

Opinnäytetyö

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

Infratekniikka

2021

Oskari Rautio

UUDEN ALUSKALUSTON MITTASUHTEIDEN MUUTOS JA VAIKUTUS VÄYLÄN MITOITUKSEEN

Oskari Rautio

UUDEN ALUSKALUSTON MITTASUHTEIDEN MUUTOS JA VAIKUTUS VÄYLÄN MITOITUKSEEN

Alusten mittasuhteet ovat muuttuneet merkittävästi varsinkin RoRo-alusten kohdalla, joiden pituus on kasvanut voimakkaasti, mutta syväys ei ole kasvanut enää samassa suhteessa. Perämeren liikenteeseen on tulossa linjalaivoja, jotka ylittävät tällä hetkellä suositellun nopeuspainumakaavan reunaehtoja. Alukset ovat Suomen mittakaavalla suuria, mikä on myös herättänyt tarvetta selvittää väylän leveyden riittävyttä nykyisellä mitoitustavalla. Opinnäytetyön tarkoituksena on kartoittaa varustamoiden rakenteilla ja suunnitteilla olevat alukset, selvittää miten reunaehtojen ylitys vaikuttaa nopeuspainuman ennustamiseen sekä tutkia vaihtoehtoisia mitoitustapoja väylän leveydelle ja tuoda kehittämissuhteita Laivaväylien suunnitteluohjeeseen. Tämän opinnäytetyön tilaajana toimi Väylävirasto.

Työssä pyrittiin saamaan kattava kuva tulevista aluksista lähestymällä varustamoita sähköpostitse, mikä lopulta osoittautui haasteelliseksi, koska varustamoilta ei saatu kattavaa tietoa. Tilatuista aluksista saatiin kuitenkin hyödyllistä tietoa muista lähteistä käyttämällä, mm. varustamoiden lehdistöjulkaisuja hyödyntämällä. Työssä perehdyttiin myös alusten kokokehitystä ohjaaviin tekijöihin. Nopeuspainuman ennustamiseen valittiin kolme vertailtavaa kaavaa, joilla on kansainvälisen ohjeen mukaan päästy luotettaviin tuloksiin. Väylän leveyden mitoitukseen vertailtavaksi kaavaksi valikoitui tutkimustulosten perusteella menestynyt ROM-standardin mukainen mitoitus.

Nopeuspainuman laskentakaavoista rakennettiin Exceliin laskentataulukko, missä kaavojen vertailu onnistuu nopeasti ja tuloksista saadaan rakennettua kuvioita tulkitsemisen helpottamiseksi. Tuloksista ei ilman laboratorio- tai kenttätutkimuksia ole eroteltavissa parhaiten toimivaa kaavaa, vaan analyyseissä korostuu keskiarvotarkastelun tärkeys. ROM-standardin mukainen mitoitus vaikuttaa turvallisemmalla mitoitustavalla ja kookkaita aluksia käyttämällä kaava tuntuu antavan suurempia arvoja leveydelle verrattuna nykyiseen kaavaan. Mitoituksen oikeellisuus on syytä kuitenkin varmistaa simulaattorikokein.

ASIASANAT:

aluskoko, mittasuhteet, nopeuspainuma, väylän leveys

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil engineering

Instructor Pirjo Oksanen, M.Sc.Eng.

2021 | 85 pages, 1 page in appendices

Oskari Rautio

CHANGE IN THE PROPORTIONS OF THE NEW VESSELS AND IMPACT ON THE DIMENSIONING OF THE WATERWAY

The proportions of vessels have changed significantly, especially for RoRo vessels, which have seen a sharp increase in length, but the dredging has no longer increased in same proportion. New line ships are entering to traffic in the Bothnian Bay, which are currently exceeding the constraints of the recommended squat formula. The vessels are large on a Finnish scale, which has also raised the need to investigate the adequacy of the width of the fairway with the current dimensioning. The purpose of the thesis is to chart the vessels under construction and planned by the shipping companies, determine how exceeding the constraints affects the forecasting of squat, explore alternative dimensioning methods for the width of the fairway and to bring development proposals to the waterway design guidelines. This thesis was commissioned by the Finnish Transport Infrastructure Agency.

The aim of the work was to obtain a comprehensive picture of future vessels by approaching shipping companies by e-mail, which ultimately proved challenging and no comprehensive information was obtained through this. However, useful information from the vessels ordered was obtained using other sources, including through press releases from shipping companies. The work also focused on the factors guiding the development of ships. Three comparable formulas were chosen to predict the squat, which have obtained reliable results according to international guidelines. Based on the results of the research, the successful ROM dimensioning was chosen as a formula to compare with the current dimensioning method.

A spreadsheet was built from the squat calculation formulas into Excel, where the formulas can be compared quickly, and the results can be used to construct patterns to facilitate interpretation. Without laboratory or field studies, the results cannot be distinguished by the best-performing formula, but the analyses highlight the importance of an average review. Rom dimensioning seems to be a safer dimensioning method and by using large vessels, the formula seems to give higher values for width compared to the current formula. However, the correctness of the dimensioning should be verified by simulator tests.

KEYWORDS:

vessel size, proportions, squat, waterway width

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	9
2 LAIVAVÄYLÄN SUUNNITTELUPROSESSI	11
3 VÄYLÄN SUUNNITTELU JA MITOITUS	14
3.1 Mitoitusalus	14
3.2 Väylän linjaus	15
3.3 Väylän leveys	18
3.4 Väylän syvyys	24
4 SQUAT	28
4.1 Ennustamisen tärkeys	31
4.2 Aluksen nopeuspainuman laskemiseen vaikuttavat tekijät	32
4.3 Väylän ominaisuudet laskennassa	35
4.4 Yhdistetyt parametrit	38
5 ALUSTEN KOKO TULEVAISUUDESSA	39
5.1 Ilmastotavoitteet	39
5.2 Ilmastotavoitteiden vaikutus	40
5.3 Tulevaisuuden innovaatiot	45
5.4 Itämeren olosuhteisiin soveltuvat alukset	47
5.5 Tilatut konttialukset	48
6 NOPEUSPAINUMAN LASKENTAKAAVAT	50
6.1 Mitoitusalus	50
6.2 Väylän tiedot	51
6.3 Käytetyt kaavat	52
6.4 Huuska/Guliev	52
6.5 BarrassB3	54
6.6 Yoshimura	54
6.7 Ankudinov	55
7 KAAVOJEN TULOKSET	59

8 VÄYLÄN LEVEYS	65
8.1 Simulointimallit	65
8.2 ROM-standardin mukainen väylän leveyden mitoitus	69
9 JOHTOPÄÄTÖKSET	80
LÄHTEET	83

LIITTEET

Liite 1. Väylän leveys.

KAAVAT

Kaava 1. Yksikaistaisen väylän leveys.	22
Kaava 2. Kaksikaistaisen väylän leveys.	22
Kaava 3. Navigointikaistan leveys.	22
Kaava 4. Frouden luku.	29
Kaava 5. Aluksen uppouman tilavuus.	34
Kaava 6. Aluksen uppouman tilavuussuhde.	34
Kaava 7. Aluksen vedenalainen poikkipinta-ala.	34
Kaava 8. Väylän tehokas leveys.	37
Kaava 9. Väylän leveys pinnassa.	37
Kaava 10. Poikkileikkausala.	37
Kaava 11. Veden keskisyvyys.	37
Kaava 12. Veden relevantti syvyys.	37
Kaava 13. Blockage factor.	38
Kaava 14. Velocity return factor.	38
Kaava 15. Huuska/Gulievin kaava.	53
Kaava 16. Korjauskerroin Huuska/Guliev.	53
Kaava 17. Blockage factor Huuska/Guliev.	53
Kaava 18. BarrassB3 kaava.	54
Kaava 19. Väylän K arvo Barrass.	54
Kaava 20. Yoshimura.	55
Kaava 21. Equivalent velocity term.	55
Kaava 22. Ankudinov MARSIM2000.	55
Kaava 23. Keskipisteen uppouma.	55
Kaava 24. Potkurien vaikutus.	56
Kaava 25. Aluksen rungon vaikutus.	56
Kaava 26. Etenemisnopeuden vaikutus.	56
Kaava 27. Veden syvyyden vaikutus.	56
Kaava 28. Väylän vaikutus.	56
Kaava 29. Syvyystekijä rajoitetuille väylille.	57
Kaava 30. Aluksen trimmikulma.	57

Kaava 31. Potkureiden vaikutus trimmikulmaan.	57
Kaava 32. Trim coefficient.	57
Kaava 33. Trim exponent.	57
Kaava 34. Potkurien vaikutus.	57
Kaava 35. Keulabulbin vaikutus.	58
Kaava 36. Peräsimen vahvikkeen vaikutus.	58
Kaava 37. Alkuperäinen kallistuskulma.	58
Kaava 38. Väylän vaikutus trimmikulmaan.	58
Kaava 39. Väylän leveys.	69
Kaava 40. Väylän nimellinen leveys.	70
Kaava 41. Sortokulmasta aiheutuva lisäleveys.	70
Kaava 42. Sortokulma.	70
Kaava 43. Tuulen aiheuttama sortokulma.	71
Kaava 44. Cv.	71
Kaava 45. Pituussuuntainen tuulipinta-ala.	71
Kaava 46. Vedenalainen alue.	71
Kaava 47. Virtauksen aiheuttama sortokulma.	73
Kaava 48. Aallokon aiheuttama sortokulma.	74
Kaava 49. Hinaajasta aiheutuva sortokulma.	75
Kaava 50. Ylimääräinen lisäleveys.	76
Kaava 51. Väylämerkintöjen virheet.	77

KUVAT

Kuva 1. Alusten ominaisuudet.	15
Kuva 2. Linjauksen karkea luokittelu.	17
Kuva 3. A yksikaistainen väylä, B kaksikaistainen väylä.	19
Kuva 4. Aluksen sorto.	20
Kuva 5. Väylän syvyyskäsitteet.	24
Kuva 6. Alukseen vaikuttavat vertikaaliliikkeet.	25
Kuva 7. Alus kelluu vedessä, koska nettovoimat ovat nolla.	28
Kuva 8. Nopeuspainuma = uppouma + aluksen kallistuma.	29
Kuva 9. Nopeuspainuman ilmiö matalassa vedessä.	30
Kuva 10. Aluksen staattisen trimmikulman vaikutus nopeuspainuman sijaintiin.	31
Kuva 11. Aluksen parametrit.	33
Kuva 12. Aluksen täyteläisyys.	33
Kuva 13. Aluksen ja väylän poikkipinta-alan määrittäminen.	35
Kuva 14. Väylän poikkileikkaustyyppit. U-Avoim, R-Rajoitettu, C-Kanava.	35
Kuva 15. Oceanbird.	46
Kuva 16. Wallenius Sol LNG RoRo.	50
Kuva 17. Väyläkortti Ajoksen 10 m:n väylä.	51
Kuva 18. Oulun väylä 14 m/s 270 deg.	66
Kuva 19. Oulun väylä 14 m/s 315 deg.	67
Kuva 20. Oulun väylä 14 m/s 0 deg.	68
Kuva 21. Standardin ROM mukainen suoran väylän mitoitus.	69
Kuva 22. Tug boat action.	75

KUVIOT

Kuvio 1. Vesiväylähankkeen kulku.	13
Kuvio 2. Three seatriade scenarios of coronavirus & climate change developments 2020-2050.	40
Kuvio 3. Three shipbuilding scenarios showing actual deliveries to 2019 and "required" deliveries scenarios 2020-2050.	42
Kuvio 4. Technology scenario 2 to reach IMO 2050 CO2 target (based on trade scenario2 and shipbuilding scenario 2).	44
Kuvio 5. K1 vs S.	53
Kuvio 6. Squat-tulokset nopeuden funktiona Ajoksen väylällä.	60
Kuvio 7. Squat-tulokset nopeuden funktiona rajoitetulla väylällä.	61
Kuvio 8. Squat-tulokset nopeuden funktiona avovesiväylällä.	62
Kuvio 9. Squat-tulokset nopeuden funktiona avovesiväylällä.	63
Kuvio 10. C0-kertoimen vaikutus nopeuspainuman suuruuteen.	64

TAULUKOT

Taulukko 1. Suositukset väylän linjaukseen.	16
Taulukko 2. Luiskavaran mitoitus.	21
Taulukko 3. Alusvaran suuruus.	21
Taulukko 4. Varaveden määritys alustavassa mitoituksessa.	26
Taulukko 5. Huomioitavat tekijät.	27
Taulukko 6. Ship groundings.	32
Taulukko 7. Parametrit.	36
Taulukko 8. Channel parameters.	36
Taulukko 9. Tilatut konttialukset.	48
Taulukko 10. Aluksen tiedot.	50
Taulukko 11. Kaavojen reunaehdot.	52
Taulukko 12. Squat-taulukko.	59
Taulukko 13. Kv keulabulbillisille aluksille.	72
Taulukko 14. Kv keulabulbittomille aluksille.	72
Taulukko 15. Tyypillisiä alusmittoja.	73
Taulukko 16. Kw kerroin keulabulbillisille aluksille.	74
Taulukko 17. Kw kerroin keulabulbittomille aluksille.	74
Taulukko 18. Kr kerroin.	75
Taulukko 19. Lisäleveys.	76
Taulukko 20. Suurin sallittu riski.	76
Taulukko 21. Reagointinopeudesta johtuva lisäleveys.	77
Taulukko 22. Ylimääräiset turvaetäisyydet.	77

KÄYTETYT LYHENTEET

A _c	väylän poikkileikkausala (m ²) (PIANC 2014, 185)
A _s	aluksen vedenalainen poikkipinta-ala (m ²) (Briggs Ym. 2009, 726)
A _w	väylän poikkipinta-alan ja aluksen poikkipinta-alan erotus (m ²)
B	aluksen leveys (Liikenneviraston ohjeita 2018, 72)
C _B	aluksen uppouman täyteläisyyskerroin (PIANC 2014, 169)
DWT	aluksen kuollut paino (Liikenneviraston ohjeita 2018, 72)
GT	aluksen kokonaisvetoisuus (Liikenneviraston ohjeita 2018, 72)
h	vesisyvyys (m) (PIANC 2014, 185)
h _{mT}	rajoitetun väylän vesisyvyys (m) (PIANC 2014, 185)
h _T	korkeus pohjasta luiskan yläpintaan (m) (PIANC 2014, 185)
IMO	kansainvälinen merenkulkulaitos (IMO 2018)
L _{oa}	aluksen pituus (m) (PIANC 2014, 169)
L _{PP}	aluksen perpendikkelipituus (m) (PIANC 2014, 169)
n	luiskan sivukaltevuus (PIANC 2014, 185)
RoRo	roll on/roll of (PIANC 2014, 6)
S	blockage factor (PIANC 2014, 186)
S ₂	velocity return factor (PIANC 2014, 187)
T	aluksen syväys (m) (Liikenneviraston ohjeita 2018, 72)
TEU	lastiyksikkö 20 jalan kontti (Liikenneviraston ohjeita 2018, 72)
V _K	aluksen nopeus (solmuissa) (PIANC 2014, 185)
V _s	aluksen nopeus (m/s) (PIANC 2014, 185)
W	väylän leveys pohjassa (m) (PIANC 2014, 185)
W _{EFF}	vaikutusalueen leveys (m) (PIANC 2014, 185)
W _{TOP}	väylän ennustettu leveys pinnassa (m) (PIANC 2014, 185)

1 JOHDANTO

Väylävirasto on vastuussa valtion tie-, rata- ja vesiväylien kehittämisestä sekä kunnossapidosta. Virasto pitää huolen myös liikenteen palvelutasosta sekä osallistuu liikenteen ja maankäytön yhteensovittamiseen. Väyläviraston vastuulla olevia vesiväyliä on noin 16 000 km, joista kauppamerenkulun väyliä on noin 4 000 km. Vesiväylien suunnittelu on Väyläviraston vastuulla, kuten myös suunnitteluun liittyvä ohjeistus.

Kunnossapidon ohjaus- ja kehittämysyksikkö vastaa liikenneväylien kunnossapidon suunnittelusta, väylänpidon ohjauksesta, palvelutason ja toimintalinjojen suunnittelusta. Yksikkö päättää toimenpiteiden tärkeysjärjestyksestä sekä kohdistamisesta väylänpidossa. Lisäksi yksikkö on vastuussa kunnossapidon hankinnan kehittämisestä, ohjeista, tuesta ja valtakunnallisista laatuvaatimuksista.

Alukset suunnitellaan kulkemaan mahdollisimman tehokkaasti satamien välillä, mikä tarkoittaa suurinta mahdollista lastia mahdollisimman pienillä kustannuksilla. Alusten kokokehitys on jatkanut tasaista kasvuaan 1960-luvulta aina tähän päivään ja suurimpien rahtialusten koko alkaa jo olla sitä luokkaa, että ne hädin tuskin mahtuvat liikennöimään vierailuissaan satamissa. Alusten staattinen kölivara on pienentynyt ja liikennöintinopeudet kasvaneet, minkä seurauksena nopeuspainumat ovat suurentuneet.

Kansainvälinen merenkululaitos (IMO) on asettanut tavoitteeksi vähentää alusliikenteen hiilidioksidipäästöjä 50 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoteen 2008, mikä tulee osaltaan vaikuttamaan alusten kokokehitykseen. Kansainvälinen meriliikenne tulee kohtaamaan tulevaisuudessa haasteita, jollaisiin se ei ole törmännyt vuosikymmeniin pyrkiessään IMO:n tavoitteisiin.

Nyt aluksen kantavuutta ja tilavuutta varsinkin RoRo-aluksissa haetaan lisäämällä pituutta ja leveyttä, eikä aluksen syväys kasva enää samassa suhteessa muihin mittoihin. Esimerkkinä tästä Perämeren liikenteeseen tulevat linjalaivat, joiden pituus on 242 m, leveys 35,2 m, mutta syväys vain 8,8 m.

Nopeuspainuma ilmiönä on tunnettu jo kauan, mutta sen merkitys pienillä ja hitailla aluksilla on ollut lähes merkityksetöntä. Aluskoon ja nopeuden kasvaessa, nopeuspainuman tarkalla ennustamisella pystytään ehkäisemään alusten pohjakosketuksia ja täten ehkäisemään taloudellisia tappioita ja henkilövahinkoja.

Aluksen nopeuspainuman ennustamiseen on kehitetty useita eri laskentakaavoja, joista monet ovat laajalti käytössä kansainvälisesti. Alusten mittasuhteiden kasvaessa monen kaavan reunaehdot ylittyvät ja saatujen tulosten luotettavuus muuttuu kyseenalaiseksi. Mukaan lukien laivaväylien suunnitteluohjeessa esitelty Huuska/Gulievin kaava. Useat tutkimusryhmät globaalisti pyrkivät kehittämään aluksen nopeuspainuman ennustamiseen tarkempia ja alusten kasvun mukana pysyviä laskentakaavoja.

Tässä työssä tutkitaan alusten kokoa tulevaisuudessa, siihen vaikuttavia tekijöitä, mittasuhteiden vaikutusta nopeuspainuman ennustamiseen ja kaavojen luotettavuuteen. Lisäksi tarkastellaan vaihtoehtoista mitoitustapaa väylän leveyden mitoitukseen uusilla suuremmilla aluksilla.

2 LAIVAVÄYLÄN SUUNNITTELUPROSESSI

Laivaväylien suunnittelu on laaja prosessi, joka pitää sisällään useita eri vaiheita aina esisuunnittelusta rakennusvaiheeseen. Suunnittelulla haetaan ideaaliratkaisua kustannusten, ympäristötekijöiden, navigoitavuuden ja turvallisuustekijöiden välillä. Väylän suunnittelu muodostuu eri osatekijöistä ja suunnittelulla muodostetaan yhtenäinen kokonaisuus väylän leveyden, syvyyden, linjauksen ja merkinnän osalta. Osatekijöistä puhutaan yleensä erikseen, mutta ovat ne voimakkaasti yhteydessä toisiinsa, eikä niitä siten voida ratkaista erillisinä arvoina. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 7.)

Suunnitteluprosessi on yleensä jaoteltavissa kolmeen eri vaiheeseen, jotka ovat

- esisuunnittelu
- yleissuunnittelu
- rakennussuunnittelu.

Esisuunnitelma on hyvin yleispiirteinen ensimmäinen suunnitelma toteutettavasta projektista, joka perustuu usein olemassa oleviin ja joskus puutteellisiin lähtötietoihin. Myös mitoituksessa voidaan käyttää suuntaa antavia likiarvoja. Projektin jatkoedellytykset päätetään esisuunnitelman pohjalta sekä valitaan parhaat vaihtoehdot seuraavaan suunnitteluvaiheeseen. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 8.)

Yleissuunnitteluvaihe on esisuunnittelua huomattavasti kokonaisvaltaisempi esitys, jossa pääpaino on teknisissä ratkaisuissa. Siihen sisältyy myös muita hankkeeseen vaikuttavia tekijöitä, kuten tarve, tavoitteet, vaikutukset ja toteutusedellytykset. Yleissuunnittelussa väylälle määritetään mitoitusperusteet, mitoitusarvot, geometria, kustannukset ja toteutusedellytykset sekä tarvittavat jatkotoimenpiteet. Yleissuunnittelussa voidaan ottaa kantaa useampaan eri toteutusvaihtoehtoon mitoituksen, linjauksen ja merkinnän osalta. Projektin laajuudesta riippuen, voidaan yleissuunnitteluvaihe jakaa eri vaiheisiin, jolloin suunnittelun sisältöä ja aikataulua saadaan helpommin hallittua. Suunnittelun edessä ja väyläsuunnitelman tarkentuessa myös vaihtoehtoja karsiutuu pois. Projektin yleissuunnitelma on myös pohja vesilupasuunnitelmassa. Yleissuunnitteluvaihe koostuu kolmesta erilaisesta teknisen suunnittelun vaiheesta. Näitä ovat alustava mitoitus, perusmitoitus ja tarkentava mitoitus. Kansainvälisissä ohjeissa suunnittelu on jaettu kolmen sijaan kahteen suunnitteluvaiheeseen: Concept design ja detailed design, joista concept design pitää sisällään alustavan- ja perusmitoituksen. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 9.)

Concept design

Ensimmäisessä suunnitteluvaiheessa käytetään karkeita yleisiä ohje- ja suunnitteluarvoja väylän leveyden, syvyyden ja linjauksen määrittämiseen. Tässä vaiheessa prosessin on tarkoitus olla nopeaa, eikä liiallisia lähtöarvoja tarvita, jotta myös muita vaihtoehtoisia suunnitelmia voidaan arvioida nopeasti. Alustava mitoitus perustuu lähtökohtaisesti olemassa olevaan tietoon eikä erityisiä suunnittelutyökaluja tai menetelmiä tässä vaiheessa tarvita. Esisuunnitteluvaiheessa voidaan tarvittaessa kerätä tietoa myös kokeneilta käyttäjiltä suunnittelun helpottamiseksi. (PIANC 2014, 15.)

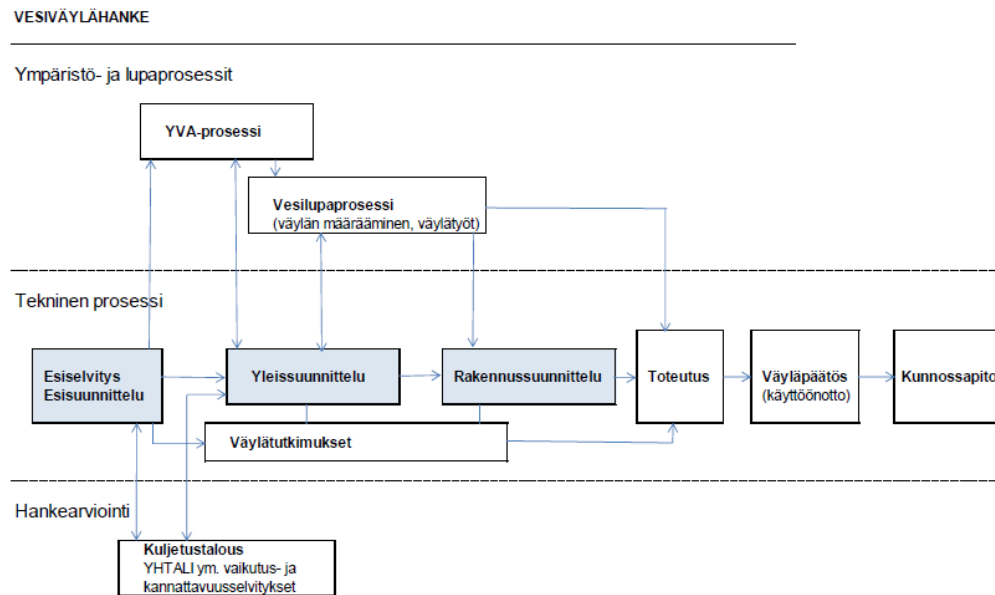
Ensimmäisten suunnitelmaluonnosten tarkentuessa kohti väylän perusmitoitusta otetaan käyttöön tarkempia mitoitusarvoja, jolloin mitoitus tulee tehdä kansainvälisesti hyväksytyjen ohjeiden mukaan kaikki saatavilla oleva tieto hyödyntäen. Mitoituslaskelmat tehdään niin tarkasti kuin se on mahdollista ja tarvittavat kenttäkokeet suoritetaan. (PIANC 2014, 15.) Alustavan- ja perusmitoituksen tulisi johtaa luotettavaan ja kohtuullisen tarkkaan kuvaan väylän linjauksesta, mitoituksesta, turvallisuudesta, navigoitavuudesta, toteutuksesta ja kustannuksista sekä tarvittavista lisätutkimuksista, joita tarvitaan suunnittelun seuraavassa vaiheessa. (PIANC 2014, 16.)

Detailed design

Tarkentava mitoitus on tarkempi ja tiukempi suunnitteluprosessi, jonka tarkoituksena validoida alustavan- ja perusmitoituksen tuloksia. Tässä suunnitteluvaiheessa käytetyt menetelmät perustuvat niin numeerisiin kuin fyysisiin ominaisuuksiin ja vaativat siksi yksityiskohtaisempia lähtötietoja sekä kokemusta ja asianmukaista harkintaa tulosten tulkinnaissa. Väylän navigoitavuutta tarkastellaan paikallisiin ympäristö- ja liikenneolosuhteisiin peilaten. Väylän operatiiviset näkökohdat tarkastetaan tässä vaiheessa. Monissa tapauksissa simulointiin perustuvat tutkimukset ovat tarpeen toiminnallisten näkökohtien varmistamiseksi. Tarkemmassa mitoituksessa tärkein asia on optimoida väylän turvallisuus ja käytettävyys ilman ylimääräisiä kuluja. (PIANC 2014, 18.)

Rakennussuunnitelman pohjana toimii viimeisin vahvistettu yleissuunnitelma. Tässä vaiheessa projektia ei oteta kantaa enää väylän mitoitukseen, vaan ne on päätetty jo yleissuunnitteluvaiheessa, pois lukien pienet muutokset tai tarkennukset parempien pohjatutkimusten ja kustannustehokkuuden parantamisen seurauksena. Rakennussuunnittelussa pääpaino on projektin teknisessä toteutuksessa ja siinä tulee esittää kaikki työt ja toimenpiteet, joita väylän valmiiksi saattaminen vaatii. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 10.) Kuviossa 1 on kuvattu vesiväylähankkeen kulku.

Kuvio 1. Vesiväylähankkeen kulku (Liikenneviraston ohjeita 2018, 8).



Ympäristövaikutusten arviointi ja vesilupasuunnittelu

YVA:n tarkoituksena on vähentää tai ehkäistä hankkeesta aiheutuvia haitallisia vaikutuksia ympäristöön. Ympäristövaikutukset arvioidaan suunnitteluvaiheessa, jolloin haitallisiin ympäristövaikutuksiin voidaan vielä ottaa kantaa ja vaikuttaa. YVA toimii suunnittelun apuvälineenä ympäristövaikutusten ehkäisyssä ja menettelyn tulokset huomioidaan lupaharkinnassa. Suunnittelusta vastaava toimija on vastuussa ympäristöselvityksen tekemisestä. Prosessia valvoo ja ohjaa ELY-keskus. (Ympäristöministeriö 2016.) Vesiväylähankkeessa YVA-prosessi on ajankohtainen esisuunnittelu- tai alustavassa yleissuunnitteluvaiheessa. Prosessissa on syytä esittää kaikki ympäristövaikutuksiltaan erilaiset vaihtoehdot. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 9.)

Vesilaissa on määritetty eri hankkeita, joihin vaaditaan vesilupa. Lain tarkoituksena on ohjata, edistää ja yhtenäistää vesivarojen käyttöä siten, että se on yhteiskunnan, taloudellisuuden ja ekologisuuden kannalta kestävä. Lupaviranomaisena toimii Aluehallintavirasto. (Vesilaki 27.5.2011/587.) Vesiväylähankkeessa pohjana vesilupasuunnittelulle toimii yleissuunnitelma, jossa on riittävällä tarkkuudella kuvattu väylän sijaintitiedot ja mitat. Lisäksi vesilupaa haettaessa tulee kaikki luvanvaraiset asiat olla tarkasti määritelty. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 9.)

3 VÄYLÄN SUUNNITTELU JA MITOITUS

3.1 Mitoitusalue

Lähtökohtana väylän mitoituksessa käytetään niin sanottua mitoitusaluea, jonka mukaan väylän päämitat ja geometria määritetään. Mitoitusalueeksi valitaan yleensä suurin väylää toistuvasti käyttävä alue, joka edustaa ohjailtavuudessa alustyyppinsä keskitasoa. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 23.)

Väylän tulee täyttää lukuisia eri kriteereitä ja monissa tapauksissa voi olla suotavaa käyttää useampaa mitoitusaluea, jotta väylän mitat ja geometria saadaan paremmin vastaamaan tulevia tarpeita. Mitoitusaluea valittaessa ilmeinen valinta olisi alue suurimmilla mitoilla. Yksittäinen alue ei kuitenkaan aina edusta epäedullisinta mitoitusperustetta kaikilla kriteereillä. Alue, jolla on suuri syväys, voi edustaa mitoitusaluea väylän syvyyttä määritettäessä, mutta leveyden määrittämiseen voidaan käyttää aluetta, jolla on esimerkiksi suurempi tuulikuorma ja huonommat navigointiominaisuudet. Mitoitusperusteita ovat mm. navigointiominaisuudet, tuulikuorma, vaarallinen rahti, liikenteen tiheys, väylän linjaus, väylän alttius tuulelle, aalloille, virtauksille ja ruoppauskustannukset. Väylästä riippuen muitakin mitoitusperusteita saattaa esiintyä. (PIANC 2014, 18.)

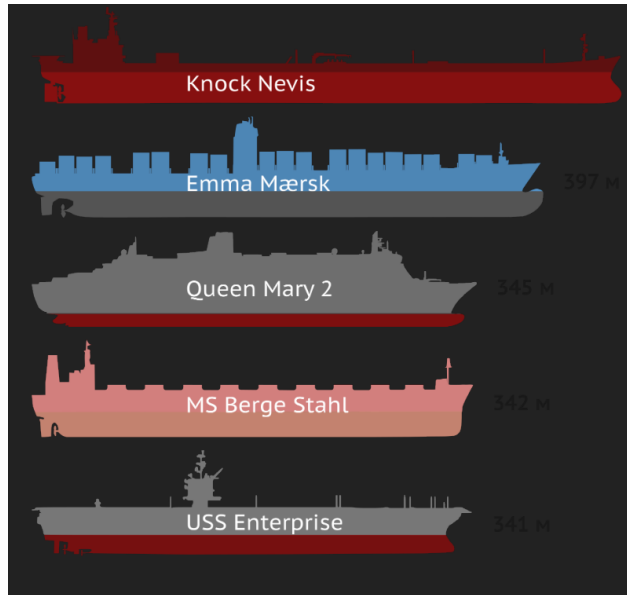
Mitoitusalueen valinnassa voidaan käyttää tietyn alueen mittoja ja tyyppiä, mikäli se on jo suunnitteluvaiheessa tiedossa. Jos suunnitteluvaiheessa alueen mitoista ei ole tarkkaa tietoa, voidaan mitoitusalueen tai aluksien mitat valita tilastojen perusteella. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 23.) Uusien valmistuneiden alusten tietoja ja mittoja voi tarkastella esimerkiksi Lloyd's Registerin kautta (PIANC 2014, 18).

Mikäli tuleva väylää käyttävä alue on tiedossa ja sen navigointiominaisuudet ovat selvästi keskimääräistä paremmat, voidaan tämä huomioida väylän mitoituksessa pienempinä minimiarvoina. Vastaavasti tämä saattaa aiheuttaa käyttö- ja olosuhterajoja samankokoisille ja tyyppisille aluksille, joiden navigointiominaisuudet ovat huonommat. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 23).

Yhteenvetona voidaan sanoa, että väylän geometrinen suunnittelu ja väylän päämitat riippuvat mitoitusalueen eri parametreista, joita ovat syväys, pituus, leveys, tuulipinta-ala, ohjailtavuus ym. Mitoitusalueen valinnassa on siis tärkeää, että se johtaa

äärimmäisiin arvoihin väylän mitoissa tai muihin äärimmäisiin ominaisuuksiin. (PIANC 2014, 18.)

Kuvassa 1 on esitetty luokkansa suurimpien aluksien pituuksia, syväyksiä ja vedenpinnan yläpuolista tuulipinta-alaa erilaisten ominaisuuksien vertailemiseksi.



Kuva 1. Alusten ominaisuudet (Seekpng n.d.).

3.2 Väylän linjaus

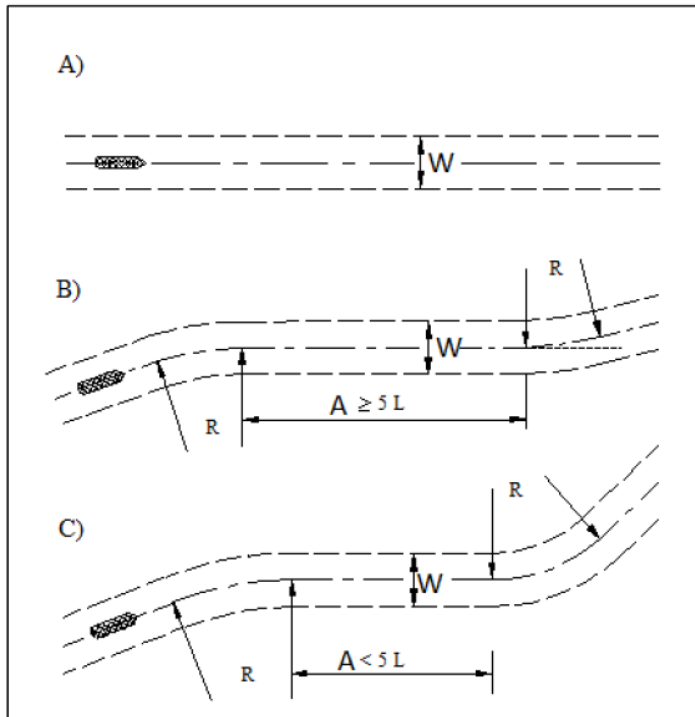
Linjauksen tulisi edustaa optimaalista mitoitusaluksen mukaan suunniteltua geometriaa, jonka lähtökohtana on luonnollinen ajolinja suunnitellulle väylälle. Linjauksen suunnittelulla haetaan väylälle parasta ratkaisua kustannukset, liikenteelliset vaikutukset, navigoitavuus ja merkintä huomioiden. Aluksen ohjaaminen suoralla väylällä on helppoa ja turvallisinta ja kaartet tuovat mukanaan aina riskejä, siksi linjauksella tulisi pyrkiä mahdollisimman suoraan väylälinjaan. Mahdollisimman pitkien väylälinjojen suunnittelemisen ei kuitenkaan ole tarkoituksena, vaan pitkän väylän jakaminen kahteen osaan voi olla käytännöllisempää vesialueiden ja merkinnän toteuttamisen kannalta. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 24.) PIANCin (2014, 249–250) ohjeessa on esitetty yleistasoisia suosituksia mitä väylän linjauksessa on syytä huomioida (taulukko 1).

Taulukko 1. Suositukset väylän linjaukseen (PIANC 2014, 249–250).

Väylä tulee suunnitella niin suoraksi kuin mahdollista, välttämällä kaarteita, joita seuraa käänteinen kaarre.
Mikäli mahdollista, tulee väylä suunnitella niin, että se myötäilee päävirtoja, jolloin saadaan minimoitua poikittaisvirtausten vaikutus. Samaa logiikkaa on syytä noudattaa aaltojen ja tuulen kanssa. Ainakin niin hyvin kuin mahdollista, vaikka näiden suunta onkin hyvin vaihtelevaa.
Väylän tulee välttää alueita, joilla esiintyy sedimentin kertymistä, jotta voidaan pienentää kunnossapitokustannuksia.
Väylä tulee linjata niin, että poikittaissuuntaiset myrskyt vältetään. Toisin sanoen suunnataan väylä vallitsevaan aallonsuuntaan, niin hyvin kuin mahdollista.
Satamien lähestymisväylät tulee suunnitella mahdollisimman suoriksi kaarteita välttämällä. Näin vältetään alusten kurssimuutoksia kriittisillä navigointialueilla.
Mikäli mahdollista tulee väylä suunnitella saman suuntaiseksi satamalaitureiden ja ankkurointipaikkojen kanssa, jotta minimoidaan aluksen sivuttaiset liikkeet ja riskit.
Kapeat väyläalueet tulee toteuttaa hyvin merkattuina, suorina kokonaisuuksina niin, että linjaus pysyy suorana vähintään minimietäisyyden 5 L kapeikon molemmin puolin.
Mikäli kaarteita ei voida välttää, on yksi kaarre parempi kuin usea pienempi kaarre lyhyellä välimatkalla. Olettaen, että väylä on merkattu hyvin navigointia varten.
Kaarresäteen tulee olla vähintään 5 L suurimman väylää käyttävän aluksen mukaan. Suositeltavaa on käyttää 10 L tai suurempaa jos mahdollista.
Mikäli mahdollista tulee linjaus suunnitella niin, että suorien suuntausten välinen kulma on enintään 30 astetta.
Suorien osuuksien pituus kaarteiden välissä on oltava vähintään 10 L suurimmasta väylää käyttävästä aluksesta.
Näkyvyyden väylän akselilla mitattuna tulee olla suurempi kuin mitoitusaluksen pysähtymismatka suurimmalla väylällä sallitulla nopeudella.

Suomessa rannikkovedet ovat usein matalia ja karikkoisia. Korkeiden ruoppauskustannusten vuoksi linjauksen optimaalista ratkaisua ei useinkaan ole mahdollista toteuttaa, vaan linjauksen osalta on löydettävä sovitteluratkaisu turvallisuuden ja kustannusten välillä. Hankkeissa on usein kyseessä väylän parantaminen erinäköisistä syistä, jolloin väylä-

län täysin uusi linjaus tulee harvoin kyseeseen, mutta voi se jossain tilanteissa olla järkevää ja perusteltua. Välttämättömiä risteyskiä tulisi mahdollisuuksien mukaan välttää, sillä luovat ne aina riskitekijöitä väylälle. Kuvassa 2 on esitetty linjauksen karkea luokittelu, jossa A ideaaliratkaisu, B on sallittu, jos kaarteiden välinen suora on vähintään viisi alusmittaa ja C on sallittu vain perustelluista syistä. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 25.)



Kuva 2. Linjauksen karkea luokittelu (Liikenneviraston ohjeita 2018, 26).

Kaarteet

Aluksen sijainti kaarteessa pystytään määrittämään visuaalisesti ainoastaan reunamerkin perusteella ja arvion tekeminen aluksen väylällä pysymisestä on tehtävä huomattavasti puutteellisemmin kuin suoralla väylällä navigoitaessa. Kaarteet tuovat aina suurempia riskejä kuin suora linjaus ja mitä jyrkempi ja pidempi käänнос on, sitä suurempi on riski, että alus siirtyy ulos väylältä kaarroksen loppuessa, koska käännosken aikana on vaikeaa hahmottaa aluksen siirtymistä poikittaissuunnassa. Hyvä nyrkkisääntö kaarresäteelle on vastaava kuin 15–20 asteen peräsinkulman arvo erinomaisissa olosuhteissa. Tällöin jää riittävästi pelivaraa sääolosuhteita ja muita korjaavia toimintoja varten. Aluksen kääntymisominaisuuksiin vaikuttaa edellä mainitun lisäksi alustyyppi, rungon muoto, varaveden määrä ja tuuliolosuhteet. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 27).

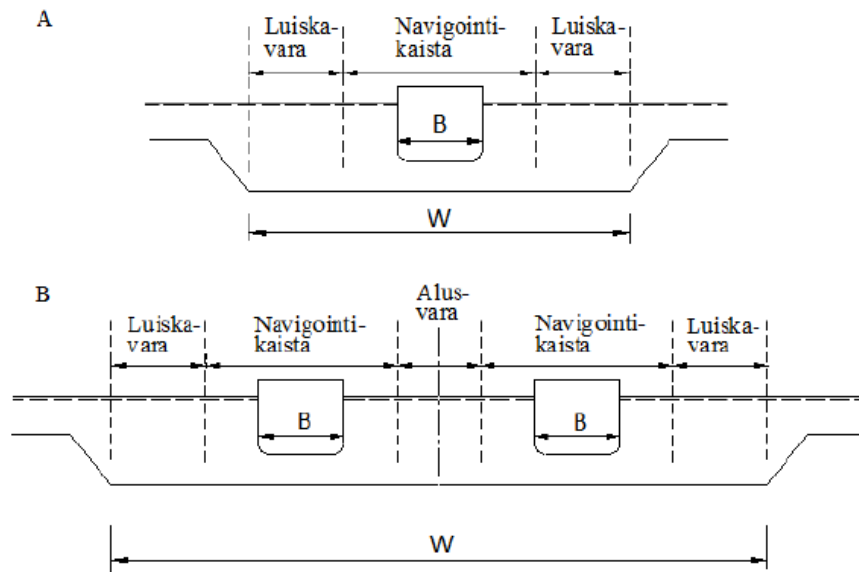
Liian suurella kaarresäteellä suunniteltu väylän osa vaikeuttaa aluksen kykyä seurata kaarteiden mukaista ajolinjaa, jolloin riski ajautua ohi harkitulta väylälinjalta kasvaa (Liikenneviraston ohjeita 2018, 29).

3.3 Väylän leveys

Suomen merialueilla alustiheydet ovat pieniä, jonka seurauksena yksikaistainen väylä on usein lähtökohtana suunnittelulle. Kaksikaistaiset väylät ovat harvoin tarpeellisia. Väylillä vesialueilla väylää voidaan tarpeen vaatiessa leventää lähimpään matalaan saakka, jolloin väylän leveys periaatteessa täyttää myös kaksikaistaisen väylän mitoitusleveyden ainakin osalla väylää. Vaikka lähtökohtana suunnittelulle on yksikaistainen väylä, on hyvä selvittää kaksikaistaisen väylän mitoitusleveys, jonka avulla väylälle voidaan määrittää tarpeen ja tilan mukaan myös mahdolliset kohtaamispaikat aluksille. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 30.)

Aluksen tilantarve riippuu useista eri tekijöistä, joita kaikkia ei ole mahdollista tarkasti selvittää. Leveydelle ei siis ole tarkoituksenmukaista eikä mahdollista antaa ehdottomia raja-arvoja. Parhaimpiin tuloksiin väylän leveyden suhteen päästään selvittämällä kaikki vaikuttavat osatekijät erikseen. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 30.)

Mitoitustarkastelussa väylän poikkileikkaus jaetaan navigointikaistaan, luiskavaraan ja alusvaraan (kuva 3). Navigointikaista on aluksen käyttämä osa väylän poikkileikkauksesta. Luiskavaralla tarkoitetaan reunavaraa, joka on aluksen ja luiskan tai reunamatalan väliin jäävä varmuusetaisyys. Alusvara on alusten väliin jäävä minimietäisyys alusten kohtaamis- tai ohitustilanteessa kaksikaistaisilla väylillä. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 30.)



Kuva 3. A yksikaistainen väylä, B kaksikaistainen väylä (liikenneviraston ohjeita 2018, 30).

Leveyden mitoituksessa huomioitavat osatekijät

Huomioitavia osatekijöitä väylän leveyden mitoituksessa ovat aluksen koko, aluksen navigointiominaisuudet, väylän olosuhteet, väylän merkintä, pohjan epätasaisuus, varaveden määrä, luiskavara ja alusvara. Mitoitusalueksen leveys on lähtökohtana väylän leveyden määrittämisessä. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 31–33.)

Aluksen ohjailtavuus

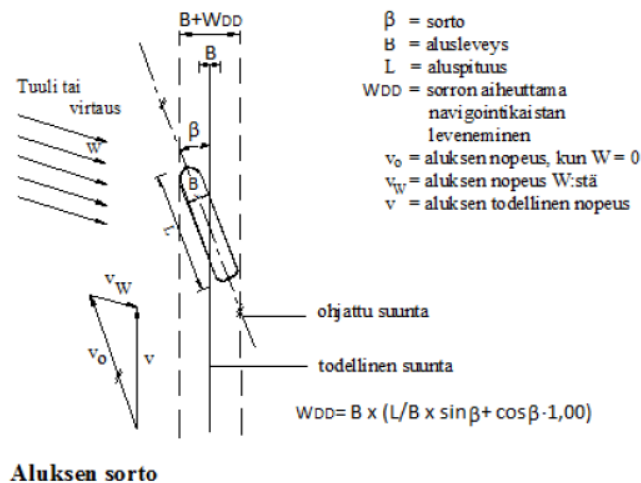
Kulkiessaan vedessä aluksen todellinen liikerata vaihtelee ja kulkiessaan suoraan se todellisuudessa mutkittelee suoran ajolinjan molemmin puolin. Tahaton mutkittelu on yhteydessä aluksen ohjailtavuus ominaisuuksiin kuten suunnan säilytykseen, kääntymisominaisuuksiin sekä siihen miten alus reagoi peräsimeen. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 31.)

Olosuhteet

Erilaisten horisontaalisten voimien vaikutuksen seurauksena alus ei liiku suoraan köllilinjän osoittamaan suuntaan vaan sortuu voiman vaikutussuuntaan (kuva 4). Sortoon vaikuttavia voimia ovat tuuli, aallokko ja virtaukset. Aluksen sortokulman suuruuteen vaikuttaa voimakkaasti aluksen nopeus ja mitä nopeampaa alus kulkee, sitä pienempi on aallokon ja tuulen vaikutus aluksen sortoon. Aluksen nopeuden ollessa yli 12 solmua, jää

aallokon ja tuulen vaikutus pieneksi. Alustyyppillä on myös suuri vaikutus siihen, kuinka voimakkaasti alus kokee sivuttaisvoimat. Esimerkiksi suurella syvyyksellä ja pienellä tuulipinta-alalla uiva bulk-alus on hyvin vakaa verrattuna risteilijään, jolla normaalisti on suuri tuulipinta-ala ja pieni syväys. Sortokulma ei missään tilanteessa saisi ylittää 15 astetta, jotta alus ei menetä ohjaitavuutta. Väylänopeus tulee suunnitella niin, että nopeudet ovat tarpeeksi suuria sorron ehkäisemiseksi. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 32).

Virtaukset ovat Suomen rannikkovesillä yleensä hyvin pieniä. Suunnittelun kannalta merkittäviä virtauksia voi kuitenkin esiintyä merenkurkun alueella sekä joissain kapeikoissa ja on ne tarvittaessa otettava huomioon. Virtauksia pääsääntöisesti kapeikoissa, jolloin niiden suunta on enimmäkseen aluksen suuntaista ja siksi helpommin hallittavissa. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 32.)



Kuva 4. Aluksen sorto (liikenneviraston ohjeita 2018, 32).

Luiskavara

Aluksen liikkuessa vedessä, aiheuttaa se ympäröivään veteen takaisvirtauksen. Virtauksen voimakkuus riippuu paljolti väylän poikkileikkauksesta ja alusnopeudesta. Mitä ahtaampi väylä on ja mitä suurempi on alusnopeus, sitä voimakkaampi takaisvirtaus on. Ilmiö korostuu eritoten kapeikoissa, jossa luiskat ovat jyrkät ja korkeat. Mikäli poikkileikkaus on kovin epäsymmetrinen, aiheuttaa se takaisvirtauksen toispuolisuutta, jonka seurauksena aluksen perä pyrkii kääntymään kohti luiskaa/reunamatalaa. Ilmiötä kutsutaan nimellä bank effect. Tästä syystä kapeiden poikkileikkausten suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota luiskien symmetrisyyteen, jotta aluksen ohjaitavuus ei heikenny.

Luiskavaran tarkoitus on tasapainottaa reunavaikutuksesta aiheutuvaa aluksen ylimääräistä mutkittelua. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 33.) Taulukossa 2 on esitetty ohjeita luiskavaran mitoitukselle eri poikkileikkaustyypeillä ja alusnopeuksilla.

Taulukko 2. Luiskavaran mitoitus (liikenneviraston ohjeita 2018, 34).

Luiskatyyppi	Alusnopeus	Luiskavaran suuruus w_l
Loiva ja matala vedenalainen luiska (1:10 tai loivempi)	suuri	0,2 B
	kohtalainen	0,1 B
	alhainen	0,0 B
Korkeahko reunaluiska tai matalikon reuna	suuri	0,7 B
	kohtalainen	0,5 B
	alhainen	0,3 B
jyrkkä ja kova pengeri tai rakenne	suuri	1,3 B
	kohtalainen	1,0 B
	alhainen	0,5 B

Alusvaran suuruus kaksikaistaisilla väylillä

Mikäli kaksikaistainen väylä on tarpeellinen, voidaan alusvaran suuruus määrittää taulukosta 3. Alusten kohdatessa, aiheuttavat ne toisilleen epäsymmetrisiä hydrodynaamisia voimia, joiden voimakkuus riippuu alusten nopeudesta, luiskakaltevuudesta, väylän symmetriasta, kölivarasta ja alusten välisestä etäisyydestä. Alusten vuorovaikutusta kohtaamistilanteessa tulee tarkastella alusten kulkiessa vastakkaisiin suuntiin sekä erikseen ohitustilanteessa. (PIANC 2014, 81.) Mitoituksessa tulee huomioida myös kohtaamisten toistuvuus. Mikäli mitoitusalueen kohtaamista tapahtuu yli kolme kertaa vuorokaudessa, suurennetaan alusvaraa puoli alusleveyttä. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 34.)

Taulukko 3. Alusvaran suuruus (Liikenneviraston ohjeita 2018, 34).

Alusnopeus v_s (solmua)	Alusvaran suuruus W_{av}	
	wäylän ulko-osa	wäylän sisäosa
suuri $v_s > 12$	2,0 B	1,8 B
kohtalainen $8 < v_s < 12$	1,6 B	1,4 B
hidas $5 < v_s < 8$	1,2 B	1,0 B

Suoran väylän leveyden mitoitus

Tarvittava väylän leveys saadaan selville summaamalla väylän leveyteen vaikuttavat osatekijät.

Yksikaistaisille väylille tarvittava väylän leveys saadaan kaavalla 1, missä W on väylän leveys, W_{nav} on navigointikaistan leveys ja W_l on luiskavaran suuruus.

$$W = W_{nav} + 2W_l \quad (1)$$

Kaava 1. Yksikaistaisen väylän leveys (Liikenneviraston ohjeita 2018, 34).

Kaksikaistaisille väylille tarvittava leveys saadaan kaavalla 2, missä W_{av} on alusvaran suuruus.

$$W = 2W_{nav} + 2W_l + 2W_{av} \quad (2)$$

Kaava 2. Kaksikaistaisen väylän leveys (Liikenneviraston ohjeita 2018, 34).

Navigointikaistan leveys on monen osatekijän summa, joka saadaan kaavalla 3.

$$W_{nav} = B + W_m + W_n + W_t + W_{V1} + W_{V2} + W_a + W_e + W_p + W_s \quad (3)$$

Kaava 3. Navigointikaistan leveys (Liikenneviraston ohjeita 2018, 35).

Missä;

B = Mitoitusaluksen leveys

W_m = Aluksen ohjailtavuuden vaikutus

W_n = Aluksen nopeuden vaikutus

W_t = Sivutuulen vaikutus

W_{V1} = Sivuvirtauksen vaikutus

W_{V2} = Myötä-/vastavirtauksen vaikutus

W_a = Aallokon vaikutus

W_e = paikanmäärityksen epätarkkuuden vaikutus

W_p = Pohjan epätasaisuuden vaikutus

W_s = Varaveden määrän vaikutus

Osatekijöiden ohjearvot saadaan taulukosta 4.

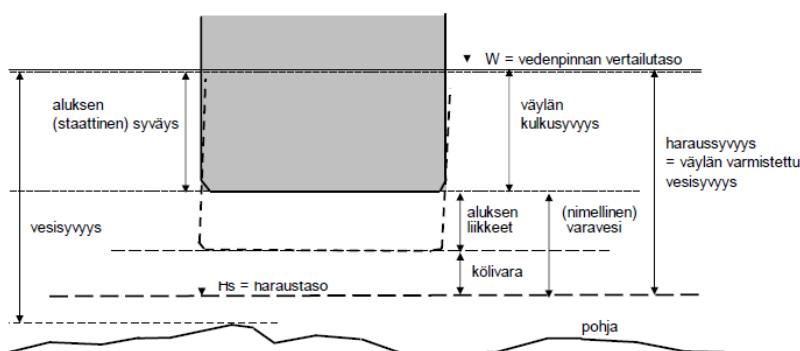
Taulukko 4. Osatekijöiden ohjearvot (liikenneviraston ohjeita 2018, 36).

		Aluksen nopeus	Avoin vesialue	Suojainen vesialue
Aluksenohjailtavuus (W_m)				
Hyvä			0,3 B	0,3 B
Keskinkertainen			0,5 B	0,5 B
huono			0,8 B	0,8 B
Aluksen nopeus (W_n)				
Suuri	yli 12 solmua		0,1 B	0,1 B
Keskimääräinen	8-12 solmua		0	0
Pieni	5-8 solmua		0	0
Sivutuuli (W_t)		Suuri	0,1 B	0,1 B
Heikko	alle 8 m/s	Keskimääräinen	0,2 B	0,2 B
		Pieni	0,3 B	0,3 B
Kohtalainen	8 – 17 m/s	Suuri	0,3 B	0,3 B
		Keskimääräinen	0,4 B	0,4 B
		Pieni	0,6 B	0,6 B
Kova	yli 17 m/s	Suuri	0,5 B	0,5 B
		Keskimääräinen	0,7 B	0,7 B
		Pieni	1,1 B	1,1 B
Sivuvirtaus (W_{v1})				
Ei virausta	alle 0,1 m/s		0,0	0,0
Heikko	0,1 – 0,3 m/s	Suuri	0,2 B	0,1 B
		Keskimääräinen	0,25 B	0,2 B
		Pieni	0,3 B	0,3 B
Kohtalainen	0,3 – 0,7 m/s	Suuri	0,5 B	0,4 B
		Keskimääräinen	0,7 B	0,6 B
		Pieni	1,0 B	0,8 B
Voimakas	0,7 – 1,0 m/s	Suuri	0,1 B	0,1 B
		Keskimääräinen	0,2 B	0,2 B
		Pieni	0,4 B	0,4 B
Myötä-/vastavirtaus (W_{v2})				
Pieni	alle 0,7 m/s		0,0	0,0
Kohtalainen	0,7 – 1,5 m/s	Suuri	0,0	0,0
		Keskimääräinen	0,1 B	0,1 B
		Pieni	0,2 B	0,2 B
Voimakas	yli 1,5 m/s	Suuri	0,1 B	0,1 B
		Keskimääräinen	0,2 B	0,2 B
		Pieni	0,4 B	0,4 B
Aallokko (W_a), merkitsevä aallonkorkeus				
Alle 1 m			0,0	0,0
1-3 m			noin 0,5 B	-
Yli 3 m			noin 1,0 B	-
Paikanmäärityksen tarkkuus/väylän merkintä (W_e)				
Erinomainen väylämerkintä + liikenteen ohjaus			0,0	0,0
Hyvä väylämerkintä			0,2 B	0,2 B
Keskinkertainen väylämerkintä			0,4 B	0,4 B
Pohjan epätasaisuus (W_p)				
Vesisyvyys suurempi kuin 1,5 T			0	0
Pienempi kuin 1,5 T				
Sileä ja pehmeä			0,1 B	0,1 B
Sileä tai viettävä ja kova			0,1 B	0,1 B
Epätasainen ja kova			0,2 B	0,2 B
Pieni varavesi (W_s)				
Vesisyvyys > 1,5 T			0,0	0,0
1-5 T – 1,25 T (1,15 T suojainen)			0,1 B	0,2 B
< 1,25 T (1,15 T suojainen)			0,2 B	0,4 B
Lastin vaarallisuus			0,0	0,0

3.4 Väylän syvyys

Suomen merialueilla väylän syvyys ilmoitetaan kulkusyvyyytenä ja se kuvastaa väylän suurinta käyttösyvyyttä. Aluksen kölivara ja liikkeessä tapahtuvat vertikaaliliikkeet laskeaan kokonaisvaraveteen. Väylän varmistettu vesisyvyys, eli haraussyvyys muodostuu kulkusyvyuden ja varaveden summasta. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 39.)

Tarpeellinen syvyys väylälle muodostuu veden korkeustasosta, aluksen nopeuspainumasta, aluksen staattisesta syväksestä, aallokon aiheuttamista vertikaaliliikkeistä, tarpeellisesta kölivarasta ja aluksen mahdollisista kallistumisista kaarteissa (kuva 5) (Liikenneviraston ohjeita 2018, 39).



Kuva 5. Väylän syvyyskäsitteet (Liikenneviraston ohjeita 2018, 39).

Veden korkeustaso

Toistaiseksi merialueilla veden korkeustasona käytetään tietyn vuoden keskiveden tasoa (MW-tasoa). MW-tasosta ollaan kuitenkin luopumassa, kun käyttöön otetaan N2000 korkeustaso vaiheittain vuodesta 2020 lähtien. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 39.)

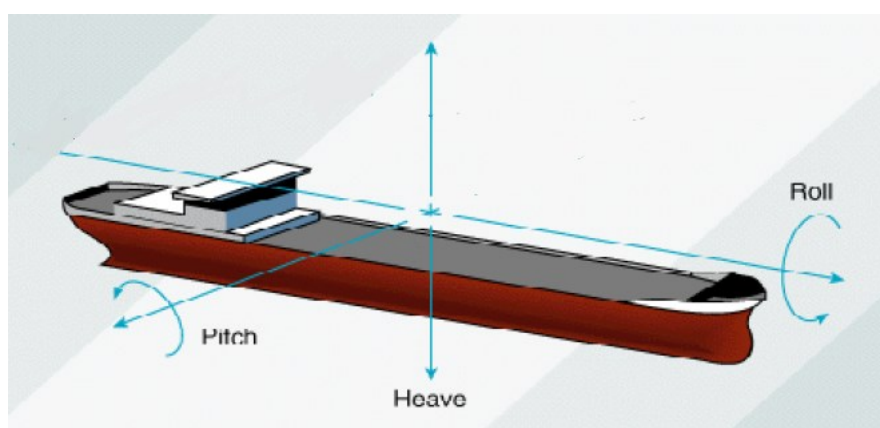
Aluksen nopeuspainuma

Aluksen nopeuspainuma käsitellään kokonaisuudessaan luvussa 4.

Aallokosta aiheutuvat aluksen pystyliikkeet

Vedessä oleva alus kokee erilaisia vertikaalisia liikkeitä. Näitä ovat aluksen keinunta pituussuunnassa (pitch), aallokon mukana tapahtuva aluksen kohoilu (heave) ja aluksen

keinunta sivusuunnassa (roll) (kuva 6). Vertikaalivoimien vaikutuksen suuruus on riippuvainen aallokon ja aluksen mitoista sekä aallokon kulmasta suhteessa alukseen. Merkittäviksi aallokon aiheuttamiksi ominaisuuksiksi lasketaan aaltojen toistuvuus, aallonkorkeus ja aallon pituuden suhde aluksen pituuteen. Suojaisilla alueilla aaltojen aiheuttamien vertikaaliliikkeiden suuruuden on arvioitu olevan 0,2 m:n luokkaa. Mitä suojattomampi väylä aaltojen vaikutukselta on, sitä suurempia ovat alukseen kohdistuvat vertikaaliliikkeet. Väylän ulko-osilla aluksen vertikaaliliikkeet tulee huomioida suurempina johtuen voimakkaammista luonnonilmiöistä ja varaveden määrä tulee olla noin 0,5 m (Liikenneviraston ohjeita 2018, 43–44.)



Kuva 6. Alukseen vaikuttavat vertikaaliliikkeet (Liikenneviraston ohjeita 2018, 43).

Muut kallistumat

Aluksen kallistumiin vaikuttaa aallokon lisäksi tuuli, kaarteissa keskipakovoima, aluksen nopeus kaarteessa ja kaarresäde. Tuulen aiheuttaman kallistuman suuruuteen vaikuttaa pitkälti aluksen tuulipinta-ala ja aluksen painopisteen sijainti. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 44.)

Jäännösvaravesi

Pohjakosketuksien välttämiseksi ja aluksen ohjailtavuuden säilyttämiseksi tulee aluksen kölin alla olla aina tietty jäännösvaravesi. Merialueilla kölivaran suuruus on 0,5 m ja siihen sisällytetään haraussyvyyden varmistamisessa käytettyjen mittalaitteiden epätarkkuudet. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 44.)

Pohjan liettyminen

Väyläalueilla, joissa liettymistä on havaittu tai arvioidaan tapahtuvan, on se tarpeen mukaan otettava huomioon haraussyvyyttä määritettäessä. Yleisesti liettyminen on Suomessa vähäistä ja huomioon ottaminen haraussyvyyteen on täysin yksilöllistä ja väyläkohtaista. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 45.)

Muutokset veden tiheydessä

Veden ominaispaino on erilainen makeassa ja suolaisessa vedessä. Aluksen liikkua merivedestä makeaan veteen aiheuttaa se muutoksen aluksen syväyksessä johtuen veden ominaispainosta. Muutoksesta johtuen aluksen syväys kasvaa keskimäärin 2–3 % makeassa vedessä. (PIANC 2014, 23.)

Varaveden ja haraussyvyyden mitoitus

Väylä jaetaan erilaisiin väyläosuuksiin varaveden ja haraussyvyyden määrittämiseksi, riippuen luonnonolosuhteiden voimakkuudesta. Alustavassa mitoituksessa kokonaisvaraveden määrä voidaan määrittää suhteessa mitoitusaluksen syväykseen. Taulukossa 4 on kuvattu väyläosuuksien jaottelu ja ohjearvot kokonaisvaraveden määrittämiseen alustavassa mitoituksessa. Näitä ohjearvoja sovelletaan kulkusyvyydeltään yli 6 m:n väyliin. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 45.)

Taulukko 4. Varaveden määrittäminen alustavassa mitoituksessa (Liikenneviraston ohjeita 2018, 45).

Väylän ulko-osa	1,2T tai vähintään 1,5 m
Väylän sisäosa	1,15T tai vähintään 1,0 m
Satama-allas	1,1T tai vähintään 0,6 m

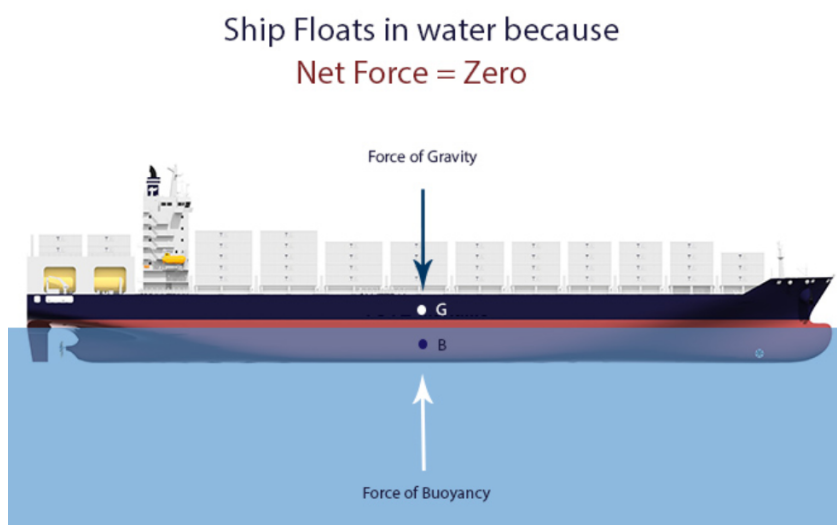
Tarkentavassa mitoituksessa varaveden riittävyys tulee tarkastaa kaikilta väylän syvyyden vaikuttavilta osatekijöiltä paikalliset olosuhteet huomioiden. Tarkastelun tulee perustua laskennalliseen sekä kokemusperäiseen tietoon, missä huomiota tulee kiinnittää taulukon 5 mukaisiin tekijöihin. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 46.)

Taulukko 5. Huomioitavat tekijät (Liikenneviraston ohjeita 2018, 46–47).

Aluksen nopeuspainumaan väylän kriittisillä poikkileikkausalueilla. Samassa yhteydessä tulee miettiä mahdollisia nopeusrajoitteita, mutta myös nopeuden vaikutusta aluksen ohjailtavuuteen.
Vaarallisiin aallokoihin ja suuntaan suhteessa väylän linjaukseen.
Mitoitusaluksen tuulipinta-alaan ja tämän huomioimista aluksen kallistumassa.
Matalien sijoittumiseen kaarrealueelle.
Mahdollisiin vedenkorkeusvaihteluihin.
Pohjan mahdolliseen liettymiseen.
Väylät, joilla ruoppausmäärät ovat suuria, tulee mitoitus tehdä erityisellä huolellisuudella kaikki saatavilla oleva tieto hyödyntäen. Näin vältetään ylimitoituksen tuottamilta ylimääräisiltä kuluilta, mutta samalla mahdollistetaan väylän turvallinen käyttö.

4 SQUAT

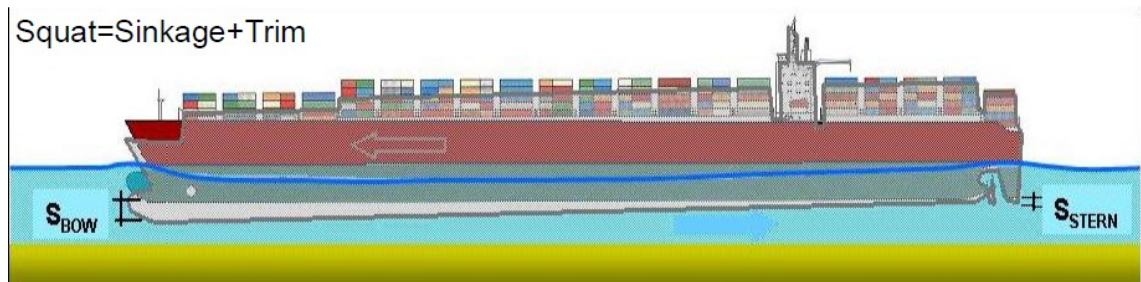
Alukset kelluvat vedessä hyvin yksinkertaisesta syystä. Vaikuttavat voimat ovat vastakkaisia ja yhtä suuria. Painon lisääntyessä kelluvassa aluksessa sen painovoima kasvaa, jonka seurauksena alus uppoaa siihen pisteeseen asti, kunnes nosteen voima on yhtä suuri kuin painovoima (kuva 7). (Jassal 2016.)



Kuva 7. Alus kelluu vedessä, koska nettovoimat ovat nolla (Jassal 2016).

Nopeuspainuma on hydrodynaaminen ilmiö, missä suurin vaikuttava tekijä on aluksen nopeus. Nopeuden lisäksi nopeuspainuman suuruuteen vaikuttaa aluksen syväys, pituus, rungon muoto ja varaveden määrä. (Pilot 2018, 3.)

Kun alus liikkuu eteenpäin vedessä se työntää vettä eteensä ja ympärillä oleva vesi virtaa rungon alla ja ympärillä keulan työntämän vesimäärän korvaamiseksi. Matalassa vedessä ruongon ja pohjan välissä virtaus on rajoitettu, joka johtaa suurempaan virtausnopeuteen ja vedenpaineen laskuun, jonka seurauksena alus vajoaa syvemmälle. Sen lisäksi, että alus vajoaa pystysuoraan alaspäin, se yleensä kallistuu eteen tai taakse riippuen aluksen tyypistä. Suurin nopeuspainuma voi siis esiintyä joko aluksen keulassa, perässä tai koko aluksen matkalla ja tätä painuman ja kallistuman yhtälöä kutsutaan aluksen squatiksi (kuva 8) (kuva 9). (Barras & Derret 2012, 367.)



Kuva 8. Nopeuspainuma = uppouma + aluksen kallistuma (PIANC 2014, 26).

Kulkuvastus suurenee aluksen nopeuden kasvaessa ja matalissa vesissä ilmiö on erittäin voimakas. Normaalisti aluksen konetehto ei kuitenkaan riitä kasvattamaan nopeutta matalassa vedessä niin suureksi, että pohjakosketus tapahtuisi aluksen nopeuspainumasta johtuen. Pohjakosketus on kuitenkin täysin mahdollinen aluksen tulessa kovalla vauhdilla syvästä vedestä matalampaan veteen, esimerkiksi matalikon päälle, jolloin matala syvyys ehdi riittävästi hidastaa alusta, jonka seurauksena aluksen nopeuspainuma voi kasvaa nopeasti erittäin suureksi. (Liikenneviraston ohjeita 2018, 40.)

Kulkuvastusilmiötä kuvaa Frouden luku F_{nh} , joka määritetään kaavalla 4.

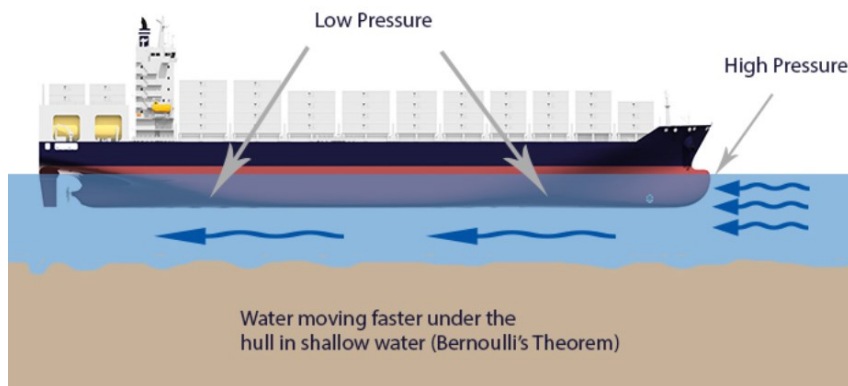
$$F_{nh} = \frac{v}{\sqrt{g}} * h \quad (4)$$

Kaava 4. Frouden luku (Liikenneviraston ohjeita 2018, 40).

Missä:

v = alusnopeus.
 h = vesisyvyys.
 g = 9,81 m/s².

Squat Effect on ships in Shallow waters



Kuva 9. Nopeuspainuman ilmiö matalassa vedessä (Jassal 2016).

Useimmissa tapauksissa suurin nopeuspainuma tapahtuu aluksen keulassa, erityisesti aluksilla, joilla on täyteläinen, eli laatikkomainen runko, kuten tankkialuksilla. Kapeilla väylillä tai kanavissa ja sulavarunkoisilla aluksilla, esimerkiksi matkustaja-aluksilla maksimaalinen nopeuspainuma voi esiintyä myös aluksen perässä. Aluksen staattisella trimmikulmalla on myös vaikutus aluksen maksimaaliseen nopeuspainumaan ja aluksen suurin nopeuspainuma esiintyy aina samassa paikassa aluksen staattisen pituuskallistuman kanssa. Esimerkiksi jos alus staattisessa asennossa kallistuu kohti keulaa, esiintyy suurin nopeuspainuma aina keulassa ja toisinpäin (kuva 10). (Briggs, Debaillon, Ulizcka & Vantorre 2009, 724.) Saksalaistutkimuksen mukaan uudemmilla aluksilla joissa on aikasempaa leveämpi perälauta ja suurempi nostevoima, tilanne voi joissain tapauksissa olla päinvastainen. Alus voi siis kokea maksimaalisen nopeuspainuman keulassa vaikka alus staattisessa asennossa kallistuisi kohti perää. (PIANC 2014, 27.)

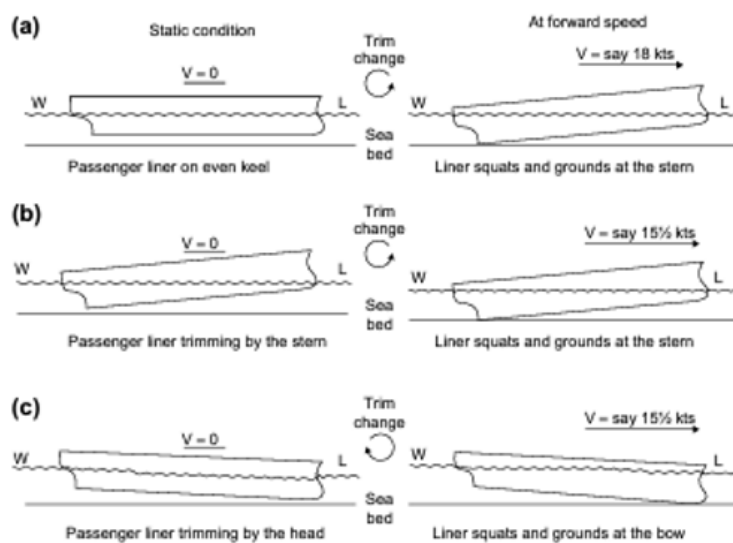


Figure 42.5:
The Link Between Static Trim and Location of Maximum Squat.

Kuva 10. Aluksen staattisen trimmikulman vaikutus nopeuspainuman sijaintiin (Barras & Derret 2012, 375).

PIANCin (2014) mukaan Barras on esittänyt, että aluksen uppouman täyteläisyyskerroimella C_B on yhteys siihen missä maksimaalinen nopeuspainuma esiintyy. Hän on todennut, että täyteläisyyskerroimen ollessa $> 0,7$, esiintyy maksimi squat aluksen keulassa ja täyteläisyyskerroimen ollessa $< 0,7$ esiintyy maksimaalinen nopeuspainuma aluksen perässä. (PIANC 2014, 27.)

4.1 Ennustamisen tärkeys

Uusilla supertankkereilla ja ultrasuurilla konttialuksilla staattinen varavesimäärä on pienentynyt, mutta samalla alusten liikennöinti nopeudet ovat kasvaneet. Lisäksi satamat ja viranomaiset haluavat tarjota turvallista ja tehokasta liikennöintiä kauppamerenkululle. Vesiväylien ruoppaus on kallista ja tarkalla nopeuspainuman ennustamisella pystytään ehkäisemään ylimääräisiä ruoppauskustannuksia, mutta samalla tarjoamaan turvallisia vesiväyliä niiden käyttäjille. (Briggs ym. 2009, 724.)

Dr. Barras pitää hallussaan tietokantaa 117 aluksesta, jotka ovat saaneet pohjakosketuksen liiallisen nopeuspainuman johdosta. Taulukossa 6 on esitetty squatista johtuvat pohjakosketukset vuosina 2009–2011. (Barras & Derret 2012, 368.)

Taulukko 6. Ship groundings (Barras & Derret 2012, 368).

Date	Name of Ship	Type of Ship	Location
16 jan 2009	Mirabelle	Cargo ship	Svendborg, Denmark
20 jan 2009	CSL Argosy	Bulk carrier	Chesapeake Bay, Baltimore
21 jan 2009		Cargo ship	Marseilles
17 feb 2009	Ocean	Cruise ship	San Martin, Antarctica
22 March 2009	Karin Schepers	Container ship	Drogden, Baltic sound
10 june 2009	Akti N	Oil tanker	Vlissingnes, Netherlands
3 April 2010	Shen Neng 1	Bulk coal carrier	Great Barrier Reef Australia
13 Aug 2010	Flinterforest	Cargo ship	Oresund Srait, Sweden
31 Jan 2011	Jack Alby 11	Trawler	Isle of Rum, Shetland
16 Feb 2011	K-Wave	Container ship	Malaga coastline, Spain
3 Aug 2011	Karin Schepers	Container ship	St Just, near West Cornwall

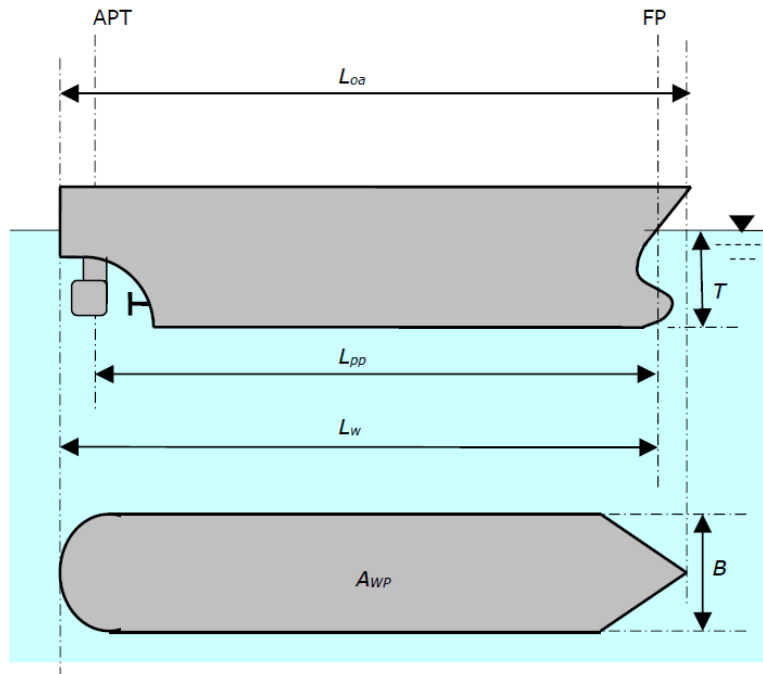
4.2 Aluksen nopeuspainuman laskemiseen vaikuttavat tekijät

Squatin laskemiseen vaikuttavia tekijöitä ovat aluksen ominaisuudet sekä väylän poikkeileikkaustyyppi.

Aluksen ominaisuudet

Tärkeimmät aluksen parametrit ovat nopeus, joka esitetään, joko muodossa V_s m/s tai V_k solmuissa, syväys ja rungon muoto, josta saadaan rungon uppouman täyteläisyyskerroin C_B . Muita tärkeitä parametreja ovat aluksen perpendikkelipituus L_{pp} ja aluksen leveys B (kuva 11). (Briggs ym. 2009, 725–726.) Perpendikkelipituudesta voidaan myös käyttää approksimoivaa arvoa $0,95 L_{oa}$, aluksen kokonaispituudesta (PIANC 2014, 239). Kaikkein tärkein parametri on kuitenkin aluksen nopeus, mutta on tärkeää ymmärtää,

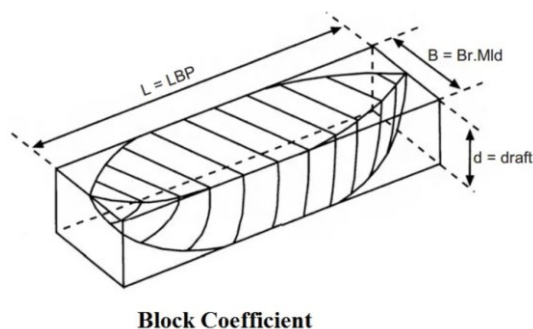
että kyseessä on aluksen nopeus suhteessa veden nopeuteen, joten virtaukset on tarvittaessa otettava huomioon. Squat vaihtelee nopeuden neliön mukaan, eli nopeuden tuplaantuessa squat nelinkertaistuu ja päinvastoin. (Briggs ym. 2009, 725–726.)



Kuva 11. Aluksen parametrit (PIANC 2014, 182).

Aluksen uppouman täyteläisyyskerroin C_B

Aluksen uppouman täyteläisyyskerroin kuvastaa aluksen rungon muotoa suhteessa vastaavaan suorakaiteen muotoiseen tilavuuteen (kuva 12). Mitä suurempi C_B arvo on, sitä laatikkomaisempi on aluksen runko. Tyypillisesti C_B arvo vaihtelee välillä 0,45–0,85. Nopeilla matkustaja-aluksilla arvo voi olla lähempänä 0,5, kun taas hitailla ja laatikkomaisemilla aluksilla, kuten tankkereilla arvo voi olla yli 0,8. (Briggs ym. 2009, 725–726.)



Kuva 12. Aluksen täyteläisyys (Cultofsea n.d.).

Lasketut aluksen parametrit

Aluksen perusmittoihin perustuvia laskettuja arvoja on kaksi. Aluksen uppouman tilavuus ∇ ja aluksen vedenalainen poikkipinta-ala A_S . Aluksen uppouman tilavuus saadaan kaavalla 5.

$$\nabla = C_B L_{PP} B T \quad (5)$$

Kaava 5. Aluksen uppouman tilavuus (Briggs ym. 2009, 726).

C_B pystytään määrittämään uppouman tilavuudesta, mikäli aluksen muut mitat ovat tiedossa. (Briggs ym. 2009, 726).

Aluksen uppouman tilavuussuhdetta meriveden tilavuuspainoon ρ_{SW} ja painovoimaan g kuvataan kaavalla 6 (PIANC 2014, 180).

$$C_B = \frac{\Delta}{\rho_{SW} g L_{PP} B T} = \frac{\Delta_m}{\rho_{SW} L_{PP} B T} = \frac{\nabla}{L_{PP} B T} \quad (6)$$

Kaava 6. Aluksen uppouman tilavuussuhde (PIANC 2014, 180).

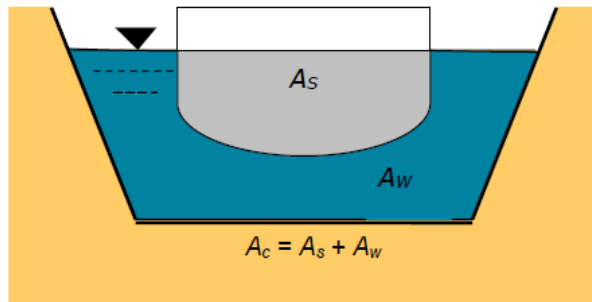
Meriveden tilavuuspaino on lämpötilan funktio, jonka tyypillinen arvo 20°C lämpötilassa on 1,025 t/m³ (PIANC 2014, 180). Itämerellä käytetään tyypillisesti arvoa 1,005 t/m³.

Aluksen vedenalainen poikkipinta-ala määritetään kaavalla 7 (kuva 13).

$$A_S = 0,98 B T \quad (7)$$

Kaava 7. Aluksen vedenalainen poikkipinta-ala (Briggs ym. 2009, 726).

Missä kerrointa 0,98 käytetään pienentämään pinta-alaa kölin muodon takia (Briggs ym. 2009, 726).



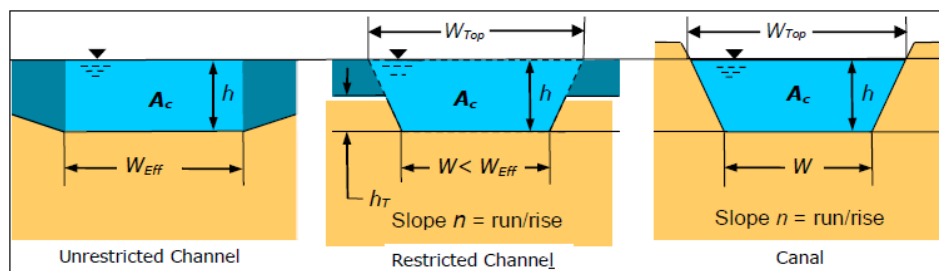
Kuva 13. Aluksen ja väylän poikkipinta-alan määrittäminen (PIANC 2014, 184).

4.3 Väylän ominaisuudet laskennassa

Suurimmat nopeuspainumaan vaikuttavat väylätekijät ovat väylän leveys, väylän syvyys ja väylän poikkileikkauksen muoto. Aluksen kulkiessa vedessä, jossa vesisyvyyden suhde aluksen syvyyteen on yli 1,5 on nopeuspainuman vaikutus vähäistä. Alus kyllä painuu syvässäkin vedessä, mutta mahdollisuus pohjakosketukseen on olematon. (PIANC 2014, 28.)

Väylätyypit

Väylätyypit jaotellaan kolmeen eri luokkaan squat laskelmissa kuvan 14 mukaan. Avovesiväylään, rajoitettuun/ruopattuun väylään ja kanavaan.



Kuva 14. Väylän poikkileikkaustyyppi. U-Avoin, R-Rajoitettu, C-Kanava (PIANC 2014, 184).

Yksittäinen väylä voi eri osassa väylää täyttää ehdot kahteen tai jopa kolmeen eri väylätyyppiin. Huomioitavaa on myös, että väylä harvoin on symmetrinen ja täydellisesti väylätyyppiä vastaava. (PIANC 2014, 184.)

Väylän parametrit

Väylätyyppien määrittämiseen käytetään taulukon 7 mukaisia parametreja:

Taulukko 7. Parametrit (PIANC 2014, 185).

Väylän leveys pohjassa W
Luisakaltevuuudesta heijastettu leveys pinnassa W_{TOP}
Veden syvyys h
Veden keskisyvyys h_M
Rajoitetun väylän vesisyvyys h_{mT}
Korkeus pohjasta luiskan yläpintaan h_T
Sivukaltevuus n
Poikkileikkausalue A_C

Taulukossa 8 on esitetty mitkä parametrit ovat tarpeellisia millekin väylätyypille.

Taulukko 8. Channel parameters (PIANC 2014, 185).

Parameter	Symbol	Channel Type		
		Unrestricted U	Restricted R	Canal C
Width input				
Channel width	W	--	Input	Input
Effective width	W_{Eff}	Calculated	--	--
Projected width at top	W_{Top}	--	Calculated	Calculated
Depth input				
Water depth	h	Input	Input	Input
Mean water depth	h_M	--	Calculated	Calculated
Restricted water depth	h_{mT}	--	Calculated	--
Height of trench	h_T	--	Input	--
Slope input				
Inverse bank slope	n	--	Input	Input
Cross-sectional area	A_C	Calculated	Calculated	Calculated

Koska rajoittamattomalla/avovesiväylällä ei ole leveyttä, tulee väylän tehokas leveys W_{Eff} määrittää, jotta saadaan selvitettyä täyttääkö väylä rajoittamattoman väylän poikkileikkausalueen ehdot. Määrittämiseen voidaan käyttää kaavaa $W_{Eff} = 8 B$ ja sulavamuotoisille aluksille jopa $W_{Eff} = 12 B$. (PIANC 2014, 185.) PIANCin (2014) mukaan Barrass (2004) esitteli viimeisimmässä työssään vaihtoehdoisen kaavan vaikutusalueen leveydelle "width of influence", joka luo keinotekoiset rajat väylälle ja joiden sisällä liikkuva alus kokee muutoksia suorituskyvyssä, veden vastuksessa, nopeudessa ja potkureiden

pyörimisnopeudessa, jotka vaikuttavat aluksen nopeuspainumaan. Reunaehtona kaavalla on h/T välillä 1,10–1,40 rajoittamattomalla väylällä ja se määritetään kaavalla 8. (PIANC 2014, 185.)

$$F_B = W_{EFF} = \left[\frac{7,04}{C_B^{0,85}} \right] B \quad (8)$$

Kaava 8. Väylän tehokas leveys (PIANC 2014, 185).

Rajoitetuille väylille ja kanaville W_{TOP} määritetään kaavalla 9.

$$W_{TOP} = W + 2nh^2 \quad (9)$$

Kaava 9. Väylän leveys pinnassa (PIANC 2014, 186).

Poikkileikkausala A_C kanaville ja rajoitetuille väylille saadaan kaavalla 10.

$$A_C = Wh + nh^2 \quad (10)$$

Kaava 10. Poikkileikkausala (PIANC 2014, 186).

Avovesiväylällä käytetään W :n tilalla tehokasta leveyttä ja sivukaltevuus n asetetaan nol-laksi.

Kanaville ja rajoitetuille väylille tarvittava veden keskisyvyys saadaan kaavalla 11.

$$h_M = \frac{A_C}{W_{TOP}} \quad (11)$$

Kaava 11. Veden keskisyvyys (PIANC 2014, 186).

Veden relevantti syvyys rajoitetuille väylille saadaan kaavalla 12.

$$h_{mT} = h - \frac{h_T}{h}(h - h_m) \quad (12)$$

Kaava 12. Veden relevantti syvyys (PIANC 2014, 186).

4.4 Yhdistetyt parametrit

Squat laskelmissa tarvitaan useita kaavoja, jotka ovat suhteita aluksen ja väylän välillä. Näitä ovat: Vesisyvyyden ja aluksen syväyksen suhde, blockage factor, velocity return factor, Frouden luku ja kriittinen nopeus kanavassa. Vesisyvyyden ja syväyksen suhde h/T kuvastaa väylän suhteellista syvyyttä. Tyynille vesille nyrkkisääntönä pidetään minimiarvoa 1.1–1.15 ja merenkäynnin ollessa voimakkaampaa nousee suositus välille 1.15–1.4. Mitä pienempi h/T arvo on, sitä vähemmän vettä on aluksen kölin ja pohjan välissä, mikä taas aiheuttaa suurempaa nopeuspainumaa ja vaikeuttaa aluksen ohjailtavuutta. Blockage factor S , kuvastaa murto-osaa väylän poikkileikkauspinta-alasta, jonka tyypillinen arvo vaihtelee välillä 0.1–0.3. Se määritetään kaavalla 13. (PIANC 2014, 185–187.)

$$S = \frac{A_s}{A_c} \quad (13)$$

Kaava 13. Blockage factor (PIANC 2014, 186).

Velocity return factor on aluksen poikkintala-alan suhde väylän nettopoikkipinta-alaan, jossa A_w on väylän poikkipinta-alan ja aluksen poikkipinta-alan erotus. S_2 Määritetään kaavalla 14.

$$S_2 = \frac{A_s}{A_w} = \frac{S}{1 - S} \quad (14)$$

Kaava 14. Velocity return factor (PIANC 2014, 187).

5 ALUSTEN KOKO TULEVAISUUDESSA

5.1 Ilmastotavoitteet

Tulevaisuuden ennustaminen on hankalaa, eikä kukaan pysty varmaksi sanomaan mihin suuntaan alusten mittasuhteet kehittyvät. Mikäli kehitys jatkuu samanlaisena, on oletettavissa, että aluskoko jatkaa kasvuaan ainakin leveyden ja pituuden puolesta. Suurin rajoittava tekijä on aluksen syväys, joka rajoittaa alusten pääsyä matalammille väylille ja satamiin. Tulevaisuudessakin väylillä ja satamilla tulee olemaan reunaehtoja, jotka osaltaan rajoittavat alusten kokokehitystä. (PIANC 2014, 9.)

Vuonna 2019 maailmanlaajuisista energiaan liittyvistä hiilidioksidipäästöistä noin 2 % oli kansainvälisen merenkulun tuottamaa (Tattini & Teter 2020).

Huhtikuussa 2018 Kansainvälinen merenkululaitos (IMO) hyväksyi strategian, joka yhdenmukaistaa kansainvälisen merenkulun kasvihuonepäästöjen vähennyksen Pariisin ilmastotavoitteiden kanssa (IMO 2018).

Kansainvälinen merenkululaitos on asettanut tavoitteeksi vähentää alusliikenteen hiilidioksidipäästöjä kansainvälisesti vähintään 40 % vuoteen 2030 mennessä ja 70 % vuoteen 2050 mennessä, verrattuna vuoteen 2008. Vuoteen 2050 mennessä tavoitteena on vähentää vuotuisia kasvihuonepäästöjä 50 % vuoteen 2008 verrattuna. (IMO 2018.) Mikä tarkoittaa 8,5 miljoonan tonnin vähennystä vuodessa (International shipping news 2020). Samalla pyritään päästöjen asteittaiseen vähentämiseen.

IMO on ainoa organisaatio, joka on ottanut käyttöön energiatehokkuustoimenpiteitä, jotka sitovat oikeudellisesti koko maailmanlaajuisesta teollisuutta ja koskevat kaikkia maita. IMO on laatinut perusaikataulut kunkin alustyyppin tietyn lastikapasiteetin osalta palavan polttoaineen määrälle. Tulevaisuudessa uusien alusten tulee ylittää tietty perustaso, jonka raja-arvo tiukkenee ajan myötä. Vuoteen 2025 mennessä kaikkien uusien alusten tulee olla 30 % energiatehokkaampia kuin vuonna 2014. Asetus astuu voimaan useilla alustyypeillä vuonna 2022. Esimerkiksi vuonna 2022 valmistuva konttialus, jonka kuollut paino on yli 200,000 t energiatehokkuuden suunnitteluindeksin (EEDI) vähennysaste on 50 %, kun taas DWT kokoluokan 15,000–39,999 konttialuksen energiatehokkuuden

suunnitteluindeksin vähennysaste on 30 % alkaen vuonna 2022. Vähennysaste vaihtelee aluksen koon mukaan periaatteella mitä suurempi alus, sitä suurempi vähennysaste. (IMO 2019.)

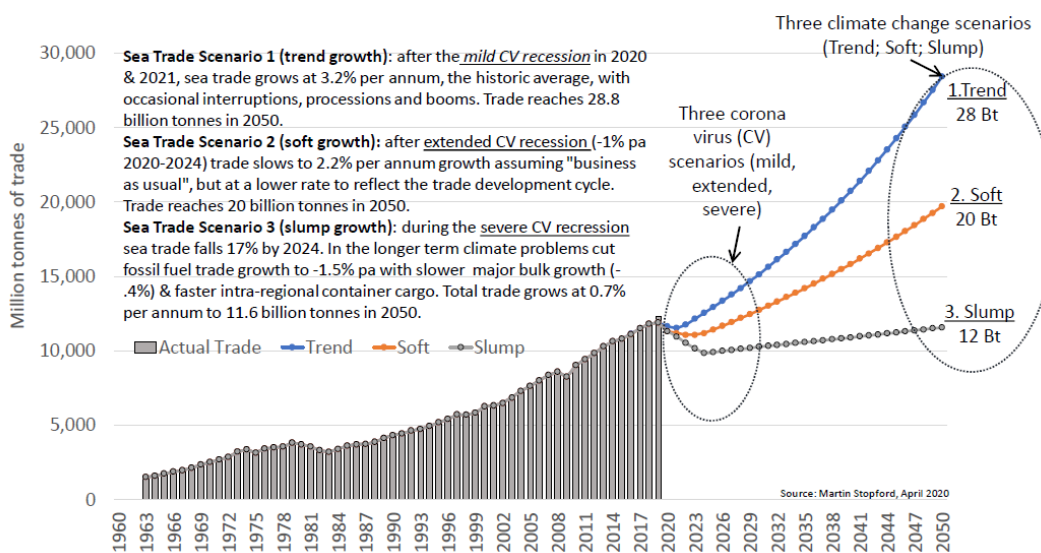
5.2 Ilmastotavoitteiden vaikutus

Alusten tekninen kehitys on pysynyt pääpiirteittäin samanlaisena viimeisen 50- vuoden aikana ja suunnittelijat ovat voineet tukeutua aina viimeisimpään malliin. Tulevina vuosina ilmastotavoitteet ja alusten uusi tekniikka asettavat kansainväliselle merenkululle haasteita, jollaisiin se ei ole törmännyt sitten fossiilisten polttoaineiden tultua käyttöön 200- vuotta sitten. (Stopford 2020, 9.)

Koronavirus ja ilmastotavoitteet

Stopford (2020) kuvailee tutkimustyössään koronaviruksen ja ilmastomuutoksen vaikutuksia meriliikenteen kaupankäyntiin sekä alusten muutoksiin, joita ne tulevat kokemaan IMO:n asetusten vuoksi. Kuviossa 2 havainnollistetaan koronaviruksen ja ilmastomuutoksen vaikutusta merikaupankäyntiin miljoonissa tonneissa mitattuna.

Kuvio 2. Three seatriade scenarios of coronavirus & climate change developments 2020-2050 (Stopford 2020, 10).



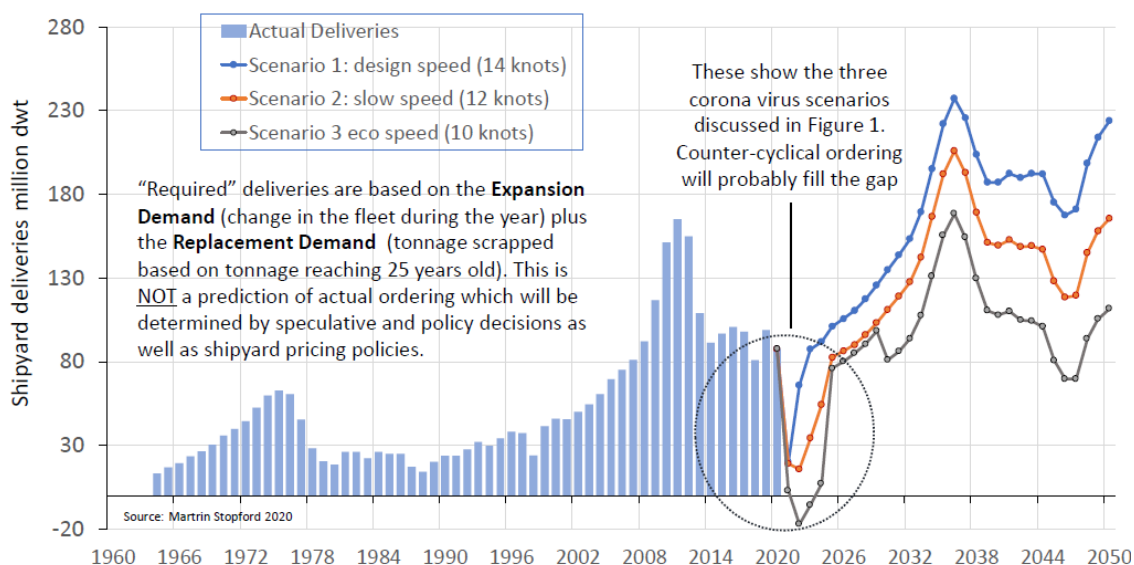
Skenaariossa yksi kuivallaan trendikasvu, jossa koronaviruksen vaikutukset jäävät suhteellisen miedoiksi. Virus aiheuttaa kuitenkin ongelmia kansainvälisiin toimitusketjuihin, jotka johtavat matalampiin volyymeihin merikaupankäynnin osalta vuosina 2020 ja 2021. (Stopford 2020, 9.)

Vuonna 2022 kaupankäynti lähtee kahden prosentin vuotuisen kasvuun ja myöhemmin saavuttaa historiallisen keskiarvon 3,2 prosenttia vuodessa, saavuttaen 28,8 miljardia tonnia vuonna 2050. Skenaariossa kaksi, mieto kasvu, viruksen vaikutukset näkyvät jo voimakkaammin ja virus aiheuttaa uusia aaltoja. Tästä aiheutuu kallis ja epätasainen toipuminen, jonka seurauksena suuret G7 talousmaat saavuttavat normaalin tason vuonna 2023 rokottamisen ja immuniteetin ansiosta. Lasku maailman taloudessa jatkuu vuoden loppuun ja hyödykkeiden kysyntä on vähäistä. (Stopford 2020, 10.)

Vuonna 2024 merikaupankäynti lähtee kasvuun saavuttaen 2,2 prosentin kasvun vuonna 2025, joka jatkuu aina vuoteen 2050 saavuttaen 20 miljardin tonnin vuotuisen volyymin. Tämä pitkän aikavälin skenaario aiheuttaa korkeampia kustannuksia vähähiihliin kuljetusmuotoihin ja vähentää fossiilisten polttoaineiden kuljetusta sekä vaikuttaa negatiivisesti raskaaseen teollisuuteen. Kolmas skenaario kuvaa kasvun hidastumista radikaalisti ja virus aiheuttaa suuria taloudellisia ongelmia valtioille ja yrityksille toistuvien eristäytymisten myötä. Turismi ja työmatkustaminen toipuvat hitaasti. Kansainvälinen öljykauppa laskee tasaisesti ja vuonna 2024 merikaupankäynti on laskenut 15 prosenttia, mikä tarkoittaa saman tyylistä taantumaa kuin vuonna 1980. (Stopford 2020, 10–11.)

Kuviossa 3 esitetään kolme laivarakennuksen kysynnän skenaariota sekä nopeuden vaikutusta alusten tarpeisiin, jotka on kehitetty kuvion 2 perusteella soveltamalla erilaisia olettamuksia laivaston suorituskyvystä erilaisissa olosuhteissa. Historiallinen tieto vuosilta 1964–2019 perustuu toimitettuihin aluksiin, mutta ennusteet perustuvat uusien alusten vaatimuksiin ja tarpeisiin, jotka on johdettu kaupankäynnin kasvusta ja alusten korvaamisesta, johtuen vanhenevasta kalustosta. Alusten tarpeilla tarkoitetaan suurempaa lastitilaa, jotta pysytään kasvavan kysynnän mukana, jossa suurimpana tekijänä on alusnopeus. Kuviossa 3 esitetään kolme erilaista nopeuden skenaariota ja alusten on ennustettu kasvavan 40 prosenttia vuosina 2020–2050. (Stopford 2020, 11–12.)

Kuvio 3. Three shipbuilding scenarios showing actual deliveries to 2019 and “required” deliveries scenarios 2020-2050 (Stopford 2020, 12).



Laivanrakennus skenaario yksi perustuu kuvion 2 kaupankäynnin skenaarioon yksi, suunnittelunopeuteen ja laivakaluston korvaamiseen uusilla. Pandemian aiheuttama suhteellisen pieni alamäki kääntyy nousuun ja alusten vaatimukset yhdessä tuoreimman teknologian kanssa lähtevät vahvaan kasvuun. Tässä skenaariossa olettamuksena on, että alukset kulkevat suunnittelunopeudella, joka on 14 solmua. Kaaviosta nähdään tarpeiden terävä taantuma vuonna 2021, jota seuraa tarpeiden nousu lähelle 250 miljoonaa dwt:tä 2030-luvun alussa. Nousu johtuu 3,2 prosentin vuotuisesta kaupankäynnin kasvusta ja vuonna 2009–2013 rakennettujen alusten korvaamisbuumista. Tässä skenaariossa yhdistyy voimakas kaupankäynnin kasvu ja alusten liikennöinti suunnittelunopeudella, jonka syystä se turvautuu voimakkaasti hiilineutraaliin polttoaineeseen välttääkseen ylittämästä IMO:n vuoden 2050 asetusta. (Stopford 2020, 12.)

Skenaario kaksi perustuu kuvion 2 kaupankäynnin skenaarioon kaksi, alhaiseen nopeuteen ja laivakaluston korvaamiseen. Tässä alusnopeutena on 12 solmua ja se perustuu nykyisiin markkinoihin. Nopeuden aleneminen vähentää laivakaluston kuljetuskapasiteettia 14 prosenttia sekä dieselmoottoreiden polttoaineen kulutusta ja päästöjä 38 prosenttia. Lyhyellä aikavälillä ennuste perustuu pidempiin pandemian aiheuttamiin vaikutuksiin, joista rakentuu kaupankäynnin skenaario kaksi, kunnes vuonna 2025 kaupan-

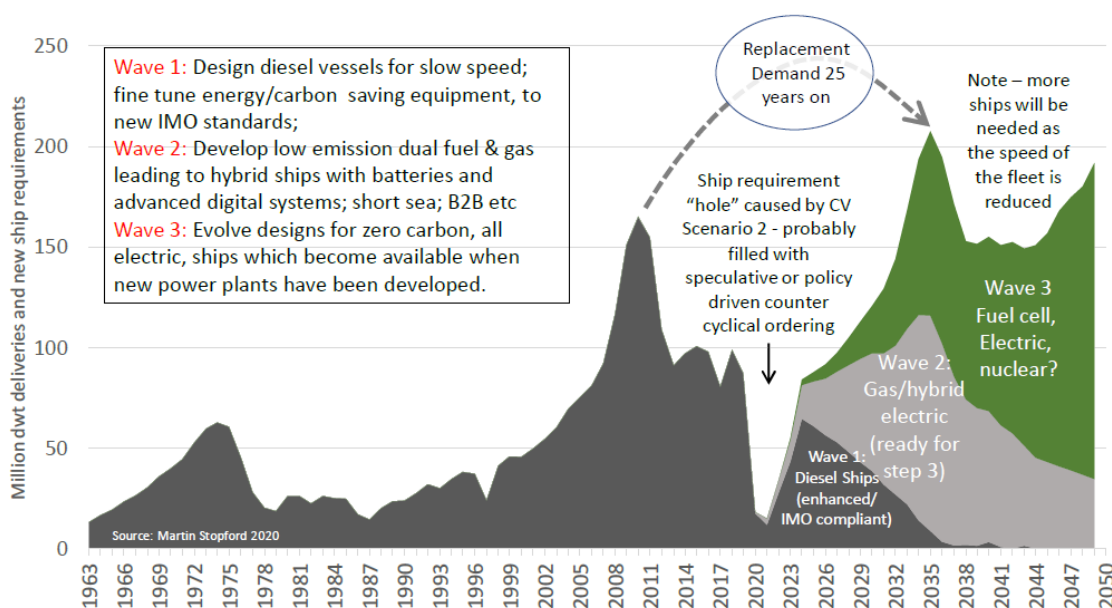
käynti saavuttaa 2,2 prosentin vuotuisen nousun ja alukset kulkevat 12 solmun nopeudella. Tämä skenaario aiheuttaa voimakkaan alamäen laivanrakennuksessa seuraavina kahtena vuotena, kunnes alusten vaatimukset lähtevät nousuun saavuttaen 200 miljoonan dwt:n 2030-luvun alussa. Kysynnän kasvu johtuu pääasiassa vuosina 2010–2015 (laivanrakennuksen superbuumi) rakennetun kaluston voimakkaasta uusimisesta ja ope-
rintinopeuden alenemisestä. (Stopford 2020, 12.)

Skenaario kolme perustuu kaupankäynnin skenaarioon kolme, ekonopeuteen ja kalus-
ton uusintaan. Alusten liikennöinti nopeus laskee 10 solmuun, joka aiheuttaa 17 prosentin alenemisen laivaston kuljetuskapasiteetissa ja 40 prosentin kulutus- ja päästövähennyk-
set verrattuna skenaarioon kaksi. Aikaisessa vaiheessa ekonopeus saattaa aiheuttaa liian pientä kuljetuskapasiteettia verrattuna kysyntään, toisaalta koronapandemian ai-
heuttama taantuma vähentää painetta. Skenaario 3 aiheuttaa voimakkaamman taantu-
man 2020- luvun alussa, johtuen rajusta pandemian aiheuttamasta maailmantalouden alamäestä eikä laivanrakennuksen kysyntä toivu ennen vuotta 2025, saavuttaen 160 miljoonan dwt:n rajapyykin vuonna 2036, mikä on lähes vastaava määrä kuin vuonna 2011. Kuten muissakin skenaarioissa kysynnän piikki johtuu vuonna 2009–2012 raken-
nettujen alusten korvaamisesta ja nopeuden alenemisen seurauksena tulevasta kapasi-
teetin tarpeesta. (Stopford 2020, 12–13.)

Tekniikan kehityksen kolme aaltoa

Kuviossa 4 kuvataan, miten tulevien vuosikymmenten teknillisiin haasteisiin pystytään vastaamaan. Kaupankäynnin skenaariossa kaksi ja laivanrakennuksen skenaariossa kaksi (the soft trade and the slow speed scenario) uusien alusten tarpeet laskevat ensin muutaman vuoden, jonka jälkeen vaatimukset lähtevät nousuun (kuvio 3) saavuttaen 200 miljoonan dwt:n rajan vuonna 2035. Suurimpana ongelmana tulevana vuosikymme-
nenä on alusten voimanlähde. Tänä päivänä yli 99 prosenttia yli 5000 GT:n rahtilaivoista käyttää fossiilisia polttoaineita, joka jakautuu seuraavasti; 78 prosenttia aluksista käyttää kaksitahtisia dieselmootoreita ja 17 prosenttia nelitahtisia dieselmootoreita. IMO:n ase-
tus päästövähennyksistä on vähintään puolet vuoden 2008 tasosta, määränä tämä tar-
koittaa noin 900 miljoonan tonnin kasvihuonepäästöjen vähentämistä 450 miljoonaan tonniin vuonna 2050. (Stopford 2020, 13–14.)

Kuvio 4. Technology scenario 2 to reach IMO 2050 CO2 target (based on trade scenario2 and shipbuilding scenario 2) (stopford 2020, 14).



Skenaario kaksi vaatii 2,7 miljardin verran lisää kuollutta painoa uusilta aluksilta vuonna 2050. Sijoittajille ongelmaksi on, ettei hiilineutraalia voimanlähdettä ole nyt saatavilla. Tulevaisuudessa todennäköisinä vaihtoehtoina korvaamaan fossiilisia polttoaineita ovat polttokennot, jotka tuottavat sähköenergiaa vedystä tai ammoniakista, mutta tällaista sähkövoimaa ei ole odotettavissa kaupalliseen käyttöön ennen 2020-luvun loppua. Lisähaasteita aiheuttaa kyseisten hiilineutraalien polttoaineiden hinta ja suuri kysyntä myös maissa sekä toimitusketju. Mikäli kasvihuonepäästöjen vähentämisen tavoitteisiin halutaan päästä, vaatii se vaiheittaista lähestymistä (kuvio 4). (Stopford 2020, 14.)

Tekniikan kehitys on jaettu kolmeen aaltoon vuosina 2020–2050, jossa ensimmäinen aalto alkaa koronaviruksen aiheuttamasta kuilusta. Stopfordin (2020) mukaan tässä vaiheessa on vääjäämättömästi sijoittajien sijoittama tehokkaiden dieselmootoreiden kehitykseen ja päästöjen optimointiin käyttämällä digitaalista teknologiaa (Industry 4.0) sekä parantamalla koko laiva-alustan suorituskykyä, mikä edellyttää järjestelmien merkittävää uudelleensuunnittelua ja digitaalisesti integroitujen käyttöjärjestelmien käyttöönottoa. Haasteena on myös saada sijoittajat vakuuttuneeksi, että diesel käyttöisillä aluksilla voidaan liikennöidä ja käydä kauppaa tarpeeksi kauan. Mikäli nämä ongelmat saadaan ratkottua, luodaan hyvä tekninen kehitys toiseen- ja kolmanteen aaltoon. (Stopford 2020, 14–15.)

Toinen teknologiaalto pitää sisällään kaasu- ja hybridikäyttöiset alukset, alkaen 2020-luvun alusta. Akkuja käyttävät kaasu- ja hybridialukset edustavat tärkeää roolia ja toimivat testausalustana, kun kehitetään teknisesti edistyneitä malleja, jotka kuitenkin ovat edullisia, luotettavia ja kaupallisessa käytössä riittävän kestäviä. (Stopford 2020, 15.)

Kolmas aalto koostuu järjestelmistä, jotka eivät tuota kasvihuonepäästöjä. Nyt tällaiset ratkaisut ovat vain piirustuspöydällä ja ne tulevat kohtaamaan vielä suuria skaalautuvuusongelmia. Niin kuin edellä mainittiin, ensimmäiset polttokennojärjestelmät saattavat olla saatavilla jo 2020-luvun loppupuolella, mutta bunkkeriverkoston kehittämiseen ja vaarallisten aineiden jakeluun liittyy vielä suuria teknillisiä- ja turvallisuusongelmia. Mikäli teknologiakehitys etenee kaavion 3 mukaan päästäisiin vuonna 2050 328 miljoonan tonnin vuotuisiin kasvihuonepäästöihin, mikä on selvästi alle IMO:n tavoitteen. (Stopford 2020, 15.)

5.3 Tulevaisuuden innovaatiot

Oceanbird

Oceanbird (kuva 15) on wPPC- (wind powered car carrier) hankkeen kehittämä kunnianhimoinen ja innovatiivinen konsepti matkalla kohti hiilineutraalia rahtiliikennettä. Hankkeessa on mukana yksityinen, julkinen ja akateeminen sektori. WPPC:n tiimiin kuuluu Wallenius Marine, joka omistaa projektin ja osallistuu hankkeen suunnitteluun sekä logistiikkaosaamiseen, KTH (Royal institute of technology), joka tutkii hankkeessa aerodynamiikkaa, purjemekaniikkaa ja suorituskykyä. SSPA (Swedish research institute), joka asiantuntemuksellaan osallistuu hankkeen aero- ja hydrodynaamisiin mallinnuksiin, simulointiin sekä riskisimulointiin. (Alfa Laval & Wallenius 2021.)



Kuva 15. Oceanbird (Alfa Laval & Wallenius 2021).

Ensimmäisellä RoRo aluksella tulee olemaan pituutta 200 m, leveyttä 40 m ja alus tullaan varustamaan viidellä peräti 80 m korkealla siipipurjeella, jolloin aluksen korkeus vesirajasta tulee olemaan 105 m. Teleskooppitekniologian ansiosta purjeet saadaan myrskyissä tai sillan alituksissa laskettua noin 45 metriin. Aluksen keskinopeus tulee olemaan noin 10 solmua ja verrattuna tämän aikakauden tyyppisiin aluksiin Oceanbirdin kasvihuonepäästöt tulevat olemaan noin 90 % pienemmät. (Alfa Laval & Wallenius 2021.)

Sähköpostikeskustelun 20.5.2021 mukaan aluksen mitoitus-syväys ei ole vielä täysin asettunut, mutta se tulee olemaan lähellä yhdeksää ja puolta metriä. (Naval Architec C. Fagergren, Wallenius Marine AB, Henkilökohtainen tiedonanto 20.5.2021.)

Alus kykenee tulevaisuudessa liikennöimään millä tahansa merellä, mutta liikennöinti aloitetaan Pohjois-Atlantilla loppuvuodesta 2024. Aluksen kokonaiskustannuksista ei ole vielä tarkkaa tietoa, mutta kustannukset ovat samaa kokoluokkaa tyyppillisten rahtialusten kanssa, mahdollisesti hieman korkeammat. (Kuttenkeuler. J, Ym 2020.)

Perinteisissä rahtialuksissa rungon muodon lähtökohtana on mahdollisimman pieni vesivastus. Oceanbirdissä huomioon pitää ottaa siipipurjeiden aiheuttamat suuret horisontaaliset voimat, niinpä aluksessa tulee olemaan useita ”eväitä”, joita liikuttelemalla pystytään kompensoimaan suuria sivuvoimia ja alus kykenee kulkemaan suoraan ja ilman kallistumia suurista sivuttaisvoimista huolimatta. (Kuttenkeuler. J, Ym 2020.)

Aluksen siipipurjeet ovat saman tyylistä teknologiaa lentokoneen siipien kanssa. Purjeet kykenevät pyörittämään 360 astetta, jotta tuulesta saadaan optimaalinen hyöty tuulen suunnasta riippumatta. (Kuttenkeuler. J, Ym 2020.)

5.4 Itämeren olosuhteisiin soveltuvat alukset

Kaikille Suomen satamiin kulkeville aluksille asetetaan tietty jääluokka. Määräykset ovat tulosta Suomen ja Ruotsin yhteistyöstä, joilla pyritään turvaamaan alusten riittävä kyky kulkea jääolosuhteissa Itämerellä. Jääluokka määräytyy aluksen konetehon, rungon vahvistuksen ja kuljetuskoneiston vahvuuden myötä. Väylämaksun suuruuteen vaikuttavat aluksen jääluokka ja nettovetoisuus. Oikeus jäänmurtoavustukseen määräytyy kantavuuden ja jääluokan perusteella. (TRAFICOM 2021.)

Suomalaiset jääluokat ovat; IA Super, IA, IB, IC, II ja III, jossa IA Super on paras mahdollinen jääluokka ja III heikoin. Jääluokissa II ja III alusten jääluokkamääräys Itämerelle ei täyty. Löyhissä jääolosuhteissa II luokan alus voi saada jäänmurtoavustusta, mikäli sen kantavuus on riittävä. Luokan III alukset eivät saa missään tilanteissa jäänmurtoavustusta. Avovesikaudella jääluokalle ei ole vaatimuksia. (TRAFICOM 2021.)

Jääluokka määritetään alukselle sen luokitusmerkinnän perusteella. Jääluokan vahvistamiseksi aluksen edustajan on toimitettava Kansallisuustodistus, kansainvälinen mittakirja, lastiviivatodistus ja luokitustodistus. Lisäksi jos aluksen jääluokka on määritetty II-luokkaa korkeammaksi on siitä toimitettava myös luokitustodistuksen liite. Aluksen jääluokaksi vahvistetaan II luokka, mikäli asiakirjoja tai liitteitä puuttuu.

Väyläviraston tehtävänä on ohjata jäänmurtajia ja määritellä avustusrajoitukset satamiin jääolosuhteiden mukaan. (TRAFICOM 2021).

Itämeren olosuhteisiin jääluokaltaan (IA Super-IC) soveltuvia aluksia yli 20,000 DWT:n kokoluokassa on tulossa ainakin Finnlinesilta ja Wallenius-Solilta. Alusten mittasuhteet ovat poikkeuksellisen suuria varsinkin pituuden ja syvyyksen osalta. Finnlinesin aluksilla L/T suhde on 31,4 ja Wallenius-Solin aluksilla 26,6. PIANCIN (2014, 167–174) on esitetty tyypillisiä alusmittoja, missä RoRo alusten tyypilliset mittasuhteet vaihtelevat välillä 20–22 pituuden ja syvyyksen osalta ja pituus-/leveysuhde vaihtelee välillä 6–6,8. Kyseisessä alustyyppissä on tapahtunut merkittävää kasvua pituuden osalta ilman syvyyksen lisääntymistä.

5.5 Tilatut konttialukset

Taulukossa 9 on esitetty Alphaliner- sivuston mukaan 20 maailman suurinta konttivarustamoita ja varustamoiden vahvistetut tilaukset, joita ei vielä ole toimitettu.

Taulukko 9. Tilatut konttialukset (CMA CGM 2021; Cosco Shipping 2020; Gavin Van Marle 2021; Hapag-Lloyd 2020; Hellenic Shipping news 2021; Jasmina Ovcina 2021; Katherine Si 2021; Lee hong Liang 2020; Sam Chambers 2021; The Maritime Executive 2021a; The Maritime Executive 2021b).

Rank	Varustamo	Määrä	Käyttöönotto	TEU
1	MAERSK	-	-	-
2	Mediterranean Shg Co	-	-	-
3	CMA CGM Group	22	2023-2024	5,500-15,000
4	COSCO Group	7	2023-2024	23,000
5	Hapag-Lloyd	6	2023	23,500+
6	ONE	6	2023-2024	24,000
7	Evergreen Line	20	2025	15,000
8	HMM Co Ltd	8	2021	16,000
9	Yang Ming Marine Transport Corp.	-	-	-
10	Zim	10	2023	15,000
11	Wan Hai Lines	5	2023	13,200
12	PIL	-	-	-
13	Zhonggu Logistics Corp.	18	-	4,600
14	KMTC	-	-	-
15	IRISL Group	-	-	-
16	SITC	6-12	2022	1,800
17	X-Press Feeders Group	4	-	7,000
18	Antong Holdings	-	-	-
19	Sinokor Merchant Marine	-	-	-
20	UniFeeder	-	-	-

Maailman suurin konttialus kirjoitushetkellä on HMM varustamon Algeciras, jonka TEU kapasiteetti on 23 964. Pituutta aluksella on 399,9 m ja leveyttä 61 m. (Meriteollisuus 2021). Globaalissa mittakaavassa suurimpien varustamoiden konttialukset eivät tule kasvamaan aikavälillä 2021–2025 (taulukko 9), mutta ultrasuuret konttialukset tulevat lisääntymään. Maailman viidenneksi suurin konttivarustamo Hapag-Lloyd on tilannut viisi ultrasuurta konttialusta, joiden TEU kapasiteetti on +23 500. Varustamon suurimmat alukset liikenteessä tällä hetkellä ovat noin 20 000 TEUn luokkaa. Työssä lähestyttiin maailman suurimpia konttivarustamoita, joista haastattelupyynnöni vastasi Hapag-Lloydilta Nils Haupt. N. Hauptin (henkilökohtainen tiedonanto 21.5.2021) mukaan konttialusten koko ei tule merkittävästi kasvamaan tulevaisuudessa, vaikka se teknisesti olisi mahdollista jo nyt, sillä satamat eivät ole valmistautuneet suurempiin aluksiin ja nykyiset alukset pystyvät vaivoin toimimaan vierailemissaan satamissa. Suuremmat alukset eivät myöskään pysty käyttämään Suezin kanavaa, mikä tarkoittaa Afrikan mantereen kiertämistä ja polttoainekulujen merkittävää nousua. Lisäksi Vakuutusyhtiöt eivät suostu vakuuttamaan suurempia aluksia ja/tai vakuutuskulut nousevat niin suuriksi, että suuresta aluksesta saatu hyöty häviää. Tulevaisuudessa voidaan kuitenkin nähdä yksittäisiä suurempia konttialuksia esimerkiksi 28 000 TEUn kokoluokassa, mutta se ei tule yleistymään. Hapag-Lloydin uudet konttialukset tulevat olemaan hieman entisiä leveämmät, noin 1–2 konttirivin verran (5–8 m). Tarkkoja mittoja ei vielä ole. Alusten syväys tulee olemaan noin 15 m. (Senior Director N. Haupt, Hapag-Lloyd, henkilökohtainen tiedonanto 21.5.2021.)

6 NOPEUSPAINUMAN LASKENTAKAAVAT

6.1 Mitoitusalus

Mitoitusalusena squat laskelmissa ja väylän leveyden tarkastelussa käytetään Wallenius Solin uusia LNG RoRo aluksia (kuva 16), jotka tulevat liikennöimään Perämerellä.



Kuva 16. Wallenius Sol LNG RoRo (Alfa Laval & Wallenius).

Aluksen tiedot on esitetty taulukossa 10.

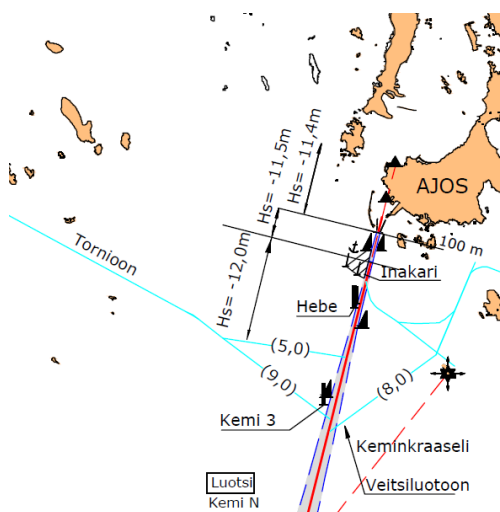
Taulukko 10. Aluksen tiedot. (Deputy Project Manager Newbuilding / Operations M. Carleitz, Wallenius Sol AB, henkilökohtainen tiedonanto 30.7.2021).

L _{oa}	B	T max	L _{pp}	DWT	Displacement
241,7 m	35,2 m	8,8 m	234,25 m	26,900 t	47883 t

6.2 Väylän tiedot

Squat laskelmissa tarkasteltu väylä on Kemin Ajoksen satamaan johtava väylä, väylän numero 10: Kemin edusta. (kuva 17) Uusien alusten myötä Väylän kulkusyvyyttä syvennetään 10 metristä 12 metriin Väyläviraston toimesta. Lisäksi väylän leveyttä lisätään 200 metriin. Koko väylästä on tehty suunnitelma, jonka uudistukset toteutetaan vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa väylää syvennetään ja levennetään 4,3 km matkalta Tornio-Ajos yhdysväylän liittymiskohdalta satama-alueen rajaan asti. Vertailun ja kaavojen toimivuuden tarkastamiseksi on niitä vertailtu myös erilaisilla väylän poikkileikkauksilla eri alusnopeuksilla. Tulokset on esitetty kohdassa 7.

Uusien linjalaivojen sekä 2024 aloittavan Metsä Fibren uuden tehtaan myötä myös Kemin satama investoi sataman infraan yli 40 milj. euroa vuosina 2022–2024. Alusmäärät Kemin satamassa tulevat nousemaan radikaalisti uuden tehtaan myötä, myös alusten kokoluokka nousee samalle tasolle Wallenius Solin uusien linjalaivojen kanssa. Kemin sataman infrahankkeet pitävät sisällään Ajoksen sataman ruoppaamisen, kääntöaltaan laajentamisen, uuden laiturin rakentamisen sekä olemassa olevien laituri- ja kaivojen syvennyksen. Suuremmat alukset tulevat myös vaikuttamaan väylän jäänmurtoon, sillä jäänmurtajista ainoastaan Polaris pystyy tekemään tarpeeksi leveän uran uusille aluksille. Lisäksi uudet alukset sitovat helposti kaksi väyläjäänmurtajaa, mikä tulee näkymään alusten pidempinä odotusaikoina. (Operations manager J. Kärkkäinen, Arctia Karhu, henkilökohtainen tiedonanto 9.6.2021.)



Kuva 17. Väyläkortti Ajoksen 10 m:n väylä (Väylävirasto 2020).

6.3 Käytetyt kaavat

Kaavat on valittu taulukossa 11 esitettyjen reunaehtojen mukaan. Nyt käytössä oleva ja suositeltu Huuska/Gulievin kaava ylittää reunaehdot leveyden ja syväyksen osalta sekä pituuden ja syväyksen osalta ja tarkoituksena on selvittää miten reunaehtojen ylitys vaikuttaa kaavan uskottavuuteen.

Vertailtaviksi kaavoiksi on valittu reunaehtojen perusteella BarrassB3 kaava, joka on yksi helpoimmista ja eniten käytetyistä kaavoista, Yoshimuran kaava, jota on parannettu rajoitetuille väylille ja kanaville vuonna 2007 sekä riittävien lähtötietojen salliessa PIANCin (2014) ohjeessa huolellisimmaksi kuvailtu Ankudinovin MARSIM2000-kaava. (PIANC 2014, 195–200.)

Taulukko 11. kaavojen reunaehdot (PIANC 2014, 191).

Code ID	Configuration			Constraint							
	U	R	C	F_{nh}	C_B	S	B/T	h/T	h_T/h	L/B	L/T
Tuck (1966)	Y	Y	Y	F_{nh}^{2+}							
Huuska/Guliev (1976)	Y	Y	Y	≤ 0.7	0.6 - 0.8		2.19 - 3.5	1.1 - 2.0	0.22 - 0.81	5.5 - 8.5	16.1 - 20.2
ICORELS (1980)	Y	(Y)		≤ 0.7	0.6 - 0.8		2.19 - 3.5	1.1 - 2.0	0.22 - 0.81	5.5 - 8.5	16.1 - 20.2
Barrass3 (2004)	Y	Y	Y	V^2	0.5 - 0.85	0.1 - 0.25		1.1 - 1.4			
Eryuzlu2 (1994)	Y	Y		F_{nh}^{2+}	≥ 0.8		2.4 - 2.9	1.1 - 2.5		6.7 - 6.8	
Römisch (1989)	Y	Y	Y	V^{2+} , V_{Cr}			2.6	1.19 - 2.25		8.7	22.9
Yoshimura (1986)	Y	Y	Y	V^2	0.55 - 0.8		2.5 - 5.5	≥ 1.2		3.7 - 6.0	

Notes:

1. Y=Yes
2. Only h/T enforced for Römisch formula.
3. Only Barrass3 and Römisch predict stern squat S_S explicitly. Others predict maximum squat, whether at bow or stern.
4. V^2 : Squat a function of square of velocity
5. V^{2+} : Squat a function of more than square of velocity
6. F_{nh}^{2+} : Squat a function of more than square of F_{nh} .
7. V_{Cr} : Squat a function of critical speed V_{Cr} .
8. ICORELS sometimes used in Restricted channel although originally developed for Unrestricted.

6.4 Huuska/Guliev

Laivaväylien suunnitteluohjeessa (2018) esitelty Huuska/Gulievin kaava on yleisesti käytetty kaava nopeuspainuman ennustamiseen. Kaavassa on kuitenkin reunaehtoja, jotka uusien alusmittojen myötä ylittyvät herkästi.

Alun perin Tuckin erillisistä kaavoista johdettu ja parannettu kaava, johon viimeisimpänä muutoksena lisättiin korjauskertoimen K_s , jotta kaavaa voidaan käyttää myös rajoitetuilla

väylillä. Keulan nopeuspainumaa ennustava kaava lasketaan kaavalla 15. (PIANC 2014, 191–192.)

$$S_{BH} = C_S \frac{\nabla}{L_{PP}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}} K_S \quad (15)$$

Kaava 15. Huuska/Gulievin kaava (PIANC 2014, 191).

Missä korjauskerroin K_S määritetään kaavalla 16.

$$K_S = \begin{cases} 7,45s_1 + 0,76 & s_1 > 0,03 \\ 1,0 & s_1 \leq 0,03 \end{cases} \quad (16)$$

Kaava 16. Korjauskerroin Huuska/Guliev (PIANC 2014, 192).

Missä korjattu blockage factor S_1 määritetään kaavalla 17.

$$s_1 = \begin{cases} 0,03, & U \\ \frac{S}{K_1}, & R \\ S, & C \end{cases} \quad (17)$$

Kaava 17. Blockage factor Huuska/Guliev (PIANC 2014, 192).

K_1 arvo on Huuskan kehittämä luiskan korkeussuhteiden funktio, joka saadaan helposti kuviosta 5.

Kuvio 5. K_1 vs S (PIANC 2014, 193).

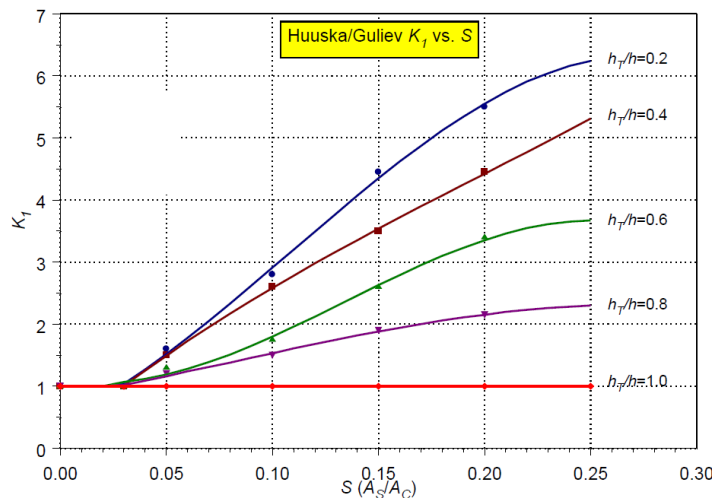


Figure D-6: Huuska/Guliev correction factor K_1 vs. $S (=A_S/A_C)$ as a function of h_T/h

6.5 BarrassB3

Barraksen B3 kaavaa pidetään hänen kolmantena kaavanaan ja sitä voidaan soveltaa kaikille väylätyypeille. PIANCin (2014) mukaan Stocks ym (2002) huomasivat, että BarrassB3 kaavalla saatiin parhaat tulokset uusille ja perinteisille bulk aluksille avovesi-väylillä St. Francisin alueella. Myös Saksassa BAW on sitä mieltä, että kaava on varteenotettava vaihtoehto heidän rajoitetuille väylilleen. (PIANC 2014, 195–196.) Reunaehtoina kaavalle ovat taulukon 9 mukaan: $C_B = 0.5 - 0.85$ ja $h/T = 1.1-1.4$. BarrassB3 määritetään kaavalla 18.

$$S_{Max,B3} = \frac{C_B V_k^2}{\frac{100}{K}} \quad (18)$$

Kaava 18. BarrassB3 kaava (PIANC 2014, 195).

Väylän K arvoa on tutkittu yli kuudella sadalla laboratorio ja kenttäkokeella kaikilla väylätyypeillä ja sen tarkoitus on muokata nimittäjää 50:n ja 100:n välillä. Channel coefficient K määritetään kaavalla 19.

$$K = 5,74S^{0,76} \quad (19)$$

Kaava 19. Väylän K arvo Barrass (PIANC 2014, 195).

6.6 Yoshimura

Maa-, infrastruktuuri-, liikenne- ja matkailuministeriö kehitti Japanissa vuonna 2007, alkuperäisen (1986) kehitetyn kaavan pohjalta parannetun kaavan ennustamaan aluksen keulan nopeuspainumaa osana uusia väylän suunnitteluohjeita. Yoshimuran kaavalla päästään usein keskiarvallisesti hyviin tuloksiin, kun verrataan muihin keulan nopeuspainumaa ennustaviin kaavoihin, se määritetään kaavalla 20 ja sitä voidaan soveltaa kaikille väylätyypeille. (PIANC 2014, 200.)

$$S_{b,Y} = \left[\left(0,7 + 1,5 \frac{1}{h} \right) \left(\frac{C_B}{\frac{L_{PP}}{B}} \right) + 15 \frac{1}{h} \left(\frac{C_B}{\frac{L_{PP}}{B}} \right)^3 \right] \frac{V_e^2}{g} \quad (20)$$

Kaava 20. Yoshimura (PIANC 2014, 200).

Vuonna 2007 Ohatsu ja Yoshimura paransivat kaavaa ottamalla huomioon S arvon rajoitetuilla väylillä ja kanavilla. V_e määritetään kaavalla 21. (PIANC 2014, 200.)

$$V_e = \begin{cases} V_s, & U \\ \frac{V_s}{(1-s)}, & R, C \end{cases} \quad (21)$$

Kaava 21. Equivalent velocity term (PIANC 2014, 200).

6.7 Ankudinov

Ankudinov ja Dagget esittelivät vuonna 2000 MARSIM kaavan, jolla ennustetaan aluksen nopeuspainumaa perustuen aluksen keskipisteen uppoumaan ja trimmikulmaan. PIANCIn (2014) ohjeessa kaavaa kuvaillaan yhdeksi huolellisimmista kaavoista, mutta samalla se on myös yksi hankalimmista. Vuonna 2009 Briggs ja Dagget vertailivat Ankudinovin MARSIM-kaavaa PIANCin ennusteisiin. Ankudinovin kaavalla saatiin hyviä tuloksia, kun niitä verrattiin laboratorio kokeisiin ja Panaman kanavassa tehtyihin mittauksiin. (PIANC 2014, 189.) MARSIM-kaava vaatii huomattavasti tarkempia lähtötietoja kuin useat muut kaavat ja siksi sen käyttö aikaisessa suunnitteluvaiheessa on hankalaa.

Suunnittelijan kannalta on hyötyä siitä, että kaava todennäköisemmin hieman yliennustaa kuin aliennustaa. (Briggs 2009, 15.) Kaava ennustaa aluksen nopeuspainumaa, sekä keulassa että perässä, riippuen trimmikulman arvosta. Reunaehtona kaavalla on $F_{nh} \leq 0,6$ ja se määritetään kaavalla 22.

$$S_{Max} = L_{PP}(S_m \mp 0,5Trim) \quad (22)$$

Kaava 22. Ankudinov MARSIM2000 (Briggs 2009, 2).

Positiivista Trim arvoa käytettäessä kaava ennustaa nopeuspainumaa aluksen perässä (S_s) ja negatiivisella arvolla nopeuspainumaa keulassa (S_b) (Briggs 2009, 2).

Keskipisteen uppouma S_m määritetään kaavalla 23.

$$S_m = SMid = (1 + K_p^S) P_{Hu} P_{Fnh} P_{\frac{h}{T}} P_{ch1} \quad (23)$$

Kaava 23. Keskipisteen uppouma (Briggs 2009, 3).

Potkurien parametri K_p^S määritetään kaavalla 24.

$$K_p^S = KpS = \begin{cases} 0,15, & \text{yksi potkuri} \\ 0,13, & \text{kaksi potkuria} \end{cases} \quad (24)$$

Kaava 24. Potkurien vaikutus (Briggs 2009, 3).

Aluksen rungon parametri matalille vesille P_{Hu} määritetään kaavalla 25.

$$P_{Hu} = 1,7C_B \left(\frac{BT}{L_{PP}^2} \right) + 0,004C_B^2 \quad (25)$$

Kaava 25. Aluksen rungon vaikutus (Briggs 2009, 3).

Aluksen etenemisnopeuden parametri P_{Fnh} määritetään kaavalla 26.

$$P_{Fnh} = F_{nh}^{(1,8+0,4Fnh)} \quad (26)$$

Kaava 26. Etenemisnopeuden vaikutus (Briggs 2009, 3).

Veden syvyysvaikutuksen kuvaamiseen käytetään parametria $P_{+h/T}$ ja se määritetään kaavalla 27.

$$P_{+h/T} = 1,0 + \frac{0,35}{\left(\frac{h}{T}\right)^2} \quad (27)$$

Kaava 27. Veden syvyyden vaikutus (Briggs 2009, 3).

Väylän vaikutukseen käytetään parametria P_{Ch1} , riippuen siitä onko väylä avoin vai rajoitettu ja se määritetään seuraavasti.

$$P_{Ch1} = \begin{cases} 1,0 & , & U \\ 1,0 + 10S_h - 1,5(1,0 + S_h)\sqrt{S_h} & , & R, C \end{cases} \quad (28)$$

Kaava 28. Väylän vaikutus (Briggs 2009, 3).

Kanaville ja ruopatuille väylille tarvittava syvyystekijä S_h määritetään kaavalla 29.

$$S_h = C_B \left(\frac{S}{h} \right) \left(\frac{h_T}{h} \right) R, C \quad (29)$$

Kaava 29. Syvyystekijä rajoitetuille väylille (Briggs 2009, 3).

MARSIM2000 kaavassa on kaksi tärkeää komponenttia, joista toinen on keskipisteen uppouma ja toinen aluksen trimmikulma (trim), joka saadaan kaavalla 30.

$$Trim = -1,7P_{Hu}P_{Fnh}P_{h\bar{T}}K_{Tr}P_{Ch2} \quad (30)$$

Kaava 30. Aluksen trimmikulma (Briggs 2009, 4).

Parametri $P_{h\bar{T}}$ kuvaa potkureiden aiheuttamaa trimmikulman vähentymistä matalissa vesissä ja se määritetään kaavalla 31.

$$P_{h\bar{T}} = 1 - e^{\left[\frac{2,5(1-\frac{h}{\bar{T}})}{F_{nh}} \right]} \quad (31)$$

Kaava 31. Potkureiden vaikutus trimmikulmaan (Briggs 2009, 4).

K_{Tr} parametri on monen tekijän funktio, joka määritetään kaavalla 32.

$$K_{Tr} = C_B^{n_{Tr}} - (0,15K_P^S + K_P^T) - (K_B^T + K_{Tr}^T + K_{T1}^T) \quad (32)$$

Kaava 32. Trim coefficient (Briggs 2009, 4).

Missä ensimmäisenä tekijänä on rungon täyteläisyyskerroin, joka on korotettu trimmikulman eksponenttiin, jonka määrittämiseen käytetään kaavaa 33.

$$n_{Tr} = 2,0 + 0,8 \frac{P_{Ch1}}{C_B} \quad (33)$$

Kaava 33. Trim exponent (Briggs 2009, 4).

Potkurien vaikutusta aluksen trimmikulmaan kuvataan kaavalla:

$$K_P^T = \begin{cases} 0,15, & \text{yksi potkuri} \\ 0,20, & \text{kaksi potkuria} \end{cases} \quad (34)$$

Kaava 34. Potkurien vaikutus (Briggs 2009, 4).

Viimeiset kolme tekijää ovat keulabulbin vaikutus (K_b^T), peräsimen vahvikkeen vaikutus (K_{Tr}^T) ja alkuperäisen trimmikulman vaikutus (K_{T1}^T). Keulabulbin tekijä määritetään seuraavasti:

$$K_b^T = \begin{cases} 0,1, & \text{alus keulabulbilla} \\ 0,0, & \text{ilman keulabulbia} \end{cases} \quad (35)$$

Kaava 35. Keulabulbin vaikutus (Briggs 2009, 5).

Peräsimen vahvikkeen vaikutus määritetään kaavalla 36.

$$K_{Tr}^T = f(x) = \begin{cases} 0,1 \left[\frac{B_{Tr}}{B} \right] = 0,1 \left[\frac{0,4B}{B} \right] = 0,04, & \text{vahvistettu peräsin} \\ 0,0 & \text{ilman vahvistusta} \end{cases} \quad (36)$$

Kaava 36. Peräsimen vahvikkeen vaikutus (Briggs 2009, 5).

Jossa B_{Tr} on peräsimen vahvikkeen leveys, jonka tyypillinen arvo on 0,4 B. Alkuperäisen kallistuskulman tekijä määritetään kaavalla 37.

$$K_{T1}^T = \left(\frac{T_{ap} - T_{fp}}{T_{ap} + T_{fp}} \right) \quad (37)$$

Kaava 37. Alkuperäinen kallistuskulma (Briggs 2009, 5).

Jossa T_{ap} on staattinen syväys perässä ja T_{fp} on staattinen syväys keulassa. Viimeinen parametri on väylän vaikutus trimmikulmaan ja se määritetään seuraavasti:


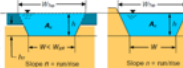
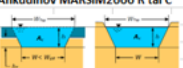
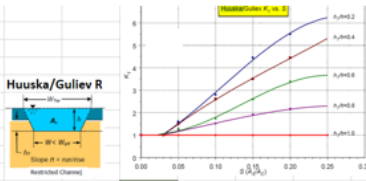
$$P_{Ch2} = \begin{cases} 1,0 & , & U \\ 1,0 - 5S_h & , & R, C \end{cases} \quad (38)$$

Kaava 38. Väylän vaikutus trimmikulmaan (Briggs 2009, 5).

7 KAAVOJEN TULOKSET

Kohdassa 6 esitetyistä kaavoista on tehty Exceliin laskentataulukko (taulukko 12), johon käyttäjä voi syöttää väylän sekä aluksen tiedot. Syöttämällä tiedostoon aluksen tiedot, ohjelma laskee ensin aluksen vaikutusalueen leveyden (kaava 8), jonka jälkeen nähdään, suoritetaanko laskenta avovesiväylän vai rajoitetun väylän ehtojen mukaan. Tulokseksi uusilla alusmitoilla saadaan 357,4 m, mikä tarkoittaa, ettei Kemin Ajoksen väylä täytä avovesipoikkileikkauksen ehtoja uusille aluksille (uuden väylän leveys pohjassa 200 m). Laskenta suoritetaan ruopattujen väylien ehtojen mukaan. Kaavoissa ei ole otettu huomioon aluksen muita vertikaaliliikkeitä, vaan tarkoituksena on selvittää reuna-ehdojen ylityksen vaikutus Huuska/Gulievin kaavaan vertailemalla tuloksia muihin toimiviksi todettuihin kaavoihin, joissa reunaehdot eivät ylitä.

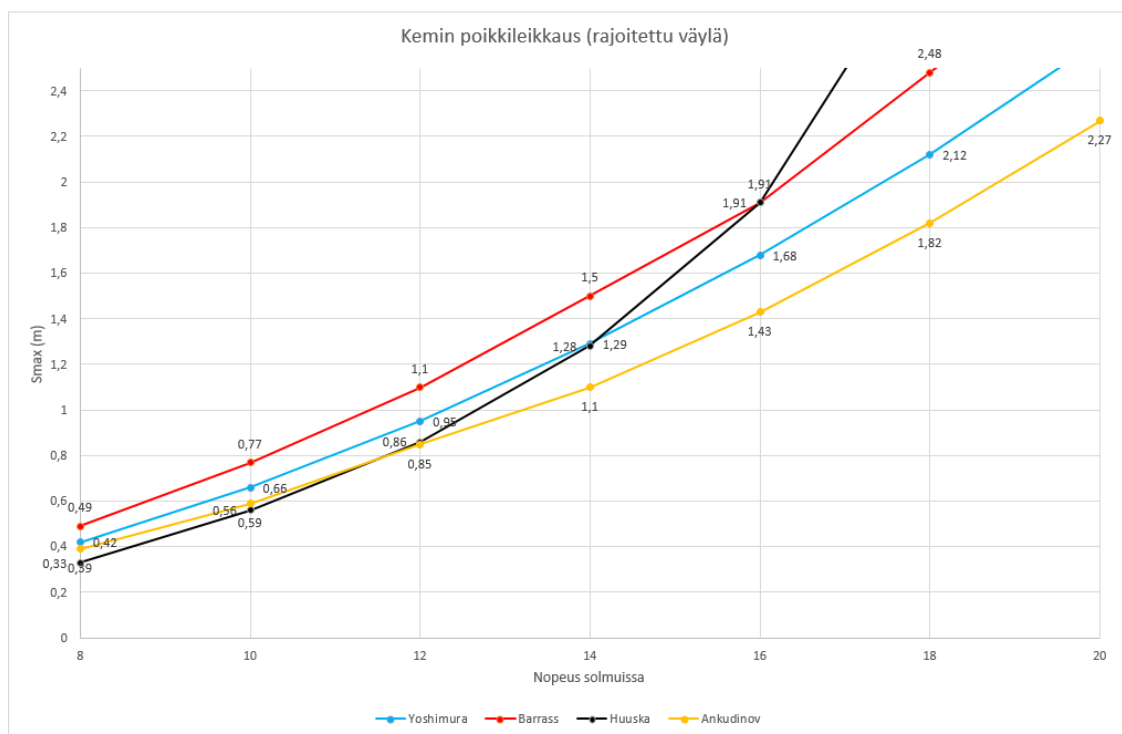
Taulukko 12. Squat-taulukko.

Yoshimura R tai C		BarrassB3 R tai C		Ankudinov MARSIM2000 R tai C	
					
Lähtötiedot Aluksen leveys (B) 35,2 m Aluksen syväys (T) 8,8 m Lpp 234,25 m Cb 0,65 vesisyvyys (h) 12 m luiskan kaltevuus (n) 0,25 Väylän lev. W 200 m Nopeus m/s 5,14 m/s h _r 4 m g 9,81 m/s		As 303,6 m ² Ac 2436 m ² S 0,12 W _{TOP} 272 m V _e 5,87		Aluksen leveys (B) 35,2 m Aluksen syväys (T) 8,8 m Lpp 234,25 m Cb 0,65 vesisyvyys (h) 12 m luiskan kaltevuus (n) 0,25 Väylän lev. (pohja) 200 m Nopeus V _s 9,99134 solmua	
S _{h,V} 0,65391 m		S _{MAX,B3} 0,76508 m		F _{rh} 0,47374 Ac 2436 As 303,6 S 0,12 S _{max} 0,00237 K _p ² 0,13 P _{HU} 0,00793 P _{FHh} 0,2262 P _h 1,18822 P _{CH1} 0,98275 S _h 0,0198 Trim 0,00025 P _h 0,85324 K _{TR} -0,10858 n _{TR} 3,20954 K _p ² 0,2 K _p ² 0,1 K _p ² 0,04 K _p ² 0 P _{CH2} 0,901	
		Huuska/Guliev R Aluksen leveys (B) 35,2 m Aluksen syväys (T) 8,8 m Lpp 234,25 m Cb 0,65 vesisyvyys (h) 12 m luiskan kaltevuus (n) 0,25 Väylän lev. W 200 m h _r 4 m Nopeus V _s 5,14 m/s g 9,81 m/s		S _{max} 0,55205 m	
Ac 2436 m ² As 303,565 m ² S 0,12 K _s 1,05012 h _r /h 0,33 S ₁ 0,03894 F _{rh} 0,47374 K ₁ 3,2 Co 2,4		S _{max} 0,58409 m stern 0,52448 m bow			

Ruopattujen väylien osalta kaavojen tulokset vaihtelevat merkittävästi (kuvio 6). Nopeuden ollessa 10 solmua ja vesisyvyyden 12 m (uuden väylän kulkusyvyys) saadaan

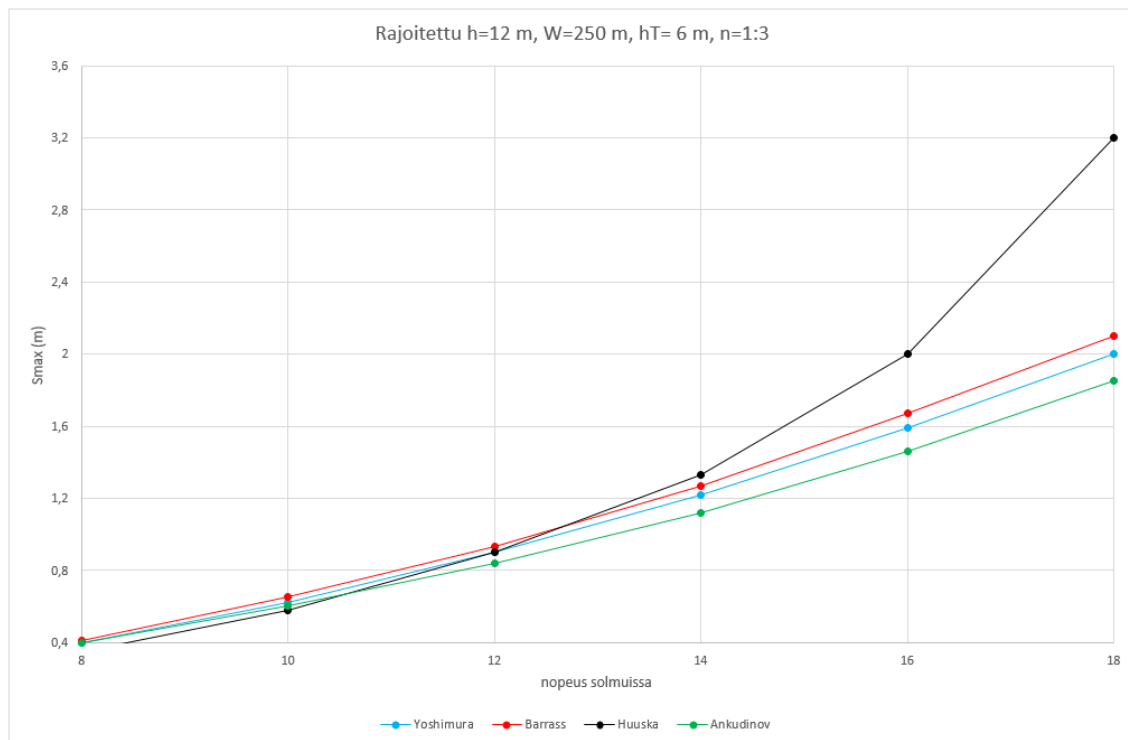
Huuska/Gulievin kaavalla pienin arvo 0,56 m kun taas BarraksenB3 kaavalla 0,77 m. Eroa pienimmän ja suurimman arvon välillä on siis 0,22 m. Keskiarvoksi kaikista neljästä kaavasta saadaan 0,66 m. Nopeuden noustessa 12 solmuun ero suurimman ja pienimmän arvon välillä nousee 0,28 metriin, suurimman arvon ollessa 1,11 m (Barras) ja pienimmän arvon ollessa 0,85 m (Ankudinov). Kuviossa 6 on esitetty nopeuden funktiona kaikkien neljän kaavan tulokset nopeuksilla 8–20 solmua. Nopeuden kasvaessa yli 12 solmuun Huuska/Gulievin kaavan käyrä lähtee nopeaan nousuun, vaikka Frouden luku ylittyy lievästi vasta 16 solmun nopeudella. Muiden kaavojen osalta käyrät näyttävät lähes identtisiltä. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että Barraksen kaava hieman yliennustaa ja Ankudinovin kaava mahdollisesti aliennustaa. Yoshimuran kaavalla saadut tulokset näyttävät luontevalta ja turvalliselta keskiarvolta kaavojen kesken. Huuska/Gulievin kaavalla reunaehdot ylittyvät erittäin paljon, eikä tulosta voida pitää täysin luotettavana.

Kuvio 6. Squat-tulokset nopeuden funktiona Ajoksen väylällä.



Koska kaavat ovat ennusteita, ei johtopäätöksiä voida tehdä yhden mallituksen perusteella. Kuviossa 2 on esitetty erilainen skenaario rajoitetusta väylästä, missä vesisyvyys on 12 m, väylän leveys pohjassa on 250 m, luiskakorkeus 6 m ja luiskan kaltevuus 1:3.

Kuvio 7. Squat-tulokset nopeuden funktiona rajoitetulla väylällä.

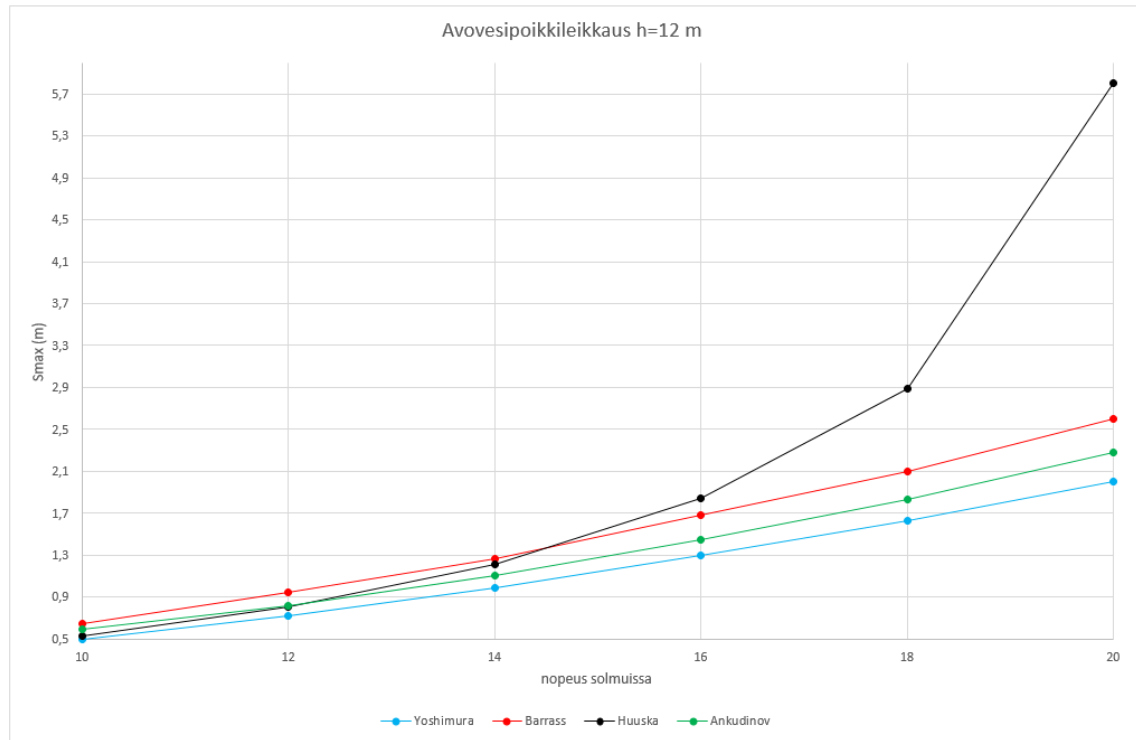


Käyrät näyttävät pitkälti samanlaisilta kuin kuviossa 6. Barrass, Yoshimura ja Ankudinov kasvavat suhteessa erittäin tasaisesti, kun taas Huuska/Gulievin kaava muuttuu epäilyttäväksi viimeistään 12 solmun jälkeen. Barrass antaa jälleen hieman suurempia arvoja, mahdollisesti kaavan yksinkertaisuudesta johtuen, kun taas Ankudinovin kaavalla saadaan pienimmät arvot. Kaavojen hajonta on kuitenkin pienempää kuin kuviossa 6, kun Huuska/Gulievin kaavaa ei oteta huomioon.

Avovesiväylillä kaavojen tulokset näyttävät pitkälti samanlaisilta kuin rajoitetuilla väylillä. Avovesiväylällä kaavojen keskiarvoksi saadaan 0,57 m, kun nopeus on 10 solmua ja vesisyvyys 12 m. Suurimman arvon myös avovesiväylällä antaa BarraksenB3 kaava arvolla 0,65 m. Pienintä nopeuspainumaa ennustaa kyseisillä lähtötiedoilla Yoshimuran kaava, jonka tulos on 0,5 m. Nopeuden kasvaessa 15 solmuun ja vesisyvyyden pysyessä samana kaavoissa on havaittavissa jo selkeää hajontaa. Pienintä nopeuspainumaa ennustaa edelleen Yoshimuran kaava tuloksella 1,21 m, kun taas Huuska/Gulievin kaava ennustaa suurinta painumaa tuloksella 1,57 m. Kyseisillä arvoilla Frouden luku on 0,72, mikä ylittää Huuska/Gulievin kaavan reunaehdon lievästi.

Kuviossa 8 on esitetty tilanne avovesiväylästä, missä vesisyvyys on 12 m.

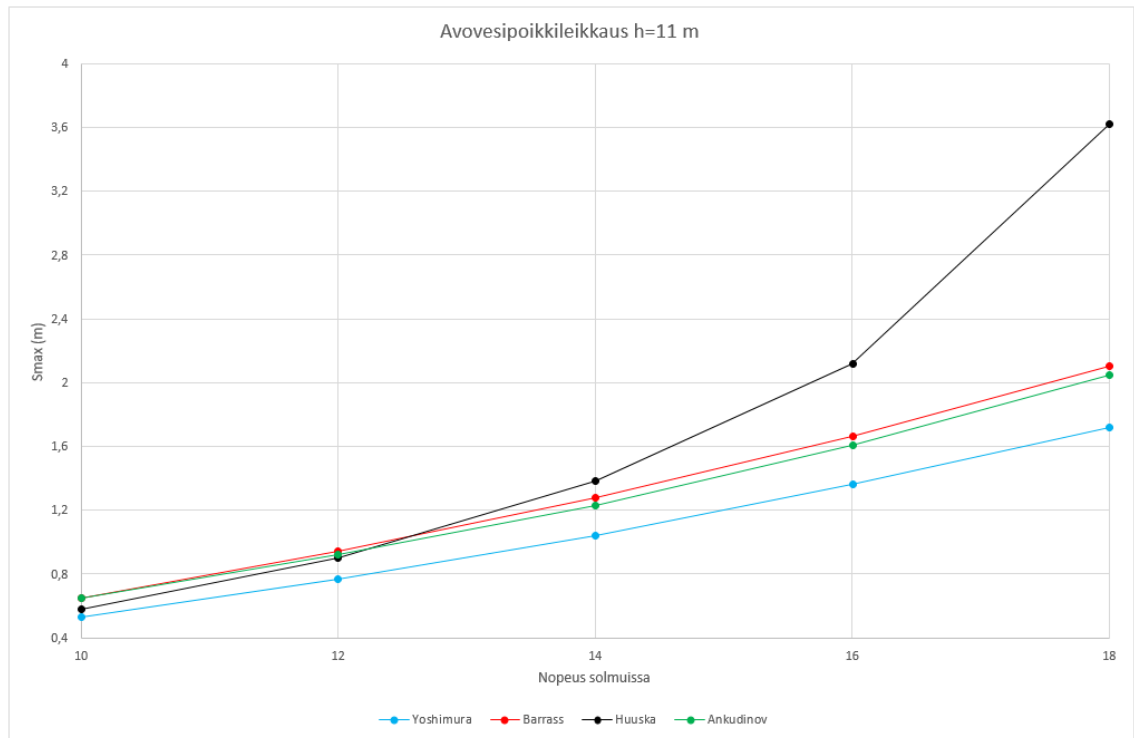
Kuvio 8. Squat-tulokset nopeuden funktiona avovesiväylällä.



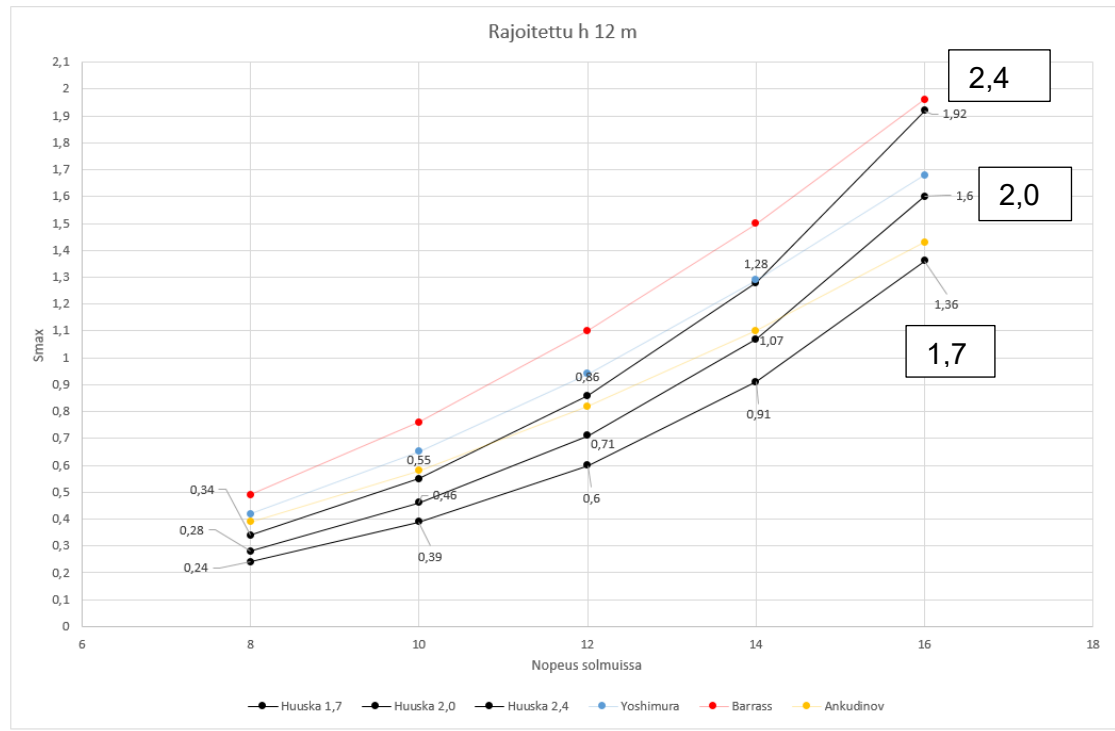
Kuviossa 8 toistuu sama kuin edellisissä rajoitettujen väylien kaavioissa. Huuska/Gullievin kaava 10 solmulla ennustaa lähes pienintä painumaa, mutta lähtee jyrkempään nousuun heti 12 solmun jälkeen ja ennustus karkaa epätodellisiin lukemiin, mikä todennäköisesti johtuu enimmäkseen Frouden luvun ylittymisestä. Avovesiväylällä Barrass ennustaa jälleen suurinta painumaa, mutta Yoshimura ja Ankudinov ovat vaihtaneet paikkoja, Yoshimuran ennustaessa pienintä painumaa kaikilla nopeuksilla.

Kuviossa 9 on esitetty avovesipoikkileikkaus, missä vesisyvyys on 11 m. Skenaariossa toistuu sama kuin kuviossa 8, mutta nyt Barrass ja Ankudinov ennustavat lähes identtistä painumaa kaikilla nopeuksilla.

Kuvio 9. Squat-tulokset nopeuden funktiona avovesiväylällä.



Kuvio 10. C0-kertoimen vaikutus nopeuspainuman suuruuteen.



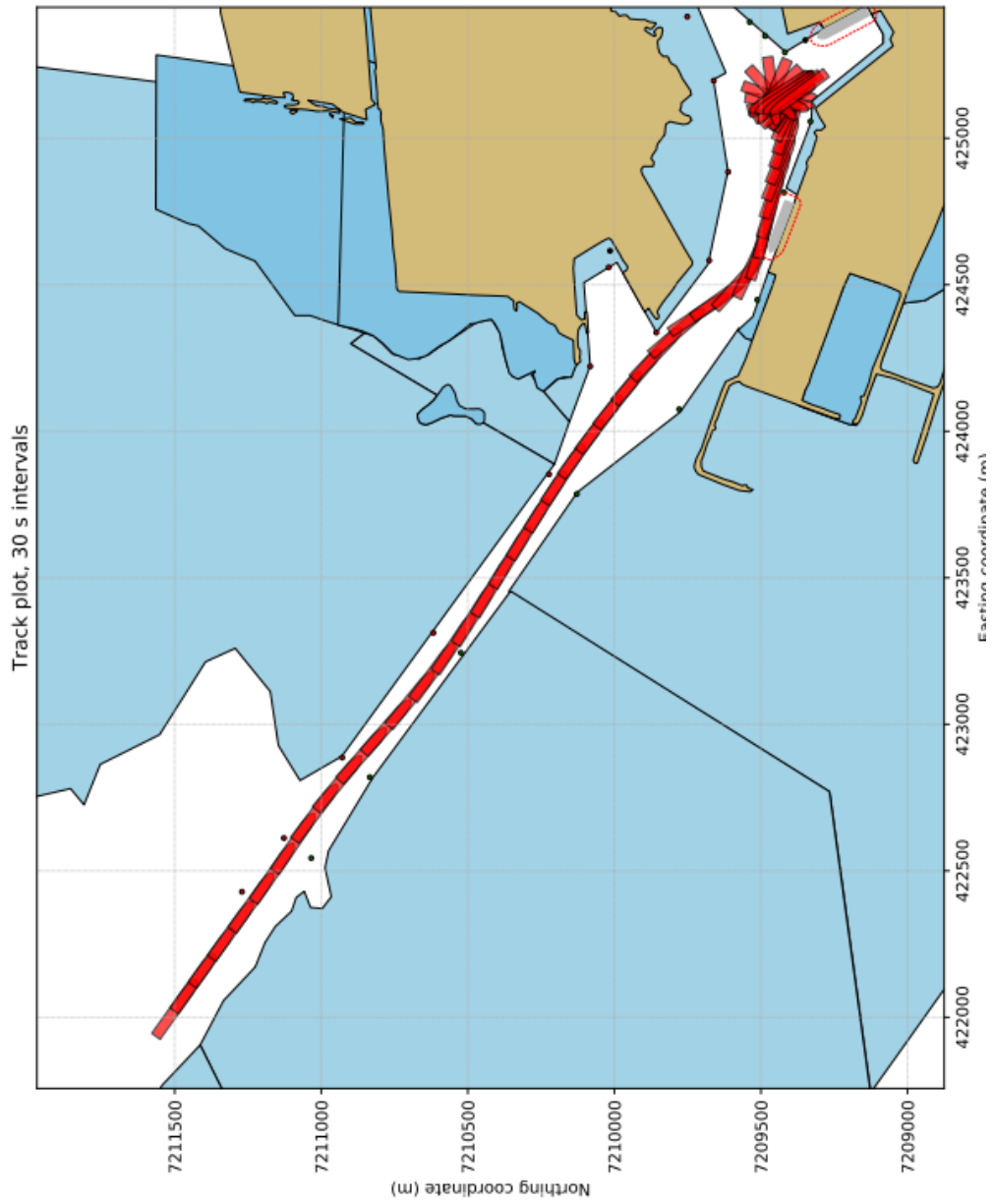
Laivaväylien suunnitteluohjeessa (2014) C0 kertoimeksi on esitetty arvoja 1,7–2,4 riippuen aluksen rungon uppouman täyteläisyyskertoimesta. Päivitetystä painoksessa (2018) ohjearvoksi on esitetty arvoa 2,4, jota voidaan kuitenkin pienentää tarvittaessa arvoon 2,0. PIANCin ohjeessa (2014) tyypillisen arvon sanotaan olevan 2,4. Kuviossa 10 on esitetty nopeuspainumakäyriä, jossa mustat käyrät kuvaavat Huuska/Gulievin kaavaa eri C0 kertoimilla. Kuvioista nähdään, kuinka suuri merkitys kertoimella on nopeuspainuman suuruuteen. 16 solmun nopeudella eroa pienimmän ja suurimman kertoimen välillä on 56 cm ja kertoimilla 2,4 ja 2,0 eroa kertyy 32 cm. Kertoimella ei kuitenkaan ole vaikutusta nopeuspainumakäyrän muotoon. Mielenkiinnon kuviossa herättää se, että Huuska/Gulievin kaavalla nopeuspainuma kasvaa huomattavasti nopeammin suhteessa alusnopeuteen ja squat kasvaa noin 5,7 kertaiseksi nopeuden tuplaantuessa. Barraksen ja Yoshimuran kaavat ennustavat squatin nelinkertaistumista ja Ankudinovin ennusteella squat kasvaa 3,7 kertaiseksi nopeuden tuplaantuessa, mikä vaikuttaa aliennustamiselta.

8 VÄYLÄN LEVEYS

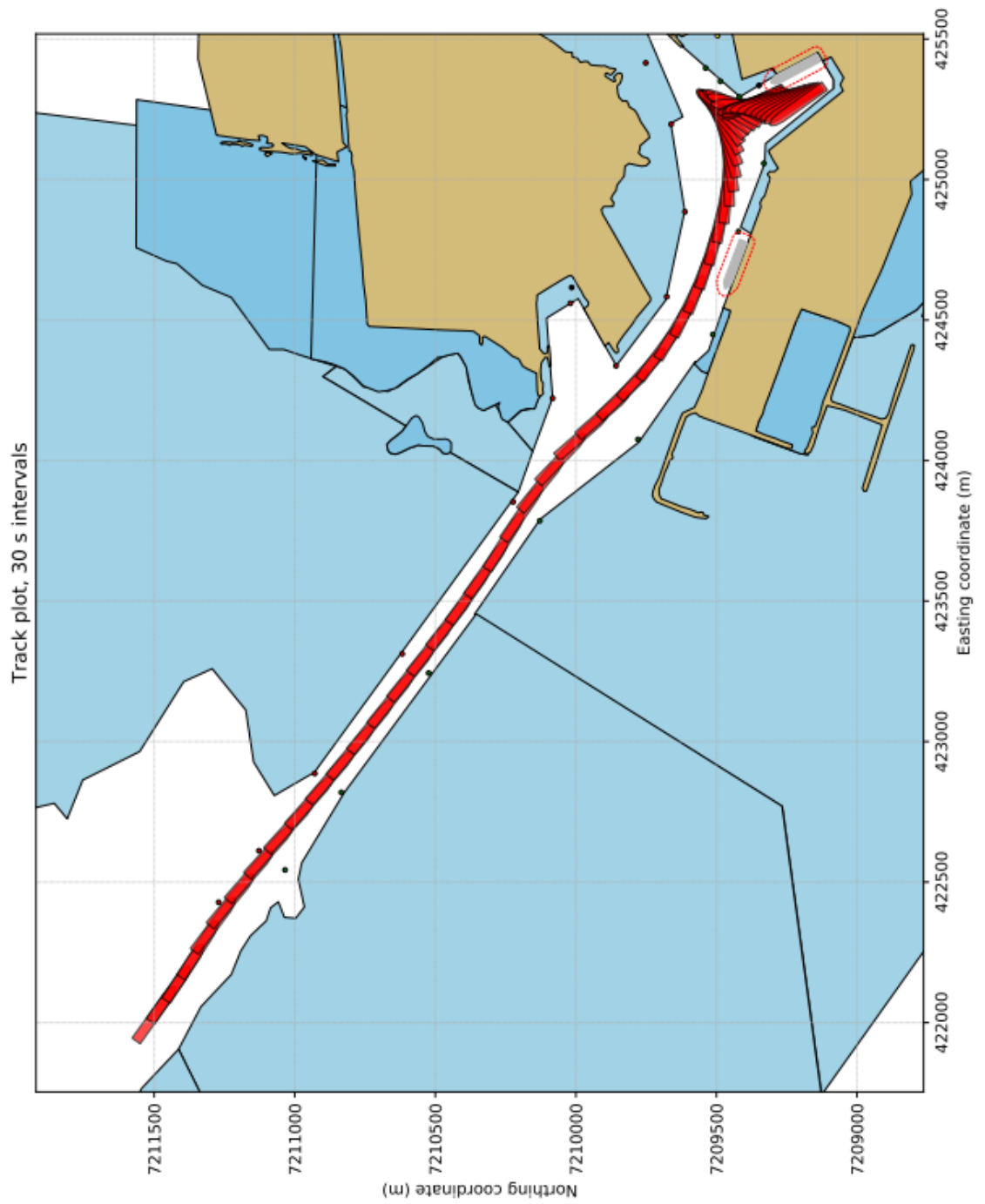
8.1 Simulointimallit

Luotsilta saadun tiedonannon mukaan aluksen ohjailtavuusominaisuudet ovat kohtalaisen hyvät, kun vettä on ympärillä riittävästi. Göteborgissa suoritetuissa simuloinneissa välillä Hietakari–Hoikka–Hiuvet aluksen ohjailtavuudessa ei ollut minkäänlaisia ongelmia missään tuuliolosuhteissa. Ohjailu heikkenee merkittävästi, kun saavutaan matalampaan veteen, jolloin pohja ja luiskat alkavat vaikuttaa alukseen. Turussa tehdyissä simuloinneissa on käytössä Finnlinesin alus, joka on kooltaan hieman pienempi ja peräsimet toimivat nopeammin. (Aluepäällikkö I. Sipilä, Finnpilot Pilotage Oy, Henkilökohtainen tiedonanto 1.9.2021.)

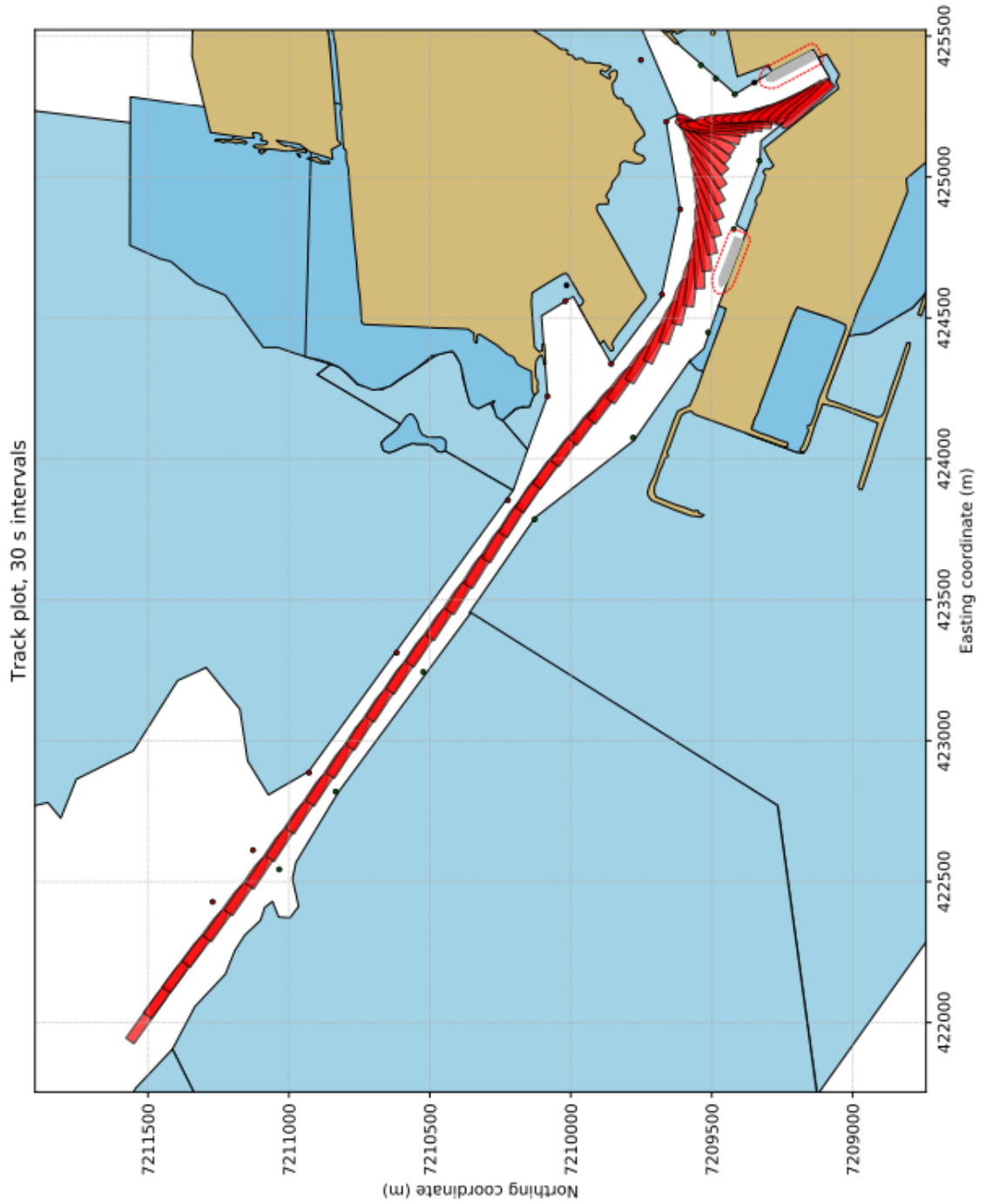
Oulun väylällä tehdyissä simuloinneissa aluksen mutkailu on huomattavaa (kuvat 18 ja 19). Väylä on kapeimmillaan 116 m ennen satama-allasta ja vahvistettu vesisyvyys on 12,5 m. Wallenius Solin aluksilla maksimi syväys on suurempi, mikä osaltaan tekee aluksesta vakaamman tuulen vaikutuksille, mutta h/T suhde pienenee, jolloin aluksen ohjailtavuus heikkenee entisestään. Kuvassa 20 on esitetty kuva simuloinnista, kun tuulen suunta on kohtisuorassa aluksen keulaan 0° . Kyseisessä tilanteessa aluksen mutkailu on lähes olematonta. Vaikuttaa siltä, että suhteellisen pienen varaveden ja kapean poikileikkauksen seurauksena aluksen perusohjailtavuus heikkenee merkittävästi kapeikon hydrodynamisten voimien vaikuttaessa siihen, jolloin aluksen reagointi peräsimen liikkeisiin hidastuu ja alusta on vaikea hallita sivutuulen vaikuttaessa. Kyseisissä olosuhteissa alus pysyy vain vaivoin väylällä.



Kuva 18. Oulun väylä 14 m/s 270 deg.



Kuva 19. Oulun väylä 14 m/s 315 deg.



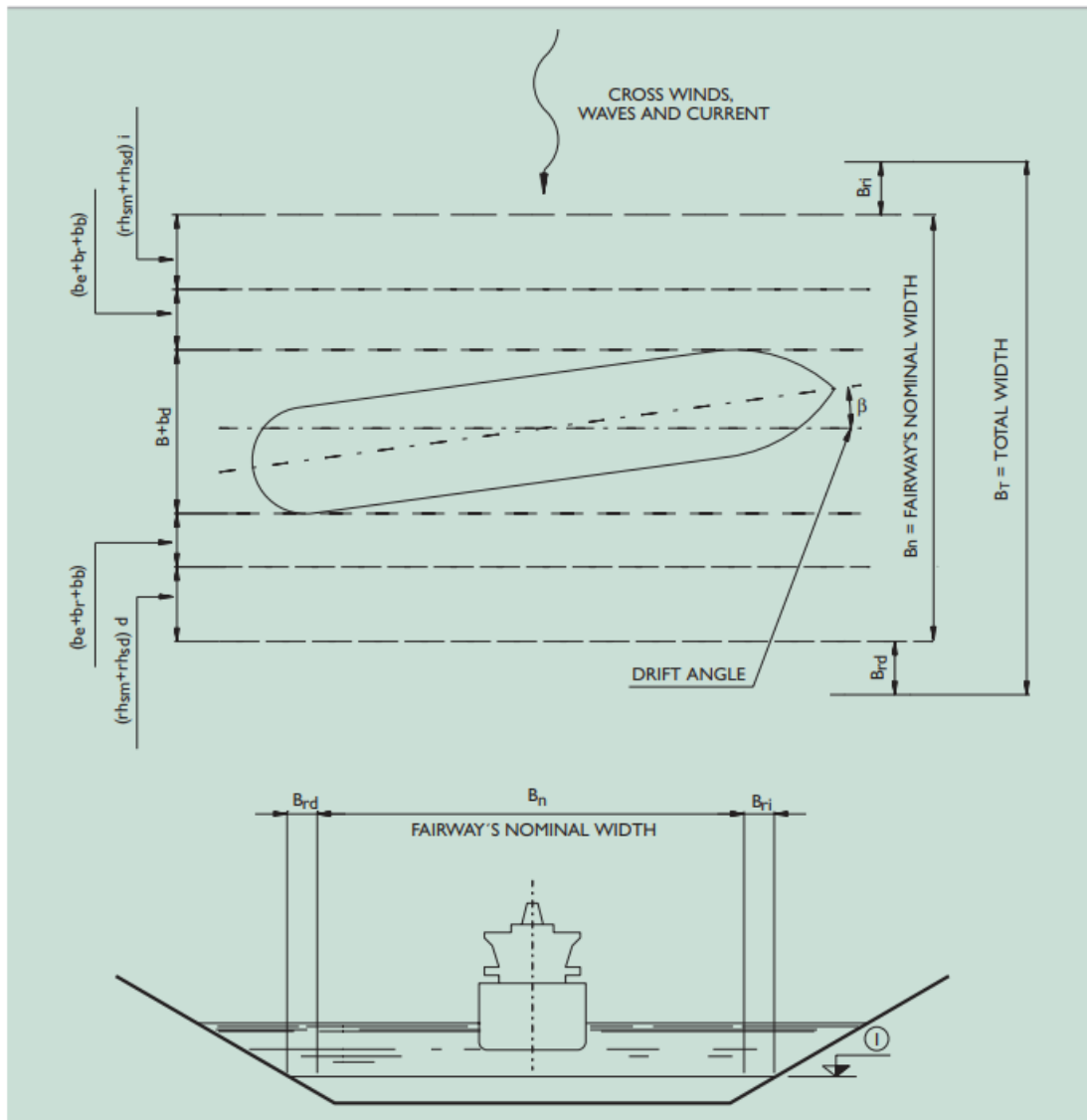
Kuva 20. Oulun väylä 14 m/s 0 deg.

8.2 ROM-standardin mukainen väylän leveyden mitoitus

ROM-standardin mukainen suoran väylän leveys, jossa ympäristöolosuhteet pysyvät muuttumattomina tarkasteltavalla väylän osalla mitoitetaan kaavalla 39 (kuva 21).

$$B_t = B_n + B_r \quad (39)$$

Kaava 39. Väylän leveys (ROM 3.1-99 2007, 209).



Kuva 21. Standardin ROM mukainen suoran väylän mitoitus (ROM 3.1-99 2007, 211).

Missä;

B_t = Väylän kokonaisleveys

B_n = Väylän nimellinen leveys, jonka on pysyttävä vapaana kaikissa tilanteissa.

B_r = Ylimääräinen varaleveys, mitä tarkastellaan paikalliset olosuhteet, käytettävissä oleva tila ja aluksen ominaisuudet huomioiden väyläkohtaisesti.

Yksikaistaisille väylille nimellinen leveys määritetään kaavalla 40.

$$B_n = B + b_d + 2(b_c + b_r + b_b) + (rh_{sm} + rh_{sd})_i + (rh_{sm} + rh_{sd})_d \quad (40)$$

Kaava 40. Väylän nimellinen leveys (ROM 3.1-99 2007, 210).

Missä;

B = Mitoitusaluksen leveys.

b_d = Tarvittava lisäleveys aluksen sortokulmasta johtuen, joka lasketaan kaavalla 41.

$$b_d = L_{pp} * \sin\beta \quad (41)$$

Kaava 41. Sortokulmasta aiheutuva lisäleveys (ROM 3.1-99 2007, 210).

Sortokulma on tuulen, virtauksen, aallokon ja hinaajan vaikutusten summa, joka määritetään kaavalla 42.

$$\sin\beta = \sin\beta_1 + \sin\beta_2 + \sin\beta_3 + \sin\beta_4 \quad (42)$$

Kaava 42. Sortokulma (Jianghao & Degong 2018, 5).

Missä;

β_1 = Tuulen aiheuttama sorto

β_2 = Virtauksen aiheuttama sorto

β_3 = Aallokon aiheuttama sorto

β_4 = Hinaajan aiheuttama sorto.

β_1 Määritetään kaavalla 43.

$$\beta_1 = \arcsin[(K_v C_v V_{sr} * \sin \alpha_{VT}) / V_r] \quad (43)$$

Kaava 43. Tuulen aiheuttama sortokulma (ROM 3.1-99 2007, 210).

Missä K_v kerroin saadaan taulukosta 13 keulabulbillisille aluksille ja keulabulbittomille aluksille taulukosta 14. Kertoimen suuruus riippuu vesisyvyyden ja aluksen syväyksen suhteesta sekä tuulen relatiivisesta kulmasta suhteessa aluksen pituusakseliin.

C_v lasketaan kaavalla 44.

$$C_v = \left(\frac{A_{LV}}{A_{LC}} \right)^{0,5} \quad (44)$$

Kaava 44. C_v (ROM 3.1-99 2007, 211).

Missä;

A_{LV} = Aluksen pitkittäissuuntainen tuulipinta-ala, joka saadaan kaavalla 45, missä G on varalaidan korkeus (korkeus vesirajasta aluksen kanteen) ja h_L on kannen yläpuolisten rakenteiden keskikorkeus pitkittäissuunnassa. Tyypillisiä keskiarvoja yläpuolisille rakenteille voidaan katsoa taulukosta 15.

$$A_{LV} = L_{pp} * (G + h_L) \quad (45)$$

Kaava 45. Pituussuuntainen tuulipinta-ala (ROM 3.1-99 2007, 116).

A_{LC} = Aluksen pituussuuntainen vedenalainen alue heijastettuna keskilinjan tasoon, mikä saadaan kaavalla 46, missä D on aluksen syväys.

$$A_{LC} = L_{pp} * D \quad (46)$$

Kaava 46. Vedenalainen alue (ROM 3.1-99 2007, 121).

V_{vr} = Tuulen nopeus suhteessa tarkasteltavaan alukseen

V_r = Aluksen nopeus suhteessa veden nopeuteen (m/s)

α_{vr} = Tuulen relatiivinen kulma suhteessa alukseen.

Taulukko 13. Kv keulabulbillisille aluksille (ROM 3.1-99 2007, 210).

h/D	K _v			
	$\alpha_{vr} \leq 10^\circ$	$\alpha_{vr} \leq 30^\circ$	$\alpha_{vr} \leq 60^\circ$	$\alpha_{vr} \leq 90^\circ$
≤ 1.20	0.0343	0.0227	0.0184	0.0172
2.00	0.0402	0.0266	0.0216	0.0201
≥ 5.00	0.0423	0.0280	0.0227	0.0211

Taulukko 14. Kv keulabulbittomille aluksille (ROM 3.1-99 2007, 211).

h/D	K _v			
	$\alpha_{vr} \leq 10^\circ$	$\alpha_{vr} \leq 30^\circ$	$\alpha_{vr} \leq 60^\circ$	$\alpha_{vr} \leq 90^\circ$
≤ 1.20	0.0243	0.0161	0.0130	0.0121
2.00	0.0255	0.0168	0.0136	0.0127
≥ 5.00	0.0259	0.0171	0.0139	0.0129

Taulukko 15. Tyypillisiä alusmittoja (ROM 3.1-99 2007, 117).

Type of vessel	DWT Tons	Mean height (m)		Type of vessel	DWT Tons	Mean height (m)		
		h _T	h _L			h _T	h _L	
Oil Tankers	500.000	32.00	4.00	Liquid gas carriers	60.000	15.00	4.00	
	400.000	29.00	3.80		50.000	14.00	4.00	
	300.000	25.00	3.70		30.000	13.00	4.00	
	275.000	24.00	3.70		20.000	11.00	4.00	
	250.000	23.00	3.60		10.000	9.00	4.00	
	225.000	22.00	3.50		5.000	7.50	6.20	
	200.000	21.00	3.40		3.000	7.00	5.00	
	175.000	20.00	3.30					
	150.000	19.00	3.20					
	125.000	17.50	3.10					
	100.000	16.50	3.00					
	80.000	15.00	2.90					
	70.000	14.50	2.80					
60.000	14.00	2.70						
Oil and chemical product carriers	50.000	13.00	2.60	General cargo merchant ships	40.000	17.00	5.00	
	40.000	12.00	2.40		35.000	16.50	5.00	
	30.000	11.00	2.20		30.000	16.00	5.00	
	20.000	10.00	2.00		25.000	15.00	5.00	
	10.000	9.00	2.00		20.000	14.00	5.00	
	5.000	8.50	2.00		15.000	13.00	5.00	
	3.000	8.00	2.00		10.000	11.50	5.00	
			5.000	8.50	5.00			
			2.500	7.50	5.00			
Bulk and multipurpose carriers	400.000	29.00	5.00	Container and ro-ro vessels	70.000	22.50	12.00	
	350.000	27.00	5.00		65.000	21.00	11.00	
	300.000	25.00	5.00		60.000	20.00	10.50	
	250.000	23.00	5.00		55.000	19.00	10.00	
	200.000	21.00	5.00		50.000	18.00	9.00	
	150.000	19.00	5.00		45.000	17.00	8.50	
	125.000	18.00	5.00		40.000	18.00	8.50	
	100.000	16.50	5.00		35.000	16.00	8.50	
	80.000	15.50	5.00		30.000	13.50	8.50	
	60.000	14.00	5.00		25.000	12.00	8.50	
	40.000	12.00	5.00		20.000	10.50	8.00	
	20.000	10.00	5.00		15.000	9.00	7.50	
10.000	9.00	5.00	10.000	8.00	7.50			
Methane carriers	60.000	19.00	10.00	Car carriers	30.000	13.00	5.00	
	40.000	14.00	8.00		25.000	12.00	5.00	
	20.000	12.00	6.00		20.000	10.50	5.00	
			15.000		9.00	5.00		

Virtauksen aiheuttama sorto lasketaan kaavalla 47.

$$\beta_2 = \arctan \frac{V_c * \sin e\alpha_{CV}}{V + V_c * \cos\alpha_{CV}} \quad (47)$$

Kaava 47. Virtauksen aiheuttama sortokulma (ROM 3.1-99 2007, 212).

Missä;

V_c = Väylän toimintarajana pidetty virtausnopeus

V = Aluksen absoluuttinen nopeus suhteessa pohjaan

α_{vr} = Absoluuttisen virtauksen ja aluksen absoluuttisen nopeuden välinen kulma.

Aallokon aiheuttama sorto lasketaan kaavalla 48.

$$\beta_3 = \arcsin e \left[K_W * \left(\frac{g}{D} \right)^{0,5} * \frac{H_s}{V_r} \right] \quad (48)$$

Kaava 48. Aallokon aiheuttama sortokulma (ROM 3.1-99 2007, 212).

Missä K_W kerroin riippuvainen rungon muodosta, vesisyvyys suhteesta ja aallokon kulmasta suhteessa alukseen. Arvo saadaan taulukosta 16 keulabulbillisille aluksille lineaarisesti interpoloimalla ja taulukosta 17 keulabulbittomille aluksille. (ROM 3.1-99 2007, 212).

Taulukko 16. K_w kerroin keulabulbillisille aluksille (ROM 3.1-99 2007, 212).

h/D	K_w						
	$\alpha_w \leq 10^\circ$	$\alpha_w \leq 30^\circ$	$\alpha_w \leq 60^\circ$	$\alpha_w \leq 90^\circ$	$\alpha_w \leq 120^\circ$	$\alpha_w \leq 150^\circ$	$\alpha_w \leq 170^\circ$
≤ 1.20	0.0418	0.0725	0.1508	0.1871	0.1673	0.1025	0.0592
2.00	0.0490	0.0849	0.1768	0.2193	0.1961	0.1201	0.0693
≥ 5.00	0.0515	0.0892	0.1857	0.2303	0.2060	0.1261	0.0728

Taulukko 17. K_w kerroin keulabulbittomille aluksille (ROM 3.1-99 2007, 212).

h/D	K_w						
	$\alpha_w \leq 10^\circ$	$\alpha_w \leq 30^\circ$	$\alpha_w \leq 60^\circ$	$\alpha_w \leq 90^\circ$	$\alpha_w \leq 120^\circ$	$\alpha_w \leq 150^\circ$	$\alpha_w \leq 170^\circ$
≤ 1.20	0.0296	0.0512	0.1067	0.1323	0.1183	0.0725	0.0418
2.00	0.0310	0.0537	0.1118	0.1387	0.1240	0.0760	0.0439
≥ 5.00	0.0315	0.0546	0.1137	0.1410	0.1261	0.0772	0.0446

α_w = Aallokon kulma suhteessa alukseen.

H_s = Väylän toimintarajana pidettyjen aaltojen merkitsevä aallonkorkeus.

V_r = Aluksen nopeus suhteessa veteen.

Hinaajasta aiheutuva sorto lasketaan kaavalla 49.

$$\beta_4 = \arcsine \left[K_r \left(\frac{g * F_{TR}}{A_{LC} * \gamma_w} \right)^{0,5} * \frac{1}{V_r} \right] \quad (49)$$

Kaava 49. Hinaajasta aiheutuva sortokulma (ROM 3.1-99 2007, 213).

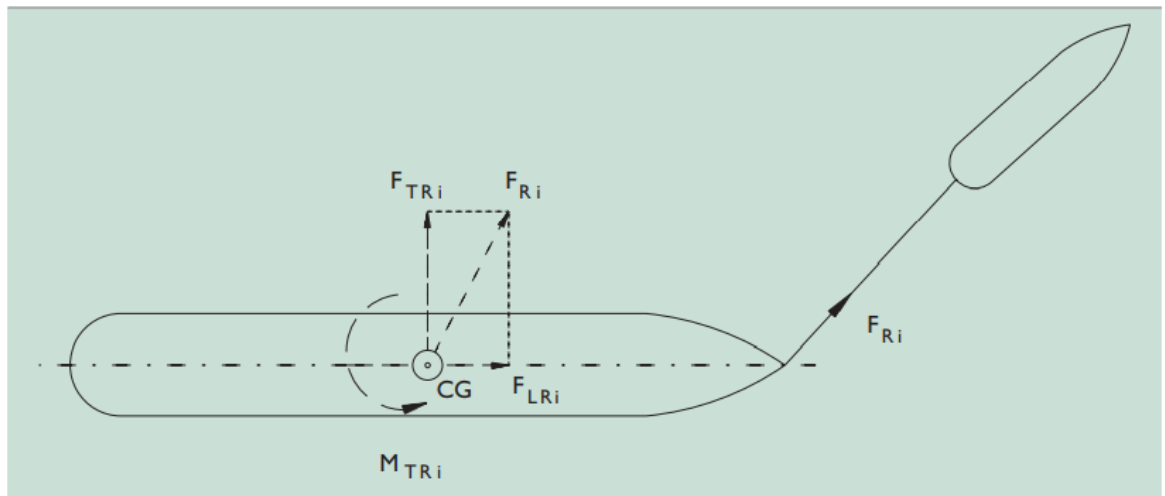
Missä K_r saadaan taulukosta 18 riippuen rungon muodosta, vesisyvyys-suhteesta ja aluksen syvyyksestä.

Taulukko 18. Kr kerroin (ROM 3.1-99 2007, 213).

h/D	K_r	
	Bulbous bow	Conventional bow
≤ 1.20	0.63	0.45
2.00	0.74	0.47
≥ 5.00	0.78	0.48

F_{TR} = Voiman osa, joka johtaa aluksen poikittaissuuntaan hinaajan avustaessa sitä (kuva 22).

Y_W = Veden tilavuuspaino.



Kuva 22. Tug boat action (ROM 3.1-99 2007, 142).

b_c = Lisäleveys paikannusvirheiden huomioimiseksi ja se saadaan taulukosta 19.

Taulukko 19. Lisäleveys (Jianghao & Degong 2018, 6).

	Operation without a pilot or captain experienced in site being considered	Operation with a pilot or captain experienced in site being considered
Visual positioning in open estuaries, without navigation marking	100m	50m
Visual positioning referred to buoys or beacons in approach ways	50m	25m
Visual positioning between buoy or beacon alignments marking the fairway's limits	20m	10m

b_r = Ylimääräinen lisäys leveyteen, jolla arvioidaan mahdollinen lisäpoikkeama siitä hetkestä kun aluksen teoreettinen sijaintipoikkeama haivataan siihen hetkeen kun korjaus tulee voimaan ja se määritetään kaavalla 50. (Jianghao & Degong 2018, 6).

$$b_r = (1,5 - E_{max}) * b_{ro} \quad (50)$$

Kaava 50. Ylimääräinen lisäleveys (Jianghao & Degong 2018, 6).

Missä;

E_{max} = Suurin sallittu riski määritetyillä kriteereillä, joka saadaan taulukosta 20.

Taulukko 20. Suurin sallittu riski (ROM 3.1-99 2007, 64).

RISK OF DAMAGE		Possibility of loss of human lives	
		Reduced	Expectable
Economic repercussion in the case of an incident (ELU) Index = $\frac{\text{Cost of losses}}{\text{Investment}}$	LOW	0.50	0.30
	MEDIUM	0.30	0.20
	HIGH	0.25	0.15

TOTAL LOSS RISK		Possibility of loss of human lives	
		Reduced	Expectable
Economic repercussion in the case of an incident (ELU) Index = $\frac{\text{Cost of losses}}{\text{Investment}}$	LOW	0.20	0.15
	MEDIUM	0.15	0.10
	HIGH	0.10	0.05

b_{ro} = Reagointinopeudesta aiheutuva lisäleveys, joka saadaan taulukosta 21.

Taulukko 21. Reagointinopeudesta johtuva lisäleveys (Cui Jianghao & Dou Degong 2018, 6).

Vessels manouvrability	b_{ro}	
	$h/D < 1,2$	$h/D > 1,5$
Good	0,1 B	0,1 B
Medium	0,2 B	0,15 B
Bad	0,3 B	0,2 B

b_b = Lisäleveys mahdollisista väylämerkinnöissä ilmenevistä virheistä johtuen, joka lasketaan kaavalla 51.

$$b_b = D * \sin 0,5^\circ \quad (51)$$

Kaava 51. Väylämerkintöjen virheet (Jianghao & Degong 2018, 7).

Missä D on kahden poijun välinen etäisyys väylän suunnassa.

rh_{sm} , rh_{sd} ovat ylimääräisiä turvaetäisyyksiä, jotka tulee ottaa huomioon väylän molemmin puolin, jotta alus pystyy navigoimaan ilman reunaimun vaikutusta. Turvaetäisyydet saadaan taulukosta 22. (Jianghao & Degong 2018, 7.)

Taulukko 22. Ylimääräiset turvaetäisyydet (Jianghao & Degong 2018, 7).

	rh_{sm}	rh_{sd}	$rh_{sm}+rh_{sd}$
Fairways with sloping channel edge and shoals($V/H \leq 1/3$)			
Vessel's absolute speed ≥ 6 m/s	0.6 B	0.1 B	0.7 B
Vessel's absolute speed between 4 and 6 m/s	0.4 B	0.1 B	0.5 B
Vessel's absolute speed ≤ 4 m/s	0.2 B	0.1 B	0.3 B
Fairways with rigid slopes($V/H \geq 1/2$) or with rocky or structural banks			
Vessel's absolute speed ≥ 6 m/s	1.2 B	0.2 B	1.4 B
Vessel's absolute speed between 4 and 6 m/s	0.8 B	0.2 B	1.0 B
Vessel's absolute speed ≤ 4 m/s	0.4 B	0.2 B	0.6 B

Esimerkki

Kuvitellaan hypoteettinen tilanne, jossa alus liikkuu 10 solmun nopeudella (5,14 m/s) luoteeseen. Tuulen nopeus pohjoisesta on 10 m/s ja tuulen todellinen suunta suhteessa alukseen 45° . Mitoitusaluksena käytetään Wallenius Solin uutta RoRo alusta, jonka tiedot on esitetty kohdassa 7. Väylän vesisyvyys on 11,5 m ja aluksen syväys 8 m, jolloin

saadaan h/T suhteeksi noin 1.45. Luiskakaltevuus on pienempi kuin $1/3$. Sivuvirtaukset ovat heikkoja ja merkitsevä aallonkorkeus on 2 m 45° asteen kulmassa suhteessa alukseen. Pohja on sileä ja pehmeä. Aluksen navigointiominaisuudet ja väylämerkintä ovat hyviä. Alusta ohjaa kokenut kapteeni.

ROM- standardin mukainen mitoitus, kun olosuhteet ovat muuttumattomat suoralla väylällä:

Tuulen suhteelliseksi nopeudeksi saadaan noin 14 m/s ja suhteelliseksi kulmaksi noin 30° . K_v kertoimeksi saadaan interpoloimalla taulukosta 13 arvoksi 0,0239.

C_v arvoksi saadaan kaavan 44 mukaan ja arvoksi 3,55.

Tuulen aiheuttama sortokulma β_1 saadaan kaavan 43 mukaan ja arvoksi $5,02^\circ$.

K_w arvoksi saadaan interpoloimalla taulukosta 16 0,1164875 ja aallokon aiheuttama sortokulma β_3 saadaan kaavan 48 mukaan ja arvoksi $2,9^\circ$.

b_c saadaan taulukosta 19 ja arvoksi 25 m.

b_r saadaan kaavalla 50 valitsemalla sallittu riski taulukosta 20 sekä reagointinopeudesta aiheutuva lisäleveys b_{ro} taulukosta 21, jolloin b_r arvoksi saadaan 3,52 m.

b_b saadaan kaavan 51 mukaan, kun merkintäväli on 1500 m ja arvoksi 13,1 m.

Ylimääräiset turvaetäisyydet väylän molemmin puolin saadaan taulukosta 22, jolloin molemmin puolin väylää tulee olla tilaa 17,6 m.

Tarvittava lisäleveys aluksen sortokulmasta johtuen saadaan kaavalla 41 ja tulokseksi 32,3 m.

Sijoittamalla tulokset kaavan 40 mukaan saadaan ROM-standardin mukaiseksi väylän nimelliseksi leveydeksi 186 m. (Liite 1)

Liikenneviraston ohjeessa esitetyllä mitoitustavalla (kohta 3.3, talukot 2 ja 4) (yhdenmukainen PIANCin ohjeen kanssa) väylän leveydeksi saadaan samoilla lähtötiedoilla 127 m. (Liite 1)

Kahdella erilaisella mitoitustavalla saadaan siis täysin erilaiset tulokset. Eroa PIANCin ja ROM-standardin välillä on 59 m, vaikka ROM-standardin esimerkkiin ei ole sisällytetty väyläkohtaisia varaleveyksiä, vaan kyseessä on väylän nimellinen leveys.

Kyseisistä mitoitushjeista on tehty vertailu väylän leveyden osalta vuonna 2018, jossa PIANCin ohjetta kuvataan vaarallisemmaksi ja ROM-standardia konservatiivisemmaksi mitoitustavaksi. Ohjeet eroavat myös väylän syvyyden mitoituksessa, mutta niistä saadut tulokset ovat lähes samanlaiset. (Jianghao & Degong 2018.)

Kaavoja on vertailtu myös Australiassa Broomen satamaan johtavalla väylällä, jossa vuorovesivaihtelu on suurta ja siitä syntyvät virtaukset väylällä voimakkaita. Suunnittelussa lopulliset mitat määritettiin kokonaisvaltaisella simulointimallilla. Tutkimuksessa ROM-standardin mukaisella mitoituksella päästiin huomattavasti lähemmäs väylän todellista leveystarvetta ja paikoitellen jopa täysin samoihin tuloksiin. (Suranko & Sounders 2019.)

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa varustamoiden rakenteilla ja suunnitteilla olevat alukset, tutkia mittasuhteiden vaikutusta nopeuspainuman ennustamiseen, tarkastella väylän leveyden riittävyttä uudella aluskoollla ja tuoda kehitysehdotuksia laivaväylien suunnitteluohjeeseen. Kartoituksessa haluttiin saada selville kattava kuva varustamoiden tulevista aluksista ja niiden mittasuhteista. Varustamot rajattiin aluskoon mukaan sillä perusteella, miltä varustamolta on teoreettisesti mahdollista tulla vähintään saman kokoluokan aluksia. Pienemmät varustamot rajattiin pois, sillä nykyiset suunnitteluohjeet ovat riittävän kattavat näiden osalta. Lukuisista varustamoille lähetetyistä sähköposteista huolimatta vastauksia kysymyksiin saatiin valitettavan vähän. Uusista RoRo-aluksista saatiin kuitenkin arvokasta ja tarkempaa tietoa varustamolta Wallenius-Sol, minkä ansiosta laskelmissa pystyttiin käyttämään tarkkoja arvoja. Lisäksi konttialusten kokokehityksestä ja näkemyksistä saatiin tietoa yhdeltä maailman johtavalta varustamolta.

Tutkimusta aluskoon kehityksestä syvennettiin tutkimalla eri teorialähteitä ja aluskokoon vaikuttavia tekijöitä tulevaisuudessa. Nopeuspainuman ennustamisessa perehdyttiin aiheen kirjallisuuteen sekä useisiin laboratorio- ja kenttätutkimuksiin. Työssä käytetyt kaavat valittiin kansainvälisesti toimiviksi todetuista ja tutkituista kaavoista, joiden reunaehdot eivät uusien mittasuhteiden myötä ylittyneet tai ylitys oli niin maltillinen, että sen vaikutus kaavan käyttäytymiseen on todennäköisesti merkityksetöntä. Reunaehdon ylitys pitää kuitenkin tiedostaa. Väylän leveyden mitoittamiseen vaihtoehtoiseksi kaavaksi valikoitui tutkimustulosten perusteella ROM-standardin mukainen mitoitus, jolla on saatu hyviä tuloksia suuremmalla aluskalustolla.

Aluskoon kehitykseen tulee tulevaisuudessa vaikuttamaan moni asia. Päällimmäisenä IMO:n päästövähennystavoitteet ja miten tulevaisuuden käyttövoima saadaan skaalattua globaaliin mittakaavaan sekä miten se vaikuttaa aluksen käyttökustannuksiin. Maailmanlaajuinen merikaupankäynti on riippuvainen taloudesta ja kaikki talouden kriisit vaikuttavat voimakkaasti alusten lastikapasiteetin tarpeeseen. Viimeisimpänä kriisinä koronaviruspandemia, joka on vaikuttanut voimakkaasti laivanrakennusteollisuuteen sekä kansainväliseen volyymiin meriliikenteessä. Mikäli merikaupankäynti pandemian jälkeen jatkaa kasvuaan 3,2 % keskiarvolla saavuttaa globaali merikaupankäynnin volyymi 28 miljardia tonnia vuonna 2050 (kuvio 2), mikä tarkoittaa volyymin yli kaksinkertaistumista

vuoteen 2019 verrattuna. Kysynnän tyydyttämiseksi laivanrakennusteollisuudelta vaaditaan vuonna 2050 lähes 230 miljoonaa tonnia kuollutta painoa uusilta aluksilta (kuvio 3). Tässä työssä varustamoilta ei saatu tarpeeksi tietoa koskien uusia tulevia aluksia, eikä alusten kokokehitykseen pystytäkään faktapohjaisesti ottamaan kantaa. Luvussa 5 esitettyjen ennusteiden ja volyymien perusteella on kuitenkin epätodennäköistä, että tulevaisuuden kysyntään pystytään vastaamaan ilman aluskoon kasvua. Kartoitettujen konttialusten pohjalta sekä yhden haastattelun perusteella vaikuttaa siltä, että suuret konttialukset ovat tällä hetkellä optimaalisissa mitoissa eikä lastikapasiteetin lisääminen alenna rahtikustannusten hintaa niin, että se olisi kannattavaa.

Nopeuspainuman ennustaminen on arvio ilmiöstä, mistä ei ole varmaa tietoa. Kaikkia kaavoja on tutkittu ja jokaiselle kaavalle on paikka, missä ennustus toteutuu lähimmäs aluksen todellista nopeuspainumaa. Yhdellä nopeuspainumakaavalla ennustaminen voi olla vaarallista, koska yhtä kaavaa käyttämällä voidaan arvioida ainoastaan paljonko squat kasvaa suhteessa alusnopeuteen, mistä voidaan osin arvioida ennustuksen luotettavuutta nopeuden neliön perusteella. Vaikka yhtä kaavaa käyttämällä ennustus vaikuttaa uskottavalta, on siitä todella vaikeaa tai lähes mahdotonta hahmottaa mahdollista aliennustamista (turvallisuus) tai yliennustamista (kustannukset).

Luvussa 7 esitettyjen tulosten perusteella kaavojen ennusteet ovat samansuuruisia, mutta erot kasvavat merkittävästi nopeuden kasvaessa. Huuska/Gulievin kaava näyttää kuitenkin poikkeukselliselta verrattaessa muihin kaavoihin ja reagointi alusnopeuteen on huomattavasti voimakkaampaa. Nopeuspainuman lähes kuusinkertaistuminen nopeuden tuplaantuessa vaikuttaa liian suurelta.

Aluksen todellisesta squat käyttäytymisestä pyrittiin saamaan tietoa varustamolta sekä suunnittelutoimistolta, jolloin nopeuspainumakäyristä olisi helposti voinut todeta parhaiten toimivan. Tutkimustuloksia ei kuitenkaan saatu ja keskiarvotarkastelun perusteella Yoshimuran kaava vaikuttaa turvalliselta vaihtoehdolta rajoitetuilla väylillä. Avovesi- väylällä kaavojen keskiarvoon osuu parhaiten Ankudovin kaava, mikä kuitenkin reagoi voimakkaasti vesisyvyyden vähenemiseen (kuvio 8) (kuvio 9). Huuska/Gulievin kaava on alhaisilla alusnopeuksilla samansuuruinen muiden kaavojen kanssa, mutta ennustus on lähes poikkeuksetta pienin 8 solmun nopeudella. Tästä herää kysymys, onko pienintä ennustusta järkevää käyttää. Ainoa tapa varmistua asiasta on suorittaa alukselle nopeuspainumamittaukset joko laboratoriotesteillä tai kenttämittauksilla. Ilman varmuutta asiasta turvallisinta on tarkastella nopeuspainumaa usean kaavan avulla. Keskiarvotar-

kastelu korostuu varsinkin reunaehtoien ylittyessä, jolloin toimivat kaavat paljastavat yli-ampuvan kaavan suuntaan tai toiseen. Huuska/Gulievin C0 kertoimella on suuri vaikutus ennustuksen suuruuteen, ilman vaikutusta nopeuspainumakäyrän muotoon (kuvio 10). Kyseisellä mitoitusaluksella ja väylän poikkileikkaustyypillä parhaalta kertoimelta vaikuttaa 2,4. Mikäli muuttuvaa kerrointa halutaan käyttää, tulee sen käytön olla tarkoin perusteltua.

ROM-standardin mukainen väylän leveyden mitoitus huomioi vallitsevia olosuhteita PIANCin ohjetta paremmin. Aluksen pituuden kasvaessa myös sortokulmasta johtuva lisäleveyden tarve kasvaa. Kohdassa 8 esitettyjen simulaattorimallien perusteella Oulun väylä vaikuttaa vaarallisen kapealta uusille aluksille. ROM-standardin mukaisella mitoituksella päästään todennäköisesti lähemmäs väylän todellista leveystarvetta tai ainakin PIANCin ohjetta suurempaan leveyteen. Kyseessä on kuitenkin concept design -vaiheen mitoitustapa ja todellinen leveystarve on parasta määrittää simulaattorikokein, missä alusmalli on kooltaan ja navigoitavuudeltaan mitoitusalukselta vastaava.

LÄHTEET

- Alfa Laval & Wallenius 2021. Viitattu 23.5.2021. <https://www.theoceanbird.com/media/>
- Barrass, B & Derret, R 2012. Ship stability for masters and mates. 7th edition. Elsevier 2012.
- Briggs, M. 2009. Ankudinov Ship Squat Predictions, Part 1. US Army Corps of Engineers. Viitattu 18.7.2021. https://www.researchgate.net/publication/236577787_Ankudinov_Ship_Squat_Predictions_-_Part_I_Theory_Parameters_and_FORTRAN_Programs
- Briggs, M. & Dagget, L. 2009. Ankudinov Ship Squat Predictions, Part II. US Army Corps of Engineers. Viitattu 13.7.2021. https://www.researchgate.net/publication/236670722_Ankudinov_Ship_Squat_Predictions_-_Part_II_Laboratory_and_Field_Comparisons_and_Validations
- Briggs, M.; Debailon, P.; Ulizcka, K. & Vantorre, M. 2009. Prediction of squat for underkeel clearance. Viitattu 10.5.2021. https://www.academia.edu/22128291/Prediction_of_Squat_for_Underkeel_Clearance
- Chambers, S. 2021. X-Press Feeders orders 7,000 TEU quartet. Viitattu 28.5.2021. <https://splash247.com/x-press-feeders-orders-7000-teu-quartet/>
- CMA CGM 2021. The CMA CGM Group announces the order of 22 new vessels. Viitattu 30.5.2021. <https://www.cma-cgm.com/news/3672/the-cma-cgm-group-announces-the-order-of-22-new-vessels>
- Cosco Shipping 2020. Disclosable transaction and connected transaction construction of seven vessels. Viitattu 30.5.2021. <https://www.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2020/1030/2020103001221.pdf>
- Cultofsea n.d. Coefficients of form-ship's waterplane, block, midship and prismatic coefficient. Viitattu 27.5.2021. <https://cultofsea.com/ship-stability/coefficients-of-form-ships-waterplane-block-midship-and-prismatic-coefficient/>
- Degong, D. & Jianghao, C. 2018. Analysis of PIANC guideline and ROM standard in design of approach channel and harbor basin. PIANC- World conference. Viitattu 5.9.2021. https://coms.events/pianc-panama/data/full_papers/full_paper_375.pdf
- Hapag-Lloyd 2020. Press release. Hapag-Lloyd orders six ultra large container vessels of 23,500+ TEU. Viitattu 30.5.2021. <https://www.hapag-lloyd.com/en/company/press-releases/2020/12/newbuilds.html>
- Hellenic Shipping News 2021. Wan Hai Lines confirmed orders for 5 new vessels. Viitattu 28.5.2021. <https://www.hellenicshippingnews.com/wan-hai-lines-confirmed-orders-for-5-new-vessels/>
- IMO 2019. Viitattu 26.5.2021. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- IMO 2018. Viitattu 26.5.2021. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- International shipping news 2020. Benefits of IMO 2020 and impacts on shipping industry. Viitattu 26.5.2021. <https://www.hellenicshippingnews.com/benefits-of-imo-2020-and-impacts-on-shipping-industry/>

Jassal, R. 2016. 5 Questions that can help in understanding of squat effects on ships. Viitattu 27.5.2021. <https://www.myseatime.com/blog/detail/5-questions-that-can-help-in-understanding-of-squat-effect-on-ships>

Kuttenkeuler, J.; Santen, V.; Söder, C.-J. & Tunnel, P. 2020. Live webcast. Viitattu 24.5.2021. Katsottavissa osoitteessa: <https://www.theoceanbird.com/>

Liang, L-H. 2020. SITC orders up to 12 container vessels from Yangzijiang. Viitattu 28.5.2021. <https://www.seatrade-maritime.com/shipbuilding/sitc-orders-12-container-vessels-yangzijiang>

Liikenneviraston ohjeita 2018. Laivaväylien suunnitteluohjeet. Liikennevirasto 2018. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-29_laivavaylien_suunnitteluohjeet_web.pdf

Meriteollisuus 2021. Viitattu 1.8.2021. <https://navigatormagazine.fi/uutiset/meriliikenne-ja-varus-tamot/suezin-kanavaan-juuttunut-ever-golden-ei-ole-ainoa-lajissaan-10-maailman-suurinta-kont-tialusta-2021/>

Oycina, J. 2021. HMM's smart, LNG-ready 16,000 TEU newbuilds set to enter into service. Viitattu 28.5.2021. <https://www.offshore-energy.biz/hmms-smart-lng-ready-16000-teu-newbuilds-set-to-enter-into-service/>

PIANC 2014. Harbour Approach Channels design Guidelines. PIANC Report Nr 121. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure.

Pilot, C. 2018. Ship squat: An analysis of two approximation formulas using the physics of hydrodynamic flows. Viitattu 27.5.2021. https://www.researchgate.net/publication/325261187_Ship_Squat_An_Analysis_of_Two_Approximation_Formulas_Using_the_Physics_of_Hydrodynamic_Flow_published_under_Pilot_C_2007_Ship_Squat_An_Analysis_of_Two_Approximation_Formulas_Using_the_Physics_of_Hydro

ROM 3.1-99 2007. Design of the Maritime Configuration of ports, Approach Channels and Harbour Basins. VA. Impresores S.A.

Sounders, B. & Suranko, H. 2019. Variable Channel Design for Ports and Harbours in Macro Tidal Enviroments. Australasian Coasts & Ports Conference. Viitattu 5.9.2021. <https://www.engineersaustralia.org.au/sites/default/files/Variable%20Channel%20Design%20for%20Ports%20and%20Harbours%20in%20Macro%20Tidal.pdf>

Seekpng n.d. msc-oscar-vs-emma-maersk. Viitattu 1.8.2021. https://www.seekpng.com/ipng/u2t4o0i1q8o0o0u2_open-msc-oscar-vs-emma-maersk/

Si, K. 2021. Zhonggu Logistics set to order up to 18 containerships. Viitattu 27.5.2021. <https://www.seatrade-maritime.com/shipbuilding/zhonggu-logistics-set-order-18-containerships>

Stopford, M. 2020. Coronavirus, Climate Change & Smart Shipping. Three Maritime Scenarios 2020–2050. Viitattu 5.6.2021. https://www.smm-hamburg.com/fileadmin/presse/pm/sm/2020/Coronavirus__Technology__Smart_Shipping_-_Stopford_20_April_2020.pdf

Tattini, J. & Teter, J. 2020. International shipping. More efforts needed. Viitattu 20.5.2021. <https://www.iea.org/reports/international-shipping-2>

The Maritime Executive 2021a. Evergreen continues expansion ordering 20 boxships for 2,6 billion. Viitattu 26.5.2021. <https://www.maritime-executive.com/article/evergreen-continues-expansion-ordering-20-boxships-for-2-6-billion>

The Maritime Executive 2021b. Zim gets 10 newbuild LNG-Containerships as part of seaspan's growth. Viitattu 26.5.2021. <https://www.maritime-executive.com/article/zim-gets-10-newbuild-lng-containerships-as-part-of-seaspan-s-growth>

TrafiCom 2021. Alusten jääluokat. Viitattu 24.8.2021. <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/merenkulku/alusten-jaaluokat>

Van Marle, G. 2021. Hapag-Lloyd and ONE order new 12 ULCVs for Asia-Europe trade. Viitattu 30.5.2021. <https://theloadstar.com/hapag-lloyd-and-one-order-new-12-ulcvs-for-asia-europe-trade/>

Vesilaki 27.5.2011/587. Viitattu 8.6.2021. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110587>

Väylävirasto 2020. Väyläkortti Kemi Ajos. Viitattu 28.8.2021. <https://vayla.fi/documents/25230764/35410858/Ajos+10+m.pdf/b830eedb-4147-4121-9d10-29f21c0e4a51/Ajos+10+m.pdf?t=1583927708065>

Leveyden mitoitus

ROM- standardin mukainen mitoitus, kun olosuhteet pysyvät muuttumattomina suoralla väylällä.

Tuulen aiheuttama sortokulma.

$$\beta_1 = \arcsin[(0,0239 * 3,55 * 10 * \sin(30^\circ))/5,14] = 5,02^\circ$$

Aallokon aiheuttama sortokulma.

$$\beta_3 = \arcsine \left[0,1164875 * \left(\frac{9,81}{8} \right)^{0,5} * \frac{2}{5,14} \right] = 2,9^\circ$$

Cv.

$$C_v = \left(\frac{23694}{1874} \right)^{0,5} = 3,55$$

Ylimääräinen lisäys leveyteen.

$$b_r = (1,5 - 0,5) * (0,1 * 35,2) = 3,52 \text{ m}$$

Väylämerkinnästä johtuva lisäleveys.

$$b_b = 1500 * \sin 0,5^\circ = 13,1 \text{ m}$$

Sortokulmasta aiheutuva lisäleveys.

$$b_d = 234,25 * \sin(7,92^\circ) = 32,3 \text{ m}$$

Väylän nimellinen leveys.

$$B_n = 35,2 + 32,3 + 2(25 + 3,52 + 13,1) + 17,6 + 17,6 = 186 \text{ m}$$

Laivaväyliä suunnitteluohjeen mukainen mitoitus yksikaistaiselle suoralle väylälle.

$$B + 0,3B + 0 + 0,4B + 0 + 0 + 0,5B + 0,2B + 0,1B + 0,1B + 0 + 2 * 0,5B = 3,6B = 127 \text{ m}$$