



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Kuressaare Kolledž

GLISSEERIVA PAADI NUMBRILINE ANALÜÜS REGULAARSETES LAINETES

NUMERICAL ANALYSIS OF A GLIDING BOAT IN REGULAR WAVES

DIPLOMITÖÖ

Üliõpilane: Kert Ojala

Üliõpilaskood 182601SDSR

Juhendaja: Mikloš Lakatoš, insener

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.

19. mai 2022

Autor: Kert Ojala

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

23. mai 2022.

Juhendaja: insener Mikloš Lakatoš

/ allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

23. mai 2022 .

Kaitsmiskomisjoni esimees abiprofessor tenuuris Mihkel Kõrgesaar

/ allkirjastatud digitaalselt/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina ,Kert Ojala

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
GLISSEERIVA PAADI NUMBRILINE ANALÜÜS REGULAARSETES LAINETES

mille juhendaja on insener 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.
-

19.mai 2022

_____ (kuupäev)

/allkirjastatud digitaalselt/

¹ 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.

Tallinna Tehnikaülikool
Kuressaare Kolledž
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kert Ojala, 182601SDSR

Õppekava, peeriala:SDSR 10/17 Meretehnika ja väikelaevaehitus

Juhendaja(d): Insener Mikloš Lakatoš, tel . +372 53 850 727

Lõputöö teema:

GLISSEERIVA PAADI NUMBRILINE ANALÜÜS REGULAARSETES LAINETES
NUMERICAL ANALYSIS OF A GLIDING BOAT IN REGULAR WAVES

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida Simcenter STAR CCM+ simulatsiooniprogrammis erinevaid kohanduva arvutusvõrgu täpsustuse (AMR) konfiguratsioone
- 2.Hinnata erinevate seadistuste mõju tulemustele
3. Anda soovitused AMR seadistuste osas

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö 90% esitamine ja eelkaitsmine	11.05.22
2.	Lõputöö 100% esitamine	19.05.22
3.	Lõputöö kaitsmine	06.06.22

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "19. mai 2022 a

Üliõpilane: Kert Ojala 19. mai 2022.a
/allkiri/

Juhendaja: Mikloš Lakatoš ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Programmijuht: Mikloš Lakatoš..... ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
1 SISSEJUHATUS	8
2 MUDELI KIRJELDUS	10
2.1 Numbriline mudel.....	11
2.1.1 Arvutusdomeen.....	11
2.1.2 Arvutusvõrk.....	13
2.1.3 Ajasamm e. <i>Time step</i>	13
2.1.4 Adaptiivne võrgu täpsustamine(AMR).....	16
2.1.5 Ventilatsioon.....	19
3 TULEMUSED	21
3.1 Kogutakistus	21
3.2 Arvutusaeg	23
3.3 Kiirendused.....	24
3.4 Püst- ja pikiõõtsumine	27
KOKKUVÕTE.....	29
CONCLUSION.....	30
Kasutatud kirjandus.....	31
LISAD.....	33
Lisa A. Takistused	33
Lisa B Kiirendused	37
Lisa C Püstõõtsumised	41
Lisa D Pikiõõtsumine.....	45

EESSÕNA

Käesolevas töös uuritakse Simcenter STAR CCM+ simulatsiooniprogrammis erinevaid kohanduva arvutusvõrgu täpsustuse (*Adaptive Mesh Refinement, AMR*) konfiguratsioone ning antakse soovitusi, milliste seadistustega edaspidi simulatsioonides adaptiivset arvutusvõrku uuendada. Selleks hinnatakse esmalt arvutusliku mudeli erinevaid parameetreid nagu võrgu kontrollamahtude arv ja suurus, arvutuse ajasammu, sisemisi iteratsioone, võrgu kontrollmahu tüüpi, lainete ja vabapinna arvutuslike kontrollmahtude arvu jne. vastavate soovitustega ITTC (*International Towing Tank Conference*) poolt ning jälgitakse ka simulatsiooni vastavust Simcenter Star CCM+ arendajate poolt antud soovitustega. Simulatsioonid viiakse läbi kahes erinevas lainetüübis kahe erineva väikelaeva kerega, mis on ühel juhul varustatud pritsmeliistudega ja teisel mitte, muus osas keredel erinevusi ei ole ning tulemusi hinnatakse läbi kahe keredele kinnitatud akseleromeetri, analüüsides nende vertikaalseid kiirendusi, aga ka kerede kogutakistust. Simulatsioonides kasutatakse vabapinna võrgu uuendamiseks erinevaid sagedusi ja võrreldakse nende tulemusi omavahel.

- Glisseeriv paat
- Arvutuslik vedeliku dünaamika (*CFD*)
- Adaptiivne arvutusvõrk (*AMR*)
- Diplomitöö

Lühendite ja tähiste loetelu

AMR – Adaptiivne kohandatav arvutusvõrk (*Adaptive Mesh Refinement*)

B_{OA} – Laeva kere kogulaius(m)

BH – Pritsmeliistudeta laeva kere (*bare hull*)

BS – Kontrollmahu baas-suurus(m) (*base size*)

B_{WL} – Laeva kere laius veeliinil (m)

CFD – Arvutuslik vedelike dünaamika (*Computational Fluid Dynamics*)

CFL – Courant-Friedrichs-Lewy tingimus

C_{max} – Maksimaalne lubatav Couranti arv

CPU – Protsessor (*central protsessing unit*)

DFBI – Dünaamiline keha-vedeliku interaktsioon (*Dynamic Fluid-Body Interaction*)

Fr – Froude´i arv

Fr_v – Mahuline Froude´i arv

ITTC – *International Towing Tank Conference*

KG – Raskuskese vertikaalsuunas (m)

L_{CG} – Raskuskese pikisuunas (m)

L_{OA} – Laeva kere kogupikkus (m)

L_{PP} – perpendikulaaride vaheline pikkus (m)

L_{WL} – Laeva kere pikkus veeliinil (m)

RANS – Reynoldsi keskmistatud Navier-Stokes´i võrrand (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation*)

SR1 – Pritsmeliistudega laeva kere (*spray rail*)

T – Süvis (m)

V_{kere} – Laeva kere kiirus (m/s)

VOF – Vedeliku maht (*Volume of Fluid*)

y⁺ - Seinä käsitluse tähis

λ - Skaleerimistegur

∇ - Mahtveeväljasurve

1 SISSEJUHATUS

Arvutusliku vedeliku dünaamika (CFD) on vedelike mehaanika haru, mis kasutab vedelikuvoogudega seotud probleemide analüüsimiseks ja lahendamiseks numbrilist analüüsi ja andmestruktuure. Vedelike vabavoolu ning vedelike ja gaaside koostoime simuleerimiseks koos piirtingimustega määratletud pindadega kasutatakse võimsaid arvuteid, millega on võimalik saavutada paremaid lahendusi ning neid on sageli vaja suuremate ja keerukamate probleemide lahendamiseks. Tänapäevaste uurimistööde tulemiks on tarkvara, mis parandab keeruliste simulatsioonistsenaariumite (näiteks turbulentsne voolamine) täpsust ja kiirust. Sellise tarkvara esialgne valideerimine toimub tavaliselt eksperimentaalsete seadmete- tuuletunnelite, katsebasseinide jne abil. Lisaks saab võrdluseks kasutada konkreetse probleemi eelnevalt tehtud analüütilist või empiirilist analüüsi. Lõplik valideerimine tehakse sageli täismahus testimise, näiteks mudel- või avaveekatsetuste abil. CFD-d rakendatakse tänapäeval juba väga paljudes uurimis- ja inseneriprobleemide lahendustes, õppevaldkondades ja tööstusharudes. Hüdro- ja aerodünaamika, helilainete liikumine, ilmastiku simulatsioonid, biotehnoloogia, soojuse ülekanne on vaid väike osa sellest. Simulatsiooni üles ehitamine algab geomeetria ja füüsikaliste piiride määramisega, edasi saab juba andmeid sobivalt töödelda, eraldada vedeliku mahu (või vedeliku domeeni) ning jagada vedeliku poolt hõivatud mahu diskreetseteks kontrollmahtudeks, millel võib olla erinev kuju. Seejärel valitakse füüsikalised mudelid, näiteks vedeliku liikumist, entalpiat jne kirjeldavad võrrandid, määratakse ka piirtingimused ehk vedeliku käitumine ja omadused vedeliku domeeni kõigil piirnevatel pindadel. Transientsete probleemide puhul määratakse ka algtingimused. Seejärel simulatsioon käivitatakse ja võrrandid lahendatakse iteratiivselt. Saadud lahenduse analüüsimiseks ja visualiseerimiseks kasutatakse post-protsessorit. [1]

Suurtel kiirustel kulgevaid, glisseerivaid aluseid on võrreldes tavaliste laevakeredega suhteliselt vähe uuritud, olemasolevad uuringud on peamiselt keskendunud kerde geomeetria ning sellele, kuidas erinevad kerde väliselemendid nagu pritsmeliistud ja pritsmete deflektorid mõjutavad takistust ja selle komponente, kiirendusi laevakere erinevates asukohtades, piki- ja püst-õõtsustumist. Ent on ka näitajaid, mida on eksperimentaalsetes mudel- või avaveekatsetes suhteliselt raske hinnata- näiteks märgpindala või ventilatsioon. [2]

M. Lakatoši jt uurimuses [3] leiti, et nii arvutuslikud kui ka katsetulemused näitasid erinevate pritsmeliistude korral sarnast mõju veesõiduki takistusele ja trimmile, kuid numbrilised simulatsioonid hindasid takistuse vähenemist märkimisväärselt üle. Sellegipoolest hinnatakse numbriliste simulatsioonide väärtuslikku teavet (rõhu jaotus,

takistus, kere üksikute osade tõstejõud), mis tavakatsete tingimustes nõuaks keerukat instrumentaalset seadistamist.

B. Molchanovi jt uurimustöös [4] võrreldi kahe pritsmedeflektori paigutust (mõeldud kiirustele $Fr_v=4,3$ ja $Fr_v=5,87$) tavaliste pritsmeliistudega kiirustel $Fr_v=3,5\dots6,65$. Lisaks saadud tulemustele takistuste erinevuses ning kiirenduste hinnangule, kus tavaline pritsmeliistude komplekt vähendas kogutakistust kuni 9% ning pritsmete deflektorid vahemikus 14,5%...25%, leiti, et pool-empiiriline Savitsky mudel ei sobi laeva sõiduasendi ennustamiseks, deflektorid suurendasid trimmi oluliselt. Edasistes uuringutes soovitatakse pritsmedeflektorite projekteerimisel kasutada CFD analüüse.

De Luca, Mancini jt uurimustöös [5] toodi välja, et glisseerivate aluste numbriline modelleerimine erineb oluliselt tavaliste, aeglastel kiirustel kulgevate laevade omast. Hinnati kolme erinevat kere mudelit ning erinevaid arvutusvõrgu topoloogiaid. Üheainsa (*single grid*) võrgu kasutamisel modelleeriti jäiga keha liikumist, liigutades võre vaba pinna suhtes, kuid sellisel juhul põhjustasid kere trimm ja takistus vabapinna võnkumise sisse- ja väljalaskepiiridel, mis ilmselt võivad esile kutsuda testitava kere täiendava trimmi ja takistuse. Sel põhjusel hinnati alternatiivseid lahendusi- kattuva arvutusvõrgu tehnikat, kus on kaks erinevat võrgusilma topoloogiat liikuva võrgupiirkonna jaoks. Oluline on märkida, et kattuv võrk (*overset grid*) vajab kahte erinevat piirkonda- staatilist ehk taustapiirkonda ning liikuvat ehk *overset* piirkonda. Pidades silmas arvuti CPU (*central processing unit*) ressursi, andis kõige parema väärtuse see, kui kasutusel oli kohandatav arvutusvõrk ja selles piirkonnas kasutati polüeedrilisi kontrollmahte. Veaprotsentide olulisi kõikumisi ei täheldatud.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida ja hinnata Simcenter STAR CCM+ simulatsiooni- programmis adaptiivse kohandatava arvutusvõrgu uuendamise sageduse mõju erinevatele väljundparameetritele kahes erinevas lainetüübis kahe erineva konfiguratsiooniga väikelaeva kere korral ning anda soovitused, millise sagedusega edaspidi simulatsioonides nimetatud arvutusvõrku uuendada. Numbrilises analüüsis kasutatakse Simcenter Star CCM+ simulatsiooniprogrammi ning vabapinna uuendamiseks AMR (*Adaptive Mesh Refinement*) aplikatsiooni, aga et tegemist on suhteliselt värske uuendusega programmis, pole selle erinevaid seadistusi ja nende mõju vabapinna uuendamisele ning muudele tulemustele seni uuritud.

2 MUDELI KIRJELDUS

Simulatsioonides kasutatav laeva kere joonisel (1) on välja töötatud Tallinna Tehnikaülikooli Kuressaare Kolledžis ning seda on kasutatud varasemalt uurimustöös, kus hinnati pritsmeliistude mõju laeva meresõidumadustele [2], [3]. Kere põhiandmed on välja toodud tabelis (1) ja on omased planeeriva, suure-kiiruselisele patrull-laevale, mis on kasutatav kas pääste- ja otsinguoperatsioonides või suurema lõbusõiduluseks. Laev on projekteeritud liikuma kiirusega $Fr = 1.355$ ja $Fr_v = 3,108$ veeväljasurvega 40t ja kiirusega 35 sõlme täisskaalas. Simulatsioonid viiakse läbi kahes erinevas lainetüübis ning nende peamised parameetrid on toodud välja tabelis (2).

Tabel 1. Laeva kere põhiandmed

Karakteristik		
Mudelskaala	λ	10
Kogupikkus	L_{OA}	1.921 m
Perpendikulaaridevaheline pikkus	L_{PP}	1.800 m
Veeliini pikkus	L_{WL}	1.703 m
Kogulaius	B_{OA}	0.581 m
Laius veeliinil	B_{WL}	0.581 m
Süvis	T	0.108 m
Massveeväljasurve	Δ_m	40 kg
Mahtveeväljasurve	∇	0.040 m ³
Raskuskese pikisuunas	L_{CG}	0.669 m
Raskuskese vertikaalsuunas	KG	0.200 m



Joonis 1. Simulatsioonides kasutatava laeva kere

Tabel 2. Lainete peamised parameetrid

Laine olukord	Laine kõrgus	Laine pikkus	Laine periood
SS3	0,88m	19,52m	3,5s
SS4	1,88m	36,9m	4,8s
Mudelskaalas	Laine kõrgus	Laine pikkus	Laine periood
SS3	0,088m	1,952m	1,107s
SS4	0,188m	3,69m	1,518s

2.1 Numbriline mudel

Simulatsioonid viiakse läbi kaubandusliku tarkvaraga Star CCM+ 2021.2 v.16.04.007. RANS (*Reynolds averaged Navier-Stokes equation*) võrrandite lahendamiseks koos k-epsilon turbulentsi mudeliga kasutatakse kaudset ebastabiilset lahendajat (*implicit unsteady solver*). Õhku ja vett hõlmav mitmefaasiline vool lahendatakse vedeliku mahu (VOF) lähenemisviisi abil, mis jälgib vabapinna piiri. Piki- ja püst-õõtsumist hinnatakse, kasutades dünaamilist vedeliku-keha interaktsiooni mudelit (DFBI). Numbrilise seadistuse ja arvutuspiirkonna peamised üksikasjad on näidatud tabelis (3).

Tabel 3. Simulatsiooni lahendaja peamised seaded

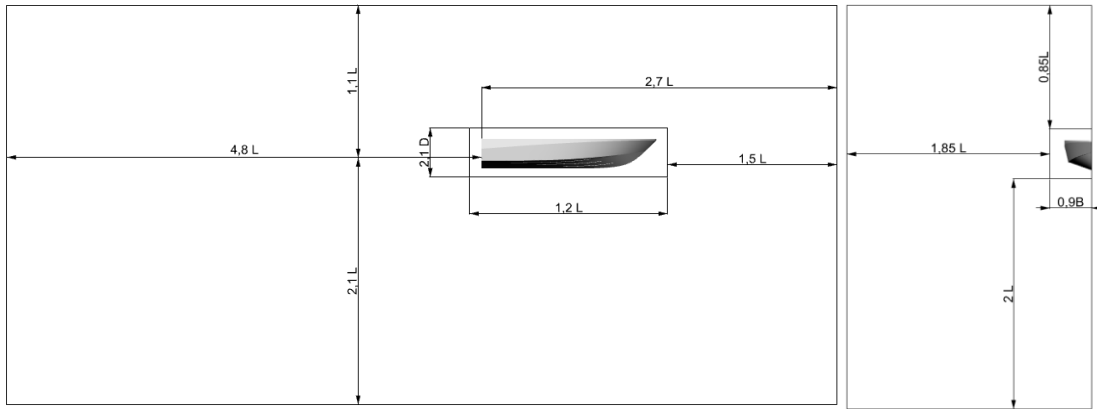
Prismakihtide arv	15
Ajasamm	Kiiruse ja võrgu suuruse funktsioon
Sisemisi iteratsioone ajasammu kohta	5
Ajaline diskretiseerimine	Esimene järk
Turbulentsi mudel	k-ε
Interpolatsiooni skeem	Lineaarne
Seina käsitus	Kahe-kihiline all y+
Konvektsioon	Teine järk
AMR täpsustamise tase	2
Väikseim kontrollmahu suurus	0,00375m
AMR uuendamise sagedus	10; 25; 50; 100

2.1.1 Arvutusdomeen

Arvutusdomeen koos olulisemate mõõdmetega on kujutatud joonisel(2). Simcenter Star CCM+ soovitude kohaselt [6] peaks domeen olema üles ehitatud sarnaselt teiste sügavas vees tehtavate analüüsidega ning eraldi tähelepanu tuleks pöörata sellele, kui kaugemale on paigutatud tanki väljalaskeava laeva ahtri perpendicularikulaarist. Oluline kriteerium on, et lained oleks täielikult lahendatud, enne kui nad jõuavad väljalaske avani. Ligikaudsed juhised on järgmised:

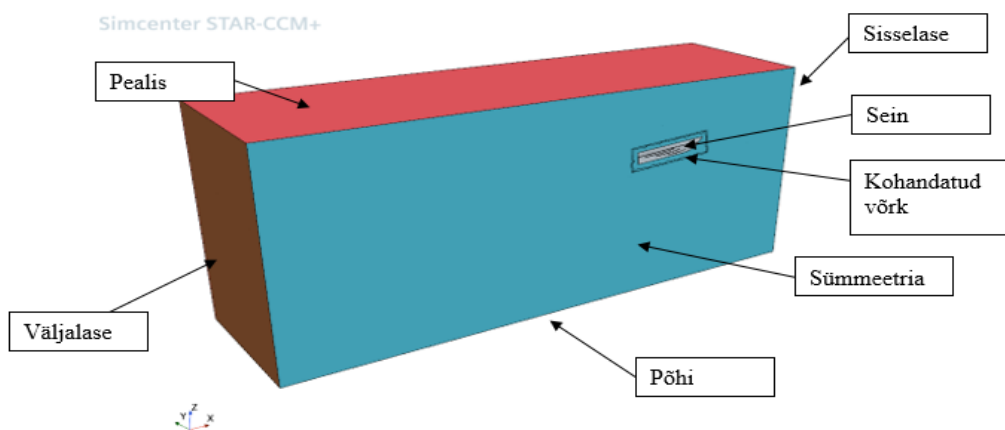
- 4 L_{pp} ahtri perpendicularikulaarist allavoolu
- 3 L_{pp} vööri perpendicularikulaarist ülesvoolu
- 3 L_{pp} külgsuunas

Käesolevas töös kasutatav arvutusdomeen erineb mõnevõrra nendest soovitudest ning on vastavalt M. Lakatoši uurimistööle [3] kujutatud joonisel 2.

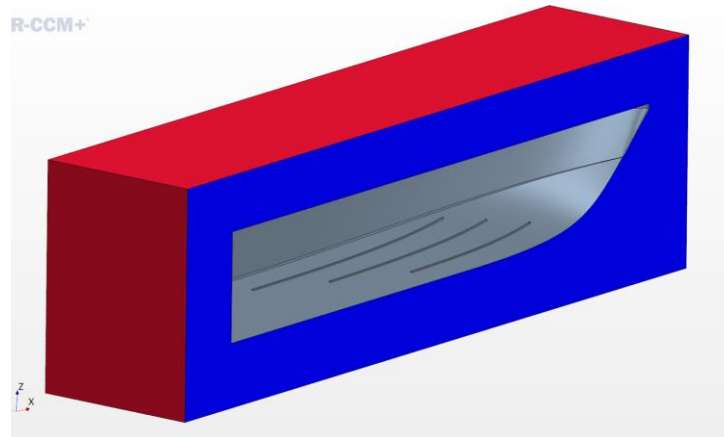


Joonis 2. Simulatsioonidomeeni peamised mõõdud

Arvutusdomeen on jagatud kaheks piirkonnaks- statsionaarne kaugvälja piirkond, mida tähistatakse kui "Tank", mis on kujutatud joonisel (3) ja liikuv piirkond, mida tähistatakse kui "Kohandatud võrk", (i.k. *overset*, joonis 4). Kaugvälja ehk tanki piirkonnas on kolme tüüpi piire: sisselase, väljalase ja sümmeetria ning liikuv kohandatud arvutusvõrgu piirkonnas sein, kohandatud võrk ja sümmeetria. Numbriline mudel kasutab lainesummutust, et vältida lainete tagasi peegeldumist sisselaskeavalt, väljalaskeavalt ja tanki külgedelt.



Joonis 3. Kaugvälja – ja kohandatud võrgu piiritingimused.



Joonis 4. Kohandatud võrgu domeen

2.1.2 Arvutusvõrk

Arvutusvõrk (i.k. *mesh*) koosneb heksaeedri-kujulistest kontrollmahtudest ning vedeliku voolu lahendamiseks piirikihis kasutatakse prismakihi võrke (i.k. *prism layer*). Simulatsiooni arvutuste tulemuse täpsus sõltub suurel määral sellest, millise kujuga kontrollmahte on arvutusvõrgus kasutatud, kõige parema täpsuse annavad teadaolevalt heksaeedri-kujulised elemendid. Vastavalt ITTC soovitudele peaks arvutusvõrk olema sümmeetriline, juhul kui ka laev seda on. Arvutusvõrk peaks ideaalis suutma korralikult lahendada kõik olulised omadused nagu vee vool, turbulentne piirikiht, keerised, lained jne. Ei ole olemas ühest soovitus, kui palju täpselt peaks simulatsioonis kontrollmahte olema, nõuded ja soovitusud ütleavad vaid, et need peavad olema piisavad, et saada tõepärased ja täpsed tulemused.

Vedelike dünaamikas ütleb seina seadus (tuntud ka kui seina logaritmiline seadus, i.k. *log law*), et turbulentse voolu keskmine kiirus teatud punktis on võrdeline selle punkti ja "seina" vahelise kauguse logaritmiga või vedeliku piirkonna piiriga. Vastavalt ITTC soovitudele peaks y^+ olema 30-100. Et kere piirikihti õigesti lahendada, ei tohiks arvutusvõrku seina normaali suunas liialt välja venitada, see suhe tuleks hoida alla 1,2.

2.1.3 Ajasamm e. *Time step*

Vabapinna uuendamine – siin kasutatakse vabapinna uuendamisel konvektiivset Couranti numbrit, mis on defineeritud kui

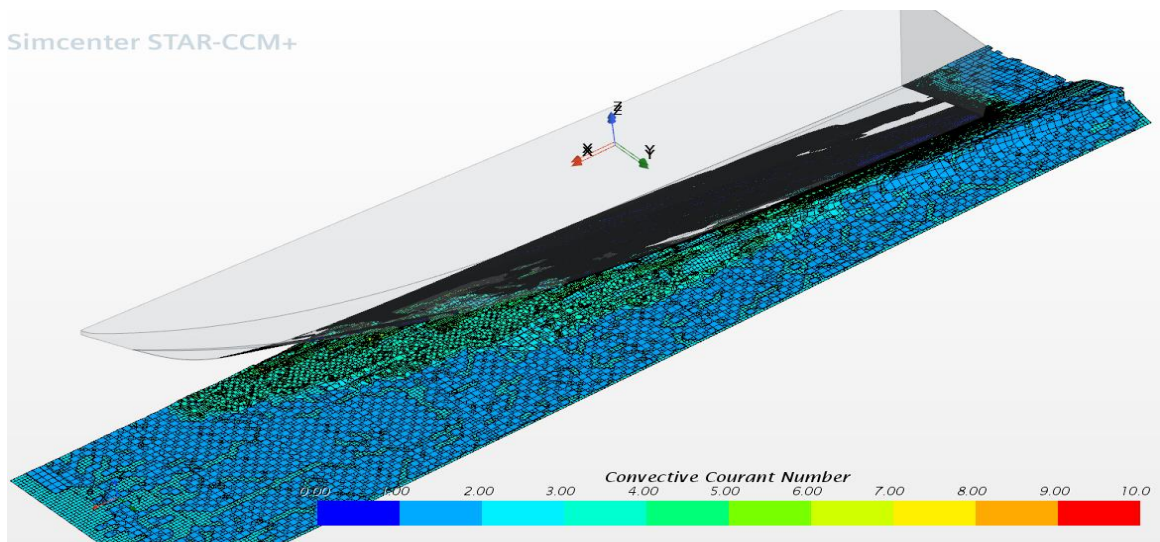
$$U * dt/dx, \quad (2.1)$$

kus U on kohalik voolukiirus $\frac{m}{s}$,

dt on ajasamm, s ja

dx on kontrollmahu kuupjuur.

Konvektiivse Couranti numbri säilitamine on paljude transientsete simulatsioonide jaoks oluline kaalutlus. Couranti numbrist sõltuva ajasammu lubamiseks saab kasutada ka konvektiivset sihtarvu (*target*). Kasutaja määratud tsoonides hoitakse see väärtus 1 juures, kui see aga peaks olema suurem kui 5, on oht ventilatsiooni tekkele. Vabapinna uuendamist ja konvektiivset Couranti numbrit on võimalik simulatsioonides ka monitoorida ja visualiseerida ning see on kujutatud joonisel (5).



Joonis 5. Konvektiivne Couranti number

Ajasamm on järkjärguline ajamuutus, mille jaoks reguleerivaid võrrandeid lahendatakse, seda kasutatakse reaajas väikeste sammudega edasiliikumiseks, et arvutada välja ebastabiilse probleemi lahendus. Kõigi vedeliku muutuste jäädvustamiseks on soovitatav valida väike ajasammu suurus. Lihtsamalt öeldes on simulatsiooni ajasamm fikseeritud ajavahemik, mille võrra simulatsioon edeneb. Star CCM+ programm kasutab võrrandite lahendamiseks iteratsioonimeetodit, st ekstreemum – ja muude ülesannete lahendite lähisväärtuste järk-järgulist leidmise meetodit. Ajasammu sisemiste iteratsioonide arvu saab kasutaja ise määrata. Loomulikult sõltub tulemuse täpsus ka arvutusvõrgu (*mesh, grid*) rakkude ehk kontrollmahtude või -pindade suurusest. Samas on võimalik simulatsioonile ajasamm anda ette funktsioonina, mida sageli ka tehakse, et hoida simulatsiooni lahendus stabiilsena. Ajasammu määramiseks kasutatakse Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) tingimust, mis näitab vedelikuosakeste läbitud punktide arvu ajasammuga võrdse ajavahemiku jooksul:

$$\frac{|\bar{u}|\Delta t}{\Delta x} = C_{max}, \quad (2.2)$$

kus $|\bar{u}|$ on kohtkiirus $\frac{m}{s}$,

Δt on ajasamm, s ja

Δx lineaarne kontrollmahu suurus voolu suunas (m).

Selgelt ebakindel (*Explicit unsteady*)- meetod arvutab süsteemi oleku hilisemal ajahetkel süsteemi hetkeseisu järgi. Siin võib Couranti number olla kuni 1.

Kaudselt ebakindel (*Implicit unsteady*)- meetod arvutab lahenduse, lahendades võrrandid, mis hõlmavad nii süsteemi hetkeseisu kui ka hilisemat. Siin võib Couranti number olla suurem kui 1. Sellisel juhul valitakse ajasamm vooluomaduste järgi.

Vastavalt ITTC 7.5-03-02-03 soovitustele tuleb:

- Lühemate lainete jaoks kasutada vähemalt 60 ajasammu või 100 ajasammu perioodi kohta tavaliste lainete jaoks.
- Muud perioodilised nähtused- 100 ajasammu perioodi kohta
- Δt peab olema väiksem kui $0,01 \frac{L}{U}$, (2.3), kui üks või kaks turbulentsi võrrandi mudelit on kasutuses ning see peab olema väiksem kui $0,001 \frac{L}{U}$, (2.4), kui on kasutusel Reynolds pingeturbulentsi mudel.

Simulatsioonis juhib ajasammu funktsioon

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{V_{kere}} = \frac{0,25BS}{V_{kere}}, \quad (2.5)$$

kus Δx on kontrollmahu suurus (25% baas-suurusest) esimeses kontrollmahu täpsustuse astmes (m) ja

V_{kere} on laeva kere kiirus $\frac{m}{s}$.

Seega määrab funktsioon ajasammu Δt nii, et $CFL=0,5$ väljaspool täpsustamise regiooni ja $CFL = 1$ üle täpsustatud regioonis esimeses astmes. Simulatsioonis on kontrollmahu baas-suuruseks (BS) 0,06m ja kiirustel vahemikus $Fr_{\bar{v}} = 1,776$ kuni 3,108 tuleb vastavaks ajasammuks

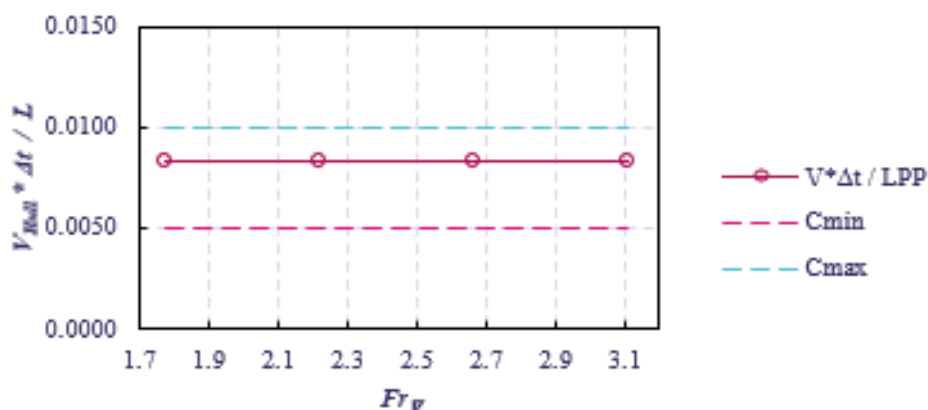
$$\frac{0,008L_{PP}}{V_{kere}} \quad (2.6)$$

kus L_{PP} on laeva perpendikulaaride vaheline pikkus (m)

ning see rahuldab ITTC soovitusi [7], kus

$$\Delta t = \frac{0,01 \sim 0,005 L_{PP}}{V_{kere}} \quad (2.7)$$

Ajasammu miinimum-, maksimum- ja kasutuses olevad väärtused on kujutatud joonisel(6).



Joonis 6. Ajasammu valik simulatsioonis

2.1.4 Adaptiivne võrgu täpsustamine (AMR)

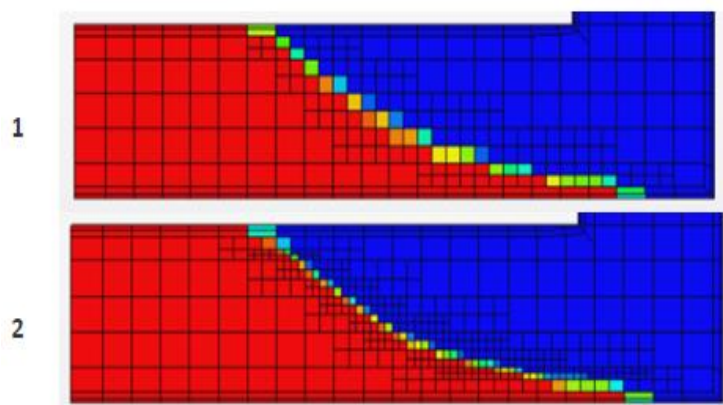
Vabapinna arvutusvõrgu täpsustamine (*Free Surface Mesh Refinement*) on adaptiivse võrgusilma täpsustamise (*AMR*) kriteerium, mis on loodud VOF mitmefaasiliste simulatsioonide jaoks. See meetod täpsustab või järestab mahuvõrgu rakke, et parandada faasidevahelise liidese eraldusvõimet. Mõne stsenaariumi korral on vajalik piirata täpsustamist teatud piirkondades või mahtudes. Rakkude arvu optimaalsena hoidmiseks laeva kere ja lainete interaktsiooni vahel on soovitatav, et kere ümbruses oleks arvutusvõrk väga peen ehk kontrollmahtude suurus väga väike, säilitades samal ajal kontrollmahtude suuruse kerest eemal suhteliselt suurena. Kontrollmahu suurust saab kontrollida, määrates tema suurusele miinimumi, millest väiksemaks neid ei genereerita, kuid seda väärtust rakendatakse siis kõikidele vabadele pindadele. Et seda vältida, saab kontrollmahu suuruse soovitud asukohas anda ette funktsioonina, mitte konstantse väärtusena. See aitab kokku hoida simulatsiooni arvutamise aega ja tõstab tulemuse usaldusväärsust ja täpsust. AMR poolitab igas suunas kontrollmahud, see on soovitatud just lainetes simuleerimisel. Simulatsioonis on kasutusel algne mahuline täiustus, mis tekitab sobiva suhte laine piirkonnas kontrollmahtudel ja kui AMR rakendub, siis viimane hoiab selle kontrollmahu suhte alles. Levinud tava ja soovitus

Simcenter Star CCM+ kohaselt on hoida kontrollmahu suhe 1:4 ning see on ka simulatsioonides rakendatud.

Üksikasjad võrgu loomise protsessi kohta sõltuvad suuresti lahendajast ja ruudustiku tüübist, mida ta suudab käsitleda (struktureeritud mitme plokiga, struktureerimata, ülekoormatud jne) ning ITTC-s on mõned üldised juhised, mis kehtivad enamiku lahendajate kohta. Üldiselt kirjeldab ITTC arvutusvõrgu loomise osa väga üldiselt ning mingeid konkreetseid nõudeid rakkude suurusele ja kvantiteedile ei sea.

Et mõista, kuidas erinevaid AMR sätteid häälestada, oleks kasulik mõista, kuidas vaba pinna täpsustamise mudel töötab. Mudeli eesmärk on tagada terav VOF-liides, ent need täpsustamise kriteeriumid ei täpsusta lahtrid, mis juba sisaldavad liidest, selle asemel püüab algoritm ennustada olemasoleva liidese asukohast allavoolu olevaid kontrollmahte ja käivitab nende lahtrite täpsustamise, kui vaba pind nendesse lahtritesse liigub. Algoritm kasutab täpsustamiseks määratud värskendamissagedust ja allpool kirjeldatud sätteid, et ennustada, kuhu liides liigub enne järgmist AMR-i sündmust ning märgib need lahtrid täpsustamiseks [8].

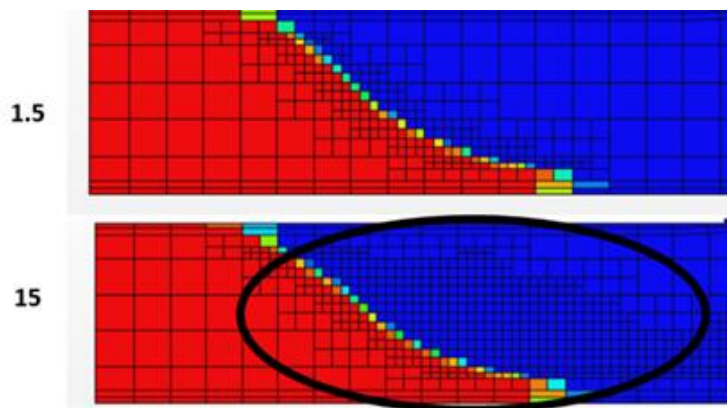
Maksimaalne täpsustustase- sellega määratakse, mitu korda lahtrit täpsustatakse. Tuleb märkida, et ühe AMR-i sündmuse korral täpsustatakse lahtrit ainult ühe taseme võrra. Oletame, et meil on 8mm nelinurkne kontrollmaht. Ühe täpsustustasemega viimistletakse seda 4mm-ni ja juhul kui on lubatud kaks täpsustustaset, siis vastavalt 2mm-ni, kuid edasine täpsustamine blokeeritakse. Näide joonisel (7):



Joonis 7. Erinevad täpsustustasemed [8]

Liidese tuvastamise eraldusvõime kriteerium- kasutatakse vaba pinda ja VOF-liidest sisaldavate kontrollmahtude tuvastamiseks. Teisisõnu, liides, mis on lahendatud määratud kontrollmahtude arvu järgi, käivitab täpsustamise.

Läbitud kauguse hinnangutegur- kasutatakse selleks, et määrata, kui kaugele tuleb kontrollmahte kahe AMR-i sündmuse vahel täpsustada. Liidesele on võimalik anda väärtus nii üles- kui allavoolu, kui ülesvoolu liides puudub, seatakse väärtuseks lihtsalt null. Mõnel juhul võib vaba pind kohalike voolutingimuste muutumise tõttu rafineeritud tsoonist välja liikuda ja sellistel juhtudel on soovitatav suurendada allavoolu hindamistegurit.

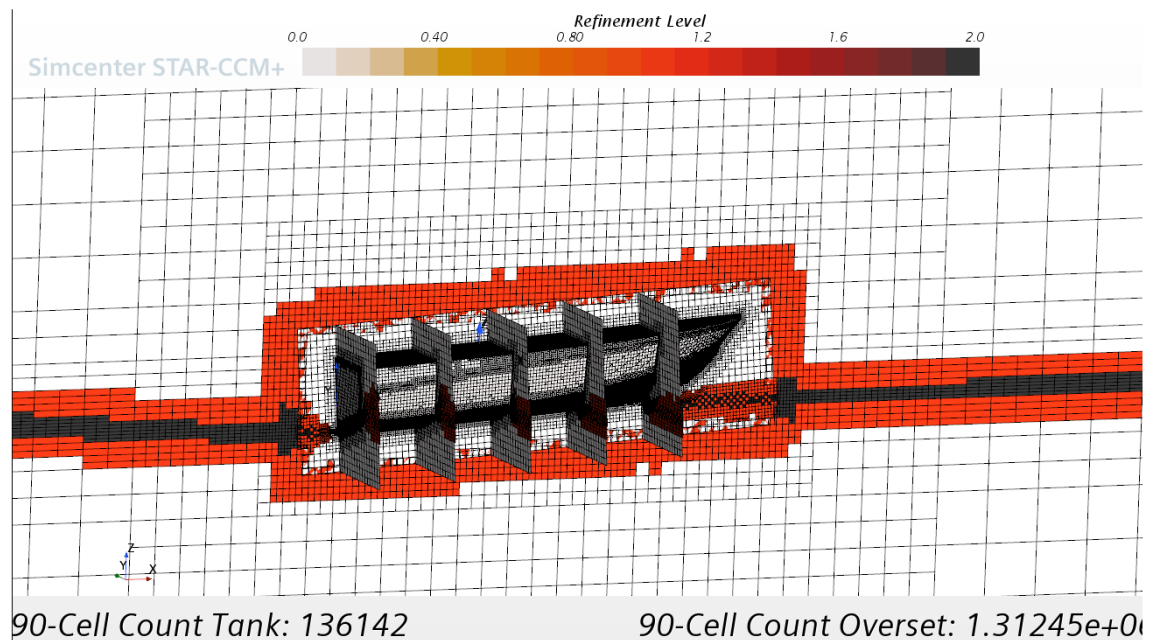


Joonis 8. Läbitud hinnangukauguse mõju [8]

Viimane võimalus on määrata raku suurus, millest väiksemaid rakke ei täpsustata. Teisisõnu, kui täpsustamine on vajalik määratud suurusest väiksemas lahtris, siis täpsustamine blokeeritakse. See tuleks hoolikalt valida, kuna väga suure lahtri määramine võib blokeerida kogu domeeni täpsustamise.

Simulatsioonis on lainepikkuseks 3,69m ning kontrollmahu pikkuseks 0,03m, seega on ühe laine pikkuse kohta meil kontrollmahte $3,69:0,03=123$ tk, soovitus on omada perioodilistes simulatsioonides, kus on kasutusel lained, 100 või rohkem kontrollmahtu - seega on see nõue vastavuses ITTC soovitustega.

Kuna AMR on suhteliselt uus Star CCM+ aplikatsioon, siis sellise lähenemise kohta pole ITTC dokumendis sõnagi, Star CCM+ Support Center kohaselt ei ole olemas ühtseid arvutusvõrgu kvaliteedikriteeriume. On tehtud jõupingutusi, et lahendada võrgusilma kvaliteediprobleeme, mis on mõjutanud konvergentsi nii otse mahuvõrkude sees kui ka lahendajas. Võrgusilma genereerimise käigus tekkivaid halva kvaliteediga rakke saab tuvastada ja eemaldada kasutades vigaste lahtrite eemaldamise tööriista. See tööriist on mõeldud lahti ühendatud rakkude või peaaegu nullmahuliste rakkude eemaldamiseks. Lahendaja saab hakkama marginaalse rakukvaliteediga rakkudega. Simulatsioonides rakendatav täpsustamise tase on kujutatud joonisel (9)



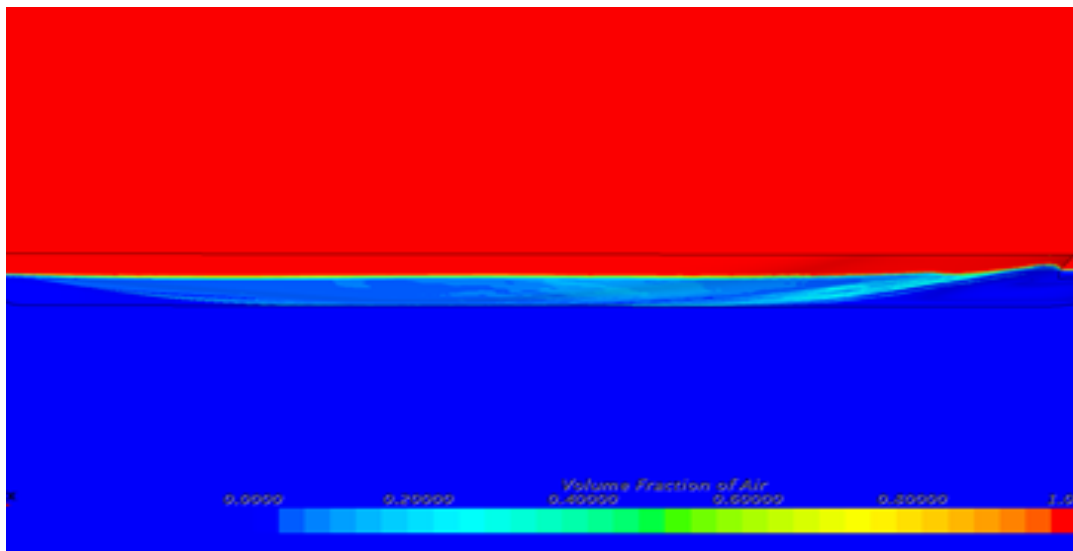
Joonis 9. Adaptiivse võrgu täpsustamise tase

2.1.5 Ventilatsioon

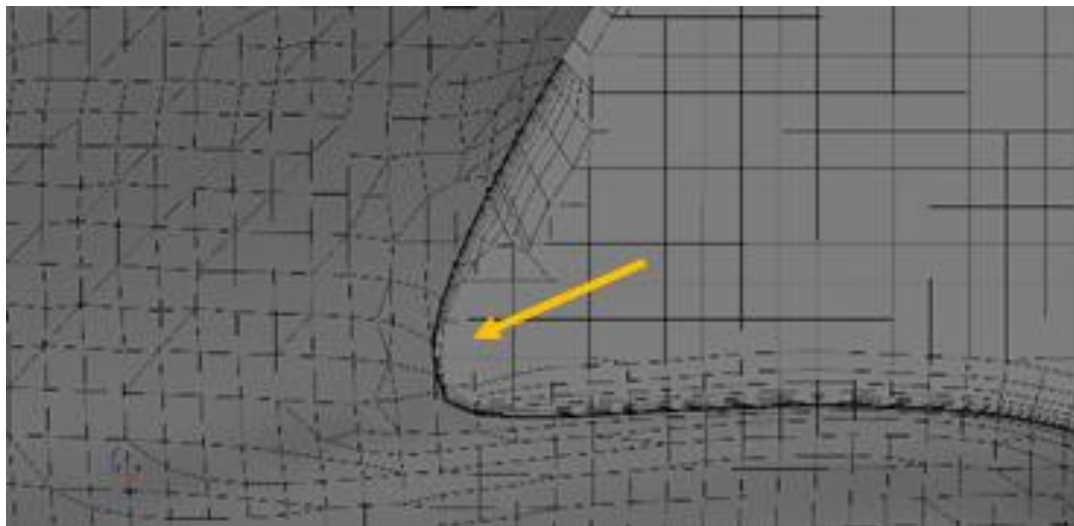
Üks levinumaid probleeme, mis kere simulatsioonide tegemisel tekkida võib, on ventilatsioon ehk vedeliku mahu (VOF-i) hajumine domeenis. See esineb siis, kui vaba pinna liides hajub ja moondub nagu joonisel(10), mis põhjustab lahenduses ebatäpsusi. Probleemi põhjuseid võib olla mitu, ning ventilatsiooni vältimiseks tuleks läbida soovitud [9] kohaselt järgmised sammud:

- Esimese asjana tuleb teha lihtne kontroll veendumaks, et mudelit on jooksutatud piisavalt kaua, et vedeliku vool areneks ning jäägid ja simulatsiooni väljundid oleksid ühtlustunud. Kui simulatsiooniparameetrid ei ole ühtlustunud, tuleb seda võib-olla täiendavalt käivitada.
- Üks ventilatsiooni põhjusi võib olla ka kere geometria. Kui modelleerimisprogrammiga loodud pinnad on ebatasased või vööri lähedal on teravaid jooni, kus laine tabab kere, põhjustab see ventilatsiooni. Sellistel juhtudel tuleb kere geometria enne STAR-CCM+ importimist parandada.
- Väga paljudel juhtudel on ventilatsiooni põhjuseks arvutusvõrk. Vööri ees olev arvutusvõrk peab olema väga hästi viimistletud, et tabada laine löök kerele. Täpsustusplokk peaks olema vöörilaine tabamiseks piisavalt suur. Jäme arvutusvõrk või ebaühtlased prismakihid vööris, nagu näidatud joonisel(11), võivad põhjustada ventilatsiooni.

- Ajasamm võib olla ka üheks ventilatsiooni põhjuseks. Tuleb jälgida vabapinnal olevat Courant'i numbrit ja veenduda, et see on väiksem kui 5. Kui see on suurem kui 5, näitab see, et ajasammu võib olla vaja vähendada.
- Mõnel juhul on ventilatsiooni põhjuseks lainete peegeldumine domeeni ehk tanki piiridelt. Sellistel juhtudel tuleks kasutada lainesummutamist ja seada see nii kaugemale, et peegeldunud lained oleksid piisavalt summutatud.



Joonis 10. Ventilatsioonist põhjustatud vaba pinna hajumine [9]



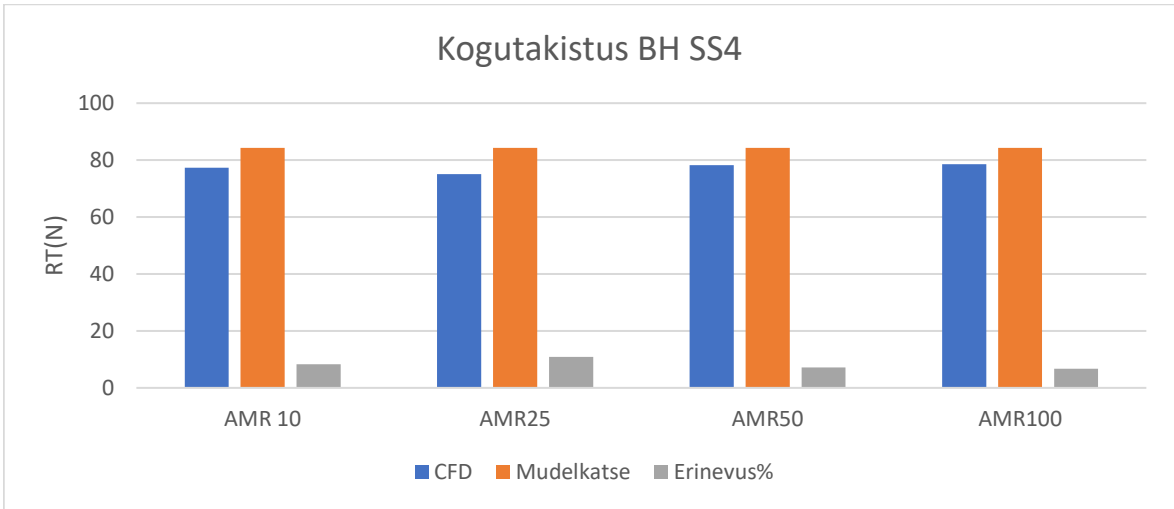
Joonis 11. Geomeetriast põhjustatud halb arvutusvõrk [9]

3 TULEMUSED

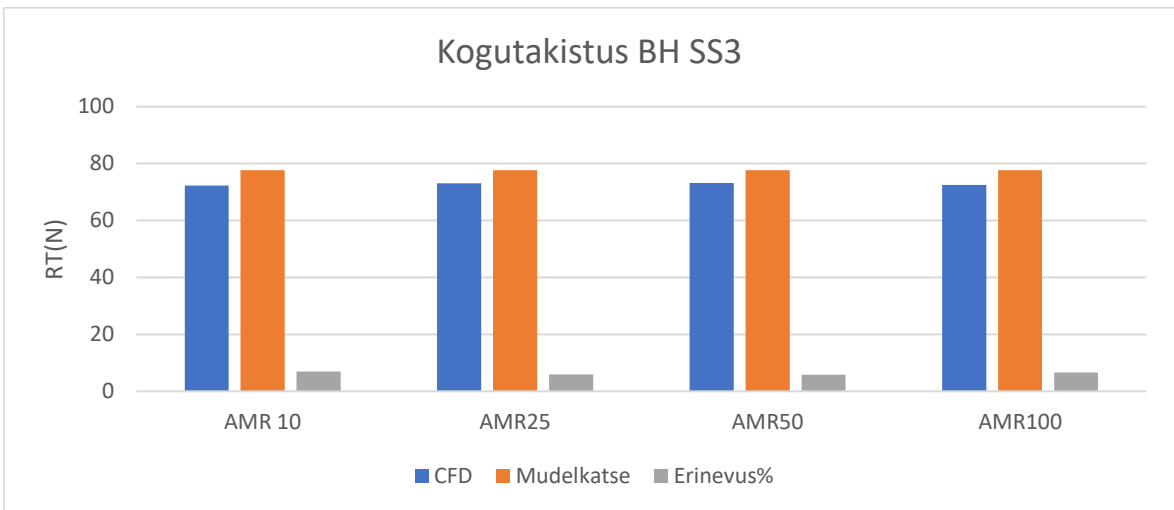
Simulatsioonide kogutakistuse ja kiirenduste graafikutest (esitatud Lisades) on näha, et igal graafikul esineb niinimetatud stabiliseerumata osa, hinnanguliselt umbes 1,5 sekundi jooksul simulatsiooni algusest. Sellest osast tulenevad andmed ei ole usaldusväärsed ning seetõttu ei ole tulemuste hindamisel seda osa arvesse võetud. Samas on ka näha, et väiksemate AMR sageduste juures esineb takistuse ja kiirenduste graafikutel nn hajumine- jooned on laiad, konkreetset väärtust mingil ajahetkel on leida keeruline. Nagu näha, on see asjaolu põhjustatud AMR-i uuendamise sagedusest, jooned lähevad loetavamaks, kui sagedus on 50 või rohkem. Joonistel(12, 13, 14 ja 15) on esitatud simulatsioonides saadud kogutakistuse väärtused kahe erineva lainetüübi korral ning võrreldud neid mudelkatsetes leitud tegelike tulemustega.

3.1 Kogutakistus

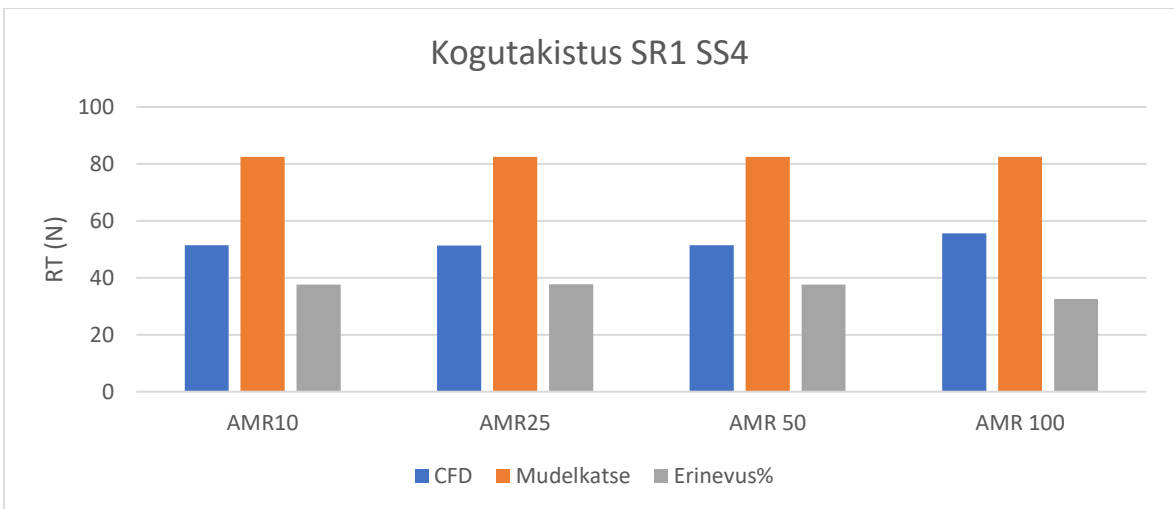
Kogutakistuse hindamisel võeti arvesse saadud takistuste aritmeetilisi keskmisi väärtusi. Nagu näha, erineb SR1 kere puhul kogutakistuse väärtus lubamatult palju mudelkatses saadud tulemusest, ulatudes 25-37 protsendini. Selle põhjuseks, nagu peale simulatsioonide läbiviimist selgus, oli dimensioonitu Courant´i numbri maksimaalväärtuseks (peab olema 10), seatud millegipärast hoopis lainekõrgus meetrites (0,88m). Lisaks kirjeldatud väärtuse parandamisele muudeti hilisemas simulatsioonis ka DFBI moodulis laeva kere y-telje suunalist inertsimomenti, mille algse väärtuse paneb paika Simcenter STAR CCM+ -i apliksatsioon *Hull Performance Workflow*, tuntud ka lühendiga EHP. Uus inertsimomendi väärtus saadi mudelkatse raportitest. Peale kontroll-simulatsiooni läbiviimist saadi takistuste erinevuseks võrreldes mudelkatsega 9%, mida võib lugeda usaldusväärseks. Üldiselt võib öelda, et AMR sageduste muutmine takistuste väärtusi ei muutnud ja võrdluses mudelkatsetega on erinevus lubatu piires, vastavalt üldlevinud praktikale on lubatud erinevus kuni 10 %. Kui jätta mudelkatsete tulemused kõrvale, on erinevus veelgi väiksem.



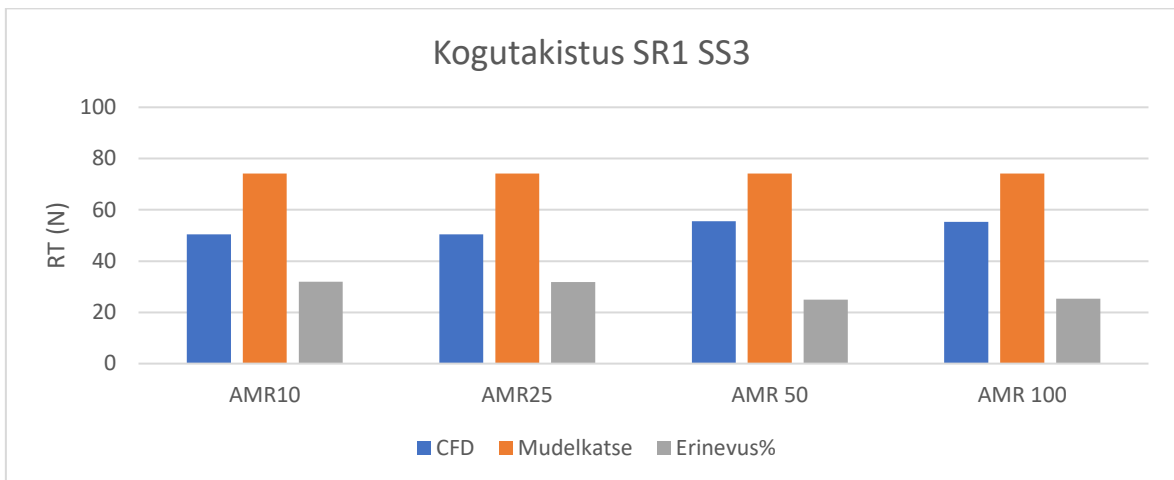
Joonis 12. Kogutakistus BH SS4



Joonis 13. Kogutakistus BH SS3



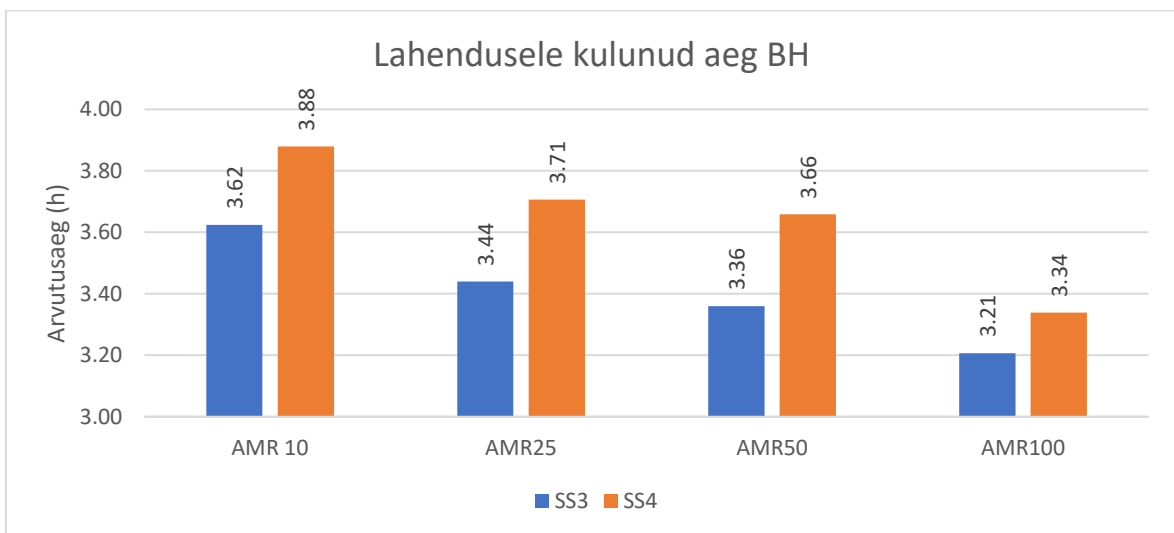
Joonis 14. Kogutakistus SR1 SS4



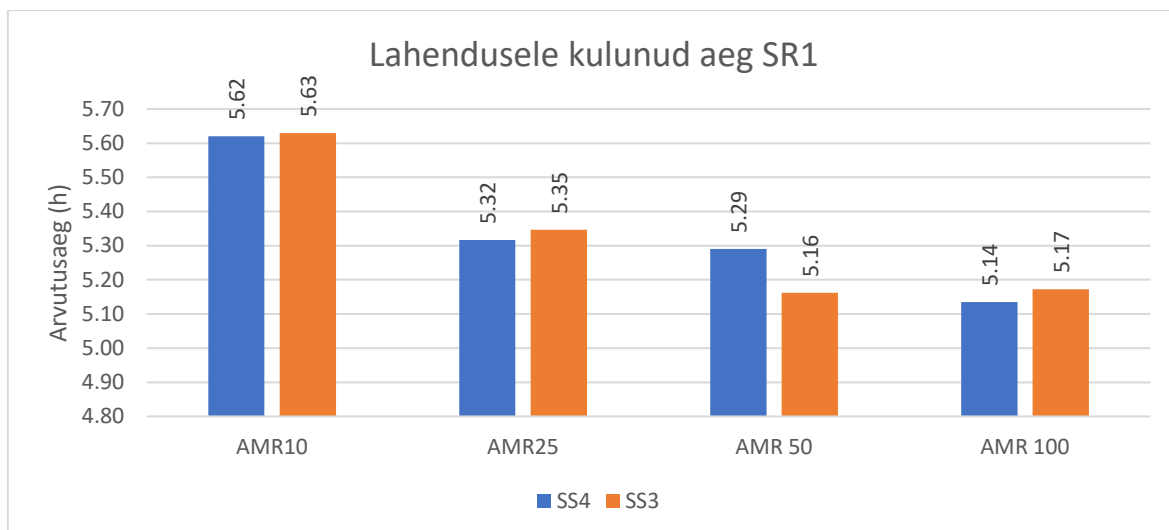
Joonis 15. Kogutakistus SR1SS3

3.2 Arvutusaeg

AMR sageduse suurendamine vähendab mõningal määral simulatsiooni lahendamiseks kuluvat aega, täpsemad väärtused joonistel(16 ja 17). Erinevus pritsmeliistudeta ja pritsmeliistudega kere lahendusele kulunud ajast tuleneb simulatsioonide erinevast peatumise kriteeriumist, esimesel juhul oli see 8335, teisel juhul 13335 sisemist iteratsiooni. Keskmiselt vähenes simulatsiooni läbiviimise aeg poole tunni võrra.



Joonis 16. Pritsmeliistudeta kerega lahendusele kulunud aeg

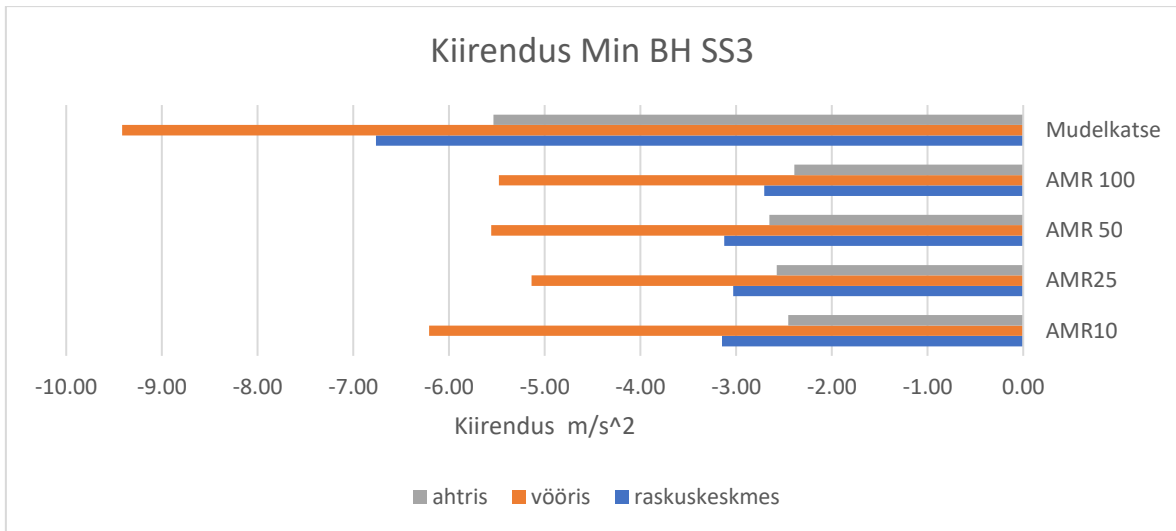


Joonis 17. Pritsmeliistudega kerega lahendusele kulunud aeg

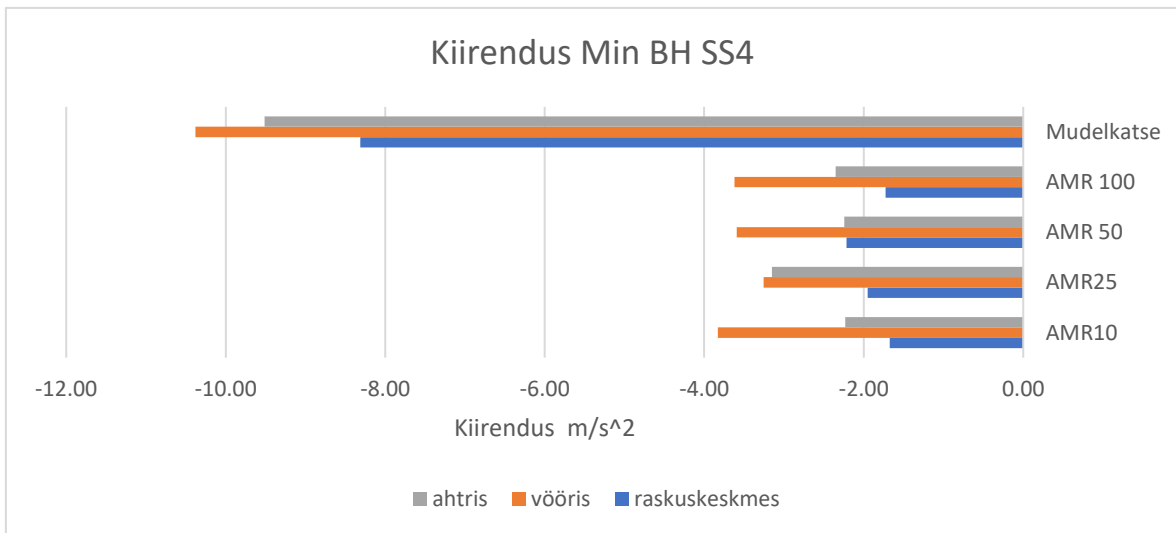
3.3 Kiirendused

Kiirenduste mõõtepunktid on simulatsioonides paigutatud sarnaselt mudelkatsele, ahtri poolt arvestades 155mm, 670mm (raskuskeskmesse) ja 1700 mm kaugusele, kuid nagu joonistel (18 kuni 25) näha, ei kattu need absoluutselt mudelkatsetes saadud väärtustega, erinedes lausa suurusjärkude võrra. Kui aga jätta mudelkatsete tulemused kõrvale, võib väita, et AMR sageduste suurendamine vähendab mõningal määral kõiki erinevate kiirenduste väärtusi, jäädes vahemikku 3-6%, kuid ühel juhul (joonis 22) on kiirenduste väärtused langenud isegi kuni poole võrra. Ilmselt ei ole simulatsioonist saadud kiirenduste väärtused hetkel usaldusväärsed, SR1 kere puhul võib probleemiks olla juba varasemalt kirjeldatud vale Courant´i sihtarv, kuid see ei pruugi olla ka ainuke põhjus. Pritsmeliistudega kere korral erinevad simulatsiooni ja mudelkatsete tulemused suurusjärgus umbes 10 korda. Kontrollsimulatsioonis, kus sai parandused sisse viidud, tuli erinevuseks umbes 5 korda.

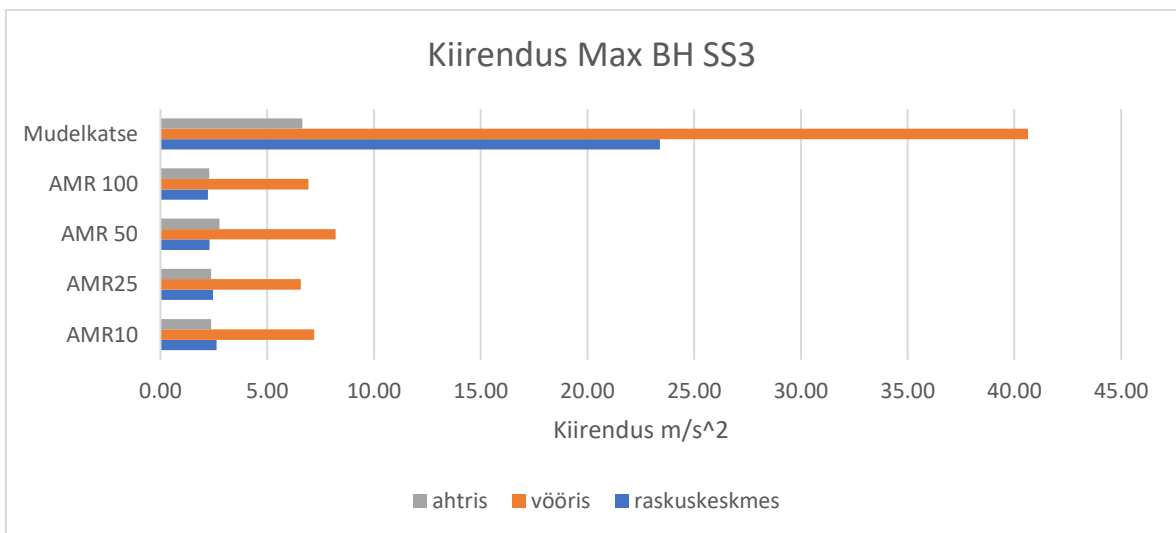
Pritsmeliistudeta kere korral erinevad saadud tulemused vähem- miinumkiirenduste korral jäävad need vähemalt samasse suurusjärku, kuid ulatuvad on siiski kuni 40%-ni, maksimumkiirendused seevastu jällegi kuni kümme korda. Samuti ei ole loogiline, et SS4 lainetüübis on kiirenduste väärtused väiksemad kui SS3 lainetüübi korral.



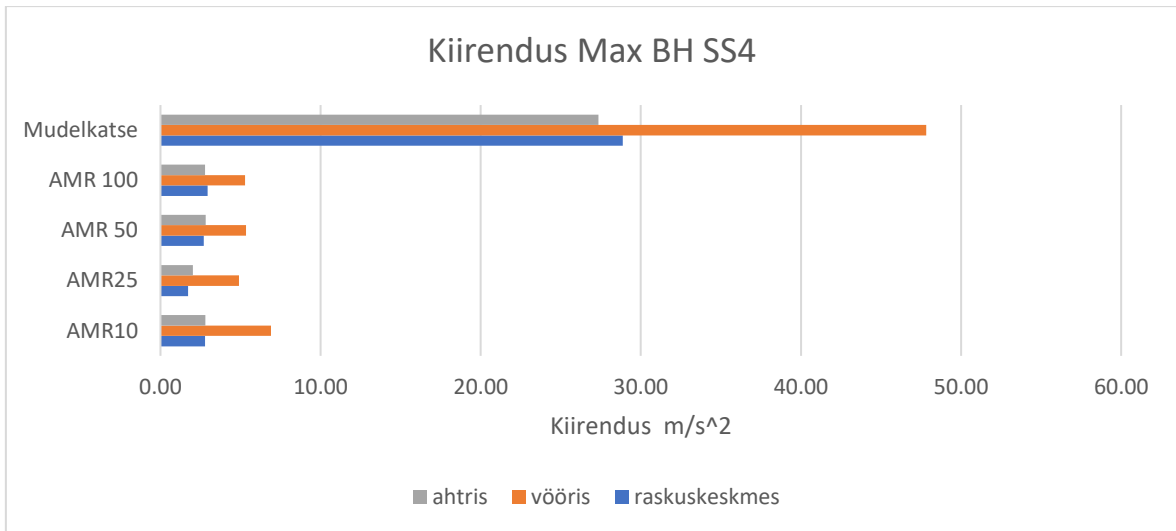
Joonis 18. Miinimumkiirendused BH SS3



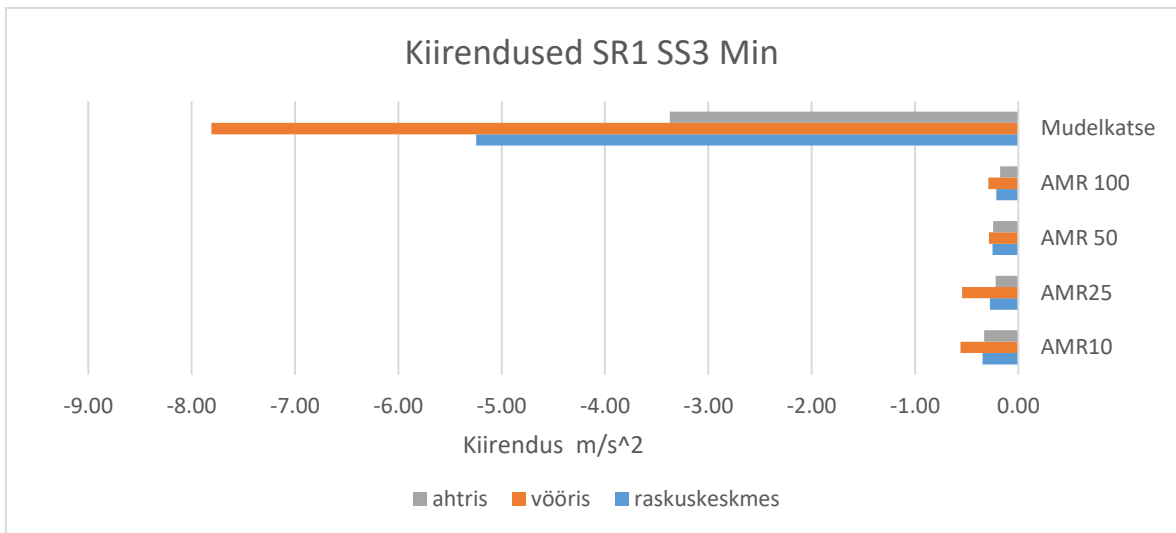
Joonis 19. Miinimumkiirendused BH SS4



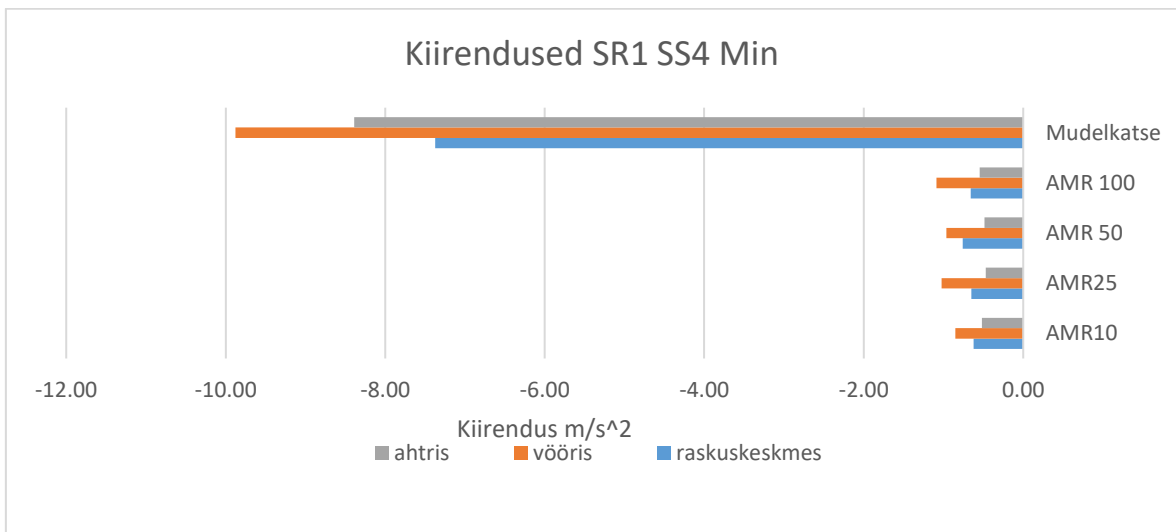
Joonis 20. Maksimumkiirendused BH SS3.



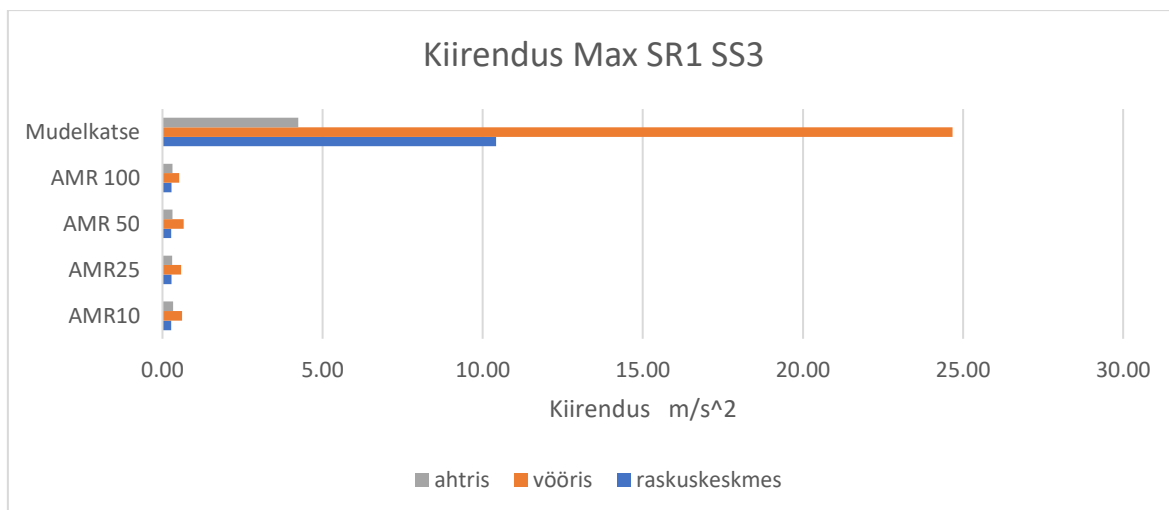
Joonis 21. Maksimumkiirendused BH SS4



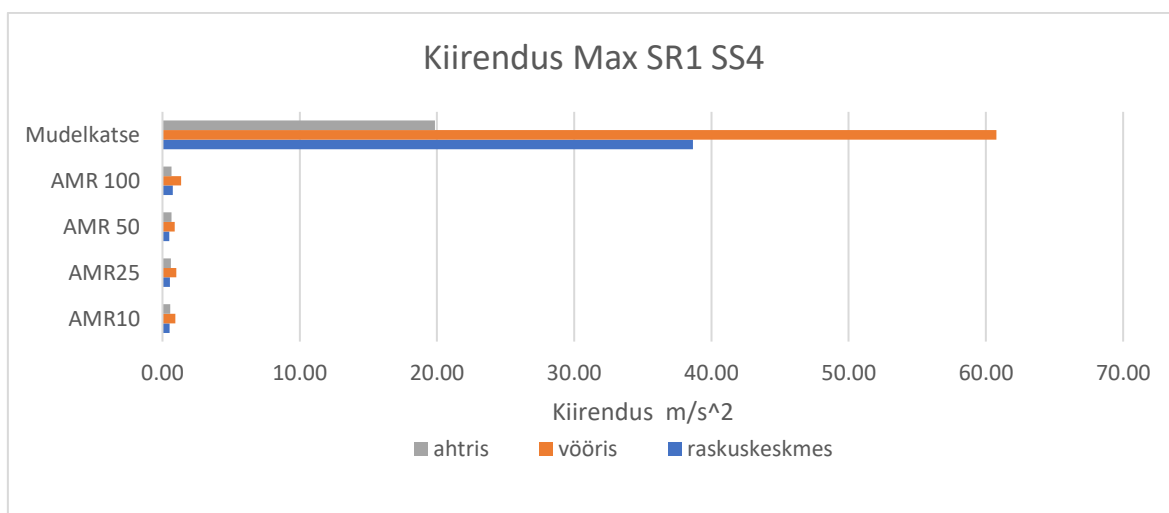
Joonis 22. Miinimumkiirendused SR1 SS3



Joonis 23. Miinimumkiirendused SR1 SS4



Joonis 24. Maksimumkiirendused SR1 SS3

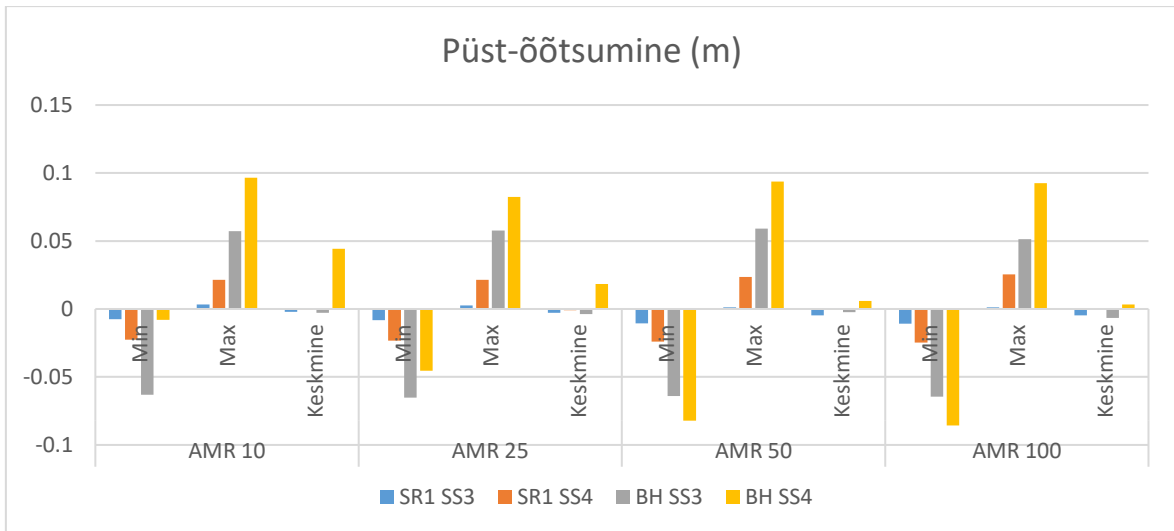


Joonis 25. Maksimumkiirendused SR1 SS4.

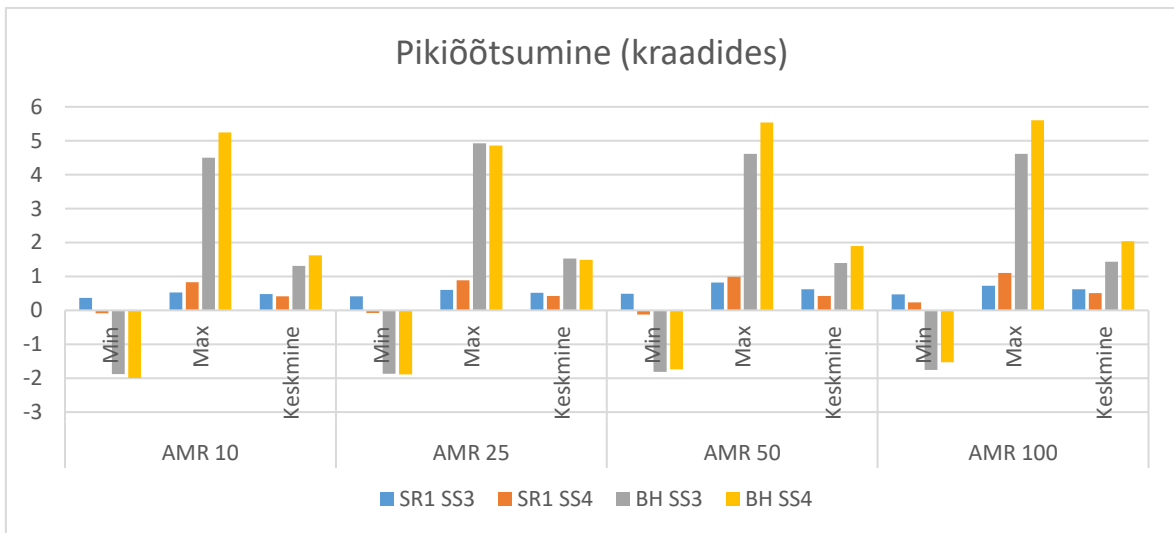
3.4 Püst- ja pikiõõtsumine

Püst-õõtsumisi kirjeldavalt jooniselt (26) võib näha, et AMR sageduse muutmine ei mõjuta saadud maksimumväärtusi ja sama võib väita ka miinimumväärtuste kohta, kuid ühe erandiga- pritsmeliistudeta kere ja SS4 laineolukorras on püst-õõtsumise miinimumväärtus AMR sagedustel 50 ja 100 oluliselt tõusnud.

Seevastu piki-õõtsumist ehk trimmi kirjeldavalt jooniselt (27) on näha, et AMR sageduste muutmine mingeid olulisi kõrvalekaldeid ei põhjustanud. Mudelkatsetega võrdlus puudub, kuna sealsetes raportites on basseinikatsetes saadud väärtused töödeldud täisskaalasse ja pole võrreldavad. Märkimisväärne erinevus pritsmeliistudega ja ilma pritsmeliistudeta kere vahel vajab tulevikus täiendavat uurimist nii püst- kui ka piki-õõtsumise korral.



Joonis 26. Püst-õõtsumine erinevate konfiguratsioonide korral



Joonis 27. Piki-õõtsumine erinevate konfiguratsioonide korral

Kokkuvõttena tulemustest võib öelda, et AMR sageduste muutmine ei mõjuta saadud kogutakistuse väärtusi, kuid simulatsioonid alahindavad takistuste väärtusi vahemikus 6-10%, mis vastab üldlevinud praktikale. Kui määrata simulatsioonides AMR uuendamise sageduseks 50 või 100 ajasammu, vähendab see simulatsioonide lahendamise aega 8-12%, ajaliselt umbes pool tundi. Mõne üksiku erandiga võib väita, et ka kiirenduste väärtused jäid muutumatuks, kuid siiski vajab edasine töö tähelepanu, et viia kiirenduste väärtused vastavusse mudelkatsetest saadud väärtustega või otsida põhjuseid, miks need ei kattu. Piki- ja püst-õõtsumiste tulemuste puhul tuleks esmalt selgitada välja, kuidas kõrvutada saadud andmeid mudelkatse andmetega ning hinnata seejärel simulatsioonist saadud tulemuste usaldusväärsust.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli hinnata Simcenter STAR CCM+ simulatsiooniprogrammis adaptiivse kohandatava arvutusvõrgu (*Adaptive Mesh Refinement, AMR*) uuendamise sageduse mõju erinevatele väljundparameetritele, nagu laevakere kogutakistusele regulaarsetes lainetes, piki- ja püst-õõtsumisele, kerele mõjuvatele kiirendustele ahtris, vööris ja raskuskeskmes ning anda hinnang, kuidas mõjutab nimetatud sageduse vähendamine simulatsiooni lahendamiseks kuluvat aega.

Simulatsioonid viidi läbi väikelaeva mudelskaalas kerega, mis ühel juhul oli varustatud pritsmeliistudega ja teisel juhul mitte. Kasutati kahte erinevate parameetritega regulaarseid laineid, rakendades neid mõlemale kerele. Simulatsioonid viidi läbi AMR uuendamis-sagedustega 10; 25; 50 ja 100 ajasammu. Esmalt võrreldi simulatsiooni ülesehitust ja vastavust ITTC ja Simcenter STAR CCM+ programmi arendajate poolt antud soovitude ja levinud praktikatega.

Tulemusena leiti, et erinevatel AMR sagedustel jäid kogutakistuse väärtused muutumatuks ning võrreldes mudelkatsetega alahindas simulatsioon takistuste väärtusi vahemikus 6-10%, mis üldlevinud praktikate kohaselt on aktsepteeritav tulemus.

Kiirenduste väärtused jäid ühe erandiga samuti muutumatuks, kuid erinevuste tõttu mudelkatsetega tuleks edaspidi uurida, kuidas viia simulatsioonist saadud andmed vastavusse mudelkatsetega.

Ühe ettepanekuna võiks leida ahtri ja vööri kiirendused raskuskeskme suhtes läbi nurkkiiruse. Piki- ja püstõõtsumiste puhul samuti AMR sageduse muutmine ühe erandiga saadud tulemusi ei mõjutanud, edaspidises töös tuleks aga andmeid võrrelda mudelkatsetega, et veenduda nende usaldusväärsuses. Edaspidistes simulatsioonides on soovitatav uuendada AMR sagedusega 50 või 100, kuna olulisi kõrvalekaldeid see tulemustele ei põhjusta ning läbi selle väheneb ka simulatsioonide lahendamiseks kuluv aeg.

CONCLUSION

The aim of the dissertation was to evaluate the effect of the Adaptive Mesh Refinement (AMR) update frequency in the Simcenter STAR CCM + simulation program on various output parameters such as total hull resistance in regular waves, longitudinal and vertical oscillation and hull acceleration, stern thrust, this reduction in frequency affects the time taken to complete the simulation.

The simulations were performed on a model scale of a recreational craft with a hull, in one case equipped with spray rails and in the other not. Two regular waves with different parameters were used, applying them to both bodies. Simulations were performed with AMR update frequencies of 10; 25; 50 and 100 time steps.

First, the simulation design and compliance with the recommendations and common practices provided by the ITTC and Simcenter STAR CCM + program developers were compared.

As a result, it was found that the values of the total resistance remained unchanged at different AMR frequencies, and compared to the model tests, the simulation underestimated the resistance values in the range of 6-10%, which is an acceptable result according to common practices.

With one exception, the acceleration values remained unchanged, but due to differences in the model tests, it should be further investigated how to reconcile the simulation data with the model tests. One suggestion would be to find stern and bow accelerations relative to the center of gravity through angular velocity.

In the case of pitch and heave, the change of the AMR frequency also did not affect the results obtained with one exception, but in future work the data should be compared with model tests to ensure their reliability.

In future simulations, it is recommended to update the AMR at a frequency of 50 or 100, as this will not cause significant deviations in the results and will reduce the time required to complete the simulations.

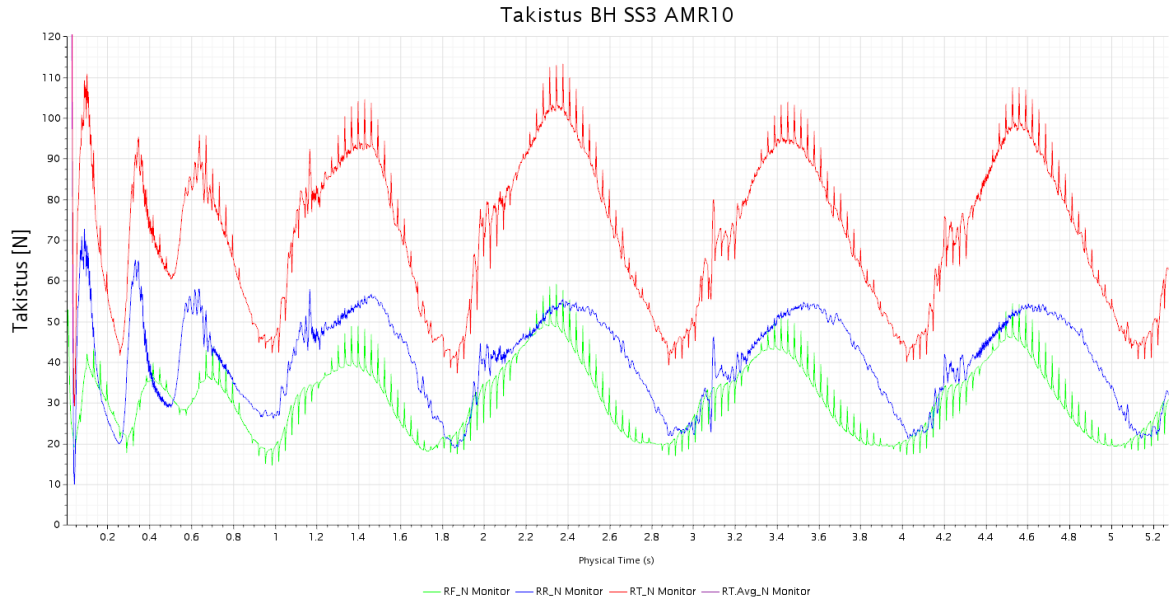
Kasutatud kirjandus

- [1] J. Laanearu, „Rakenduslik hüdroomehanika,“ 2019, pp. 1-20.
- [2] M. Lakatoš, T. Sahk, H. Andreasson ja K. Tabri, „The effect of spray rails, chine strips and V-shaped spray interceptors on the performance of low planing high-speed craft in calm water,“ *Applied Ocean Research*, kd. 122, 2022.
- [3] M.Lakatoš, K.Tabri, A.Dashtimanesh, H.Andreasson, „Numerical Modelling of a Planing Craft with a V-Shaped Spray Interceptor Arrangement in Calm Water,“ *12th Symp. High Speed Mar. Veh. HSMV 2020*, pp. 33-42, 2020.
- [4] B.Molchanov, S.Lundmark, M.Fürth, M.Green, „Experimental Validation of Spray Deflectors for High Speed Craft,“ *Ocean Engineering*, kd. 191, 2019.
- [5] Fabio DeLuca, Salvatore Miranda, Simone Mancini, Claudio Pensa, „An Extended Verification and Validation Study of CFD Simulations for Planing Hulls,“ *Journal of Ship Research*, kd. 60(2), pp. 101-118, 2016-06-01.
- [6] Center, Simcenter STAR CCM+ Support, „Best Practices for High Speed Craft Resistance Simulations,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000045360_EN_US?pid=sc%3Atypeahead&index=content-external&audience=externa. [Kasutatud 13 12 2021].
- [7] ITTC, „7.5-03-02-03 Practical Guidelines for Ship CFD Applications, pp.1-20,“ %1 28th, 2017.
- [8] Center, Simcenter STAR CCM+ Support, „What are the Free Surface Mesh Refinement Controls?,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000040330_EN_US?pid=sc%3Atypeahead&index=content-external&audience=external. [Kasutatud 14 12 2021].
- [9] Center, Simcenter STAR CCM+ Support, „How to debug hull ventilation?,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000034166_EN_US?pid=sc%3Atypeahead&index=content-external&audience=external. [Kasutatud 14 12 2021].
- [10] J. Suneela, P. Krishnankutty ja V. Anantha Subramanian, „Numerical investigation on the hydrodynamic performance of high-speed planing hull with transom interceptor,“ *Ships and offshore structures*, kd. 15, pp. 134-142, 2020-12-30.
- [11] Center, Simcenter STAR CCM+ Support, „Is there a tool to check mesh quality? What is a minimum requirement to guarantee a converged solution in terms of mesh quality?,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000035471_EN_US?pid=sc%3Atypeahead&index=content-external&audience=external. [Kasutatud 13 12 2021].
- [12] Emre Kahramanoglu, Ferdi Çakıcı * and Ali Dogrul, „Numerical Prediction of the Vertical Responses of Planing Hulls in Regular Head Waves,“ *Journal of marine science and engineering*, kd. 6, pp. 1-18, 2020-06-01.
- [13] Nimmagadda, Naga Venkata Rakesh ; Polisetty, Lokeswara Rao ; Vaidyanatha Iyer, Anantha Subramanian, „Simulation of Air–Water Interface Effects for High-speed Planing Hull,“ *Journal of marine science and application*, kd. 19, pp. 398-414, 2020-11-03.

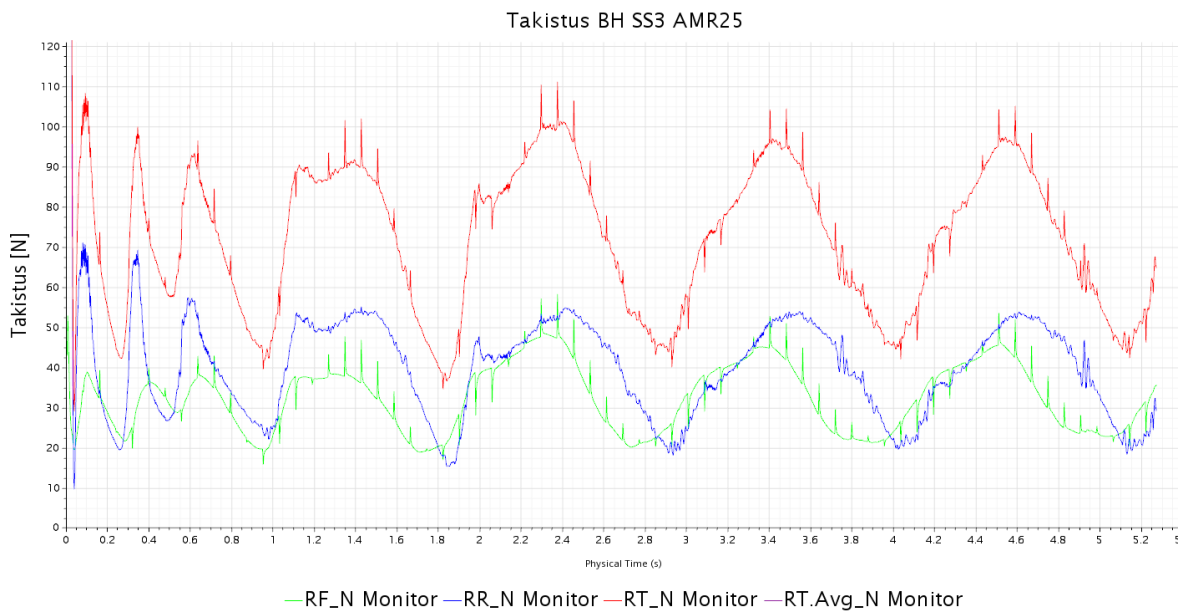
- [14] Center, Simcenter Star CCM+ Support, „Example of User-defined Waves for VOF-Wave Modeling,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000046888_EN_US?pid=sc%3Atypeahead&index=content-external&audience=external. [Kasutatud 14 12 2021].
- [15] „How to use Adaptive Mesh Refinement in combination with a tight-overset approach: a marine example,“ Simcenter Star CCM+ Support Center. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 14 12 2021].

LISAD

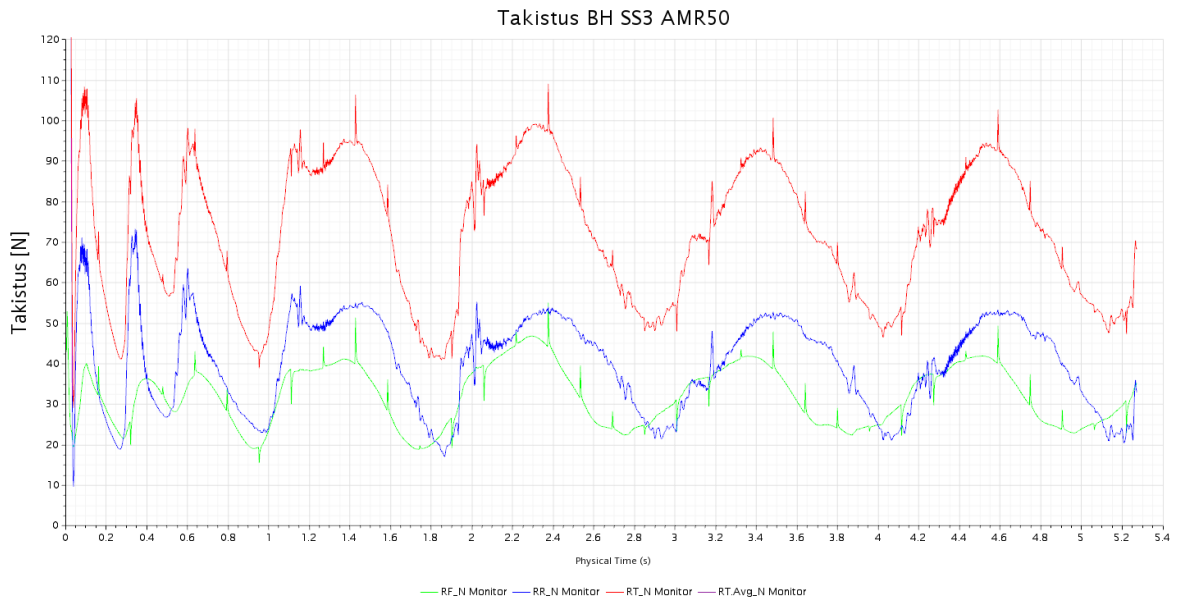
Lisa A. Takistused



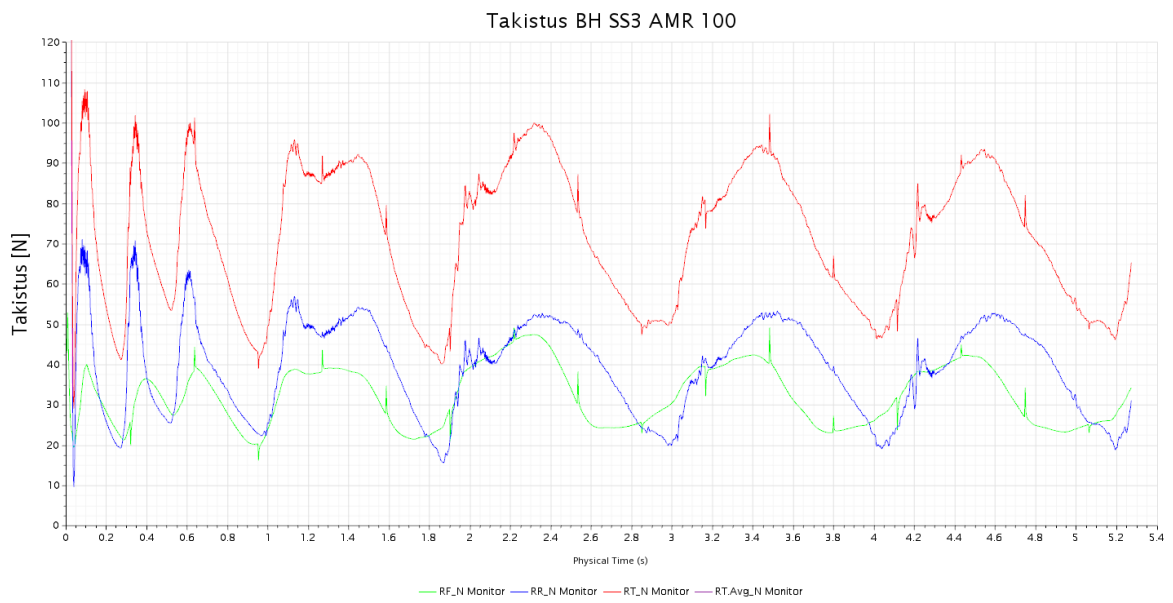
Lisa A 1. Takistus BH SS3 AMR10



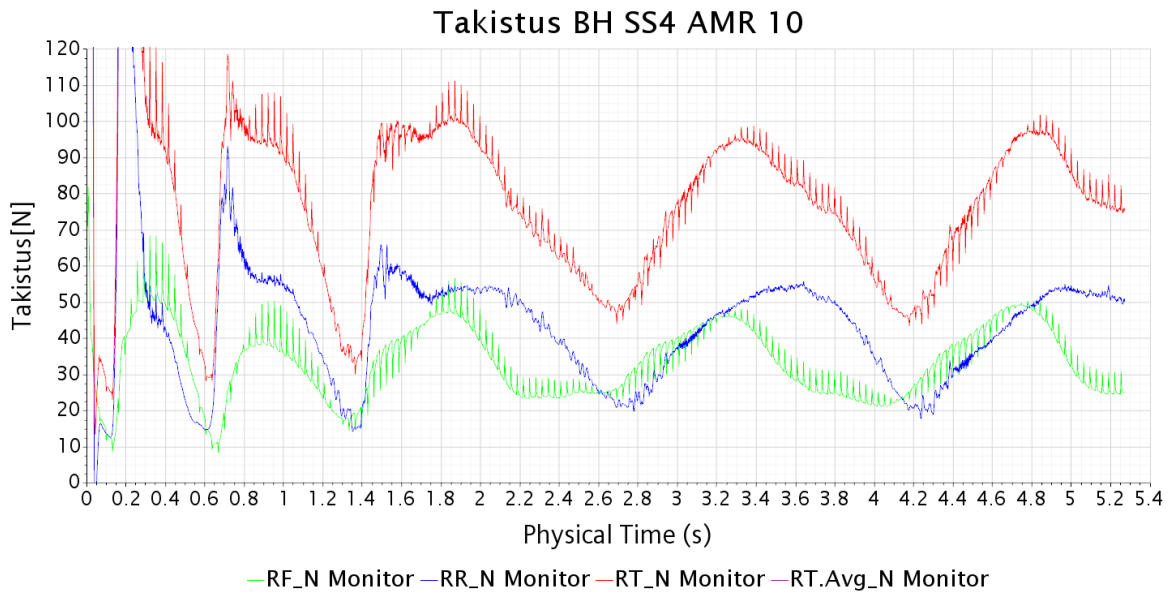
Lisa A 2. Takistus BH SS3 AMR25



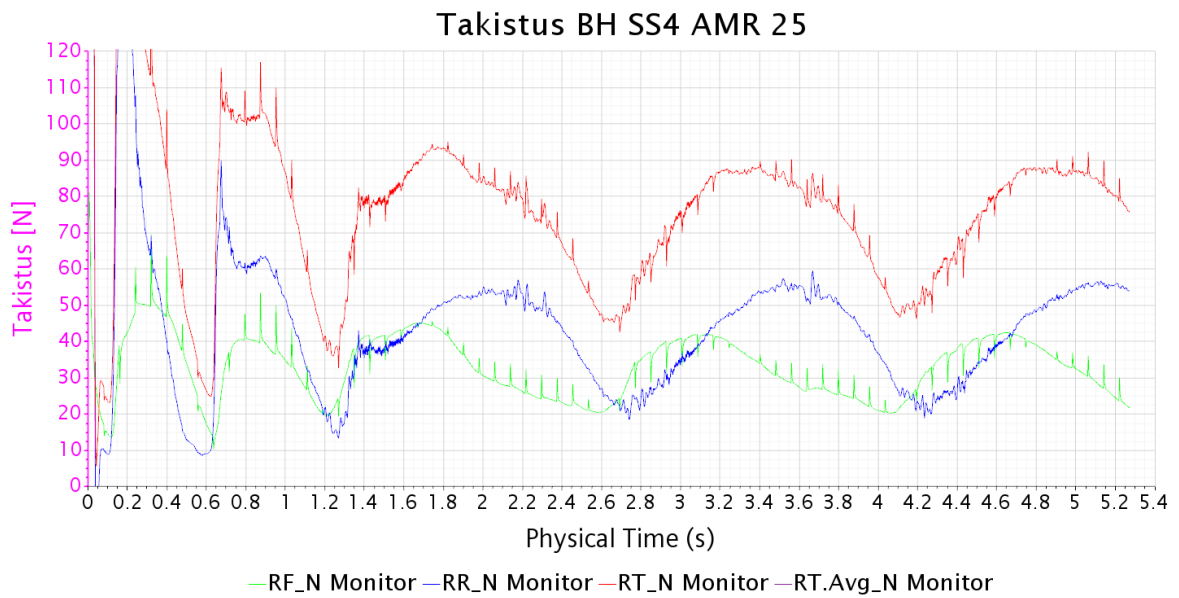
Lisa A 3. Takistus BH SS3 AMR50



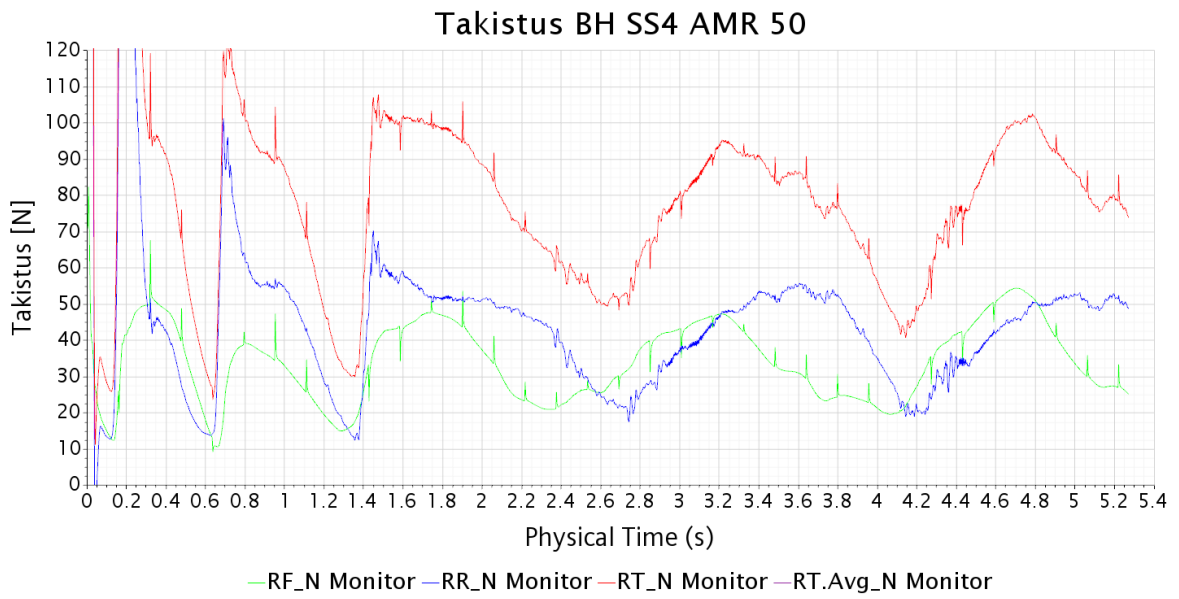
Lisa A 4. Takistus BH SS3 AMR100



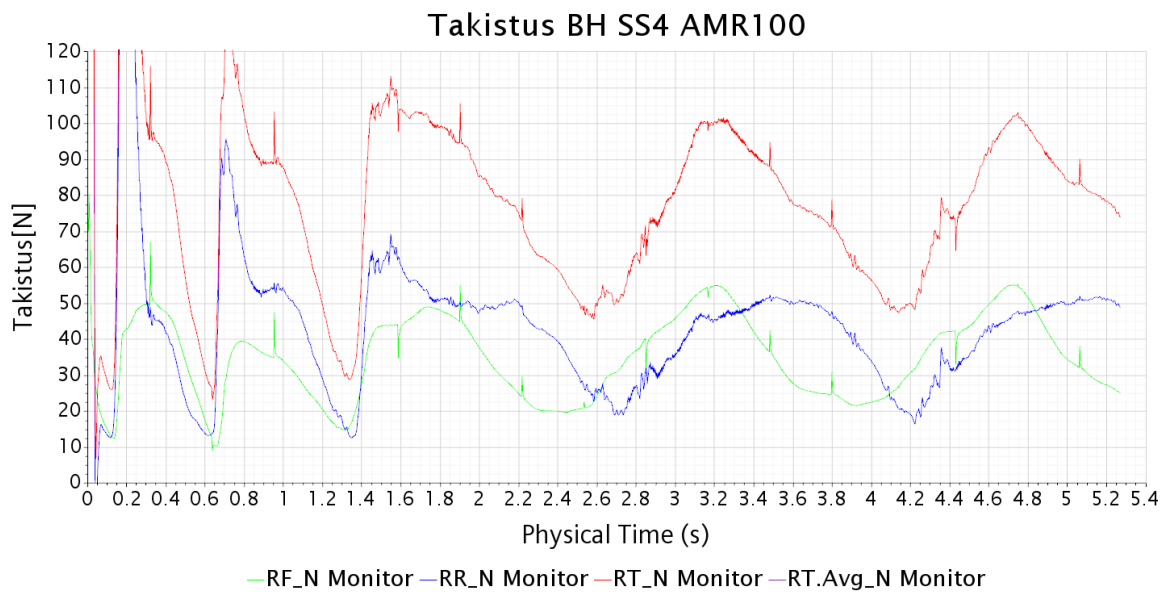
Lisa A 5. Takistus BH SS4 AMR10



Lisa A 6. Takistus BH SS4 AMR25

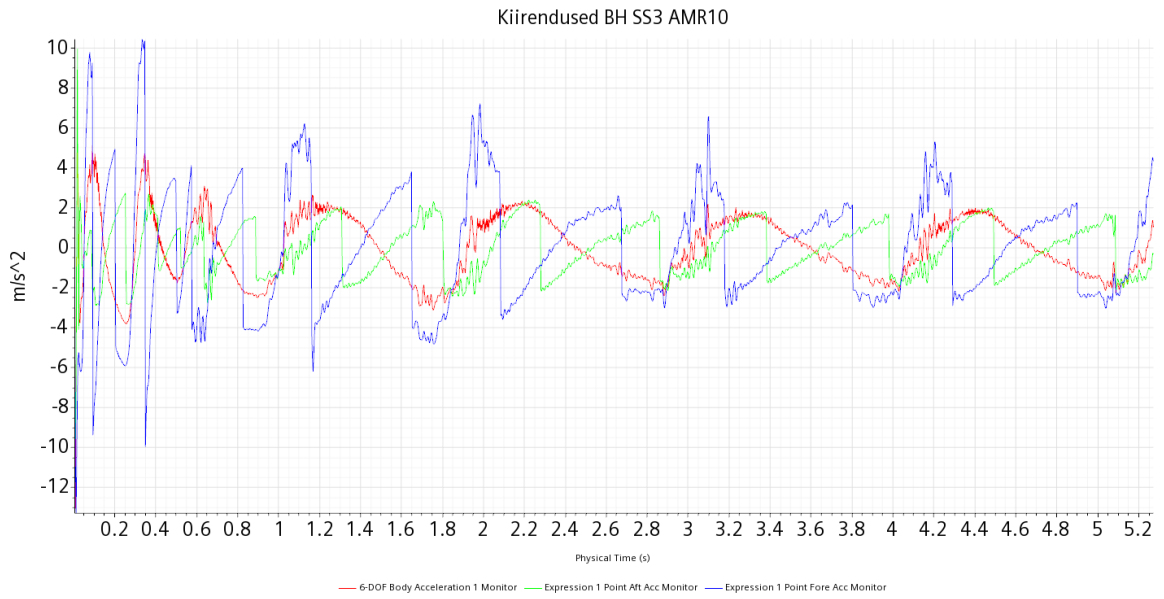


Lisa A 7. Takistus Bh SS4 AMR50

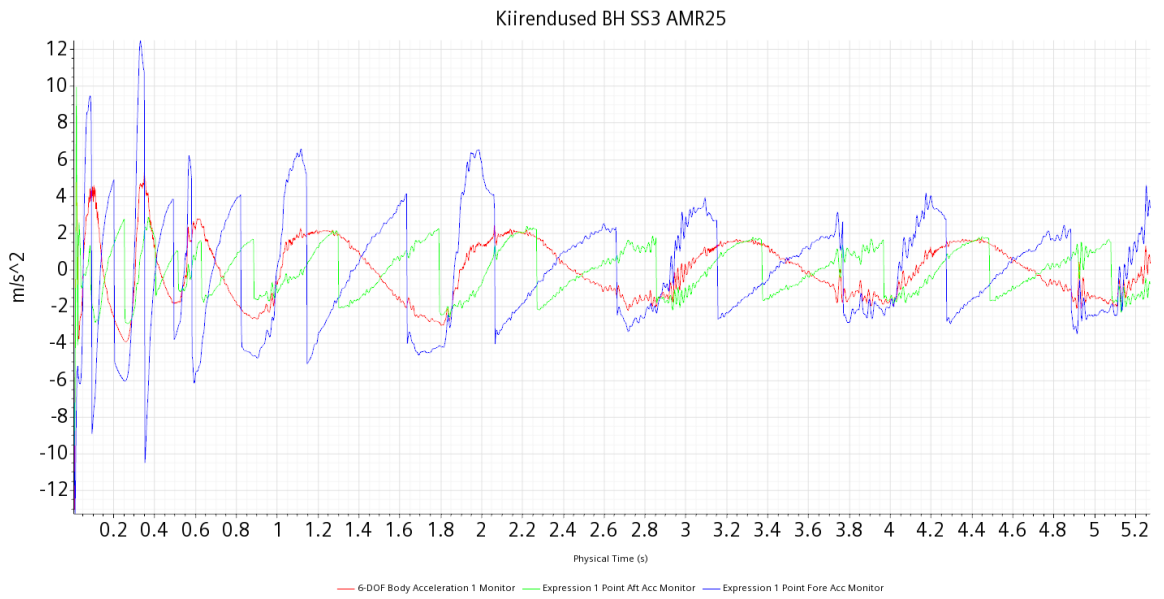


Lisa A 8. Takistus BH SS4 AMR100

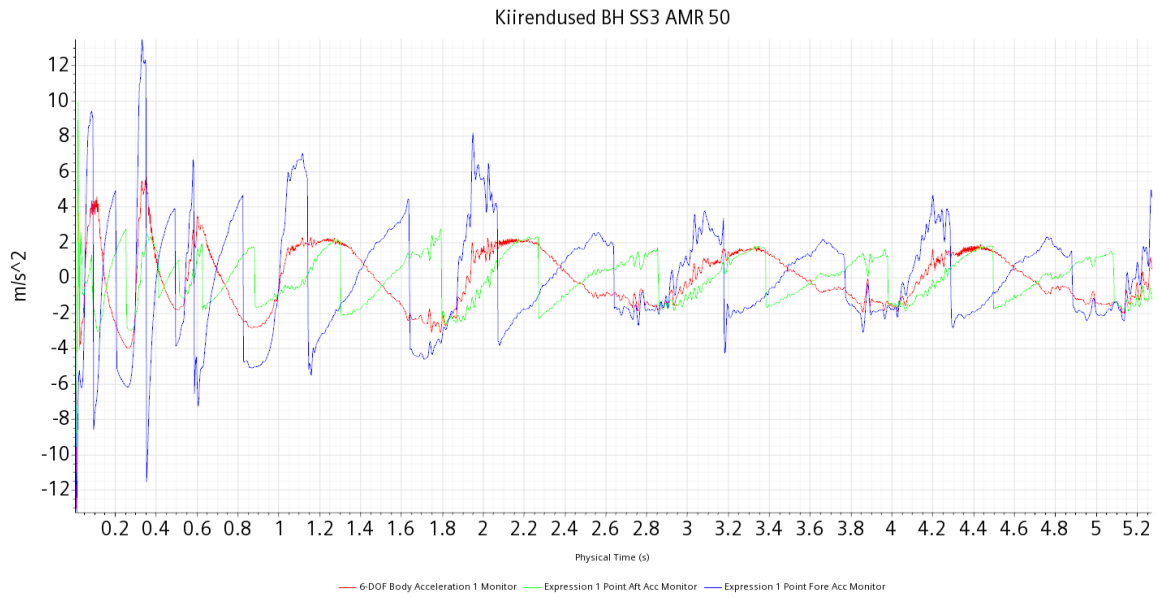
Lisa B Kiirendused



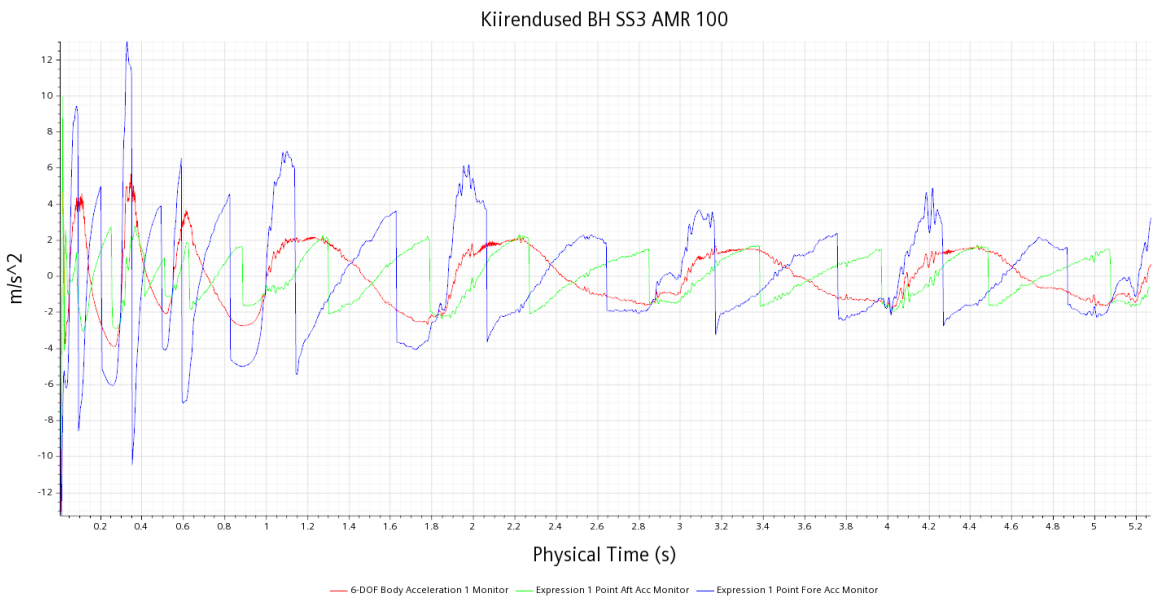
Lisa B 1. Kiirendused BH SS3 AMR10



Lisa B 2. Kiirendused BH SS3 AMR25

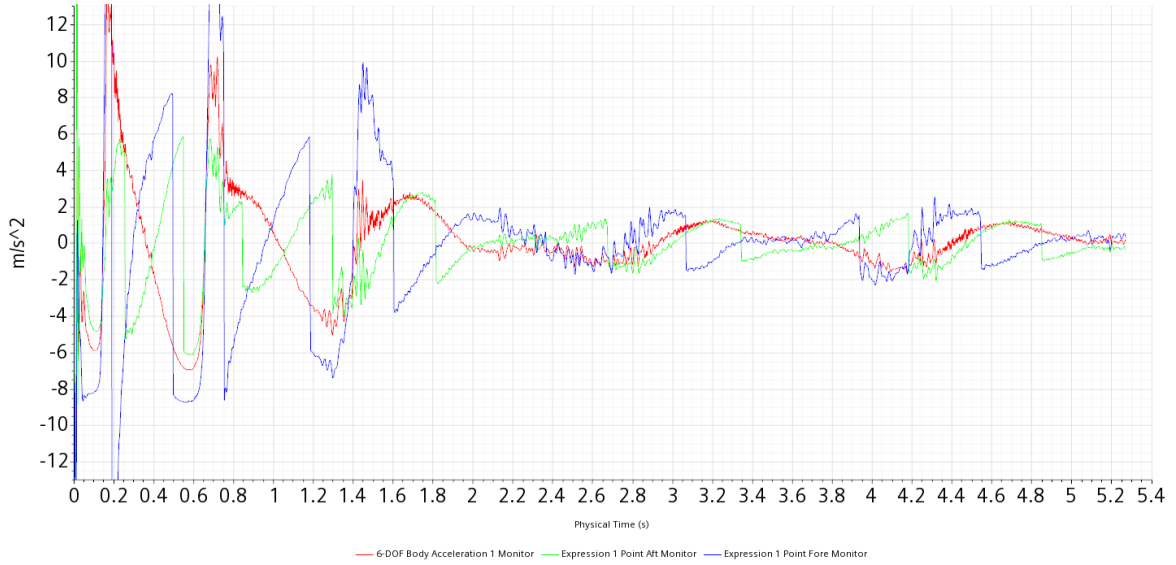


Lisa B 3. Kiirendused BH SS3 AMR50



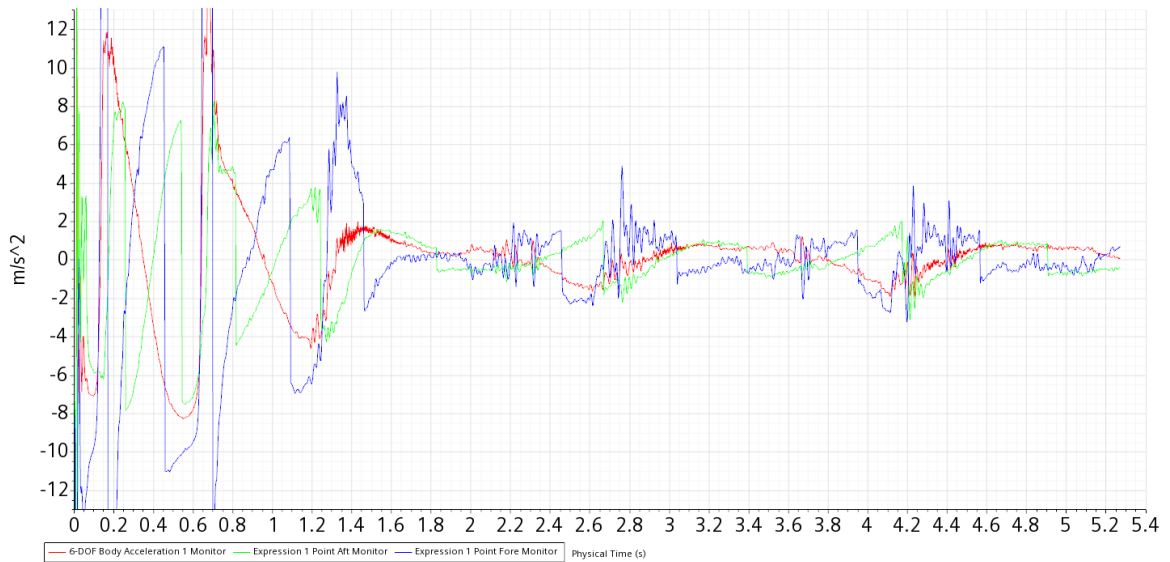
Lisa B 4. Kiirendused BH SS3 AMR100

Kiirendused BH SS4 AMR 10



Lisa B 5. Kiirendused BH SS4 AMR10

Kiirendused BH SS4 AMR 25



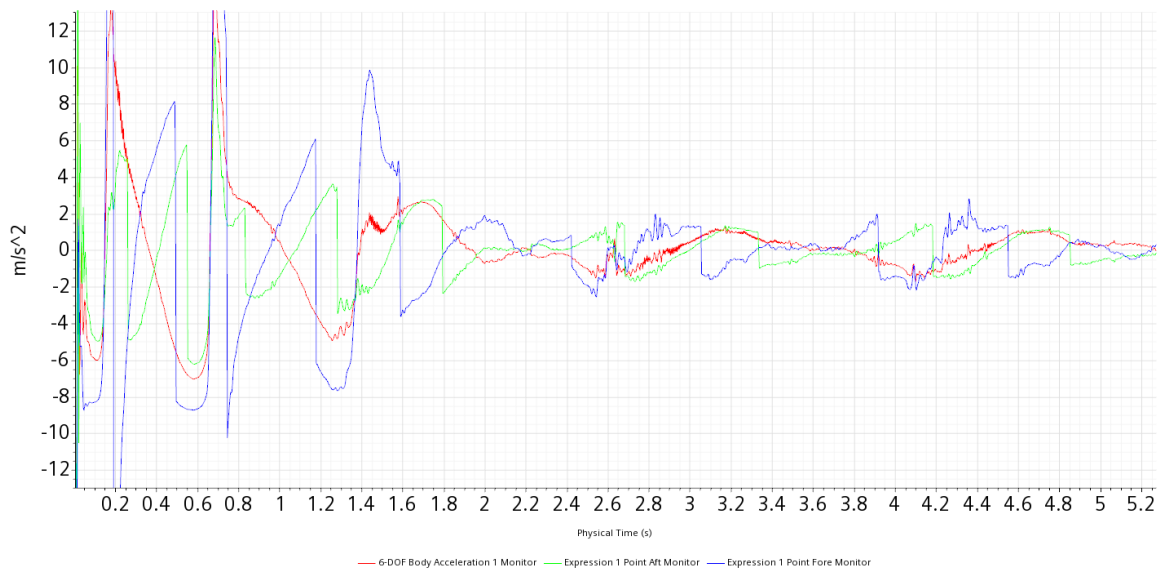
Lisa B 6. Kiirendused BH SS4 AMR25

Kiirendused BH SS4 AMR 50



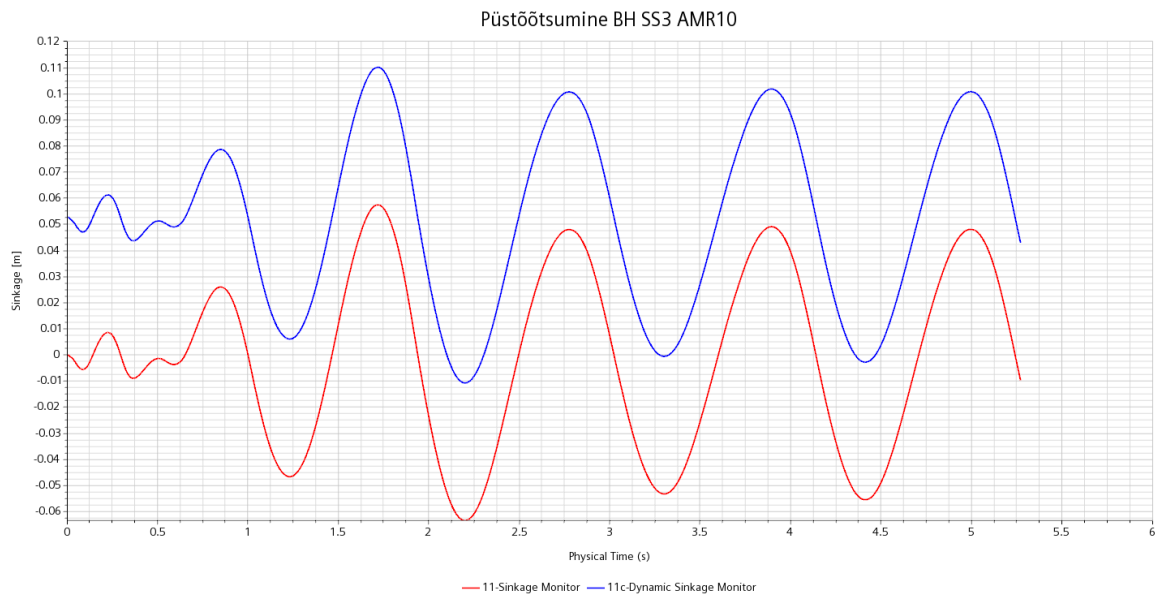
Lisa B 7. Kiirendused BH SS4 AMR50

Kiirendused BH SS4 AMR 100

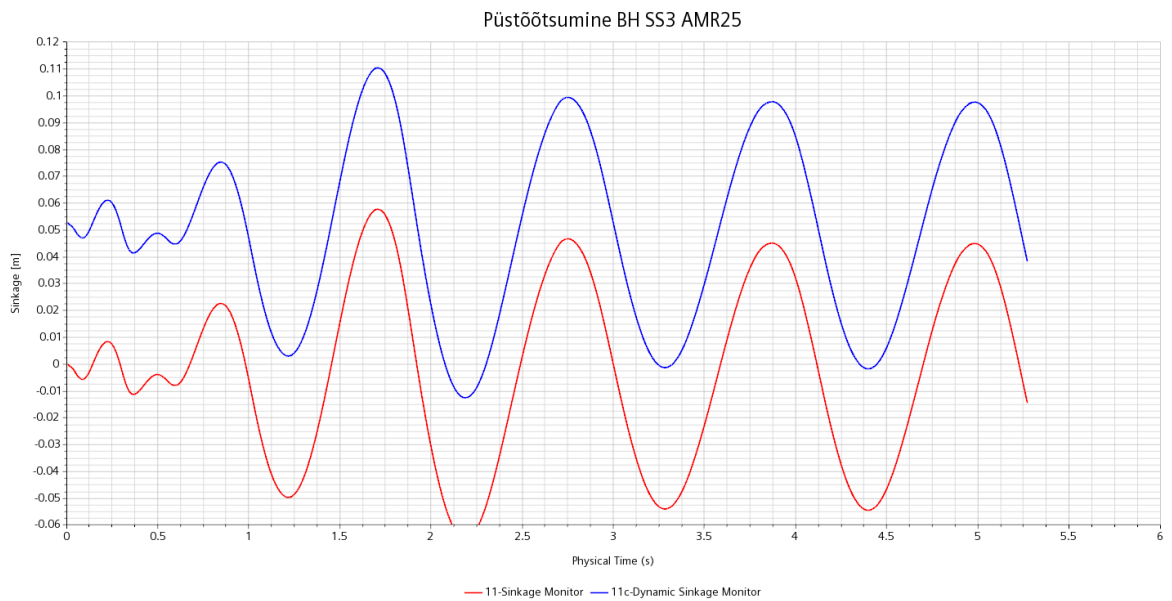


Lisa B 8. Kiirendused BH SS4 AMR100

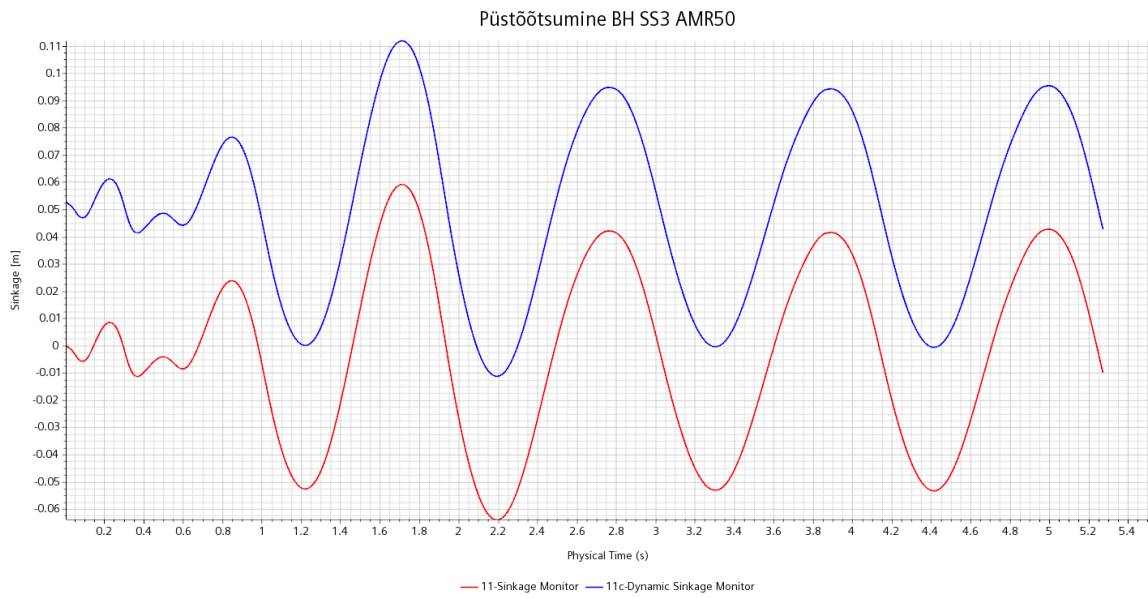
Lisa C Püstõõtsumised



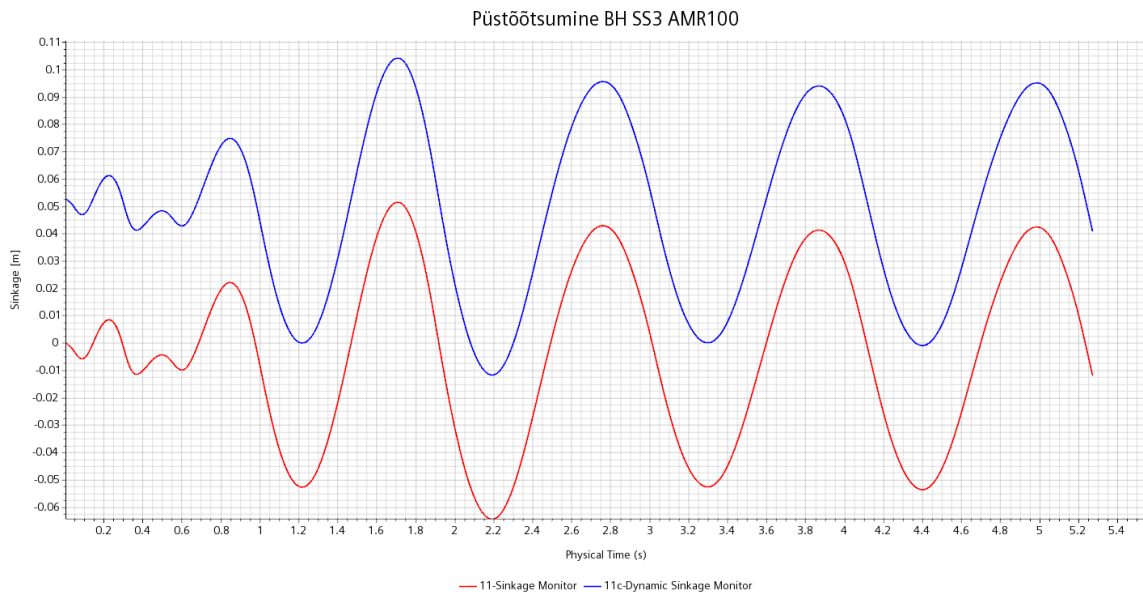
Lisa C. 1. Püstõõtsumine BH SS3 AMR10



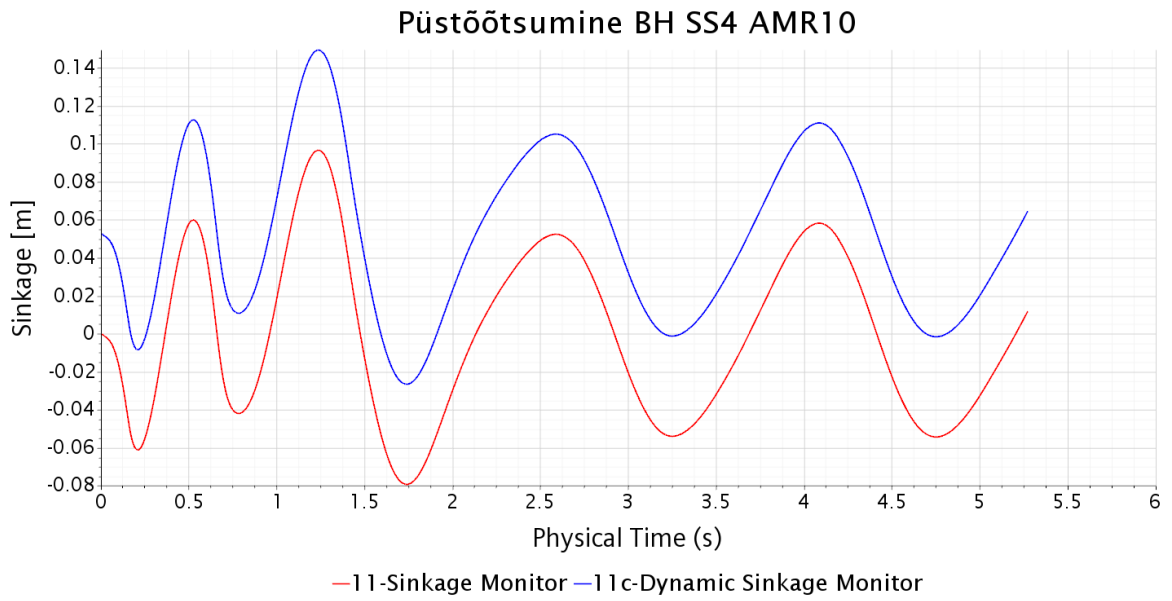
Lisa C. 2. Püstõõtsumine BH SS3 AMR25



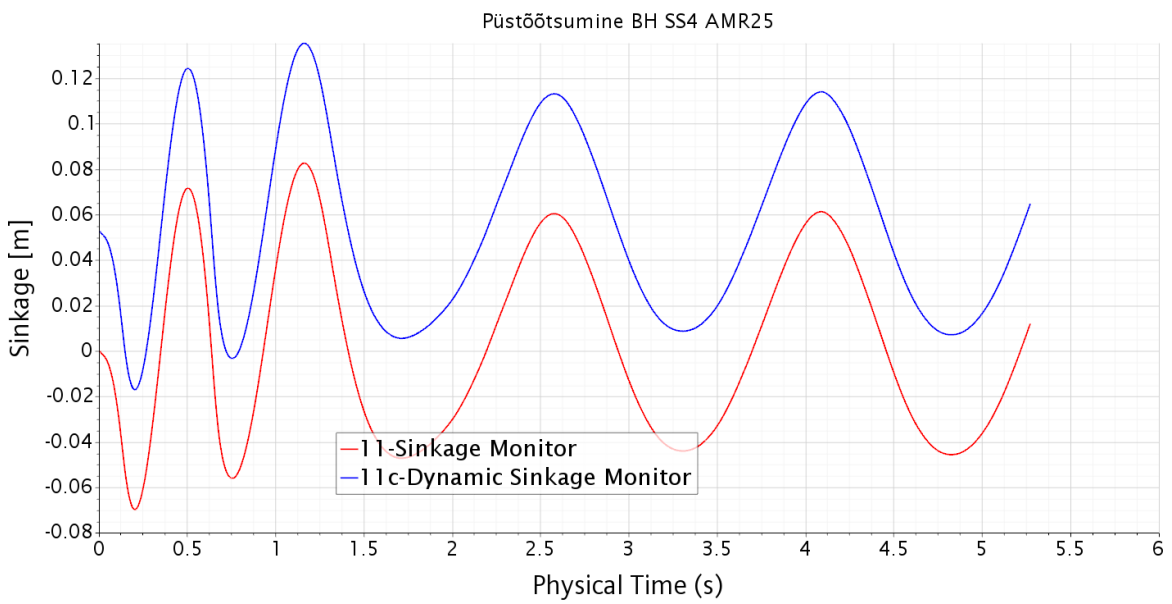
Lisa C. 3. Püstõõtsumine BH SS3 AMR50



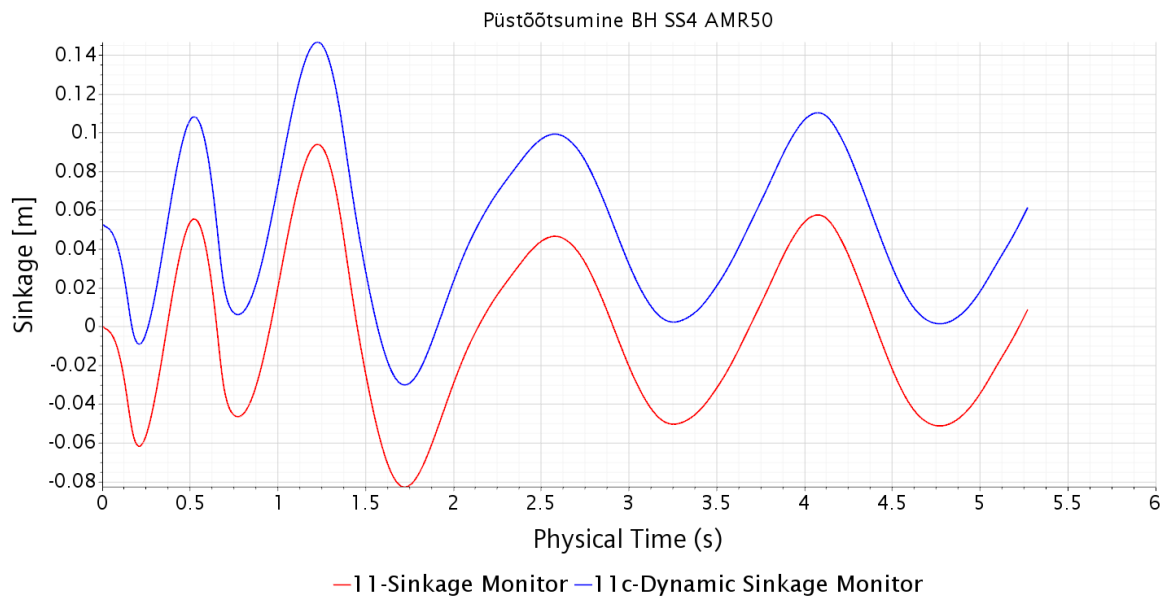
Lisa C. 4. Püstõõtsumine BH SS3 AMR100



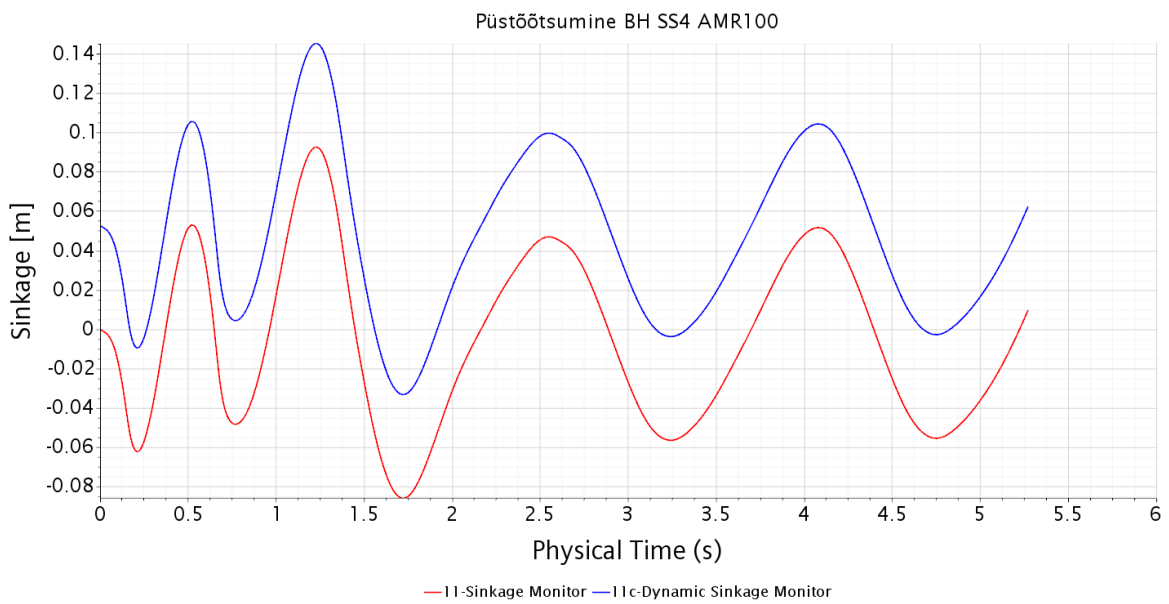
Lisa C. 5. Püstõõtsumine BH SS4 AMR10



Lisa C. 6. Püstõõtsumine BH SS4 AMR25

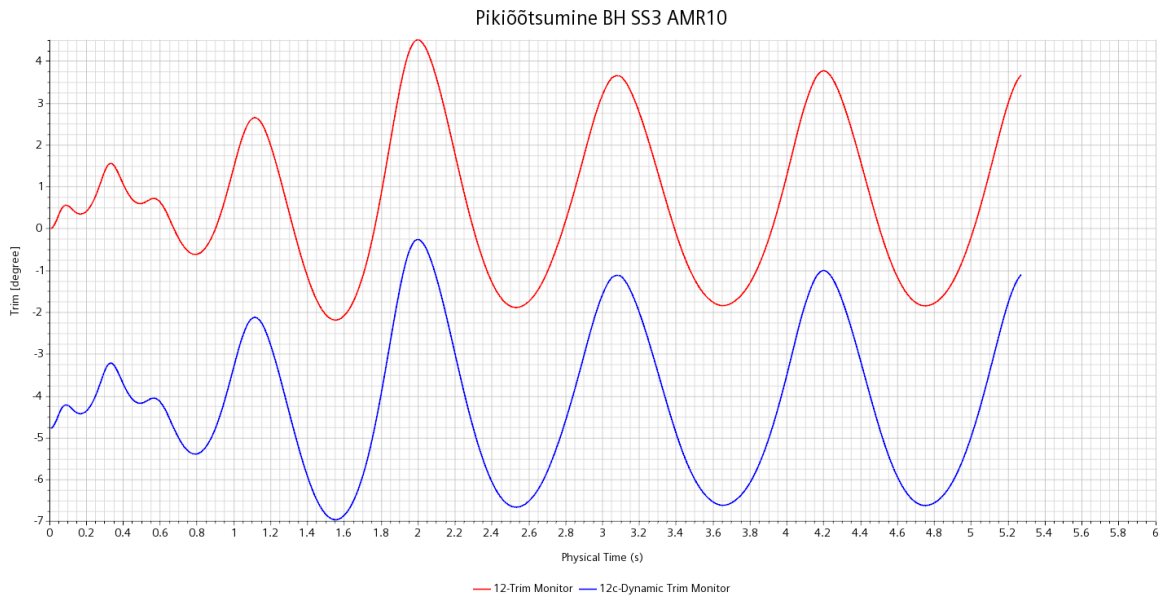


Lisa C. 7. Püstõõtsumine BH SS4 AMR50

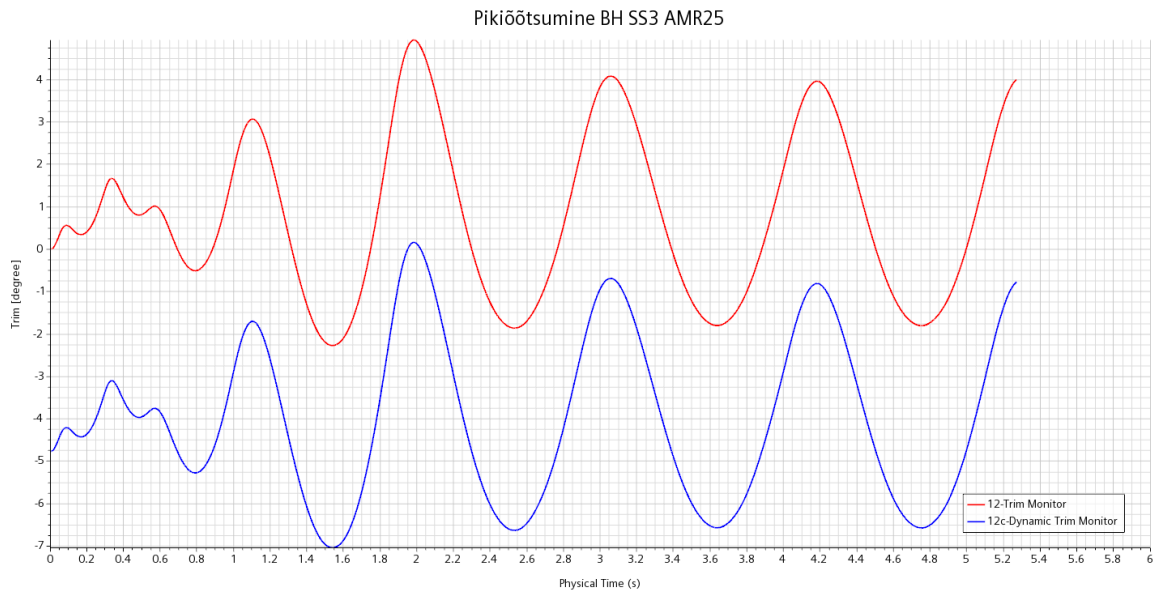


Lisa C. 8. Püstõõtsumine BH SS4 AMR100

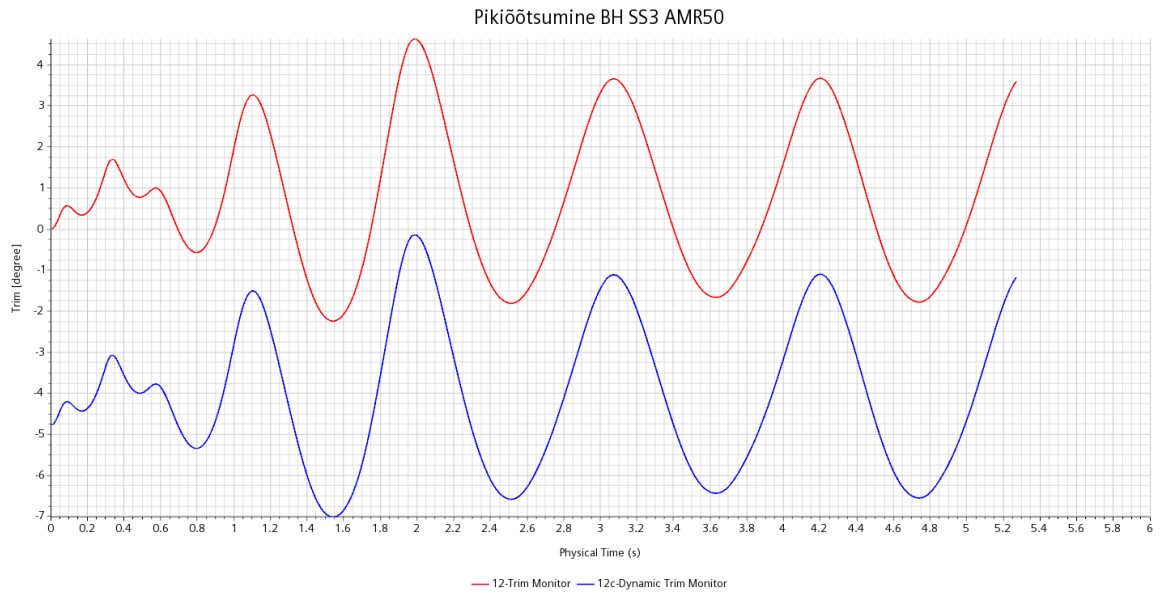
Lisa D Pikiõõtsumine



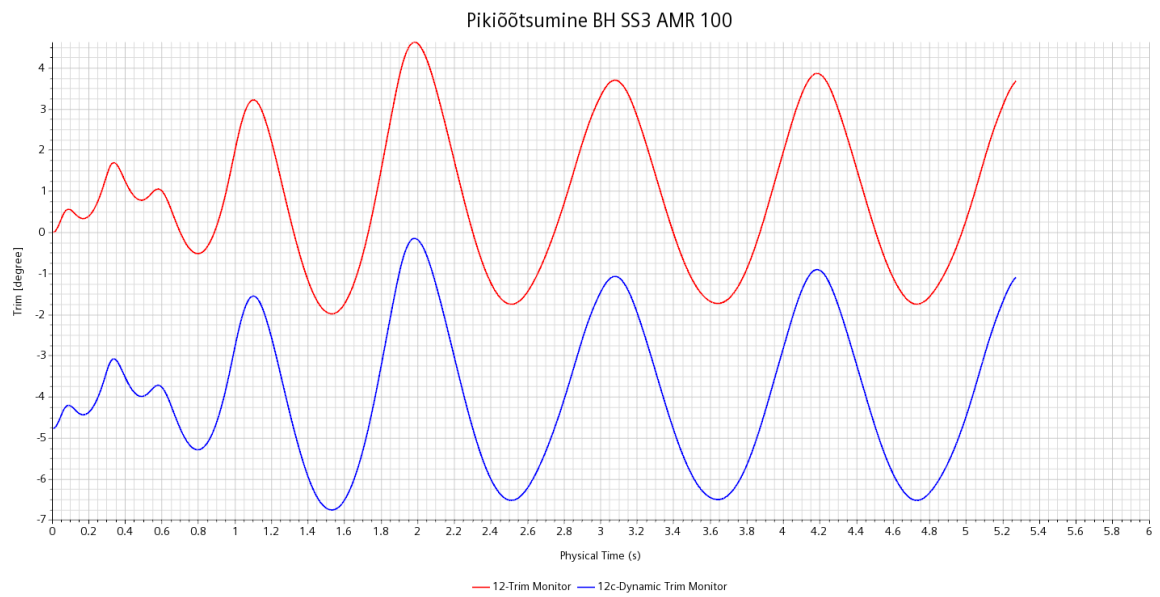
Lisa D. 1 Pikiõõtsumine BH SS3 AMR10



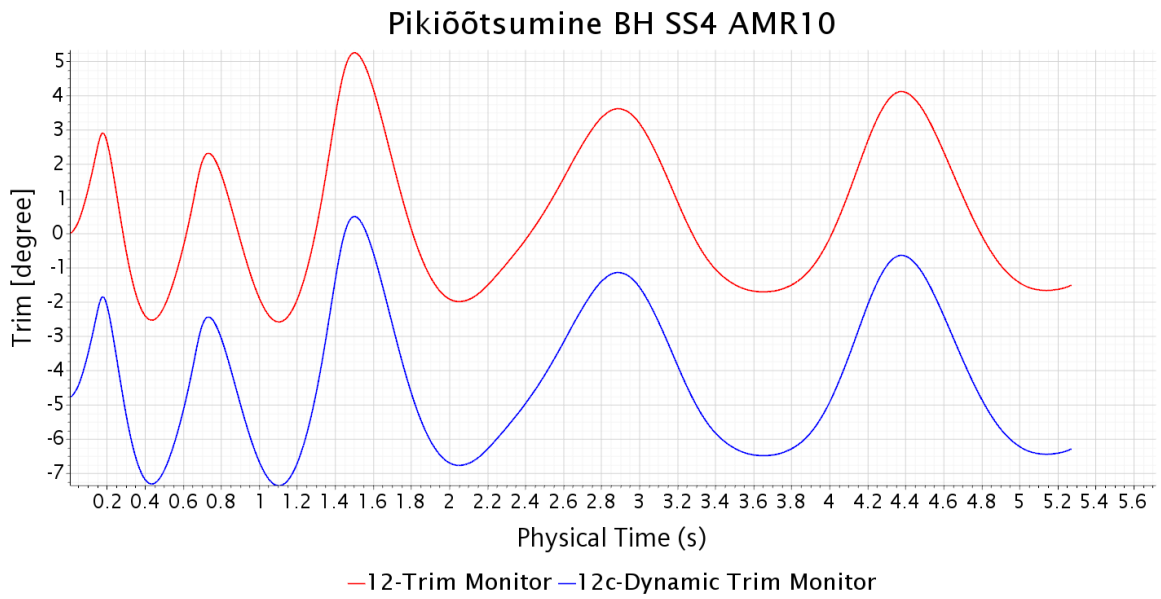
Lisa D. 2. Pikiõõtsumine BH SS3 AMR25



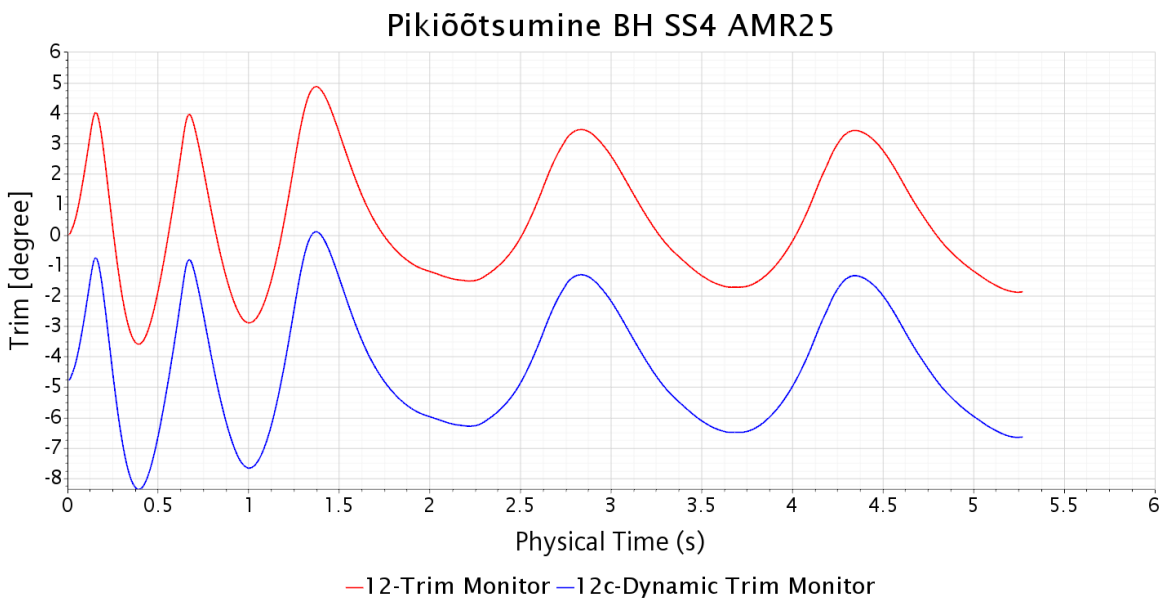
Lisa D. 3. Pikiõõtsumine BH SS3 AMR50



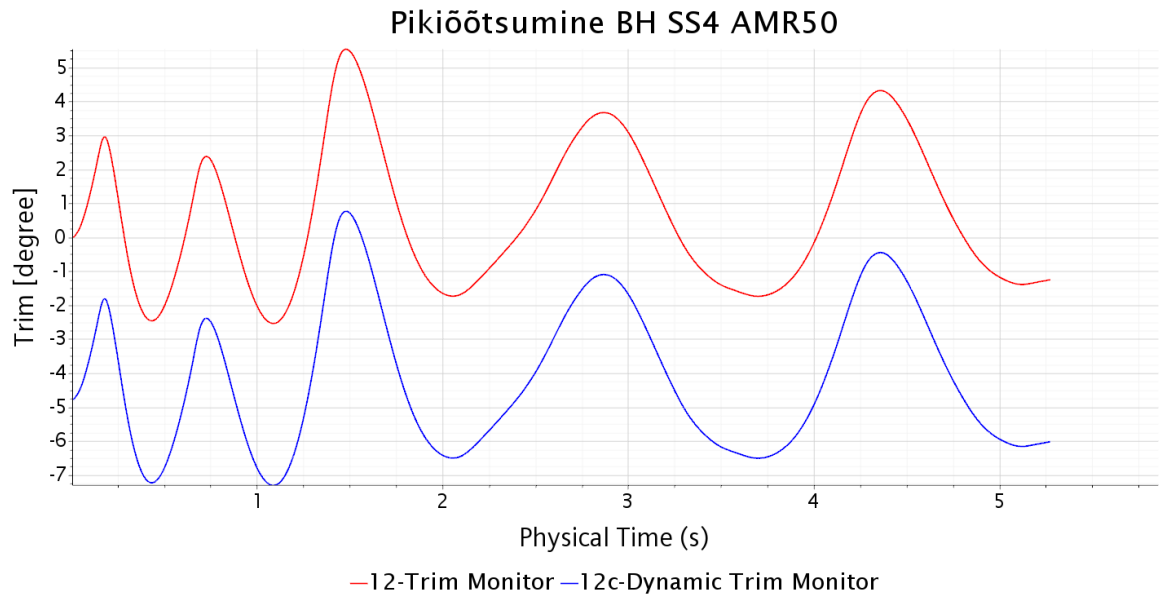
Lisa D. 4. Pikiõõtsumine BH SS3 AMR100



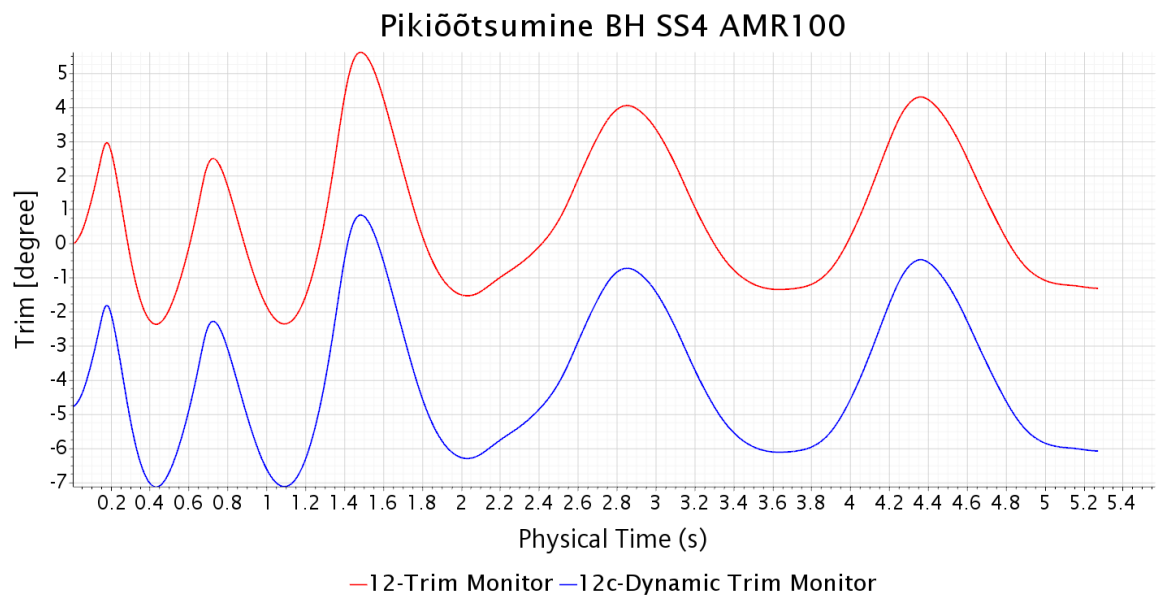
Lisa D. 5. Pikiõõtsumine BH SS4 AMR10



Lisa D. 6. Pikiõõtsumine BH SS4 AMR25



Lisa D. 7. Pikiõõtsumine BH SS4 AMR50



Lisa D. 8. Pikiõõtsumine BH SS4 AMR100