomiseks on Friendship Systems (*caeses.com*) loonud veebipõhise ja vabavaralise töövahendi (<https://www.wageningen-b-series-propeller.com/>) mis võtab arvesse B-seeria labade geometriat. Nende käest sai e-kirja teel küsitud, et kas ja kuidas oleks võimalik  $Z = 2$  Wageningen sõukruve modelleerida nende töövahendiga aga vastust sellele küsimusele ei laekunud.



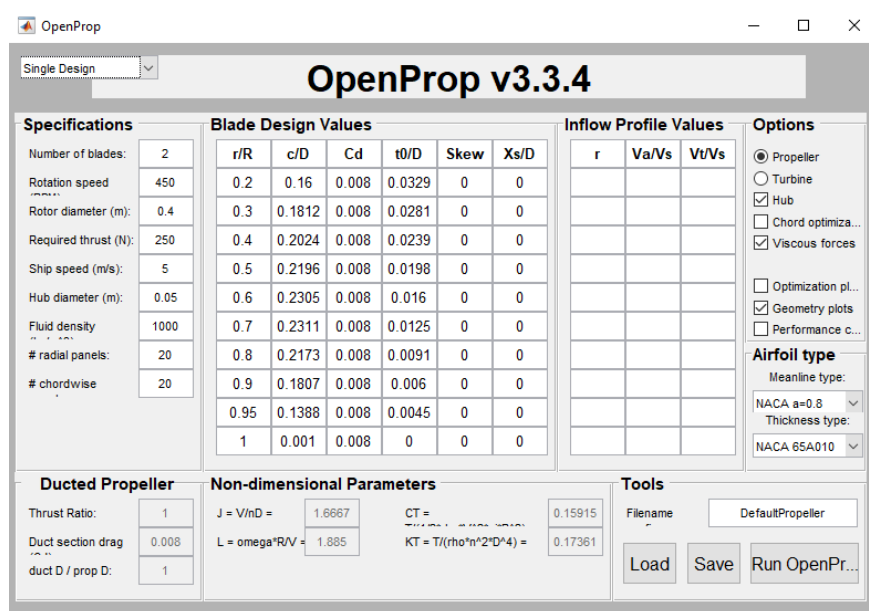
Joonis 5. Sõukruvi nr. 3 ( $Z = 3$ ;  $P/D = 1,4$ ;  $D = 0,35$  m;  $AE/A_0 = 0,3$ ;  $\eta_{A0} = 0,726$ )

Teine töövahend mis võimaldab luua erinevate propellerite 3D mudeleid on OpenProp (<https://openprop.engineering.dartmouth.edu/>) mis nõuab MATLAB programmi ja

omajagu käsitööd, sest Wageningen B-seeria sõukruvide parameetritega see programm kursis ei ole. Joonistel (6) ja (7) oleva sõukruvi puhul on defineeritud  $Z = 2$ ;  $D = 0,4$  m ja rummu (ingl *hub*) diameeter  $0,05$  m; pöörete arv minutis  $450$ ; tõukejõud ( $T$ )  $250$  N eeldatav aluse liikumise kiirus  $5$  m/s ehk  $9,7$  sõlme. Labade geomeetria väärtused on programmi vaikeväärtused, mis ei vasta Wageningen B-seeria geomeetriaale aga programm lubab neid määrata. Antud töö puhul sai ajaline piiraja määravaks ja selles töös selleni ei jõutud.



Joonis 6. Sõukruvi nr. 1. prototüüp.



Joonis 7. Sõukruvi nr. 1 laba vaikeparameetrid.

## 4. SÕUKRUVI VALMISTAMINE

Süsinikkiust ja nailonist, võrdlusena alumiiniumist ( $Z = 5$ ;  $D = 0,25$  m) sõukruvide käitumist, täpsemini labade deformatsiooni, uuriti Jaapanis [11] mudelkatsete kujul kavitatsiooni tunnelis, STAR-CCM+ ja ABAQUS programmidega. Uurimise käigus leiti, et enim deformeerusid nailonist sõukruvi labad ja enim just labade tipud. Vähene deformatsioon isegi parandas sõukruvi efektiivsust, sest pöordemomendi ( $Q$ ) kahanemine oli suurem, kui tõukejõu ( $T$ ) kahanemine aga edasine labade deformatsioon vähendas sõukruvi efektiivsust.

Samas, olles vaadanud pilte ja kirjeldusi varasematel IWR võistlustel osalenud ja seal võitnud vesijalgratate sõukruvidest, millele on eelpool juba viidatud aga ka jõuülekannetest, peamiselt Hamburgi tehnikaülikooli vesijalgratta projektidest [12] kes on vesijalgrattaid pea 30 aastat ehitanud ja mitmetel aastatel regati ka võitnud ning kaaludes erinevaid tootmisviise, siis hakkas valmistamise mõtte kalduma 3D printimise poole, sest toodete prototüüpimine on jõudsalt liikunud selles suunas, sest printerid on juba suhteliselt levinud ja lihtsalt kättesaadavad, nii teenusena, kui soetamise kujul.

Näinud seda pilti (<https://www.instagram.com/tuhamburg/>) ja jäädes uskuma pildi kommentaari, et selline sõukruvi pidas vastu kõik teised IWR distsipliinid v.a. pollari tõmbamise, mis murdis sõukruvi labad, siis tekkis tõdemus, et esimene katse tuleb 3D printeriga ja sarnane, sest see võimaldab aega kokku hoida, et mitte iga kord sõukruvi rummu osa uuesti valmistada, et katsetada erinevaid materjale (filamente) ja trükitehnikaid.



Joonis 8. TU Hamburg vesijalgratas "Emperor" purunenud sõukruvi (düüsiga).

Kuna 3D printimine on teadus omaette, et leida õige materjal (filament) mida kasutada ning veelgi olulisem, et leida õige kiirus, temperatuur, düüs ja veel hulk detaile mis nõuavad vilumust. Esmane otsing ja mõtte peatus 3dkoda.com ja 3dprinting.ee teenustel, et lasta neil printida sõukruvide nr.1 ja nr.3 labad aga lähemal uurimisel selgus, et TalTech Kuressaare kolledžis on olemas nii termoplast filamenti (PLA, PETG, Nailon) kui UV vaiku kasutavad printerid. Plastikprinteritöömaht on 240 mm kuup, vaiguprinteril 298 x 164 x 300 mm (pikkus x laius x kõrgus). Lisaks on veel suur plastikprinter mille töömaht ehk maksimaalse detaili mõõtmed on 1800 x 600 x 600 mm. Termoplastist prinditud detaile saab ahjus järeltöödelda tugevuse parandamiseks. Natuke pahtlitööd filamendist printides kindlasti jääb, kuid võib katsetada ABS-ist printimist ja selle siis atsetooniaurukambris poleerimist. Vaiguprinteriga järeltöötlust vaja ei ole, saab kohe sileda detaili mille tugevusomadused on eeldatavasti paremad. Neid teadmisi jagasid Väikelaevaehituse kompetentsikeskuse töötajad mehhatroonikainsener Kaarel Koppel ja õppetöö assistent Virgo Tiidermann.

Sõukruvi rummu sisemine osa ehk pool sai joonestatud programmis Solidworks ja rummu diameeter sai valitud Wageningen B-seeria kriteeriumi järgi  $d/D = 0.18$  ehk sõukruvi nr. 1 puhul 70 mm ja sõukruvi nr. 3 puhul 60 mm. Rummu ava mõõduks sai 8 mm lähtuvalt võlli läbimõõdust (A. Vainokivi lõputöö IWR VESIRATTA JÕUÜLEKANDE DISAIN, 2022). Kui on soov sõukruvi rummu osa teha metallist ja oskuseid on piisavalt, siis Väikelaevaehituse kompetentsikeskuses on olemas nii freespink, kui ka treipink. Alternatiivina võib kaaluda ettevõttelt Fractory (fractory.com) metallist detaili tellimist aga tuleb üle täpsustada, kas ühe-kahe rummu valmistamiseks neil ka partnerid on, sest nemad pakuvad vaid seda keskkonda, kus tellija ja valmistaja kokku saavad.

Kaalumisel oli ka sõukruvi ühes või mitmes tükis 3D trükkimine ning selle katmine kanga ja vaiguga nagu seda tegi Rijeka ülikooli IWR meeskond enda sõukruvidega 2018 aasta vesijalgratta ehitamisel [10].

## KOKKUVÕTE

Lõputöö kirjeldab IWR võistlusel võistlemiseks mõeldud vesijalgrattale sobivaimate sõukruvide leidmise protsessi. Vesijalgratta kere takistus arvutati Holtrop-Mennen meetodil, eeldades rattasõidu andmete põhjal, et kahe sõitja kogu väljundvõimsus on vahemikus 612 – 1020 W. PropCalc tarkvara kasutati kere takistuse arvutamiseks ja Wageningen B-seeria sõukruvide analüüsimiseks, et leida nende hulgast kõige efektiivsemad, lähtuvalt sõukruvi parameetritest nagu läbimõõt ( $D$ ), labade arv ( $Z$ ), labade pindala suhe ( $AE/A_0$ ) ja sammu/läbimõõdu suhe ( $P/D$ ).

Katsed viidi läbi 2-, 3- ja 4-labaliste sõukruvidega, mille läbimõõt jäi vahemikku 0,3–0,525 meetrit. Leiti, et kõige tõhusam sõukruvi on kahe labaga, mille läbimõõt on 0,4 meetrit, labade pindala suhe 0,3 ja sammu ja läbimõõdu suhe vahemikus 1,16 kuni 1,24, mis saavutas avavee efektiivsuse ( $ETA_0$ ) 0,782. Valmistamise võimaluste analüüsimiseks loodi kahest efektiivsemast sõukruvist 3D-mudelid. 3D-printimist peeti mõistlikuks alternatiiviks tänu võimalusele kiiresti prototüüpida ja katsetada erinevaid materjale ja tehnikaid. Kokkuvõttes leiti sobivad sõukruvid varasemalt disainitud vesijalgratta kere ja jõuülekanne jaoks.

Järgmised sammud võiksid olla 3 labaga sõukruvi valmistamine, 2 labaga sõukruvi 3D mudeli geomeetria viimistlemine vastavalt Wageningen B-seeriale, vigu põhjustanud VBA koodi parandamine ja merekeskkonna jaoks sobivate prinditavate materjalide tundmaõppimine. Seejärel võiks heita pilgu hiljuti tutvustatud Wageningen F-seeria sõukruvidele ja veel disaini faasis olevale FC seeriale. Sõukruvi efektiivsust ja sobivust mõjutavate parameetrite loetelu on oluliselt pikem, kui selles lõputöös käsitletud, seega saab sõukruvide kohta palju veel õppida.

## SUMMARY

The thesis outlines the process of finding the most suitable propellers for a waterbike previously designed to compete in the IWR competition. The waterbike hull resistance was calculated using the Holtrop-Mennen method, assuming a total output power of 612 to 1020 W from the two riders based on cycling power data. PropCalc software was used to calculate the hull resistance and to analyze the Wageningen B-series propellers to find the most efficient ones based on parameters like diameter ( $D$ ), blade count ( $Z$ ), blade area ratio ( $AE/A_0$ ) and pitch/diameter ratio ( $P/D$ ).

Tests were run with 2, 3, and 4-bladed propellers with diameters ranging from 0,3 to 0,5 meters. The most efficient propeller was found to be a 2-bladed design with a 0,4 meter diameter, blade area ratio of 0,3 and pitch to diameter ratio of 1,16 to 1,24 achieving an open water efficiency ( $ETA_0$ ) of 0,782. 3D models of the most efficient 2-bladed and 3-bladed designs were created to analyze manufacturing options. 3D printing was identified as a viable option due to the ability to quickly prototype and test different materials and techniques. In summary, suitable propellers were identified for specific hull and drivetrain previously designed.

Next steps could be manufacturing the 3-bladed propeller, finalizing the 2-bladed propeller 3D model geometry in accordance with the Wageningen B-series, fixing the VBA code that caused the errors and learning more about the printable materials in marine environment. Then it would be good idea to look at the lately introduced Wageningen F-series and still in design phase FC series. The list of parameters affecting the propeller's efficiency and suitability is much longer than covered in this thesis so there is plenty to learn about propellers.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Holtrop ja G. G. J. Mennen, „An Approximate Power Prediction Method,” *International Shipbuilding Progress*, kd. 29, pp. 166-170, 1982.
- [2] L. Birk, „Propeller Series Data,” %1 *Fundamentals of Ship Hydrodynamics*, Wiley, 2019, p. 561.
- [3] „POLAR,” [Vörgumaterjal]. Available: [https://support.polar.com/e\\_manuals/grit-x-pro/polar-grit-x-pro-user-manual-english/content/cycling-performance-test.htm](https://support.polar.com/e_manuals/grit-x-pro/polar-grit-x-pro-user-manual-english/content/cycling-performance-test.htm). [Kasutatud December 2022].
- [4] A. Hunter ja A. Coggan, *Training and Racing with a Power Meter*, 2010.
- [5] C. R. Abbiss, J. J. Peiffer ja P. Laursen, „Optimal cadence selection during cycling,” *International SportMed Journal*, kd. 10, nr 1, 2009.
- [6] M. M. Bernitsas, D. Ray ja P. Kinley, „KT, KQ and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers,” 1981.
- [7] L. Larsson, E. E. Rolf ja O. Michal, „Sõukruvi karakteristikud,” %1 *Jahtide Projekteerimise Alused*, 2014, p. 417.
- [8] „Waterbiketeam Straak zu Bremen,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.instagram.com/waterbikestraakzubremen/>. [Kasutatud 2023].
- [9] „Pru Waterbike Team,” [Vörgumaterjal]. Available: [https://www.instagram.com/pru\\_wbt/](https://www.instagram.com/pru_wbt/). [Kasutatud 2023].
- [10] R. Dejhalla, D. Kolich, D. Majnaric, I. Majnaric, M. Andrun ja M. Tomašic, „Design and Development of Waterbikes at the Faculty of Engineering - University of Rijeka,” %1 *SNAME 6th International Symposium on Ship Operations, Management and Economics*, Athens, 2018.
- [11] T. Taketani, K. Kimura, A. Satoko ja Y. Koutako, „Study on Performance of a Ship Propeller Using a Composite Material,” %1 *Third International Symposium on Marine Propulsors*, Tasmania, 2013.
- [12] „H.F. LATTE,” Website Der Fachschaft Schiffbau Und Der Schiffbauervereinigung HEYLIGE FRAWE LATTE, 2023. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.hf-latte.de/tretboote/>. [Kasutatud 2023].



# LISAD

Lisa A

**Z = 2, AE/A0 = 0.3**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,542	0,529	0,515	0,499	0,483
0,68	0,615	0,605	0,592	0,579	0,565
0,76	0,671	0,665	0,657	0,646	0,635
0,84	0,712	0,710	0,706	0,699	0,691
0,92	0,738	0,741	0,741	0,738	0,732
1,00	0,753	0,759	0,762	0,762	0,760
1,08	0,759	0,768	0,773	0,775	0,776
1,16	0,758	0,769	0,776	0,780	0,782
1,24	0,755	0,766	0,774	0,779	0,782
1,32	0,750	0,762	0,770	0,776	0,779
1,40	0,747	0,759	0,767	0,773	0,775

**Z = 2, AE/A0 = 0.4**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,503	0,489	0,475	0,460	0,446
0,68	0,571	0,561	0,550	0,537	0,523
0,76	0,624	0,617	0,609	0,599	0,587
0,84	0,661	0,658	0,653	0,646	0,637
0,92	0,685	0,686	0,684	0,680	0,674
1,00	0,698	0,703	0,704	0,703	0,699
1,08	0,705	0,711	0,715	0,716	0,715
1,16	0,706	0,715	0,720	0,723	0,723
1,24	0,705	0,715	0,722	0,726	0,728
1,32	0,705	0,715	0,723	0,728	0,730
1,40	0,706	0,718	0,726	0,731	0,734

**Z = 3, AE/A0 = 0.3**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,455	0,440	0,423	0,407	0,391
0,68	0,515	0,500	0,485	0,469	0,453
0,76	0,565	0,553	0,539	0,524	0,509
0,84	0,606	0,597	0,586	0,573	0,559
0,92	0,639	0,633	0,624	0,613	0,601
1,00	0,663	0,660	0,654	0,645	0,636
1,08	0,681	0,680	0,676	0,670	0,662
1,16	0,694	0,695	0,692	0,688	0,682
1,24	0,703	0,706	0,705	0,702	0,697
1,32	0,711	0,715	0,715	0,713	0,709
1,40	0,721	0,725	0,726	0,724	0,720

**Z = 3, AE/A0 = 0.4**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,442	0,427	0,411	0,396	0,382
0,68	0,503	0,489	0,474	0,460	0,444
0,76	0,553	0,542	0,529	0,515	0,501
0,84	0,594	0,586	0,575	0,563	0,550
0,92	0,625	0,620	0,612	0,602	0,591
1,00	0,649	0,646	0,641	0,633	0,624
1,08	0,665	0,665	0,662	0,657	0,650
1,16	0,678	0,680	0,679	0,675	0,670
1,24	0,687	0,691	0,692	0,690	0,686
1,32	0,696	0,701	0,703	0,703	0,700
1,40	0,706	0,712	0,715	0,716	0,714

**Z = 3, AE/A0 = 0.5**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,417	0,402	0,387	0,373	0,359
0,68	0,480	0,466	0,452	0,437	0,422
0,76	0,532	0,520	0,507	0,494	0,479
0,84	0,573	0,564	0,554	0,541	0,529
0,92	0,605	0,599	0,590	0,581	0,570
1,00	0,628	0,625	0,620	0,613	0,603
1,08	0,646	0,646	0,642	0,638	0,630
1,16	0,659	0,661	0,660	0,657	0,652
1,24	0,670	0,674	0,675	0,673	0,670
1,32	0,680	0,686	0,688	0,688	0,686
1,40	0,691	0,699	0,703	0,704	0,704

**Z = 3, AE/A0 = 0.6**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,382	0,368	0,354	0,340	0,326
0,68	0,448	0,434	0,420	0,405	0,391
0,76	0,502	0,489	0,477	0,463	0,448
0,84	0,545	0,535	0,524	0,512	0,499
0,92	0,578	0,572	0,562	0,552	0,540
1,00	0,604	0,600	0,594	0,585	0,575
1,08	0,624	0,622	0,618	0,612	0,604
1,16	0,639	0,640	0,638	0,634	0,628
1,24	0,652	0,655	0,656	0,654	0,650
1,32	0,665	0,670	0,672	0,672	0,669
1,40	0,679	0,685	0,689	0,691	0,690

**Z = 4, AE/A0 = 0.3**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,400	0,384	0,368	0,352	0,337
0,68	0,454	0,438	0,422	0,406	0,390
0,76	0,502	0,488	0,472	0,457	0,441
0,84	0,544	0,532	0,519	0,503	0,489
0,92	0,580	0,570	0,558	0,545	0,531
1,00	0,609	0,601	0,592	0,581	0,568
1,08	0,633	0,627	0,619	0,610	0,599
1,16	0,652	0,648	0,642	0,633	0,624
1,24	0,667	0,665	0,660	0,653	0,644
1,32	0,681	0,680	0,676	0,670	0,663
1,40	0,696	0,696	0,693	0,688	0,680

**Z = 4, AE/A0 = 0.4**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,397	0,381	0,366	0,351	0,336
0,68	0,454	0,439	0,423	0,408	0,392
0,76	0,504	0,490	0,475	0,460	0,445
0,84	0,546	0,535	0,522	0,508	0,493
0,92	0,582	0,573	0,562	0,550	0,537
1,00	0,611	0,605	0,596	0,585	0,574
1,08	0,634	0,630	0,623	0,615	0,605
1,16	0,652	0,650	0,645	0,638	0,630
1,24	0,667	0,667	0,664	0,658	0,651
1,32	0,681	0,682	0,680	0,676	0,670
1,40	0,695	0,697	0,697	0,694	0,689

**Z = 4, AE/A0 = 0.5**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,385	0,370	0,356	0,341	0,326
0,68	0,446	0,430	0,415	0,400	0,385
0,76	0,497	0,484	0,470	0,455	0,440
0,84	0,542	0,530	0,518	0,504	0,490
0,92	0,578	0,569	0,558	0,547	0,534
1,00	0,607	0,601	0,593	0,582	0,571
1,08	0,630	0,626	0,620	0,612	0,603
1,16	0,648	0,647	0,643	0,637	0,629
1,24	0,663	0,664	0,661	0,657	0,651
1,32	0,676	0,679	0,678	0,676	0,671
1,40	0,690	0,694	0,696	0,695	0,691

**Z = 4, AE/A0 = 0.6**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,3)	ETAO(D0,325)	ETAO(D0,35)	ETAO(D0,375)	ETAO(D0,4)
0,60	0,366	0,351	0,337	0,322	0,309
0,68	0,428	0,413	0,399	0,384	0,369
0,76	0,483	0,470	0,455	0,441	0,426
0,84	0,529	0,517	0,504	0,491	0,477
0,92	0,567	0,558	0,547	0,535	0,522
1,00	0,597	0,590	0,582	0,572	0,561
1,08	0,621	0,617	0,611	0,603	0,593
1,16	0,640	0,638	0,634	0,628	0,621
1,24	0,655	0,656	0,654	0,650	0,644
1,32	0,669	0,671	0,671	0,669	0,665
1,40	0,682	0,687	0,689	0,689	0,686

**Z = 2, AE/A0 = 0.3**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,425)	ETAO(D0,45)	ETAO(D0,475)	ETAO(D0,5)	ETAO(D0,525)
0,60	0,467	0,452	0,437	0,423	0,409
0,68	0,550	0,535	0,519	0,504	0,490
0,76	0,622	0,608	0,595	0,580	0,566
0,84	0,681	0,670	0,658	0,646	0,633
0,92	0,726	0,717	0,708	0,698	0,687
1,00	0,756	0,750	0,744	0,736	0,727
1,08	0,774	0,770	0,766	0,760	0,753
1,16	0,782	0,780	0,776	0,772	0,766
1,24	0,782	0,781	0,779	0,775	0,770
1,32	0,779	0,778	0,775	0,771	0,766
1,40	0,775	0,774	0,770	0,766	0,760

**Z = 2, AE/A0 = 0.4**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,425)	ETAO(D0,45)	ETAO(D0,475)	ETAO(D0,5)	ETAO(D0,525)
0,60	0,432	0,417	0,404	0,390	0,378
0,68	0,509	0,495	0,481	0,467	0,453
0,76	0,575	0,562	0,548	0,534	0,521
0,84	0,627	0,616	0,604	0,593	0,580
0,92	0,666	0,658	0,648	0,638	0,627
1,00	0,694	0,688	0,680	0,672	0,662
1,08	0,712	0,707	0,701	0,695	0,687
1,16	0,722	0,719	0,715	0,710	0,703
1,24	0,728	0,726	0,722	0,718	0,713
1,32	0,731	0,730	0,727	0,723	0,719
1,40	0,734	0,733	0,731	0,727	0,722

**Z = 3, AE/A0 = 0.3**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,425)	ETAO(D0,45)	ETAO(D0,475)	ETAO(D0,5)	ETAO(D0,525)
0,60	0,376	0,361	0,348	0,335	0,322
0,68	0,437	0,421	0,407	0,393	0,379
0,76	0,494	0,478	0,464	0,449	0,435
0,84	0,545	0,530	0,516	0,501	0,487
0,92	0,589	0,575	0,562	0,549	0,535
1,00	0,625	0,613	0,601	0,588	0,575
1,08	0,653	0,643	0,632	0,621	0,609
1,16	0,675	0,666	0,656	0,645	0,634
1,24	0,690	0,682	0,673	0,664	0,653
1,32	0,703	0,695	0,687	0,677	0,667
1,40	0,714	0,707	0,698	0,688	0,678

**Z = 3, AE/A0 = 0.4**

SERVICE PRED ETAO(D, P/D) [-]

P/D	ETAO(D0,425)	ETAO(D0,45)	ETAO(D0,475)	ETAO(D0,5)	ETAO(D0,525)
0,60	0,367	0,353	0,340	0,328	0,316
0,68	0,429	0,414	0,400	0,387	0,374
0,76	0,486	0,471	0,457	0,443	0,430
0,84	0,536	0,522	0,508	0,495	0,481
0,92	0,579	0,567	0,553	0,540	0,527
1,00	0,614	0,603	0,592	0,579	0,568
1,08	0,642	0,633	0,623	0,612	0,601
1,16	0,663	0,656	0,647	0,638	0,628
1,24	0,681	0,674	0,667	0,659	0,649
1,32	0,696	0,690	0,684	0,676	0,667
1,40	0,710	0,706	0,699	0,692	0,683

PropCalc Wageningen B-seeria sisend

Propulsion Prediction

PropCalcV17\_IWR\_Single Prop\_2023

IWR		H1 237kg	
Main Dimensions			
LOA	5,97	[m]	
LPP	5,97	[m]	
LWL	5,97	[m]	
B	0,87	[m]	
TM	0,11	[m]	
DISV	0,24	[m <sup>3</sup> ]	
DISP	0,24	[t]	
CB	0,43	[-]	
LPP/B	6,86	[-]	
L/T	55,79	[-]	
B/T	8,13	[-]	
Propeller & Shaft line			
D	0,400	[m]	
P/D	1,160	[-]	
A <sub>E</sub> /A <sub>O</sub>	0,300	[-]	
Z	2	[-]	
K <sub>p</sub>	0,00003	[m]	
K	0,2	[-]	
h <sub>SHAFT</sub>	-0,387	[m]	
n <sub>propellers</sub>	1	[-]	
R <sub>gear</sub>	0,200	[-]	
ETAS	0,941	[-]	
S.M.	15%	Sea Margin	

Propeller parameters		
POW_ID	0	Wageningen B2-30  Corr. For FS Corr. for Rn Corr. for Cd acc. Holtrp84
Prop. No.	5415	
Vert. Cell	76	
Hor. Cell	9	
Corr. Rn	1	
Corr. Cd	1	

B2-30					
STEP 1 P/D Optimization					
V	PE	THDF	WFT	ETAR	
[KTS]	[KW]	[-]	[-]	[-]	
8,0	0,702	0,010	0,010	1,0000	
0,2175	MIN	MAX	NUM	STEP	
	D [m]	0,30	0,50	5	0,050
	P/D [-]	0,60	1,40	11	0,080
STEP 2		imax	13	0,387 %	
V	PE	THDF	WFT	ETAR	
[KTS]	[KW]	[-]	[-]	[-]	
1,0	0,001	0,010	0,010	1,000	
2,0	0,009	0,010	0,010	1,000	
3,0	0,032	0,010	0,010	1,000	
4,0	0,087	0,010	0,010	1,000	
5,0	0,181	0,010	0,010	1,000	
6,0	0,349	0,010	0,010	1,000	
7,0	0,503	0,010	0,010	1,000	
8,0	0,702	0,010	0,010	1,000	
9,0	0,938	0,010	0,010	1,000	
10,0	1,206	0,010	0,010	1,000	
11,0	1,521	0,010	0,010	1,000	
12,0	1,890	0,010	0,010	1,000	
13,0	2,318	0,010	0,010	1,000	

Iteration parameters (IHM)		
JA	0,00	MIN. Advance Number J
JB	2,00	MAX. Advance Number J
Max. Iter	50	Max. IHM iterations of J
Max. Error	0,000450	Max.error of T [kN]
SMPEA	1,00	Min. S.M.(PE)
SMPEB	2,00	Max. S.M.(PE)
Max.Iter.SM	50	Max. S.M. IHM iterations
Max.Error.SM	0,000045	Max.error of S.M. [%]

PropCalc - Holtrop-Mennen '84 sisend

**Propulsion Prediction**  
PropCalcV17\_IWR\_Single Prop\_2023

! For Holtrop Propulsion prediction fill propeller data (D, P/D, Ae/Ao) to Propeller & Shaft line -table!

35,40

**HOLTROP-84**

Parameters for Holtrop84				Approximate (1+k2)	Range	(1+k2)	SAPP [m^2]	(1+k2)SAPP
LWL	5,971 [m]	Lr	0,60 [m]	Rudder behind skeg	1.5 - 2.0	2,0	0,01	0,02
LPP	5,971 [m]	LR/L	0,10 [-]	Rudder behind stern	1.3 - 1.5	1,5	0,00	0,00
B	0,856 [m]	iE_est	17,24 [deg]	Twin-screw balanced ru	2,8	2,8	0,00	0,00
TF	0,107 [m]	iE	17,239 [deg]	Shaft brackets	3	3,0	0,00	0,00
TA	0,107 [m]	ABT	0,000 [m2]	Skeg	1.5 - 2.0	1,5	0,00	0,00
LCB	-12,10 [%]	hB	0,000 [m]	Strut bossings	3	3,0	0,00	0,00
DISV	0,237 [m3]	AT	0,065 [m2]	Hull bossings	2	2,0	0,00	0,00
CM	0,746 [-]	Sw_est	3,563 [m2]	Shafts	2.0 - 4.0	4,0	0,00	0,00
CWP	0,655 [-]	Sw	3,453 [m2]	Stabilizer fins	2,8	2,8	0,00	0,00
CB	0,433 [-]	SAPP	0,010 [m2]	Dome	2,7	2,7	0,00	0,00
CPL	0,581 [-]	(1+k2)eq	2,000 [-]	Bilge keels	1,4	1,4	0,00	0,00
C_stern	0 [-]	CBTO	0,000 [-]					
C_ship	0 [-]	d_t	0,000 [m]					
ks	1,50E-04 [m]							

THDF_BP	WFT_BP	ETAR_BP
0,010	0,010	1,000

Lcb 1,128 -0,31 %

**Velocity Range HOLTROP84**

	MIN	MAX	NUM	STEP
V [kn]	1,00	13,00	13,00	1,00