

**Nopeiden, liukuvien veneiden
mukavuuskriteerit ja
pystykiihtyvyyksien mittaaminen**

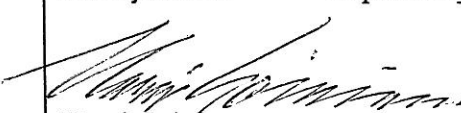


Kirjallisuusselvitys

Raportti BVAL36-011117

Markku Hentinen

Espoo, 6.4.2001

| | | |
|---|----------------------------|---|
| A | Työraportti | |
| B | Julkinen raportti | X |
| C | Luottamuksellinen raportti | |

| | |
|--|--|
| Raportin nimi Nopeiden, liukuvien veneiden mukavuuskriteerit ja pystykiehtyvyyksien mittaaminen | |
| Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus TEKES, Suomenlahden merenkulkupiiri, Rajavartiolaitoksen esikunta, Merivoimien esikunta, Marine Alutech, Palkkiyhtymä Oy, Wihuri Oy, Kesko Oy | Raportin numero BVAL36-011117 |
| Projekti COMFORT RIDE | Suoritteiden numero V9SU00335 |
| Laatija(t) Markku Hentinen | Sivujen/liitesivujen lkm 10 |
| Avainsanat slamming, pystykiehtyvyys, liukuva vene, värähtelykriteerit, mukavuus | |
| Tiivistelmä Tässä raportissa on luotu katsaus ihmiseen kohdistuvan värähtelyn vaikutuksia kuvaaviin menetelmiin erityisesti nopeiden, liukuvien veneiden kannalta. Nykyisellään sopivia, valmiita mukavuuskriteerejä ei löydetty, mutta yleisen mekaanisen värähtelyn arviointiin tarkoitettu ns. VDV-arvo voisi olla lupaava veneisiin sovellettuna. Koska kriteerejä hyväksyttävälle VDV-arvoille mm. veneympäristössä ei kuitenkaan ole, tarvittaisiin jatkotoimina yhteistyötä eri kulkuvälineiden tilaajien ja niiden valmistajien välillä sopivien kriteerien löytämiseksi. | |
| Allekirjoitukset Espoossa <u>6.7</u> .2001 | |
|  Harri Soininen Tutkimuspäällikkö |  Markku Hentinen Tutkija |
| |  Tarkastanut |
| Jakelu: Rahoittajat, 1 kpl kukin VTT Valmistustekniikka/VAL3, 3 kpl TKK, 1kpl | |
| VTT Valmistustekniikka Laiva- ja konetekniikka PL 1705 02044 VTT | Puh.vaihde: (09) 4561 Faksi: (09) 455 0619, (09) 456 5888 Sähköposti: .@vtt.fi WWW: http://www.vtt.fi/val/ |

Alkusanat

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

Espoo, 6.4.2001

Tekijät

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Alkusanat..... | 2 |
| 1 Johdanto | 4 |
| 2 Tavoite | 4 |
| 3 Kohteen kuvaus ja rajaukset | 4 |
| 4 Mukavuuskriteerit ja mittaustavat..... | 5 |
| 4.1 Merisairaus | 5 |
| 4.2 Pystyssä pysyminen | 6 |
| 4.3 Iskut ja mekaaninen värähtely..... | 7 |
| 5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset..... | 9 |
| 6 Yhteenveto | 10 |

1 Johdanto

Hyvin nopeille, liukuville veneille pyrittiin löytämään kirjallisuudesta valmiita mukavuuskriteerejä jo ns. SOFT RIDE -projektissa [1]. Mukavuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä ennen kaikkea toimintakykyä, ja kriteereillä suosituksia pystykiihtyvyyksien maksimiarvoille eri käyttötarkoituksia varten. Liukuville, keveille veneille ei valmiita mukavuuskriteerejä kuitenkaan löytynyt. SOFT RIDE -projektin jatkoksi käynnistetyssä COMFORT RIDE -projektissa päämääräksi asetettiin menetelmä, jolla liukuvien veneiden merikelpoisuutta voitaisiin vertailla nimenomaan pystykiihtyvyyksien ja niille asetettujen kriteerien valossa. Tässä raportissa on luotu katsaus mukavuuskriteereihin ja mittaustapoihin yleisemmin ja etsitty kirjallisuudesta ihmiseen kohdistuvan värähtelyn vaikutuksia kuvaavia menetelmiä.

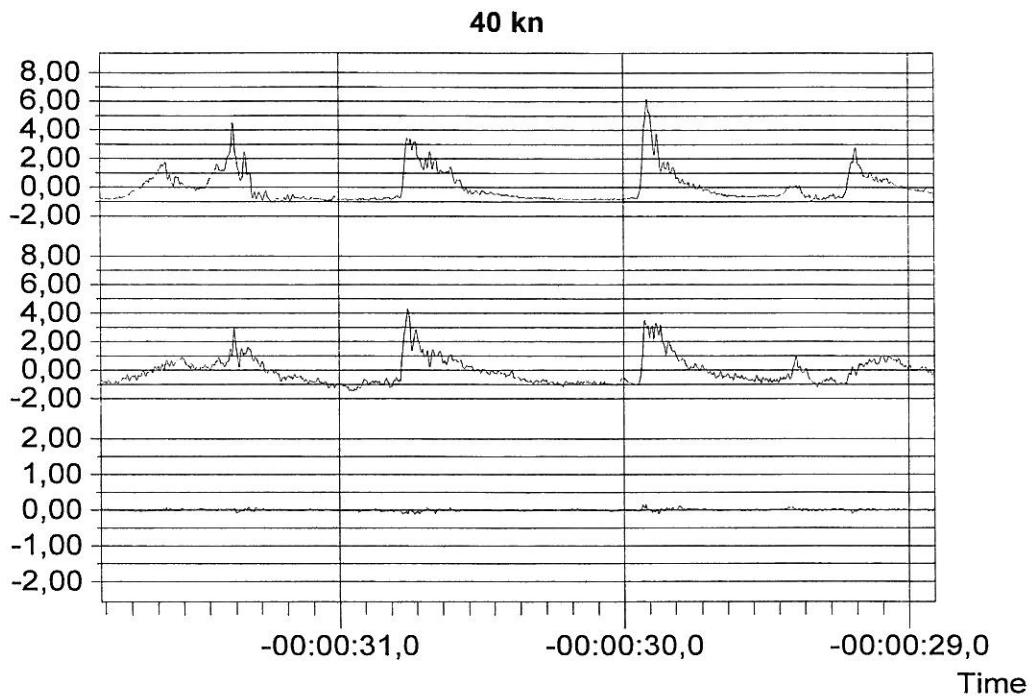
2 Tavoite

Tämän raportin tavoitteena on luoda katsaus ihmiseen kohdistuvan värähtelyn vaikutuksia kuvaaviin menetelmiin erityisesti nopeiden, liukuvien veneiden kannalta. Työ liittyy COMFORT RIDE -projektiin, jonka tavoitteena on löytää merikelpoisuuskriteerejä kyseisille venetyypeille, kun merisairauskriteerit eivät enää päde.

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.

Slamming-iskujen voimakkuudesta veneen massahitauteen nähden seuraa, että nopeiden veneiden liikkeet merenkäynnissä poikkeavat laivoista erityisesti taajuussisältönsä ja amplitudinsa osalta, kts. kuva 1. Vaikka iskut ovat lyhytaikaisia, ovat niissä esiintyvät kiihtyvyydet ja niiden aiheuttamat liikeamplitudit niin suuria, että istuvankin ihmisen toiminta vaikeutuu. Näistä ovat esimerkkejä mm. kartan tai näyttöjen lukeminen, kytkinten tai painonappien käyttö, veneessä kävelemisestä puhumattakaan. Terveysvaikutukset liittyvät usein selkävammoihin.



Kuva 1. Tyypillisiä kiihtyvyyden [g] aikahistorioita (ylh. pystykiihtyvyys ohjaajan kohdalla, kesk. pystykiihtyvyys ja alh. vaakakiihtyvyys painopisteessä), jotka on mitattu nopean, keveän veneen jäykistä rakenteista pienessä ($H_s \approx 0,4$ m) aallokossa.

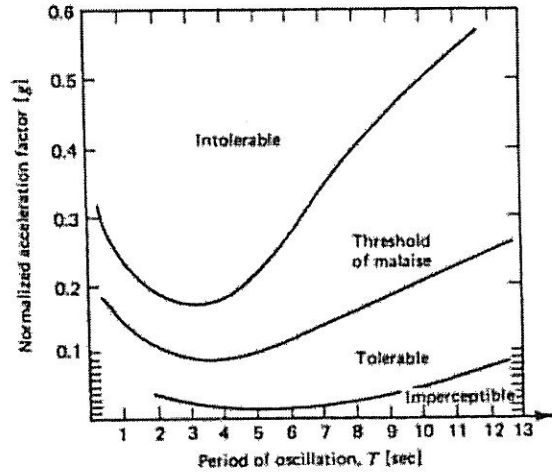
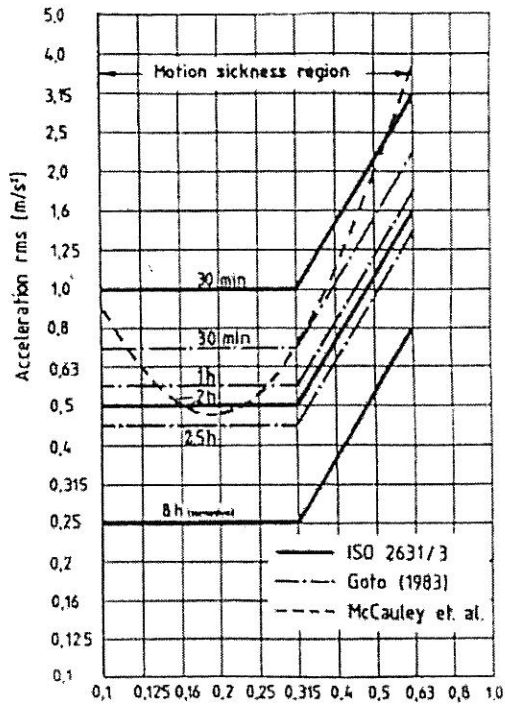
Nopeille veneille sopivien mukavuuskriteerien ja kiihtyvyyksien tai liikkeiden mittaustapojen etsintä on seuraavassa aloitettu kahdelta suunnalta: laivojen liikkeisiin sopivien kriteerien ja menetelmien eli matalien taajuuksien kautta, sekä suuremmilla taajuuksilla tapahtuvan mekaanisen värähtelyn kautta.

4 Mukavuuskriteerit ja mittaustavat

Mukavuudella tarkoitetaan tässä ennen kaikkea miehistön toimintakykyä, mutta myös viihtyvyyttä, kun pystykiihtyvyydet kasvavat aallokossa ajettaessa. Seuraavassa on tarkasteltu kirjallisuuslähteiden perusteella, mitä kriteerejä hyväksyttävillä pystykiihtyvyyksille on saatavilla.

4.1 Merisairaus

Laivoilla mukavuuskriteerit ovat ennen kaikkea merisairauskriteerejä, jotka ulottuvat taajuusalueelle 0,1-0,63 Hz [2], joskus käyriä on jatkettu lähes 2 Hz saakka [3]. Pystykiihtyvyyden RMS-arvot eivät saisi ylittää 0,5 - 3 m/s², kts. kuva 2.



Kuva 2. Pahoinvointia aiheuttavat pystykiihtyvyydet merisairauskriteereissä [2, 3]

Yleinen käsitys on, että yli 0,5 Hz taajuudella merisairaus ei ole ongelma [1]. Nopeissa veneissä merisairaus onkin harvinaista, koska altistusaika on yleensä melko lyhyt ja aaltojen kohtaamistaajuus varsinkin vasta-aallokossa suuri. Kohtaamistaajuus voidaan laskea kaavasta

$$\omega_e = \omega_w \left(1 - \frac{\omega_w V}{g} \cos \mu \right) \quad (1)$$

missä kulmataajuus $\omega = 2\pi/T$, alaviite w viittaa aaltoon ja e kohtaamiseen, ja μ on aluksen suunnan ja aaltojen etenemissuunnan välinen kulma (vastaisessa aallokossa $\mu=180^\circ$). Esimerkiksi jos aallon periodi on 4 s ja veneen nopeus 30 solmua, on kohtaamiskulmataajuus vasta-aallokossa n. 5,45 rad/s eli kohtaamistaajuus on n. 0,87 Hz.

4.2 Pystyssä pysyminen

Merisairauden sijaan toimintakykyä ja mukavuutta nopeissa veneissä voi heikentää pystyssä pysymisen vaikeus. Vaikka lyhyehköjä aikoja voidaankin pysytellä istumassa, tulisi ainakin suuremmissa aluksissa voida seistä ja kävellä ilman suurta vaaraa tasapainonsa menettämisestä. Nopeita aluksia varten onkin kehitetty ns. pystyssäpysymiskriteeri [2], jossa otetaan huomioon myös vaakakiihtyvyydet.

Jos pitkittäiskiihtyvyydet jätetään huomiotta, kaatuu kannella seisova, eteenpäin katsova henkilö, kun [1]

$$hm| -a_{lat} - g\eta_4 | > -lm(-g - a) \quad (2)$$

missä η_4 on aluksen keinunta, a_{lat} poikittais- ja a pystykiihtyvyys kohdassa, jossa henkilö seisoo, m on henkilön massa, h painopisteen korkeus ja l jalkaterän ja painopisteen välinen vaakäetäisyys. Tyypilliseksi l/h -suhteeksi katsotaan 0,25.

Aluksen operointirajoituksia voidaan arvioida pystyssäpysymisen perusteella ennustamalla, kuinka usein henkilöt menettävät tasapainonsa aikayksikköä kohden. Lähteen [2] mukaan kansityöskentely sota-aluksessa heikkenee merkittävästi, jos näitä horjahduksia tapahtuu useammin kuin yksi minuutissa. Matkustaja-aluksille esitetään alustavasti kymmenen kertaa tiukempaa arvoa.

4.3 Iskut ja mekaaninen värähtely

Värähtelyjen vaikutusta ihmiseen edellä esiteltyjä suuremmilla taajuuksilla käsitellään mekaaniseen värähtelyyn liittyvissä standardeissa. Näitä ovat

- ISO 2631 (1997), mekaanisen värähtelyn vaikutukset ihmiseen yleisesti
- ISO 6954 (1984) ja ISO/DIS 6954 (1999), värähtelymittaukset laivoissa
- BS 6841 (1987), johdonmukainen pohja ISO 2631:lle

Nämä standardit sisältävät mittauksissa ja raportoinnissa käytettävät menettelytavat ja menetelmät normalisoidujen arvojen laskemiseksi, mutta eivät selkeitä raja-arvoja hyväksyttävälle värähtelytasolle. Tämä täytyy määritellä tapauskohtaisesti, jolloin otetaan huomioon mm. värähtelyn tyyppi:

- Transientti (iskumainen) värähtely tarkoittaa, että nopeasti kasvavan piikin jälkeen värähtely vaimenee nopeasti
- Jaksottainen värähtely tarkoittaa, että lyhytaikaisten voimakkaampien värähtelyjaksojen välisinä aikoina värähtelytasot ovat selvästi alhaisempia
- Jatkuva värähtely tarkoittaa, että värähtely jatkuu keskeytymättömänä tarkastelujakson aikana.

Standardin ISO 2631-1 [5] mukaan värähtelyn vaikutukset ihmiseen ovat riippuvaisia värähtelyn tasosta, taajuudesta ja suunnasta. Lisäksi värähtelyn vaikutuskohta ja kehon asento vaikuttavat asiaan, minkä takia taajuuspainotukset ovat erilaisia eri rakenteille, kuten lattioille ja istuimille. Lisäksi eri taajuuspainotuksia on esitetty sen mukaan, onko kriteerinä terveystarkkohdat, mukavuus ja havaintokyky, vai merisairaus.

Värähtelytasojen määrittämisen tulee ISO 2631:n mukaan aina sisältää kiihtyvyyden neliöllinen keskiarvo (RMS, root-mean-square):

$$a_w \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

missä a_w on taajuuspainotettu kiihtyvyys ja T mittausjakson pituus. RMS-arvo kuvaa säännöllisen värähtelyn vaikutuksia hyvin, mutta se aliarvioi iskumaisten värähtelyjen vaikutusta mukavuuden huononemiseen. Tietyn värähtelysignaalin kuulumista säännölliseen tai iskumaiseen värähtelyyn voidaan arvostella harjakertoimen (crest factor) avulla, eli piikin maksimiarvon ja RMS-arvon suhteella. Standardin mukaan RMS-arvo sopii värähtelyn vaikutusten arviointiin, jos harjakerroin on enintään 9. Karkeaksi arvioksi mukavuudesta RMS-arvojen funktiona on annettu seuraava taulukko:

Taulukko 1. Värähtelytason (RMS) vaikutus mukavuuteen (jatkuva värähtely) [5]

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Alle 0,315 m/s ² | ei epämukavaa |
| 0,315 - 0,63 m/s ² | hieman epämukavaa |
| 0,5 - 1 m/s ² | melko epämukavaa |
| 0,8 - 1,6 m/s ² | epämukavaa |
| 1,25 - 2,5 m/s ² | hyvin epämukavaa |
| Yli 2 m/s ² | äärimmäisen epämukavaa |

Suuremmilla harjakertoimilla suositellaan MTVV-arvon (Maximum Transient Vibration Value) ja VDV-arvon (Vibration Dose Value) käyttöä. MTVV on liukuvasta RMS-arvosta (running r.m.s) lasketun hetkellisen kiihtyvyyden $a_w(t_0)$ maksimi-arvo tietyllä, tarkastelun alaisella aikajaksolla. VDV-arvo taas on kumulatiivinen, eli se kuvaa henkilöön kohdistuneen värähtelyn kokonaisenergiaa:

$$VDV = \left\{ \left[\int_0^T [a_w^4(t)] dt \right]^{1/4} \right\} \quad (2)$$

VDV:n todetaan muissakin lähteissä olevan sopiva vertailuarvo iskuja sisältävään värähtelyyn, erityisesti jos erityyppisiä "värähtelyannoksia" halutaan verrata keskenään. Olennainen puute on kuitenkin se, ettei standardissa ole esitetty mukavuuskriteeriä, jossa hyväksyttävät VDV-tasot olisi määritelty.

ISO 2631 -standardi perustuu pitkälti British Standards Institutionin standardiin **BS 6841** [8]. Kyseisessä standardissa 0,5-80 Hz taajuudella ihmiseen kohdistuvan värähtelyn vaikutukset jaetaan kolmeen ryhmään:

- vaikutukset terveyteen
- vaikutukset toimintaan
- vaikutukset mukavuuteen

ISO 2631:n suosituksesta poikkeavasti RMS-arvo ehdotetaan korvattavaksi RMQ-arvolla (root mean quad) tai VDV-arvolla jo harjakertoimen ollessa yli 6.

$$RMQ = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{1/4} = \frac{VDV}{T^{1/4}} \quad (3)$$

Taajuuspainotukset ovat samat kuin ISO 2631:ssa.

Laivojen värähtelyn mittaamiseen, raportointiin ja arviointiin tarkoitettu standardi ISO 6954 on uudistettavana. Uudesta DIS-versiosta [4] on jätetty pois piikkien maksimia koskeva osa ja käytetään vain RMS-arvoja. Sekä kiihtyvyydelle että värähtelynopeudelle on esitetty raja-arvot, joiden yläpuolella "kielteiset kommentit" ovat todennäköisiä ja toiset raja-arvot, joiden alapuolella "kielteiset kommentit" ovat epätodennäköisiä. Nämä rajat on esitetty taulukossa 2 kolmelle eri tapaukselle:

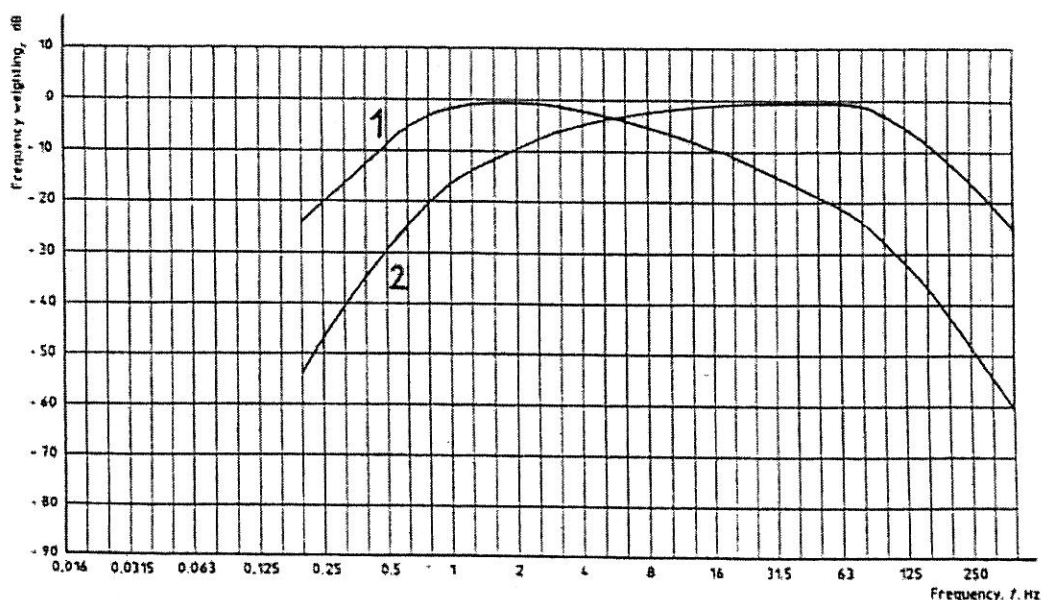
- A matkustajahytit
- B miehistöhytit
- C työtilat

Taulukon kaikki arvot ovat taajuuspainotettuja RMS-arvoja alueella 1-80 Hz.

Taulukko 2. Värähtelyn nopeuden ja kiihtyvyyden RMS-arvojen vaikutus mukavuuteen [4]

| | Alue A | | Alue B | | Alue C | |
|---|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|
| | [mm/s] | [mm/s ²] | [mm/s] | [mm/s ²] | [mm/s] | [mm/s ²] |
| Arvot, joiden yläpuolella kielteiset kommentit todennäköisiä | 4 | 143 | 6 | 214 | 8 | 286 |
| Arvot, joiden alapuolella kielteiset kommentit epätodennäköisiä | 2 | 71,5 | 3 | 107 | 4 | 143 |

ISO/DIS 6954:n mukainen taajuuspainotus sekä kiihtyvyydelle että värähtelyn nopeudelle on esitetty kuvassa 3.



- 1 based on acceleration as input quantity
 2 based on velocity as input quantity

Kuva 3. Taajuuspainotukset kiihtyvyydelle ja värähtelyn nopeudelle

5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Mukavuuskriteerit ja pystykriteerien mittaaminen keskittyvät laivoissa alhaisilla taajuuksilla (<1 Hz) aallokon aiheuttamiin liikkeisiin ja lähinnä merisairauden esiintymiseen; tälle onkin selvät kriteerit. Suuremmilla taajuuksilla edellä esitetyt standardit sopivat erityisesti koneiston ja propulsio-aiheuttaman värähtelyn vaikutuksiin ja sen mittaamiseen, myös slammin- gista aiheutuvaa värähtelyä on käsitelty. Esitetyt kriteerit liittyvät kuitenkin lähinnä matkustusmukavuuteen, eivät miehistön toimintakykyyn.

Iskumaisia osia sisältävän värähtelyn arvioinnissa VDV-arvo on lupaava. Sen käyttö vaatisi kuitenkin uutta tietoa nopeissa veneissä esiintyvien iskutyypin vaikutuksista ihmiseen. Vastaavia tarpeita löytynee maastoajoneuvoista ja työkoneista; näissä värähtelytyypit olisivat

todennäköisesti melko lähellä nopeita, liukuvia veneitä. Värähtelyn kestoajan vaikutus tulisi myös selvittää.

6 Yhteenveto

Tässä raportissa on luotu katsaus ihmiseen kohdistuvan värähtelyn vaikutuksia kuvaaviin menetelmiin erityisesti nopeiden, liukuvien veneiden kannalta. Nykyisellään sopivia, valmiita mukavuuskriteerejä ei löydetty, mutta yleisen mekaanisen värähtelyn arviointiin tarkoitettu ns. VDV-arvo voisi olla lupaava veneisiin sovellettuna. Koska kriteerejä hyväksyttävälle VDV-arvoille mm. veneympäristössä ei kuitenkaan ole, tarvittaisiin jatkotoimina yhteistyötä eri kulkuvälineiden tilaajien ja niiden valmistajien välillä sopivien kriteerien löytämiseksi.

Lähteet:

1. Hentinen, M: Slamming-kuormien ja pystykiihtyvyyksien määrittäminen liukuvissa veneissä, kirjallisuusselvitys. VTT VALB327, Espoo 1998
2. Karppinen, T; Hellevaara, M; Haapajoki-Hellevaara, T: Guidelines and criteria for the seakeeping performance assessment of fast passenger vessels. VTT VAL9201/94/LAI, Espoo 1994
3. Bhattacharyya, R (ed.): Dynamics of Marine Vehicles. John Wiley & Sons, New York 1978
4. ISO/DIS 6954: Mechanical vibration - Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration in merchant ships. International organization for standardization 1999.
5. ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, 1997
6. ISO 2631-2: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), 1989
7. ISO 2631-3: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 3: Evaluation of exposure to whole-body z-axis vertical vibration in the frequency range 0,1 to 0,63 Hz, 1985
8. BS 6841: Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. BSI 1987