

**Tutkimusraportti
BVAL36-011145**

**PYSTYKIIHTYVYYKSIEN LASKENTA NOPEILLE
LIUKUVILLE VENEILLE**

Laskenta- ja mittaustulosten yhdistäminen ja vertailu

Markku Hentinen, Joakim Konsin

Espoo 31.08.2001

Alkusanat

Tämä työ liittyy TEKES-tavoitetutkimusprojektiin “Nopean veneen pohjauskujen ja pystykiihtyvyyksien pienentäminen - COMFORT RIDE”. Projektin tavoitteena on luoda uusia ja parantaa olemassa olevia menetelmiä nopeiden, liukuvien alusten pohjauskujen ja niistä aiheutuvien kiihtyvyyksien pienentämiseksi ja analysoimiseksi. Projektissa on tehty myös kirjallisuusselvityksiä ja täysmittakaavakokeita.

Espoo, 31.8.2001

Tekijät

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	4
2	Tavoite	4
3	Kohteen kuvaus ja rajaukset.....	4
4	Laskenta- ja mittaustulosten vertailu.....	5
4.1	Vertailun taustatiedot	5
4.1.1	Mitatut veneet ja olosuhteet	5
4.1.2	Käytetyt laskentamenetelmät.....	5
4.2	Mitatut ja lasketut pystykiihtyvyydet painopisteessä	6
4.3	Eroavaisuuksien todennäköiset syyt.....	7
4.3.1	Rakenteen värähtelyn vaikutus.....	8
4.3.2	Viippauskulman vaikutus	8
4.3.3	Pohjan tehollisen pinta-alan vaikutus.....	11
4.3.4	Pohjan muodon yksityiskohdat	12
5	Ehdotettava menetelmä.....	12
5.1	Vertailulaskelmat.....	12
5.2	Verifointimittaukset.....	14
6	Johtopäätökset	15
7	Yhteenveto	15
	Lähdeviitteet.....	16

1 Johdanto

Hyvin nopeat, liukuvat veneet kokevat aallokossa toimintakykyä ja mukavuutta rajoittavia pystykiihtyvyyksiä. Aiemman SOFT RIDE -projektin [1] yhteydessä todettiin, että olemassa olevat yksinkertaiset laskentamenetelmät eivät pysty ennustamaan oikein pystykiihtyvyyksiä ja niiden riippuvuutta veneen nopeudesta silloin, kun vene alkaa loikkia aallonharjalta toiselle. Kyseiset laskentamenetelmät perustuvat suurimmalta osalta yli 20 m pienaluksille tehtyihin mittauksiin. Niitä on sovellettu tätä pienemmille veneille useimmiten rakennemitoituksen yhteydessä, jolloin pohjan mitoituspaine määritetään lasketun pystykiihtyvyyden perusteella. Tällöin kiihtyvyyden absoluuttisella arvolla on vähemmän merkitystä, kunhan mitoituspaine johtaa realistisiin rakennevaatimuksiin. Tämän projektin yhteydessä on laskettu em. menetelmillä pystykiihtyvyyksiä kuudelle eri veneelle lähteessä [2].

Tässä osassa COMFORT RIDE- projektia on vertailtu mitattuja ja laskettuja pystykiihtyvyyksisarvoja kolmelle eri veneelle, ja ehdotettu näiden perusteella uutta menetelmää pystykiihtyvyyden määrittämiseksi nopeissa, liukuvissa veneissä.

2 Tavoite

Raportin tavoitteena on vertailla slamming-iskuissa syntyvien pystykiihtyvyyksien mitattuja ja laskettuja tuloksia ja luoda näiden perusteella uusi, parannettu menetelmä pystykiihtyvyyksien ennustamiseksi nopeissa, liukuvissa veneissä.

3 Kohteen kuvaus ja rajaukset

Nopeilla, liukuvilla veneillä tarkoitetaan tässä työssä aluksia, joiden Frouden uppoumaluku ylittää arvon 3.0 (esimerkiksi 10 tonnin painoisella veneellä 27 solmua). Tälle alueelle yltävät mm. nopeimmat luotsiveneet, erilaiset partioveneet sekä useat huvivenetyypit. Aallokossa veneet kokevat voimakkaita slamming-iskuja, jotka rajoittavat veneen käytettävyyttä: iskujen kasvaessa miehistön tai joskus myös rakenteen tai laitteiden kannalta liian suuriksi on suuntaa muutettava tai vauhtia hiljennettävä huomattavasti.

Tämä työ on rajattu koskemaan slamming-iskujen aiheuttamia pystykiihtyvyyksiä. Rakenteiden lujuutta ei ole tarkasteltu. Pystykiihtyvyydet on pyritty määrittelemään veneen jäykissä rakenteissa, eikä miehistön istuimia tai muita vaimennettuja rakenteista ole otettu mukaan.

4 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu

SOFT RIDE ja COMFORT RIDE -projektien yhteydessä on tehty pystykiihtyvyyssmittauksia viidessä eri veneessä, joista viimeistä (Jurmo2) käytettiin vain verifiointia varten.

Seuraavassa on vertailtu mitattuja arvoja eri menetelmillä saatuihin laskennallisiin arvoihin, sekä pohdittu eroavaisuuksien syitä.

4.1 Vertailun taustatiedot

Laskenta- ja mittaustulosten vertailussa käytetyistä veneistä, laskentamenetelmistä ja mittaustuloksista löytyy tarkempia tietoja erillisistä työraporteista, jotka on jaettu projektiryhmälle. Vertailun ja menetelmäkehityksen kannalta olennaiset tiedot on kuitenkin esitetty alla.

1.1.1 Mitatut veneet ja olosuhteet

Mittauksissa mukana olleiden veneiden päämitat ovat seuraavat:

	NV-96	Chaser	Demo	Yamarin 6110	Jurmo2
Lwl	8	11	12	4,8	11,45
Bc	2,6	2	1,8	2,1	3,1
Δ	4,455	11	8	1,475	11,1
pohjanousu	26	18	20	18	17
$Lwl/\nabla^{1/3}$	4,86	4,95	6,00	4,22	5,13
$\nabla^{1/3}/Bc$	0,63	1,11	1,11	0,54	0,72
Lwl/Bc	3,08	5,5	6,67	2,29	3,69

Mittausten aikana vallinneet merkitsevät aallonkorkeudet on laskettu pystykiihtyvyyksistä, jotka on mitattu ko. veneen kelluessa paikallaan. Tämän on katsottu antavan riittävän hyvän kuvan aallokosta, koska veneet seuraavat suuren vesiviivapinta-ala - uppoumasuhteensa takia aaltoja kohtuullisen hyvin. NV-96:n mittauksissa vallinneet aallonkorkeudet on lisäksi laskettu tuuliolojen perusteella. Mittaustuloksista on tässä otettu mukaan vain vasta-aallokossa saadut arvot.

4.1.2 Käytetyt laskentamenetelmät

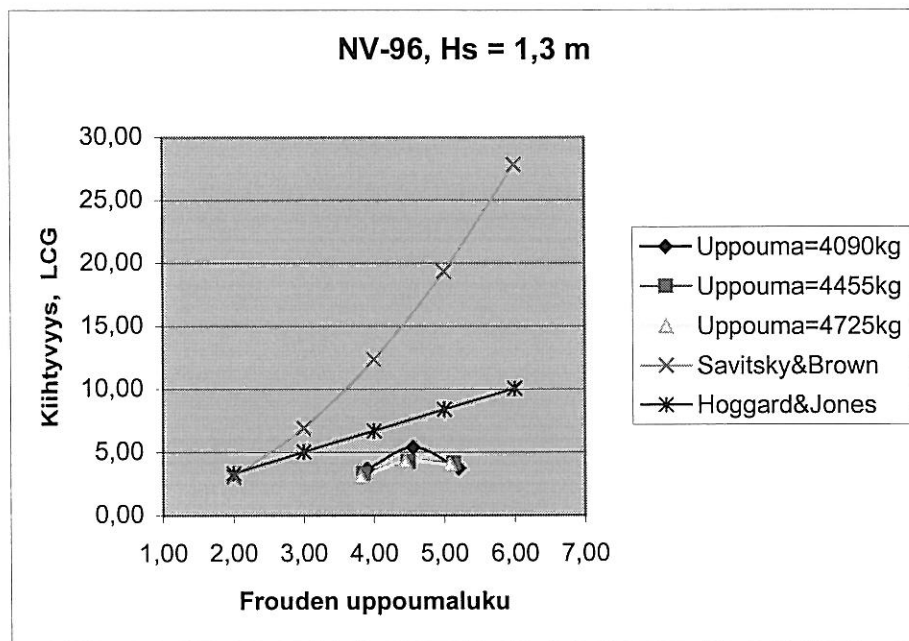
Mitattujen ja laskettujen arvojen vertailuun otettiin mukaan kaksi laskentamenetelmää:

- Savitsky & Brown'in menetelmä, johon perustuvat kaikkien suurten luokituslaitosten mitoitussäännöt kuten myös tulossa oleva veneiden lujuusmitoitusta koskeva ISO 12215.
- Hoggard & Jones'in menetelmä, joka poikkeaa selvästi Savitsky&Brownin kaavoista.

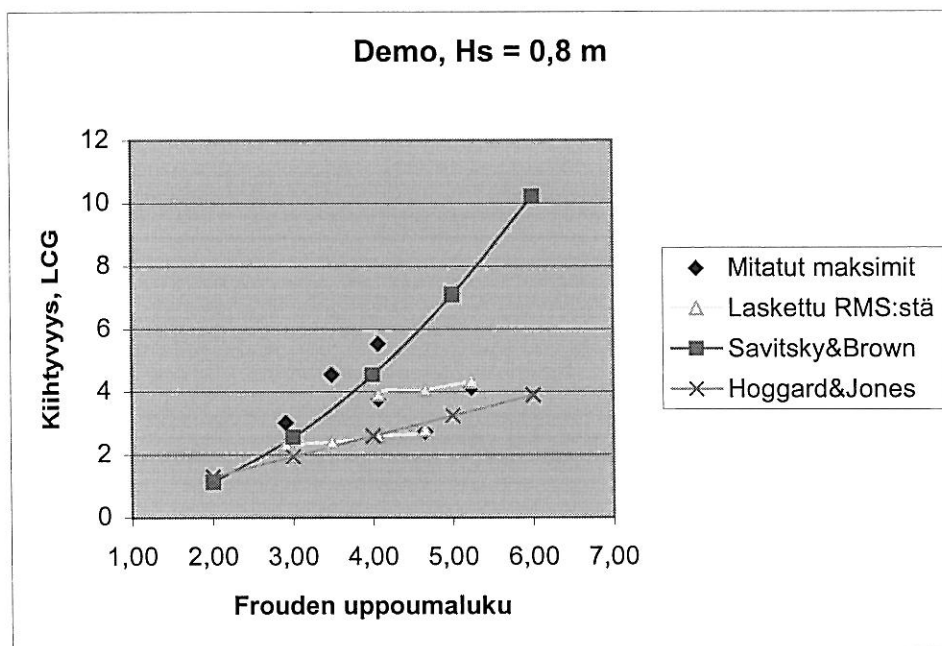
Yllämainituilla menetelmillä on laskettu pystykiihtyvyys kohdassa 4.1.1 esitetyille veneille riippumatta siitä, ylitetäänkö menetelmän pätevyysrajat.

4.2 Mitatut ja lasketut pystykiihtyvyydet painopisteessä

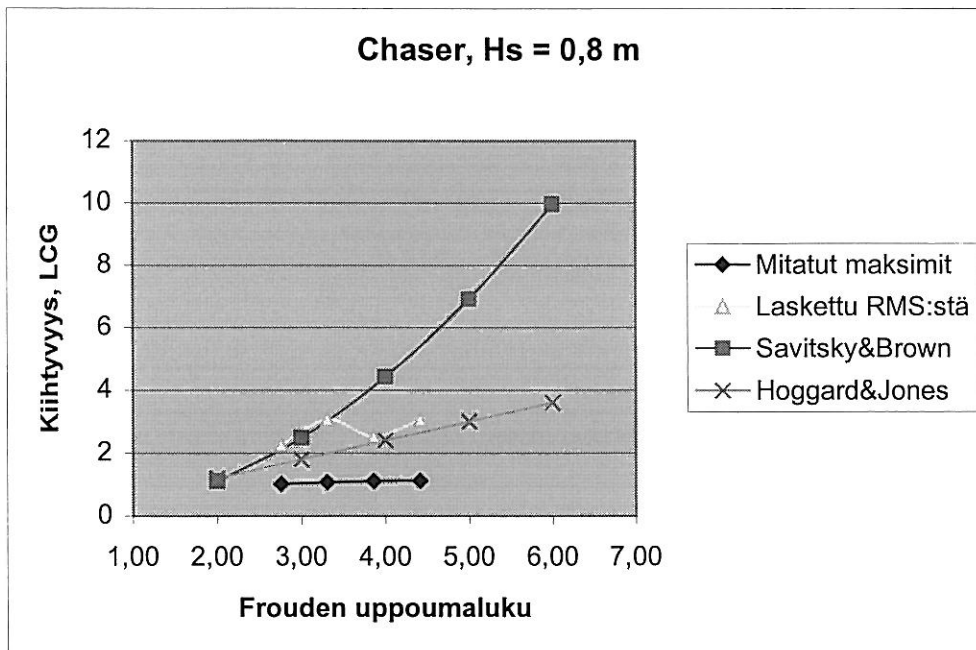
Mitattujen ja lasketujen arvojen vertailutulokset on esitetty kuvissa 1-4. Mitatuista arvoista on esitetty painopisteen maksimikihtyvyys ja RMS-arvosta laskettu suurimman sadasosan keskiarvo. Tulokset osoittavat, että mitatut arvot ovat kohtuullisilla nopeuksilla ainakin joissain veneissä melko lähellä laskettuja arvoja. Suurilla nopeuksilla laskentamenetelmät, varsinkin Savitsky&Brown, näyttävät selvästi yliarvioivan pystykihtyvyyksiä.



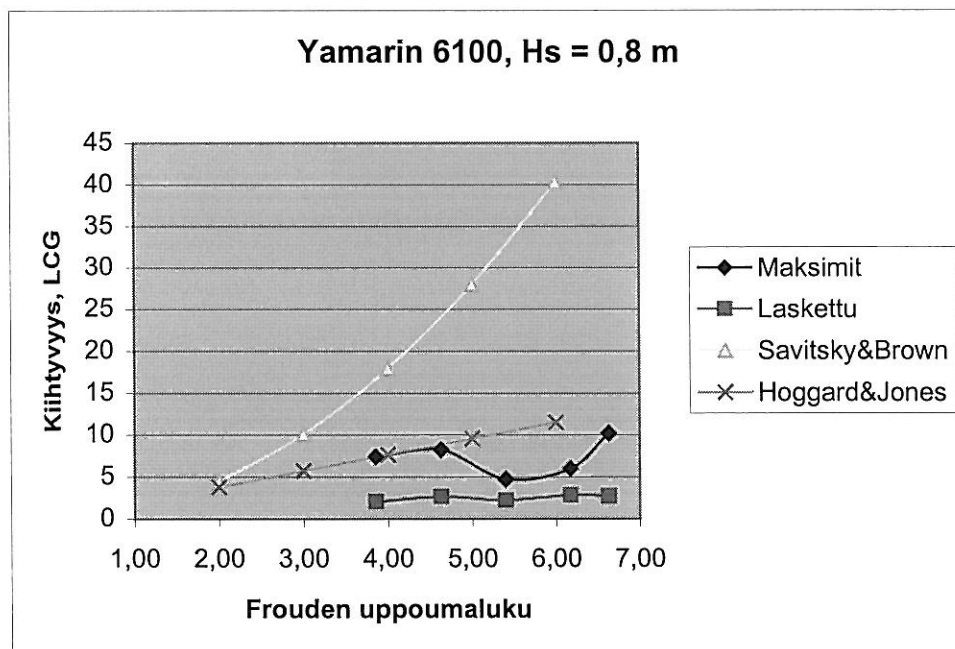
Kuva 1. Mitatut ja lasketut pystykihtyvyydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun merkittävä aallonkorkeus on 1,3 m.



Kuva 2. Mitatut ja lasketut pystykihtyvyydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun merkittävä aallonkorkeus on 0,8 m. Huomattakoon, että mittaukset tehtiin kahdessa osassa, joissa aallon periodi oli erilainen.



Kuva 3. Mitatut ja lasketut pystykihtiyydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun merkitsevä aallonkorkeus on 0,8 m



Kuva 4. Mitatut ja lasketut pystykihtiyydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun merkitsevä aallonkorkeus on 0,8 m

4.3 Eroavaisuuksien todennäköiset syyt

Kuten jo projektin aiemmissa raporteissa on todettu, on olemassa olevat laskentamenetelmät tehty suurempia ja hitaampia aluksia varten kuin mitä tämän projektin tavoitteena on ollut. Siten myös aiemmin tehdyt mittaukset on tehty aluksille ja malleille, joiden mittasuhteet ja suhteet aallokkoon poikkeavat hyvin nopeista, plaanaavista veneistä. Toisaalta myös

mittaustavat vaikuttavat voimakkaasti tuloksiin, erityisesti kaksi seikkaa on syytä ottaa tässä esiin.

4.3.1 Rakenteen värähtelyn vaikutus

Slamming-iskujen seurauksena veneen rakenteet heräävät värähtelemään ominaistaajuuksiensa mukaisesti, mikä voi vaikuttaa rakenteesta mitattuihin pystykiihtyvyyksiin hyvinkin voimakkaasti. Mittaustaajuus ja saadun signaalin suodatustapa vaikuttavat myös huomattavasti tuloksiin.

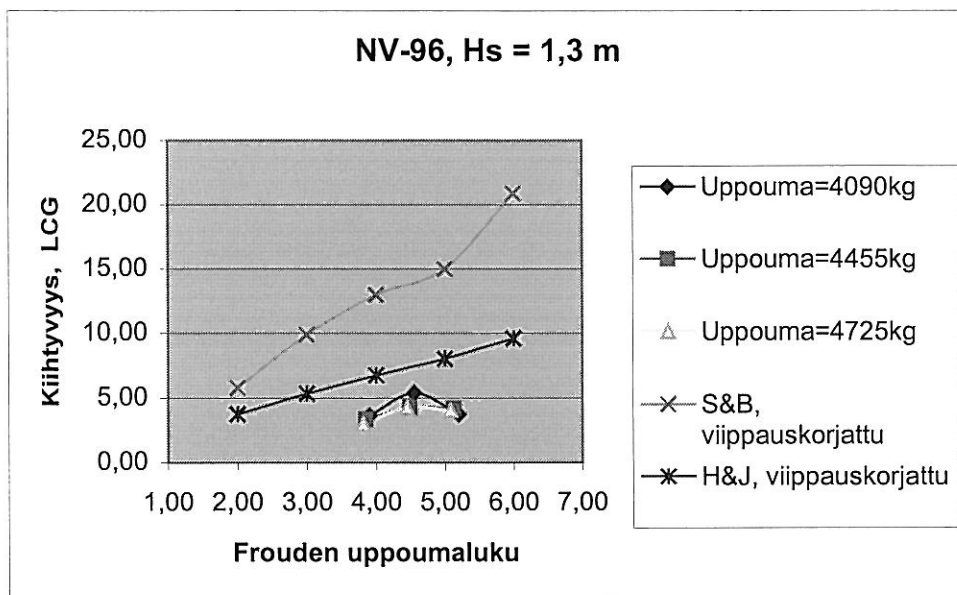
Kohdassa 4.1.2 esitetyissä laskentamenetelmissä ei ole ilmoitettu, millä taajuusalueella menetelmien on tarkoitettu toimivan. Tässä työssä on kokeiltu eri suodatustaajuuksia ja päädytty käyttämään 100 Hz alipäästösuodatusta. Tämä on kompromissi mittauksissa mukana olleiden venetyyppien välillä: Hyvin jäykiksi rakennetuissa veneissä olisi voitu käyttää korkeampaakin suodatustaajuutta ilman, että tulokset olisivat merkittävästi muuttuneet. Rakenteeltaan avoimemmissa veneissä tyypilliset alhaiset ominaistaajuudet sen sijaan vaativat alhaista suodatustaajuutta.

Slamming-iskujen aiheuttama melko korkeataajuinen (>100 Hz) värähtely ei yleensä ole matkustusmukavuuden tai veneen hallinnan kannalta kriittistä, koska istuimien pehmusteet tms. pystyvät vaimentamaan värähtelyn tehokkaasti. Laitteiden ja asennusten kannalta värähtely voi kuitenkin olla haitallista. Kaiken kaikkiaan värähtelyn merkitys ja huomioon ottaminen olisi kuitenkin tärkeä jatkotutkimuksen aihe, kun halutaan löytää tarkempia menetelmiä pystykiihtyvyyksien mittaamiseen, analysointiin ja kriteerien asettamiseen.

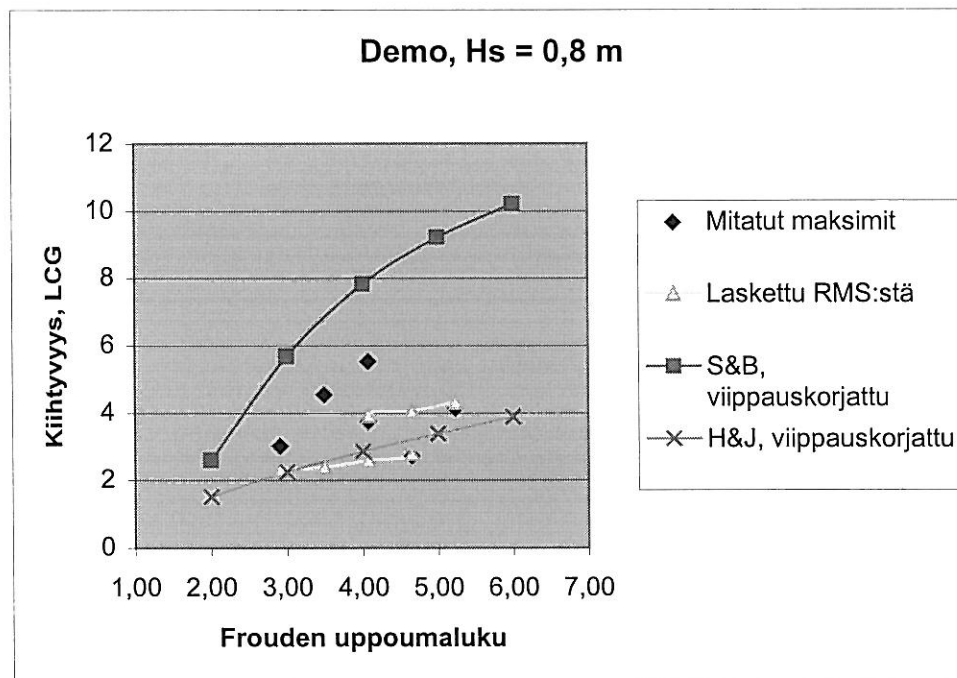
4.3.2 Viippauskulman vaikutus

Eräs tärkeimpiä, mutta vaikeimmin arvioitavia parametrejä on trimmi- eli viippauskulma. Viippauskulman vaikutus pystykiihtyvyyksiin aallokossa on suuri sekä teoriassa että käytännössä. Edellä esitetyissä laskelmissa viippauskulma on pidetty vakiona nopeuden kasvaessa. Tämä ei todellisuudessa pidä paikkaansa, vaan yleensä viippauskulma pienenee nopeuden kasvaessa.

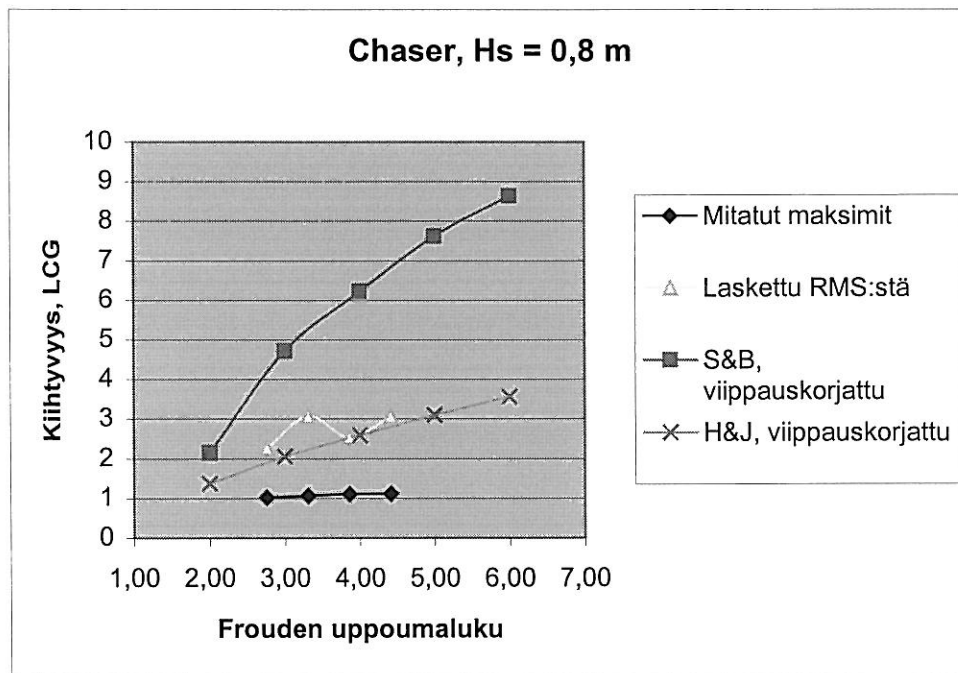
Seuraavassa on esitetty samat laskelmat kuin kohdassa 4.2 siten, että viippauskulman muutos nopeuden funktiona on laskettu Savitskyn vastuslaskumenetelmällä. Tulokset on esitetty kuvissa 5-8. Tarkkaa LCG:tä ei ollut saatavilla kaikille veneille, joten osa on jouduttu arvioimaan.



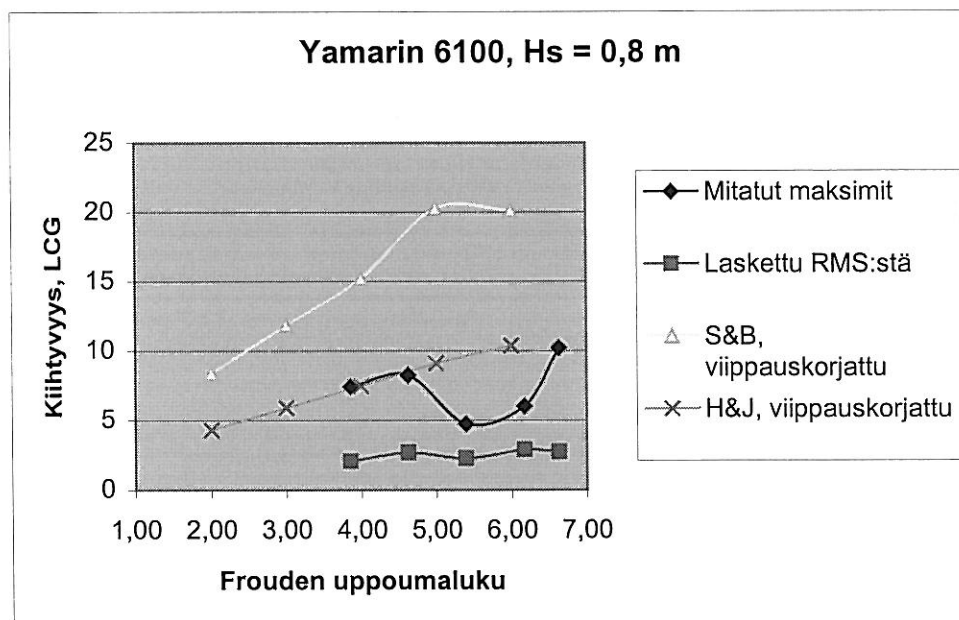
Kuva 5. Mitatut ja lasketut pystykihtyvydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun dynaaminen viippauskulma on laskettu Savitskyn vastuslaskumenetelmällä



Kuva 6. Mitatut ja lasketut pystykihtyvydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun dynaaminen viippauskulma on laskettu Savitskyn vastuslaskumenetelmällä. Huomattakoon, että mittaukset tehtiin kahdessa osassa, joissa aallon periodi oli erilainen.



Kuva 7. Mitatut ja lasketut pystykihtyvydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun dynaaminen viippauskulma on laskettu Savitskyn vastuslaskumenetelmällä



Kuva 8. Mitatut ja lasketut pystykihtyvydet painopisteen kohdalla (suurimman sadasosan keskiarvo), kun dynaaminen viippauskulma on laskettu Savitskyn vastuslaskumenetelmällä

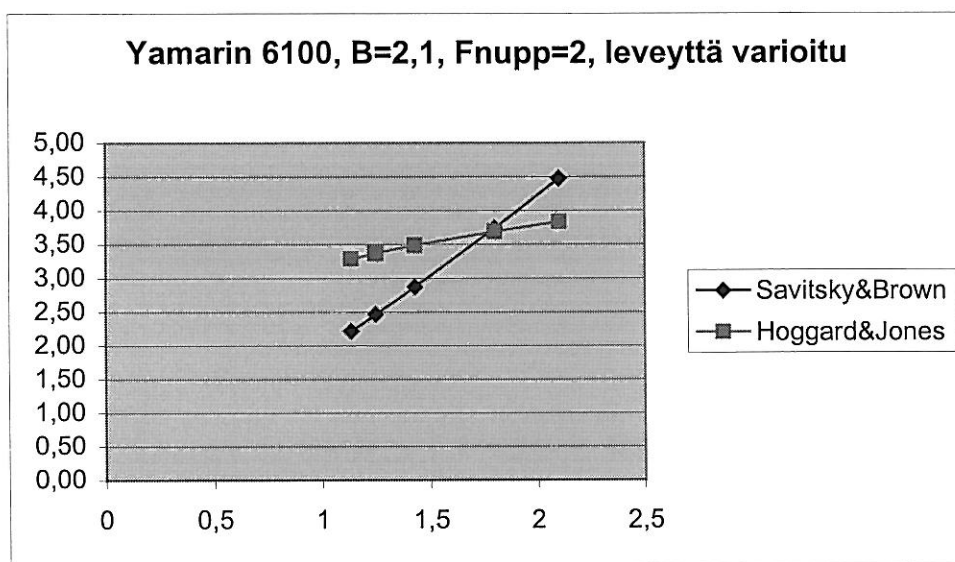
Tulokset osoittavat, että nopeusalueella $F_{nV} = 4-5$ lasketut ja mitatut tulokset lähestyvät jonkin verran toisiaan. Tätä aluetta suuremmilla nopeuksilla varsinkin Savitsky&Brownin menetelmän antamat tulokset eroavat taas selvästi mitatuista.

Kysymys relevantista viippauskulmasta vaikeutuu vielä siitä, että suuressa osassa nopeita veneitä on mahdollisuus säätää viippauskulmaa ajon aikana. Tämä tapahtuu säädettävien

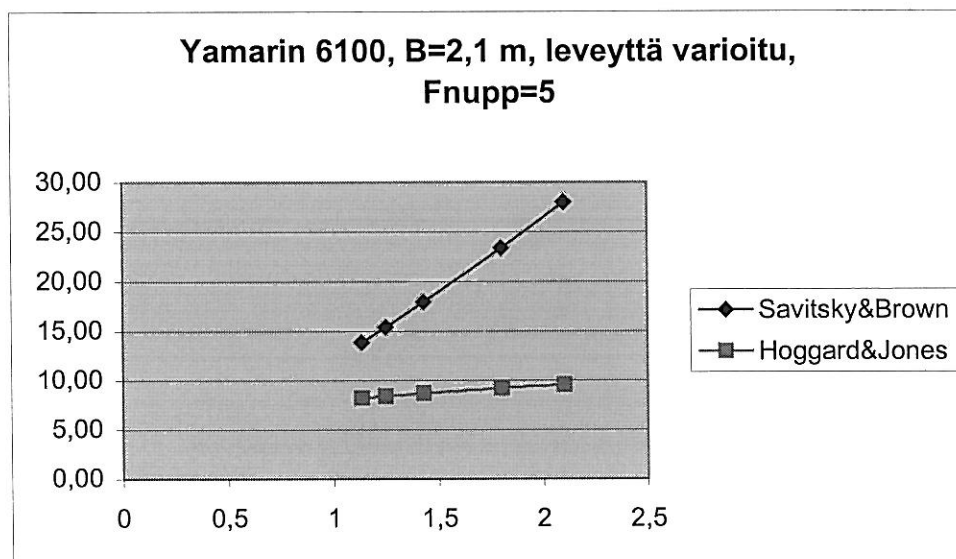
trimmitasojen ja/tai propulsiolaitteiden (power-trim) avulla. Tällöin veneen viippauskulmalla sileässä vedessä ei välttämättä ole yhteyttä aallokossa käytettävään kulmaan. Tähän projektiin liittyneissä mittauksissa ajajan onkin annettu säätää viippauskulma sellaiseksi, jota hän normaalistikin vastaavassa aallokossa käyttäisi. Viippauskulmaa säädettiin myös ajon aikana.

4.3.3 Pohjan tehollisen pinta-alan vaikutus

Erityisesti Savitsky&Brownin menetelmässä pohjan kuormituskerroin ja siten veneen leveys vaikuttaa voimakkaasti tuloksiin, kts. kuvat 9-10. Nopeat, liukuvat veneet ovat kuitenkin usein niin kevyitä ja kulkevat niin pinnassa, että pystyliike aallon suhteen ehtii pysähtyä ennen kuin painerintama saavuttaa palteen. Tehollinen pinta-ala saattaa siten olla pienempi kuin koko palleleveys tai vesiviivapituus antaisi olettaa.



Kuva 9. Palleleveyden vaikutus Savitsky&Brownin ja Hoggard&Jonesin antamiin pystykihtiivyyksiin, kun $F_{nvol}=2$ (esimerkkiveneenä Yamarin 6100).



Kuva 10. Palleleveyden vaikutus Savitsky&Brownin ja Hoggard&Jonesin antamiin pystykihtiivyyksiin, kun $F_{nvol}=5$ (esimerkkiveneenä Yamarin 6100).

4.3.4 Pohjan muodon yksityiskohdat

Yksinkertaiset laskentakaavat eivät pysty erittelemään pohjan muotoa, esim. muuttuvanousuisen pohjan tai nousulistojen koon osalta. Nämä on sisällytetty em. menetelmiin mahdollisesti ns. tehollisina arvoina ja empiirisen tiedon avulla, mutta varsinaiseen yksityiskohtien analysointiin ne eivät pysty.

5 Ehdotettava menetelmä

Menetelmäkehitystä vaikeuttaa olemassaolevien laskentakaavojen perustuminen tämän projektin kohdetta hitaampiin ja suurempiin aluksiin ja niissä esiintyviin fysikaalisiin ilmiöihin. Olemassa olevista menetelmistä irtaantumislle ei kuitenkaan ole voitu luoda pohjaa, koska tässä projektissa ei ole ollut mahdollisuutta laajamittaiseen teoreettiseen työhön eikä tarkoituksena myöskään ollut tehdä esim. laajoja mallikoesarjoja. Uuden menetelmän tulee siten nojautua olemassa oleviin, mutta mittaustuloksien mukaisesti parannettuna.

Hoggard&Jonesin menetelmä antaa kaikille mitatuille veneille parempia pystykiihtyvyyssennusteita kuin Savitsky&Brown, näin erityisesti suurimmilla nopeuksilla. Jälkimmäisen menetelmän vahvuutena on kuitenkin parempi fysikaalinen tausta ja järjestelmälliset mallikoesarjat. Suurimpana ongelmana Hoggard&Jonesin menetelmässä on pohjanousun puuttuminen parametreistä. Uuden menetelmän pohjaksi on siten valittu Savitsky&Brownin menetelmä.

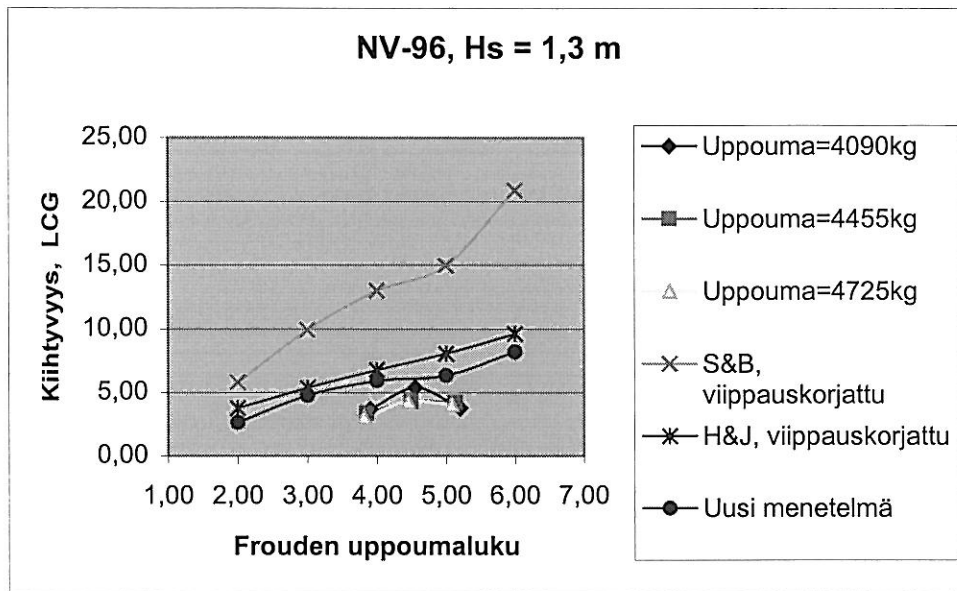
Kaikki tämän projektin yhteydessä tehdyt mittaukset osoittavat, ettei pystykiihtyvyys ole verrannollinen nopeuden toiseen potenssiin. Viippauskulman muutosten ottaminen huomioon parantaa hiukan Savitsky&Brownin antamien arvojen ja mittaustulosten yhteensopivuutta, mutta lisäksi on päädytty ehdottamaan nopeuden vaikutuksen muuttamista logaritmiseksi seuraavan kaavan mukaan:

$$n_{CG} = 0,00574 \cdot \left(\frac{H^{1/3}}{b} + 0,084 \right) \cdot \frac{\tau}{2} \left(\frac{5}{3} - \frac{\beta}{30} \right) \cdot \ln F_{nv} \cdot \left(\frac{V_K}{\sqrt{L}} \right) \cdot \frac{L/b}{C_\Delta} \quad [\text{g}]$$

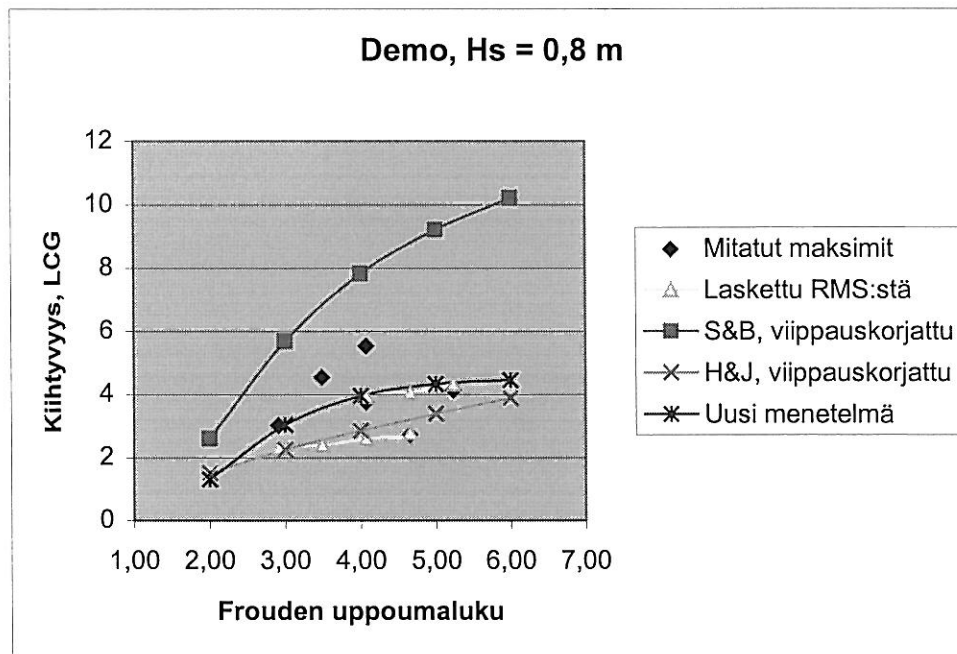
Veneen nopeus sisältyy sekä termiin $\ln(F_{nv})$ että termiin V_K/\sqrt{L} , joka siis nyt on ilman toiseen potenssiin korotusta. Kaavassa käytetään SI-järjestelmän mukaisia yksiköitä lukuun ottamatta nopeutta V_K , joka annetaan solmuissa.

5.1 Vertailulaskelmat

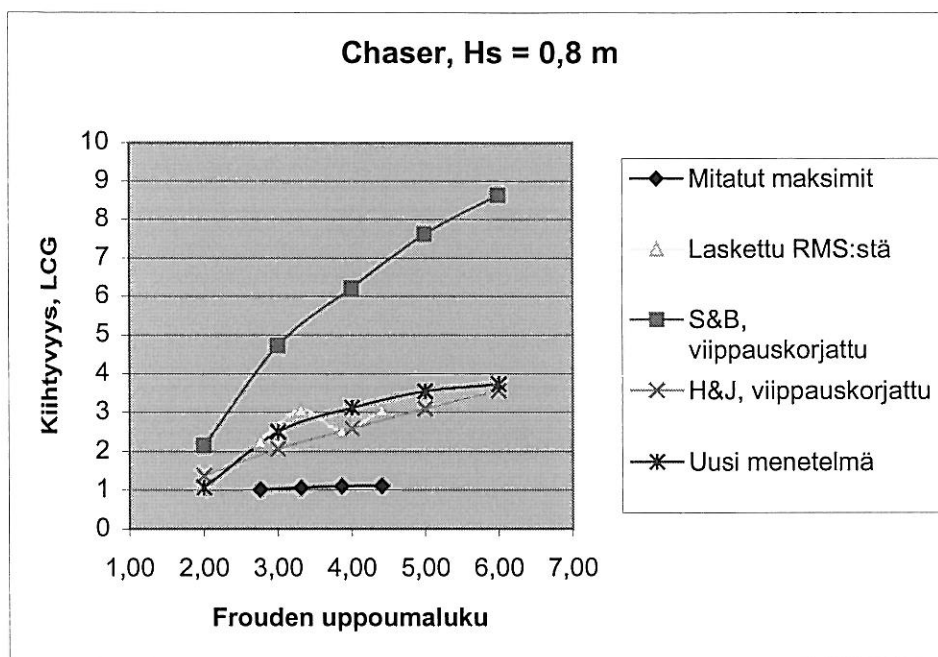
Kuvat 11-14 osoittavat, että uusi menetelmä antaa mittaustulosten kanssa melko yhteensopivia arvoja Demonian lukuun ottamatta. Tässä menetelmän pätevyysalue näyttäisi loppuvan: kyseisen veneen hyvin kapea pohja johtaa menetelmässä liian optimistisiin kiihtyvyyssarvoihin.



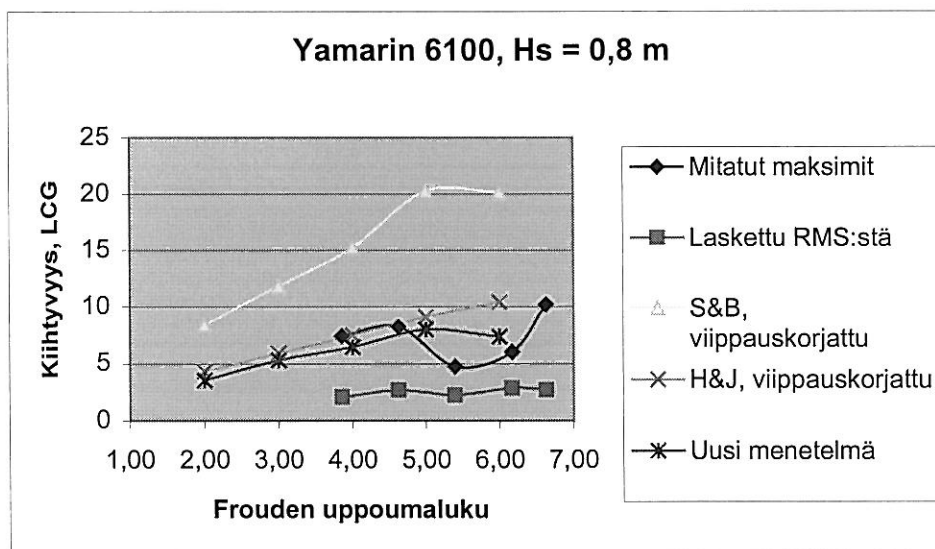
Kuva 11. Uuden menetelmän antamat pystykihtyvydet mitattuihin ja vanhoilla menetelmillä laskettuihin arvoihin verrattuna.



Kuva 12. Uuden menetelmän antamat pystykihtyvydet mitattuihin ja vanhoilla menetelmillä laskettuihin arvoihin verrattuna. Huomattakoon, että mittaukset tehtiin kahdessa osassa, joissa aallon periodi oli erilainen.



Kuva 13. Uuden menetelmän antamat pystykihtiyydet mitattuihin ja vanhoilla menetelmillä laskettuihin arvoihin verrattuna.



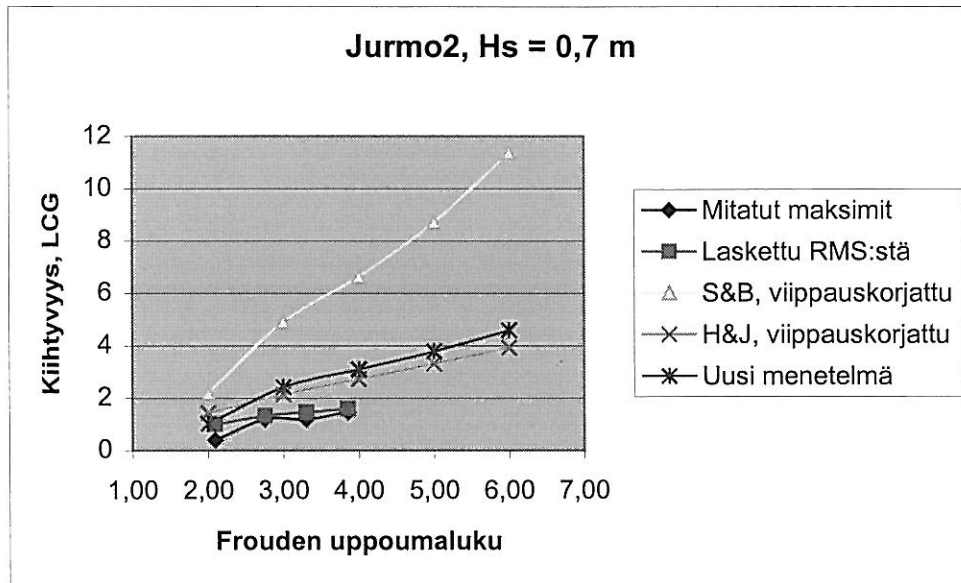
Kuva 14. Uuden menetelmän antamat pystykihtiyydet mitattuihin ja vanhoilla menetelmillä laskettuihin arvoihin verrattuna.

5.2 Verifiointimittaukset

Uuden laskentakaavan verifiointia varten mitattiin pystykihtiyyksiä Marine Alutech Oy:n rakentamasta Jurmo2-prototyypistä, jonka päämitat ovat

Lwl	11,5 m
Bch	3,1 m
Dspl	11,1 m ³
β	17°

Mittaukset tehtiin Hangon läntisellä selällä, merkitsevä aallonkorkeus oli n. 0,7 m. Mitatut ja lasketut pystykiihtyvyydet on esitetty kuvassa 15.



Kuva 14. Uuden menetelmän antamat pystykiihtyvyydet mitattuihin ja vanhoilla menetelmillä laskettuihin arvoihin verrattuna.

6 Johtopäätökset

Kehitetty uusi menetelmä antaa pystykiihtyvyyksille arvoja, jotka ovat lähempänä mittaustuloksia kuin vanhojen menetelmien ennusteet. Erityisesti suurilla nopeuksilla ($F_{nol} > 3$) voidaan vertailla päämittojen vaikutusta merikelpoisuuteen entistä luotettavammin ja asettaa tämä parametri rinnakkain muiden tekijöiden, kuten tyynen veden suorituskyvyn kanssa.

Koska kaava suurelta osin edelleen perustuu Savitsky&Brownin menetelmään, on sen pätevyysalue rajattava nyt mitattujen veneiden kattamaan alueeseen. Eri parametrisuhteiden tarkentaminen ja pätevyysalueen varmistaminen olisikin tärkeä jatkotutkimuksen aihe.

Mukavuuskriteerien soveltaminen lähteen [2] mukaisesti ei tässä vaiheessa ole mahdollista, koska kriteerit on tarkoitettu erityyppisen värähtelyn arviointiin. "Hyvin epä mukavan" rajat (n. 0,2 g) ylittyvät yleensä selvästi.

7 Yhteenveto

Nopeiden veneiden pystykiihtyvyyksien ennustamiseen on kehitetty laskentakaava, joka perustuu Savitsky&Brownin menetelmään, mutta jossa veneen nopeus otetaan huomioon eri tavoin. Kaava antaa erityisesti suurilla nopeuksilla arvoja, jotka ovat selvästi lähempänä mittaustuloksia kuin aiemmat menetelmät. Kaavaa voidaan soveltaa nopeiden veneiden

merikelpoisuusvertailuihin esisuunnitteluvaiheessa. Pätevyysalueen tarkentaminen ja fysikaalisen taustan varmentaminen olisivat seuraavat vaiheet menetelmän kehittämisessä.

Lähdeviitteet

1. Hentinen, M: Slamming-kuormat nopeassa luotsiveneessä, mittaustulokset. VTT VALB355, Espoo 1998
2. Hentinen, M: Nopeiden, liukuvien veneiden mukavuuskriteerit ja pystykihtiävyyksien mittaaminen, kirjallisuusselvitys. VTT BVAL36-011117, Espoo 2001