



Oikaisevan momentin mittaus sotilasajoneuville

Jere Laakso

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2025

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Korjaamotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Korjaamotekniikka

LAAKSO, JERE:
Oikaisevan momentin mittaaminen sotilasajoneuvolle

Opinnäytetyö 68 sivua
Toukokuu 2025

Tämän opinnäytetyön aiheena oli selvittää oikaiseva momentti sotilasajoneuvosta. Oikaisevan momentin määrä on tärkeä tieto uintiturvallisuuden kannalta. Aihe opinnäytetyöhön saatiin Patria Land Oy:ltä. Patria Land Oy Hämeenlinnan toimipiste on sotilasajoneuvoihin ja kranaatinheittäjiin keskittynyt puolustusvälineitä valmistava yritys Hämeenlinnassa. Toimeksianto annettiin, koska virallista menetelmää oikaisevan momentin selvittämiseksi ei ollut ja haluttiin tietää, vastaavatko käytännön tulokset simulaation tuloksia.

Työn tavoitteena oli suunnitella testausmenetelmä, joka mahdollistaa oikaisevan momentin mittaamisen käytännössä. Aikaisemmin oikaiseva momentti on selvitetty simuloimalla. Työn tarkoituksena oli luoda toimiva testausmenetelmä ja sen pohjalta tehdä mittaus sekä tulosten käsittely.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin kelluvuutta, vakavuuksia, painojen vaikutusta, kaavoja, mittalaitteiden käyttöä, antureita ja mittaamista. Tuloksissa perehdyttiin virheeseen, tuloslaskentaan ja tulostulkintaan.

Työn pohjalta tehty oikaisevan momentin testausmenetelmästä todettiin toimivaksi. Mittauksessa saatiin teorian ja simulointitulosten kanssa yhteneväisiä tuloksia ja mittaus onnistui suunnitelmien mukaisesti. Jatkossa kyseistä testausmenetelmää hyödynnetään Patrian suorittamissa oikaisevan momentin mittauksissa, koska oikaiseva momentti on tärkeä osa uintiominaisuuksia ja erittäin turvallisuuskriittinen.

Asiasanat: oikaiseva momentti, testaus, mittaus, sotilasajoneuvo

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Vehicle Engineering
Garage Engineering

LAAKSO, JERE:
Righting Moment Measurement for a Military Vehicle

Bachelor's thesis 68 pages
May 2025

The purpose of this thesis was to investigate the righting moment of military vehicles. The amount of righting moment is important information from the perspective of stability safety. The subject for the thesis was provided by Patria Land Oy. Patria Land Oy's Hämeenlinna facility is a company specialising in the manufacture of defense equipment, such as military vehicles and mortars. The commission was given because there was no official method for determining the righting moment, and there is a desired to know if the practical results match the simulation results.

The goal of the work was to design a testing method that would allow the righting moment to be measured practically. Previously, the righting moment had been determined through simulations. Furthermore, the objective was to create a functional testing method and based on it, perform measurements and data processing.

The theoretical section covered buoyancy, stability, the effects of weights, the use of measuring devices, sensors, and measurement techniques. The results section discussed errors, result calculation, and result processing.

The righting moment testing method developed as part of this work was found to be functional. The measurement results were consistent with both theoretical predictions and simulation data, and the measurement process was carried out successfully in accordance with the planned procedure. Going forward, this testing method will be employed in righting moment measurements conducted by Patria, as the righting moment constitutes a key aspect of hydrodynamic performance and is highly critical for safety.

Key words: righting moment, testing, measurement, military vehicle

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	PATRIA OYJ	9
	2.1 Patrian konsernirakenne ja talouskatsaus	9
	2.2 Patria Land Oy	10
	2.3 Patria AMV	11
	2.4 Patria 6X6	12
	2.5 Patria FAMOUS	13
	2.6 Sotilasajoneuvo	14
3	OIKAISEVA MOMENTTI	15
	3.1 Momentti	16
	3.2 Veden noste ja Arkhimedeen laki	17
	3.3 Kelluvat kappaleet	18
	3.4 Metakeskipiste	18
	3.5 Alkuvakavuus	20
	3.6 Staattinen vakavuuskäyrä	23
	3.7 Kallistuskulman määrittäminen staattista vakavuuskäyrää käyttäen	24
	3.8 Vapaakappalekuva	25
4	VAATIMUKSET JA STANDARDIT	27
	4.1 STANAG	27
	4.2 Varalaitavaatimus ja kelluntavara	27
	4.3 Patrian yleisohje kellunta- ja kahlaustestaukseen	29
	4.3.1 Varusteet ja käyttöön liittyvät huomiot	30
	4.3.2 Turvallisuusohjeet ja yleistiedot altaasta	30
	4.3.3 Valmistelut ja veteen ajaminen	31
5	SIMULOINTI	32
6	MITTALAITTEISTO JA TESTAUS	34
	6.1 DEWE-43A	34
	6.2 Anturit	37
	6.2.1 Kulma-anturi	37
	6.2.2 Voima-anturi	39
	6.3 Testisuunnitelma	41
7	TULOSTEN KÄSITTELY	42
	7.1 Virhetarkastelu	42
	7.2 Tuloslaskenta	45
	7.3 Mittaustulokset	49

7.4 Johtopäätökset.....	53
8 POHDINTA	60
LÄHTEET.....	63
KUVAT.....	65

LYHENTEET JA TERMIT

6X6	Patrian kuusipyöräinen sotilasajoneuvo
AMOS	Advanced Mortar System
AMV	Armoured Modular Vehicle
Amfibioajoneuvo	Maalla ja vedessä kulkeva ajoneuvo
FAMOUS	Future Highly Mobile Augmented Armoured Systems
Nemo	NEW MORTAR
STANAG	Standardisation Agreement
Validointi	Hyväksyminen prosessin täyttäessä kriteerit
Φ	Kulma ($^{\circ}$)
ρ	Nesteen tiheys (kg/m^3)
V	Esineen syrjäyttämä nesteen tilavuus (m^3)
∇	Uppoumatilavuus (m^3)
Δ	Uppouman nostovoima (N)
$B\Phi$	Uppouman siirtynyt painopiste (m)
B_0	Uppouman painopiste (m)
B	Aluksen leveys vesiviivalla (m)
BW	Ihmisen paino (Body Weight, kg)
F	Voima (N)
F_{noste}	Nostevoima (N)
g	Gravitaatiovakio (noin $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)
d	Ajoneuvon vedenalainen syvyys (m)
G	Painopiste (m)
I_{ulk}	Ulkoinen kuormittava momentti (Nm)
J	Ajoneuvon hitausmomentti ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
K	Kölipiste (m)
kg	kilogramma (kg)
L	Ajoneuvon pituus (m)
L_v	Vesiviivan pituus (keulasta perään, m)
M_0	Metakeskipiste (m)
M_{ulk}	Ulkoinen momentti (Nm)
M	Momentti (Nm)
m	Metri (m)
N	Newton (Nm)

Nm	Newtonmetri (Nm)
r	Kierroakselin ja voiman välinen vaikutussuora (m)
S	Aluksen syväys pohjasta keskiakseliin (m)
T	Keinumisperiodi (sekunti)
W	Paino (kg)
Y	Ajoneuvon leveys (m)

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli perehtyä sotilasajoneuvojen uintivakavuuteen ja sen pohjalta suunnitella Patria Land Oy:lle testausmenetelmä, joka mahdollistaa oikaisevan momentin mittaamisen Patrian tuottamista sotilasajoneuvoista. Tähän mennessä Patria Land Oy:lla ei ole ollut virallista testausmenetelmää oikaisevan momentin mittaukseen. Sain tehtäväkseni suunnitella, toteuttaa ja testata menetelmän, jolla oikaisevan momentin mittaus on mahdollista kaikista Patria Land Oy:n tuottamista uintivarusteisista ajoneuvoista.

Oikaisevan momentin määrä on turvallisuuden kannalta tärkeä tieto. Väärin sijoitettu ajoneuvon lasti, äkkinäiset liikkeet tai ulkoiset tekijät voivat johtaa vakaviin riskeihin tai onnettomuuksiin uintitilanteessa. Patrian jokainen ajoneuvo on mahdollista varustaa uintiominaisuudella malliversion mukaan, joten uintiturvallisuus on välttämätöntä.

Oikaiseva momentti on tärkeää tietää ajoneuvon lastauksen ja painon sijoittelun kannalta. Kun ajoneuvossa oleva painopiste vaihtaa paikka, muuttuu samalla oikaiseva momentti. Oikaisevan momentin mennessä rajakulman yli, momentti laskee, eikä ajoneuvo pysty enää oikaisemaan itseään. Tämän takia ajoneuvo kaahtuu. Tilanne on vakavin, johon uintitilanteessa voidaan päätyä. Väärin sijoitellun lastin, liian suuren kääntymisnopeuden, sekä kovan merenkäynnin takia, tämä skenaario on kuitenkin mahdollinen.

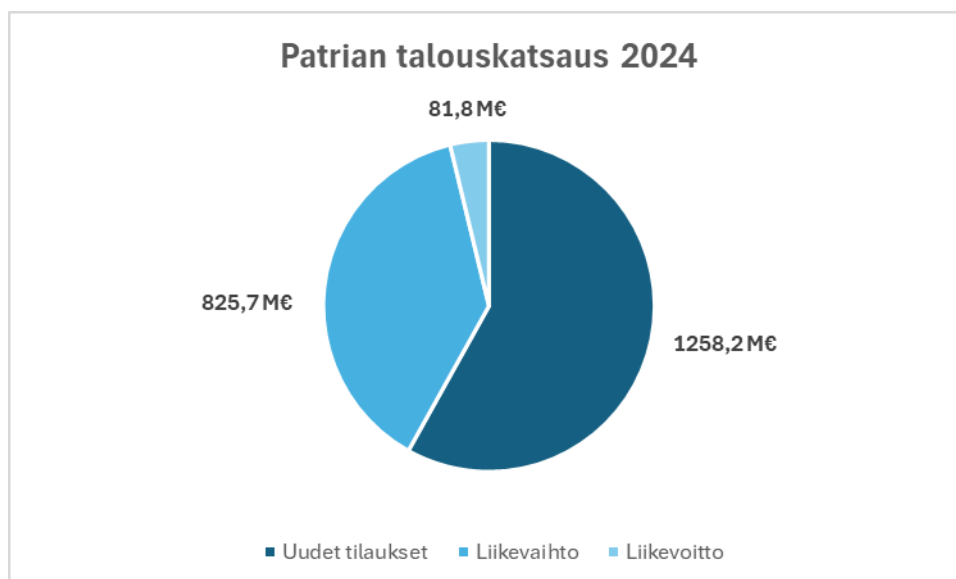
Aikaisemmin oikaiseva momentin määrä on selvitetty simuloinnin avulla. Simuloinnin tueksi on kannattavaa saada käytännön mittaus. Simulointi on nykyään todella kehittyntä, mutta ei välttämättä osaa ottaa kaikkia ulkoisia painoja huomioon. Käytännön mittauksella, tämä on kuitenkin mahdollista ja siihen tässä työssä perehdytään.

2 PATRIA OYJ

2.1 Patrian konsernirakenne ja talouskatsaus

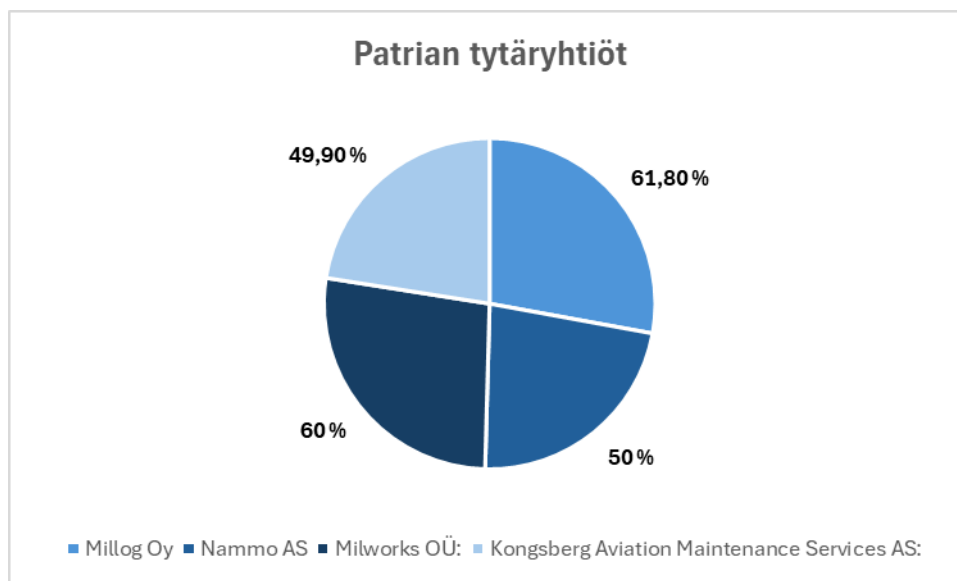
Patria on kansainvälinen puolustusteollisuus- ja teknologiayhtiö, jolla on yli sadan vuoden kokemus alalta. Patria on Suomen puolustusvoimien strateginen kumppani. Suomessa patrialaisia on usealla paikkakunnalla. Eniten patrialaisia on Jämsän Hallissa, Tampereella, Hämeenlinnassa ja Nokian Linnavuoressa. Vuodesta 2016 eteenpäin Patria Oyj on ollut 50,1 % Suomen valtion omistama. 49,9 % omistaa norjalainen teollisuuskonserni Kongsberg Defence & Aerospace. (Patria 2022.)

Patrian liikevoitto vuonna 2024 oli 81,8 miljoonaa euroa, mikä on nousua edellisvuoteen 2023 verrattuna (68,9 miljoonaa euroa). Liikevaihto kasvoi 825,7 miljoonaan euroon vuodesta 2023 (733,8 miljoonaa euroa), ja uusien tilausten arvo nousi merkittävästi 1 258,2 miljoonaan euroon vuodesta 2023 (948,4 miljoonaa euroa). Omavaraisuusaste laski 33,9 %:iin (40,0 %) ja nettovelkaantumisaste nousi 104,3 %:iin (67,5 %), mikä johtui merkittävästä investoinneista tuotantokapasiteettiin ja nettokäyttöpääomaan. Patria jatkoi kasvuaan erityisesti ajoneuvo-hankkeiden myötä, ja kannattavuus oli odotetulla tasolla. Tuotannon tehokkuus parani vuoden loppua kohti, vaikka alkuvuonna esiintyi häiriöitä ylösajovaiheessa. Millog ja Nammo suoriutuivat myös odotusten mukaisesti. (Patria 2024). (Kuvio 1.)



KUVIO 1. Patrian liiketoiminnan keskeiset tunnusluvut 2024 (Kuva: Jere Laakso).

Patria-konserni koostuu emoyhtiöstä, Patria Oyj:sta ja sen täysin omistamista tytäryhtiöistä. Kokonaan omistamiensa tytäryhtiöiden lisäksi Patria omistaa 61,8 % Millog Oy:sta, 50 % norjalaisesta Nammo AS:stä, 60 % virolaisesta Milworks OÜ:stä, sekä 49,9 % norjalaisesta Kongsberg Aviation Maintenance Services AS:stä. (Patria n.d). (Kuvio 2.)



KUVIO 2. Patrian tytäryhtiöiden omistusosuudet (Kuva: Jere Laakso).

Aiemmin Sisu kuorma-autojen valmistuksesta vastannut Hämeenlinnan tehdasalue siirtyi vuonna 1985 pääpainoisesti sotilasajoneuvoihin. Oy Sisu-Auto Ab eriytti niiden valmistuksen omaan liiketoimintaryhmään, joka sai nimekseen Sisu Defence. Sisu Defence yhtiöitettiin vuonna 1994 ja se siirtyi osaksi valtion perusteilla olevaa puolustusvälineyritystä vuonna 1996. Vuodesta 1997 sotilasajoneuvojen tuotannosta Hämeenlinnassa on vastannut Patria Vehicles Oy. Patria Vehicles Oy muuttui Patria Oyj:ksi vuonna 2010. (Blomberg 2003, 145.)

2.2 Patria Land Oy

Patria Land Oy on nimensä mukaisesti maalla käytettävien puolustusvälineiden valmistukseen keskittynyt yritys. Hämeenlinnassa toteutetaan Patria AMV-, Patria 6X6- ja FAMOUS- ajoneuvojen suunnittelu ja valmistus, sekä AMOS- ja NEMO-

kranaatinheitinjärjestelmien suunnittelu ja valmistus. Patria Land Oy työllistää n. 550 ihmistä ympäri Suomea. Henkilöstön määrä on voimakkaassa kasvussa. (Salonen 2025)

Patria alkoi sarjatuottamaan Hämeenlinnassa AMV miehistönkuljetusajoneuvoja vuonna 2004. Vuonna 2018 julkaistiin uusi Patria 6X6, jonka sarjatuotanto käynnistyi vuonna 2021 Hämeenlinnassa. Tällä hetkellä Hämeenlinnan tehtaassa valmistetaan molempia ajoneuvoja. Patria on myynyt Puolalle ja Latvialle valmistuslisenssit, jotka oikeuttavat paikallisvalmistuksen. Puolassa valmistetaan AMV miehistönkuljetus ajoneuvoja ja Latviassa Patria 6X6 miehistönkuljetus ajoneuvoja. Vuonna 2024 julkaistiin uusi kumitelainen Patria FAMOUS, jonka sarjatuotanto ei ole vielä alkanut. (Salonen 2025)

2.3 Patria AMV

Vuonna 1999 Patria lähti tekemään selvitystä 8X8- taisteluaajoneuvosta. Sen pohjalta on kehitetty nykyisinkin tuotannossa oleva Patria AMV (kuva 1). Ensimmäinen prototyyppi valmistui vuonna 2001. Ajoneuvojen sarjatuotanto käynnistyi 2004. (Tuominen 2018.)

AMV on kahdeksanpyöräinen sotilasaajoneuvo, jossa kaikki pyörät ovat vetäviä. Kaksi ensimmäistä akselia ovat ohjaavia ja valinnaisesti myös viimeinen akseli. AMV:ssä on irrotettava erillisrunko, johon on kiinnitetty voimalinja vetopyörästöineen ja pyöräntuntoineen. Panssarikori on kiinnitetty apurunkoon joustinelementeillä. (Tuominen 2018.)

Nimensä mukaisesti AMV on mahdollista modifioida täysin asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Niin panssarikoria, kuin asejärjestelmään on mahdollista muokata. AMV on saatavilla uintioptiolla, kaikista raskaimpia malleja lukuun ottamatta. (Tuominen 2018.)

Miehistöpaikkoja AMV:ssä on kolmelle henkilölle eli johtajalle, ajajalle ja ampujalle. Lisäksi miehistötilaan mahtuu variaation mukaan 8–10 taistelijaa. Voimallään käytetään Scanian valmistamaa 12-litran kuusisylinteristä rivimoottoria. Vuotta 2018 uudempiin malleihin moottorin litratilavuutta on kasvatettu yhdellä

litralta. Ajoneuvon paino vaihtelee suojauksesta ja asejärjestelmästä riippuen 16 000 kg ja 32 000 kg välillä. Tällä hetkellä AMV mallien käyttäjämaita ovat Japani, Kroatia, Puola, Ruotsi, Suomi, Slovakia, Slovenia ja Yhdistyneet arabiemiraatit.



KUVA 1. Patria AMV (Kuva: Patriagroup).

2.4 Patria 6X6

Patria 6X6 (kuva 2) on Patria Landin vuonna 2018 lanseeraama modulaarinen miehistönkuljetusajoneuvo. 6X6 suunniteltiin edullisemmaksi vaihtoehdoksi yhtiön vientimenestykseksi nousseen AMV:n rinnalle. (Tuominen 2018.)

Uudella miehistönkuljetusajoneuvolla lähdettiin tavoittelemaan kansainvälisiä markkinoita, koska maailmalla on tuhansia vanhenevia kuljetusajoneuvoja ja -vaunuja. 6X6 muistuttaa ulkonäöllisesti legendaarista Pasia eli panssarisisua. Todellisuudessa 6X6 on täysin uuden sukupolven miehistönkuljetusajoneuvo. (Tuominen, 2018.)

6X6 on erillinen apurunko ja erillisjousitus joka pyörässä. Voimanlähteenä on Scania viisisylinterinen 9,3 litratilavuuden rivikuusimoottori. Vaihteistona käytetään ZF valmistamaa 7F2R-vaihteistoa. Ajoneuvon paino vaihtelee asejärjestelmästä ja suojauksesta riippuen. Omamassa kierrejousilla varustetussa ajoneuvossa on 19000 kg ja kokonaismassa 22000 kg. (Tuominen 2018.)

6X6 ohjaamossa on kaksi miehistöpaikkaa ajajalle ja johtajalle. Ajoneuvon takaosassa on miehistöpaikkoja 10. 6X6 perusversio tarjoaa NATO:n STANAG 4569 -standardin mukaisen kakkosluokan suojan käsiaseiden 7,62 API BZ -panssari- luodeilta. (Tuominen 2018.)

6X6 on mahdollista varustaa uintioptiolla. Tämä tarkoittaa, että ajoneuvon takaosaan asennetaan potkuritunnelit ja uintikellukkeita lisätään. Ajoneuvon kahluusvyvyys on 1,5 metriä. Raskaampia, kriisinhallintatehtäviin suunniteltuja, 6X6 ajoneuvoja ei ole mahdollista varustaa uintioptiolla.



KUVA 2. Patria 6X6 (Kuva: Patriagroup).

2.5 Patria FAMOUS

Patria FAMOUS (kuva 3) on yhteiseurooppalainen hanke, jossa kehitetään tulevaisuuden panssaroitujen ajoneuvojen teknologioita, suorituskykyjä ja maataistelunvalmiuksia. FAMOUS – hankkeessa Patria on kehittänyt ajoneuvoratkaisun, joka luo suorituskykyisen perustan erityisesti vaativiin sää- ja maasto-olosuhteisiin. Kokonaisuus liittyy erityisesti Maavoimien arktisen liikkuvuuden hankkeeseen. Hankkeessa etsitään korvaavaa ratkaisua vanhenevalle ja käytöstä poistuvalla tela-ajoneuvokalustolle. (Patriagroup 2024.)



KUVA 3. Patria FAMOUS (Kuva: Patriagroup).

2.6 Sotilasajoneuvo

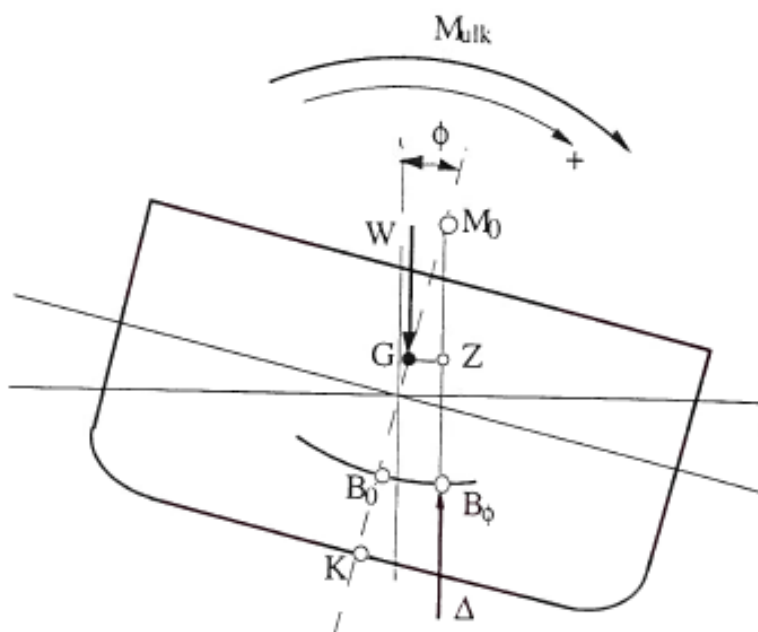
Suomen lainsäädännössä sotilasajoneuvolaki 332/2023 määrittelee sotilasajoneuvon. Suomessa sotilasajoneuvolla tarkoitetaan sellaisia ajoneuvoja, joiden omistajaksi tai haltijaksi on merkitty Puolustusvoimat. Moottorikäyttöisiä sotilasajoneuvoja ovat ajoneuvot, jotka kulkevat konevoimalla. Kansainvälisellä sotilasajoneuvolla tarkoitetaan aluevalvontalain mukaisen luvan perusteella Suomessa olevaa vieraan valtion tai kansainvälisen järjestön ajoneuvoa, joka täyttää 40 §:ssä säädetyt vaatimukset. (Sotilasajoneuvolaki 332/2023.)

3 OIKAISEVA MOMENTTI

Oikaiseva momentti on voiman momentti, jolla alus alkaa kääntämään itseään stabiiliin vaakatasoon kallistuman aikana. Aluksen kelluessa paikallaan tyynessä vedessä ja ulkoisen voiman kallistaessa sitä pieneen kulmaan Φ , painopiste G pysyy samassa paikassa, mutta uppouman painopiste B_0 siirtyy veden alle painuneen puolen suuntaan uuteen sijaintiin $B\Phi$ (kuva 4). Tässä syntyvää tilannetta kutsutaan alkuvakaudeksi. (kaava 1) (Matusiak 1995.)

$$W \cdot GZ = W \cdot \overline{GM}_0 \sin \phi, \quad (1)$$

Suure W on aluksen paino ja GZ on vakavuusmomentin varsi.



KUVA 4. Alkuvakaus (Kuva: Jerezy Matusiak).

Oikaiseva varsi GZ lasketaan kallistuskulman funktiona, vakiosiirtymän ja vakiolla painopisteen korkeuden arvoilla. Edellä mainitulla suureilla saadaan arvioitua aluksen vakavuutta suurilla kallistuskulmilla. Tätä käyrää kutsutaan staattisen vakavuuden käyräksi. Mitä suuremmassa kallistuskulmassa alus on, sitä pidempi

oikaiseva varsi on. Oikaisevaa momenttia tarvitaan myös enemmän tässä tapauksessa. (Wärtsilä 2025.) Oikaisevan momentin yksikkö on Nm.

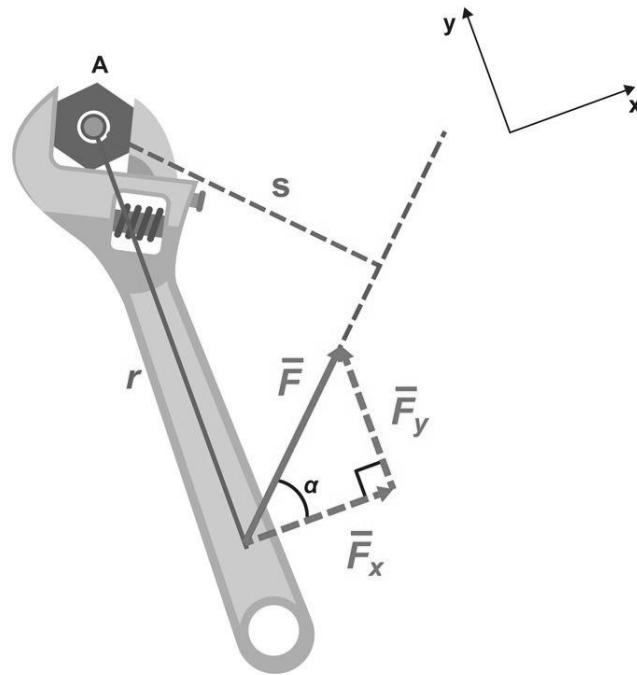
3.1 Momentti

Voiman vääntävä vaikutus kappaleeseen on momentti. Vääntövaikutus saa kappaleen vaihtamaan paikkaa, asentoa tai pyörimään itsensä ympäri. Vääntövaikutus on havaittavissa, kun kappaleen kääntyminen on mahdollista. Kappaleen tiettyyn pisteeseen kohdistuva voima luo momentin. Momentti on matkan ja voiman tulo. Momentti on vektorisuure, jonka yksikkö on newtonmetri. (Peda.net n.d.)

Momentin kaava on (kaava 2)

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

Joissain tapauksissa voiman vaikutus kiertoakselista on hankalaa selvittää. Tällaisissa tapauksissa momenttia laskiessa, voidaan voima jakaa komponentteihin. Tällöin kappaleeseen kohdistuva momentti on komponenttien momenttien summa. Kun voima jaetaan kiertoakselin suuntaiseen ja siihen nähden kohtisuoraan komponenttiin, toisen momentti on nolla ja toiselle voiman varsi on sama, kuin voiman vaikutuspisteen etäisyys kiertoakselista. (kuva 5) (Peda.net n.d.)



KUVA 5. Voiman komponentit ja momentti taitto (Kuva: Peda.net).

Työssä lisätään kallistavaa voimaa, joten tälle voimalle on laskettava momentti. Momentti lisäpainon aiheuttamasta kallistuksesta lasketaan kaavalla 3

$$M_{\text{ulk}} = kg \cdot g \cdot r \quad (3)$$

3.2 Veden noste ja Arkhimedeen laki

Veden noste ja Arkhimedeen laki liittyvät läheisesti toisiinsa. Arkhimedeen laissa pätee sääntö, jossa jokainen nesteeseen tai kaasuun upotettu esine kokee nosteen, joka on yhtä suuri kuin displacementin eli siirtyneen nesteen paino. Toisin sanoen esineeseen kohdistuva noste on yhtä suuri kuin sen syrjäyttämän nesteen paino. (Noste 2021)

Kappaleen upotessa veteen, esine syrjäyttää tietyn määrän vettä. Syrjäytetyn veden paino on nostevoima, joka toimii nostavana voimana tätä kappaletta kohtaan. Nostevoima on tärkeä monille ilmiöille, kuten laivojen kellumiselle. (Noste 2021)

Nosteen kaava on kaava 4

$$F_{\text{noste}} = \rho V g \quad (4)$$

3.3 Kelluvat kappaleet

Kelluva kappale on kokonaisuus, joka on vain osittain vedessä. Kelluvat kappaleet ovat aina kosketuksessa vapaaseen nestepintaan. Aluksen vedenalaiset pinnat ovat hyvä esimerkki kelluvan kappaleen upoksissa olevista osista.

Kokonaisvoima nesteessä kelluvaan kappaleeseen on kaava 5

$$F = k \rho g \nabla. \quad (5)$$

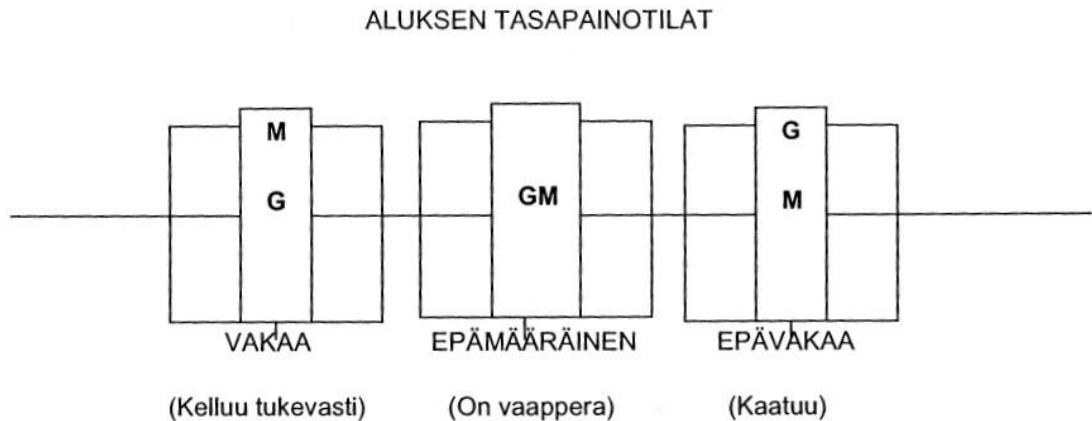
Saatu noste on yhtä suuri kuin kappaleen syrjäyttämän nestemäärän paino. Tulos täysin upoksissa olevalle ja kelluvalle kappaleelle tunnetaan Arkhimedeen laki. Arkhimedeen laki mahdollistaa hydrostatiikkalaskennassa kappaleiden tilavuuksien ja geometrinen ominaisuuksien hyödyntämisen paineiden sijaan.

3.4 Metakeskipiste

Metakeskipiste on suure, joka kuvaa aluksen vakautta, sekä vaihtokeskussäteen pituutta, kun aluksen keskitaso on pystysuorassa asennossa eli $\phi = 0$. Tätä suuretta kutsutaan alkuvaihtokeskussäteeksi. (Matusiak 1995.)

Nesteen mekaniikassa metakeskipiste on teoreettinen piste M_0 , jossa on kuvitteellinen pystysuora viiva. Viiva kulkee köli- ja painopisteen kautta ja leikkaa kuvitteellisen pystysuoran viivan, joka kulkee uuden nostepisteen kautta. Uusi nostepiste syntyy, kun kappale kelluu tai kallistuu vedessä. (metacentre n.d.)

Metakeskipisteen sijaintiin vaikuttavia tekijöitä ovat aluksen muoto, lastin sijoittelu, merenkäynnin voimakkuus ja aluksen nopeus. Näiden tekijöiden myötä voi tapahtua ei-toivottu tilanne, jossa metakeskipiste menee painopisteen alapuolelle ja aluksesta tulee epävakaa, joka lisää kaatumisen riskiä (kuva 6). Aluksen käyttäjä on vastuussa lastin sijoittelusta, joka vaikuttaa painopisteen- ja metakeskipisteen sijaintiin. Mitä alempana lastin painopiste on, sitä alempana aluksen painopiste on. (Onnettomuustutkintakeskus 1999.)



KUVA 6. Aluksen tasapainotilat (Kuva: Onnettomuustutkintakeskus).

Mikäli alus joutuu tilanteeseen, jossa painopiste ja vaihtokeskus ovat lähellä toisiaan, on aluksen painopistettä saatava alemmaksi. Kun kyseessä on ajoneuvo, on painopisteen muuttaminen kesken uinnin hankalaa. Tästä syystä ajoneuvo ja lasti on suunniteltava niin, että metakeskipiste pysyy kaikissa tilanteissa painopisteen yläpuolella. (Matusiak 1995.)

Koska tiedämme tasapainotilanteen $M_{ulk} = M_{oik}$, pystymme laskemaan metakeskipistävyyden. GM lasketaan kaavalla 6

$$GM = \frac{M_{ulk}}{W \cdot \sin \phi} \quad (6)$$

Metakeskipisteen selvittämiseksi on tiedettävä aluksen painopisteen korkeus. Painopisteen koordinaattien määrittämiseksi luodaan mitattavasta kappaleesta tasapainoyhtälöt. (Matusiak 1995.) Tässä työssä käytetään valmiiksi määritettyä painopistettä.

Suuremmissa kallistuskulmissa ei voida käyttää kaavaa 6. Suuremmilla kallistuskulmilla metakeskipiste ei pysy paikkaan, joten käytetään kaavaa 7.

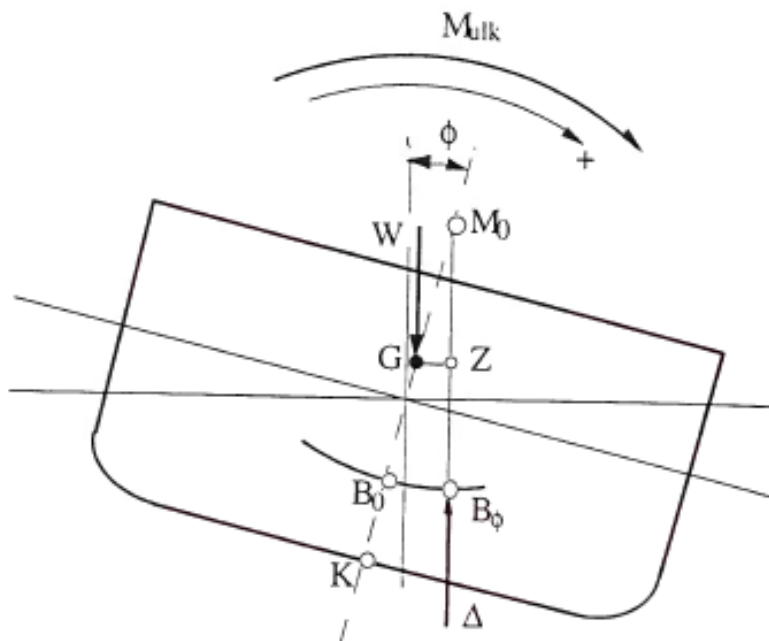
$$GM = \left(\frac{0,8 \cdot B}{T}\right)^2 \quad (7)$$

Kaavassa T on kellumisperiodi. Kellumisperiodi mitataan aluksen kelluessa tyyneessä vedessä ja siirtämällä paino toiselle laidalle. Ajanotto aloitetaan pystyasennosta ja on saatava vähintään viidelle heilahdukselle. Yksi heilahdusperiodi saadaan jakamalla heilahdusten kokonaisaika niiden lukumäärällä (Merenkulku lait-os 1972.)

3.5 Alkuvakavuus

Poikittaista alkuvakavuutta tarkastellaan poikittaisvakavuuden tärkeiden pisteiden avulla. Piste K on laskennan tukipiste. Normaalisti se tarkoittaa aluksen köli-linjatasa. Muut tärkeät pisteet ovat aluksen painopiste G ja aluksen metakeski-piste M. Näiden pisteiden keskinäisellä korkeuserolla on olennainen vaikutus aluksen vakavuusominaisuuksiin (Onnettomuustutkintakeskus 2/1999.)

Alkuvakaudella tarkoitetaan aluksen vakautta, kun kallistuskulmien arvot ovat pieniä (noin alle 10°). Kuvassa 7 on esitetty ulkoisella momentilla M_{ulk} kuormitettu alus, joka kyseisen kuormituksen seurauksena kallistuu kulman Φ verran. Pienillä kallistuskulmilla käytetään kaavaa 6. Kallistuskulman ollessa pieni, eli $\Phi \approx 0$, vaihtokeskus pysyy paikallaan eli se sijaitsee metakeskuksessa M_0 . (Matusiak 1995.)



KUVA 7. Alkuvakaus (Kuva: Jerezy Matusiak).

Aluksen kallistuman kasvaessa $d\Phi$:n verran, tukikäyrän pituus suurenee (kaava 8)

$$B_{\phi} B_{\phi+d\phi} = \overline{B_0 M_0} d\phi. \quad (8)$$

joka $y' - z'$ koordinaatistossa on (kaava 9)

$$dy'B = \overline{B_0 M_0} \cos\phi d\phi, dz'B = \overline{B_0 M_0} \sin\phi d\phi. \quad (9)$$

Koska $\overline{B_0 M_0}$ on riippumaton kallistuskulmasta Φ , voidaan kaava 10 integroida seuraavasti (kaavat 10 ja 11)

$$y'B = \overline{B_0 M_0} \int_0^{\phi} \cos\phi d\phi = \overline{B_0 M_0} \sin\phi, \quad (10)$$

$$z'B = \overline{B_0 M_0} \int_0^{\phi} \sin\phi d\phi = \overline{B_0 M_0} (1 - \cos\phi). \quad (11)$$

Ulkoinen momentti pitää tasapainottaa voimaparilla $W - \Delta$, jotta vakavuuden ensimmäinen ehdoista olisi täytetty, eli (kaava 12)

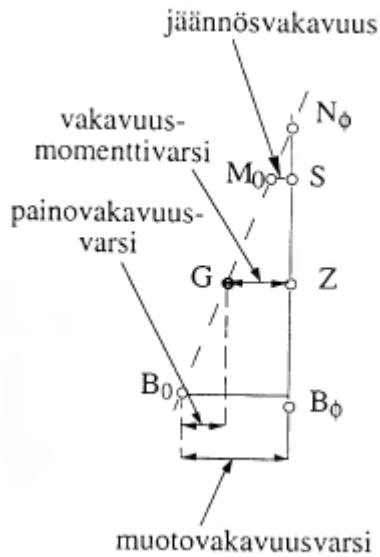
$$M_{\text{ulk}} + M_{\text{st}} = 0, \quad (12)$$

jossa vakavuusmomentti on (kaava 13)

$$M_{\text{st}} = -\Delta \overline{GZ} \quad (13)$$

ja \overline{GZ} on vakavuusmomentin varsi. Vakavuusmomentin varresta käytetään myös usein merkkiä h (kaava 14)

$$GZ = \overline{B_0 M_0} \sin\phi - \overline{B_0 G} \sin\phi = \overline{GM_0} \sin\phi \quad (14)$$



KUVA 9. Vakavuusvarret (Kuva: Jerezy Matusiak).

Painovakavuusvarren pituus saadaan selvitettyä, kun tiedetään uppouman painopiste (B_0) aluksen stabiilissa vaakatasossa ja aluksen painopiste (G). Etäisyyttä uppouman painopisteestä aluksen painopisteeksi kutsutaan painovakavuusvarreksi (kaava 18). (Matusiak 1995.)

$$\text{Painovakavuusvarsi} = \overline{B_0G} \sin \Phi \quad (18)$$

3.6 Staattinen vakavuuskäyrä

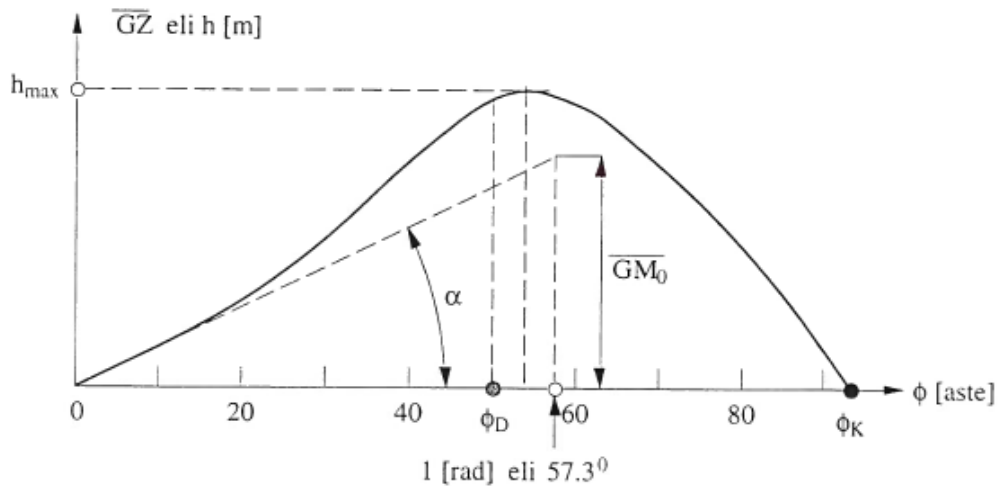
Aluksen vakavuutta koskevien laskelmien tulokset esitetään yleensä staattisen vakavuuskäyrän muodossa kallistuskulman alueella nolla-asteesta kaatumiskulman arvoon Φ_k . (Matusiak 1995.)

Kallistuskulman ollessa pieni, vakavuusmomenttivarsi \overline{GZ} muuttuu lähes lineaarisesti. Vakavuuskäyrän kulmakerroin origossa on alkuvakavuutta kuvaava mitta (kaava 19). (Matusiak 1995.)

$$\left(\frac{dh}{d\phi}\right)_{\phi=0} = \tan \alpha = \overline{GM_0} \quad (19)$$

Tätä staattisen vakavuuskäyrän ominaisuutta käytetään avuksi tarkistettaessa vakavuuslaskelmien oikeellisuutta. Vakavuuskäyrän alle jäävä pinta-ala kuvaa

aluksen kykyä ottaa vastaan ulkoinen kuormitus. Vakavuusmomenttivarren maksimiarvo h_{\max} sijaitsee kallistuskulman kohdalla, joka on tavallisesti hieman kulman Φ_D arvoa suurempi. Kulma Φ_D on se aluksen kallistuskulma, jossa aluksen kansi painuu veteen. (Matusiak 1995.)



KUVAAJA 1. Staattinen vakavuus käyrä (Jerezy Matusiak).

Usein staattisen vakavuuskäyrän akseleiden asteikot valitaan niin, että kallistuskulman yhden radiaanin pituutta vastaa yhden metrin vakavuusmomenttivarren pituus. Tämä tekee mahdolliseksi eri vakavuuskäyrien vertailun ja metakeskuk-
sen \overline{GM}_0 helpon havainnoinnin käyrästä. (Matusiak 1995.)

3.7 Kallistuskulman määrittäminen staattista vakavuuskäyrrä käyttäen

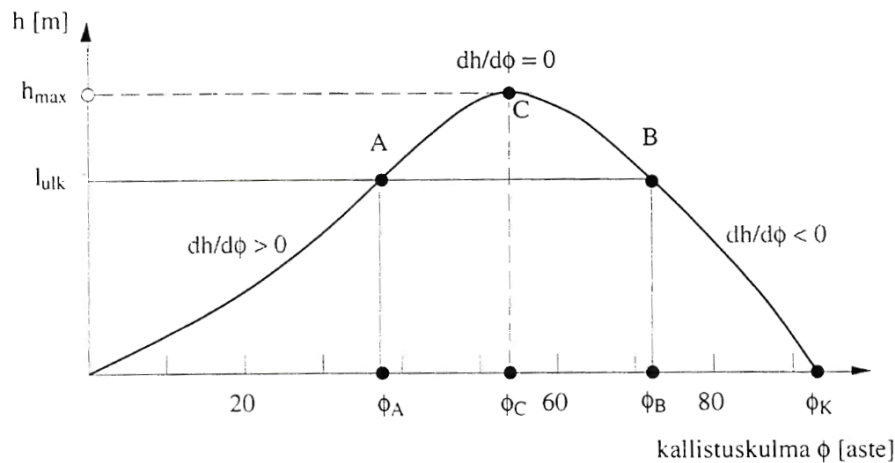
Jos aluksen vakautta vaarantaa ulkoinen hitaasti vaikuttava kuormitus, tarkastellaan aluksen tasapainotilan vakautta ja aluksen vastetta eli kallistumaa. Ensimmäinen tasapainoehto määrää, että ulkoisen kuorman ja staattisen vakavuusmomentin summan pitää olla nolla (kaava 20). (Matusiak 1995.)

$$M_{\text{ulk}} + M_{\text{st}} = 0 \quad (20)$$

Jaetaan edellä mainittu yhtälö, uppouman nostovoimalla Δ ja saadaan (kaava 21)

$$I_{\text{ulk}} = h \quad (21)$$

jossa l_{ulk} on ulkoisen laivaa kuormittavan momentin varsi. Staattiselle vakavuuskäyrälle merkittäessä l_{ulk} huomataan ehdon täyttyvän kahdessa pisteessä (A, B).



KUVAAJA 2. Kallistuskulman määrittäminen ulkoisen voiman vaikuttaessa (Jerezy Matusiak).

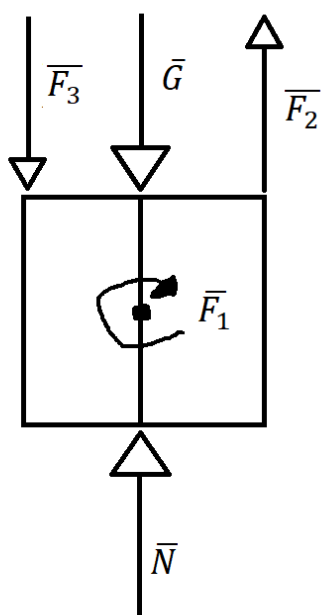
3.8 Vapaakappalekuva

Vapaakappalekuva on kuvio, jota käytetään osoittamaan kappaleeseen kohdistuvien voimien suunnat ja suuruudet tietyissä tilanteissa. Vapaakappalekuvassa voimien suunnat ovat yleensä esitetty vektoreina. Vektorilla osoitetaan voiman suunta. Vapaakappalekuvassa jokainen kappaleeseen kohdistuva voima on merkitty omalla vektorilla. (4.3 Vapaakappalekuva (johdanto))

Vapaakappalekuva käytetään apuna, kun halutaan tietää kappaleeseen kohdistuvat voimat. Vapaakappalekuva nimitys tulee siitä, että kappaleen ajatellaan olevan fyysisessä mielessä vapaassa tilassa, eikä siihen kohdistuvia muita voimia oteta huomioon. (4.3 Vapaakappalekuva (johdanto))

Opinnäytetyön yhtenä tarkoituksena on selvittää voima, jolla kappale pyrkii palautumaan stabiiliin vaakatasoonsa. Vedessä olevaa ajoneuvoa havainnoidaan neliönä. Ilman ulkoisesti vaikuttavia voimia, kappaleeseen kohdistuu ainoastaan veden noste ja painovoima. Oikaisevan momentin selvittämiseksi kappaleeseen kohdistetaan ulkoisia voimia. Vapaakappalekuvassa (kuva 10.) kappaleen oikealle puolelle kohdistetaan alaspäin suuntautuvaa voimaa ja vasemmalle puolelle

ylöspäin suuntautuvaa voimaa. Edellä mainittuja ulkoisia voimia on kuvattu vektoreilla F_2 ja F_3 . Vektori N kuvastaa veden nostetta. Vektori G , painovoimaa. Neljän keskellä oleva piste kuvastaa ajoneuvon keskiakselia, jonka ympäri ajoneuvo lähtee kiertymään ulkoisten voimien vaikuttaessa kappaleeseen. Pisteestä ympärillä oleva vektori F_1 kuvastaa oikeasevaa momenttia. Vektori F_1 , joka kiertyy keskiakselin ympäri, on piirretty myötäpäivään. Vapaakappalekuvassa voimien F_2 ja F_3 takia kappale kallistuu vasemmalle.



KUVA 10. Oikeasevan momentin vapaakappalekuva (Kuva: Jere Laakso).

4 VAATIMUKSET JA STANDARDIT

4.1 STANAG

Osa laivateknisistä turvallisuusvaatimuksista pätee myös muihin vedessä kulkeviin aluksiin. Suomen liittyttyä Natoon, myös Patrian ajoneuvoja koskee STANAG standardointisopimus. STANAG on Nato-maiden yhteinen standardointisopimus, jolla yhdenmukaistetaan Nato-maiden käytössä olevia teknisiä normeja ja käytäntöjä. Tällä tavalla parannetaan jäsenvaltioiden puolustus- ja asevoimien yhteistoimintaa. (Nato.)

Standardointi käsittää kaiken ammusten koosta joukkojen kommunikointiin. Tavoitteena standardeilla on saavuttaa optimaalisin kyky toimia eri Nato-maiden kesken. Välineiden yhteensopivuus, ymmärrettävä kommunikointi, yhteiset menetelmät, sekä toimintatavat, takaavat operatiivisesti tehokkaan toiminnan alusta alkaen. (Nato.)

4.2 Varalaitavaatimus ja kelluntavara

Amfibioajoneuvoille pätee varalaitavaatimus. Varalaita koskee vuotoaukkoja, joilla tarkoitetaan aukon alimman kohdan etäisyyttä paikalliseen vesipintaan. Hetkellisen varalaidan jonkun aukon kohdalla voidaan ajatella koostuvan staattisesta osasta, eli varalaita vaunun ollessa paikallaan, sekä useasta ”häiriökomponentista”. (Laivatekniikan laboratorio, n.d.)

Häiriökomponenteiksi luetaan kiihdytyksen ja pysähdyksen aiheuttamat muutokset, vajoamisen aiheuttama muutos ajettaessa, viippauksen aiheuttama muutos ajettaessa, kaarreajon aiheuttaman kallistumisen vaikutus, jyskinnän vaikutus ajettaessa aallokossa, keinunnan vaikutus, aaltokuvion aiheuttaman paikallisen vesipinnan korkeuden muutos ja miehistön siirtymisen aiheuttama muutos. (Laivatekniikan laboratorio, n.d.)

Ajoneuvon ollessa paikallaan, varalaidan määrittely on tietyissä lastitilanteissa varsin yksiselitteinen. Tilanne vesiajossa on selvästi vaikeampi rungon ympärille

muodostuvan aaltokuvion, sekä pakokaasujen aiheuttamien roiskeiden takia. Varalaita voidaan määrittää käytännössä myös ajotilanteessa. (Laivatekniikan laboratorio, n.d.)

Edellä mainittujen häiriökomponenttien tärkeys ja vaikutus vaihtelee suuresti. Ajoneuvon ja sen vesipinnan korkeuden muutosta lukuun ottamatta, kaikilla häiriökomponenteilla on vähintään osittainen vaikutus poikittais- ja pitkittäisvakaukseen. (Laivatekniikan laboratorio, n.d.)

Patrian ajoneuvoihin pätevä varalaitavaatimus riippuu paljon ulkoisista tekijöistä. Ajoneuvo on suunniteltu stabiiliksi ja varalaita riittävän korkeaksi. Ulkoisien tekijöiden takia saattaa varalaidan koko pienentyä. Suurin riskitekijä varalaidan pientymiselle on ajoneuvossa olevien taistelijoiden sijoittelu ja heidän varusteidensa sijoittelu. Myös ajoneuvon varusteet ovat vaikuttava tekijä. Taistelijoiden ja varusteiden välinen ero on siinä, että ajoneuvon varusteiden massakeskipiste pysyy samassa kohdassa, kun taas taistelijat liikkuvat jatkuvasti ja massakeskipisteen paikka vaihtuu hieman koko ajan.

Suurimman riskitekijän tilanteessa muodostaa se, että taistelijoiden yhteenlaskettu massakeskipisteen sijainti voi muuttua. Keskimäärin aikuisen suomalaisen miehen paino on 85 kg ja varusteet keskimäärin 27 kg. Yhden taistelijan keskimääräinen kokonaispaino on 112 kg. Opinnäytetyön mittauksessa käytettyyn Patria AMV ajoneuvoon mahtuu variaation mukaan 8–10 taistelijaa. 10 taistelijan kapasiteetilla varustetussa AMV ajoneuvossa taistelijoiden yhteenlaskettu paino on 1120 kg. Normaalisissa uintitilanteissa paino on jakautunut tasaisesti miehistötilaan, eikä vaaratilannetta pääse syntymään.

1 kg on 9.80665 N. Karkeasti ajateltuna tilanteessa, jossa ajoneuvo lähtee kallistumaan toiselle puolelle, taistelijat ovat syystä tai toisesta miehistötilassa samalla puolella. Silloin voima tällä kyseisessä puolella on (kaava 22) ja (kaava 23)

$$\text{kgN} = \text{BW} \cdot g \quad (22)$$

$$1120 \text{ kg} \cdot 9.80665 \text{ N} = 10\,983,448 \text{ kgN} \quad (22)$$

$$Nm = kgN \cdot r \quad (23)$$

$$10\,983,448\text{ N} \cdot 1\text{ m} = 10\,983,448\text{ Nm} \quad (23)$$

Ensimmäisenä lasketaan voiman suuruus kertomalla taistelijoiden paino gravitaatiokiihtyvyydellä. Tämän jälkeen kerrotaan voiman määrä etäisyydellä ajoneuvon pitkittäiseen kiertoakseliin. Kaavassa 1 m on maksimietäisyys ajoneuvon sisällä kiertoakseliin nähden. Massakeskipisteen kulmaa kiertoakseliin nähden ei tiedetä, joten se jätetään määrittämättä.

Ajoneuvon kallistuskulman ja oikaisevan momentin määrän mukaan voidaan päätellä, missä kulmassa ajoneuvo ei pysty enää oikaisemaan itseään ja kaatuu ympäri. Oikaisevan momentin ollessa pienempi kuin ulkoinen voima joka ajoneuvoa kallistaa, tapahtuu ajoneuvon kaatuminen.

Painon ollessa jakautunut tasaisesti miehistötilassa, voima vaikuttaa alaspäin. Tämä pitää ajoneuvon uintitilanteessa vaakatasossa. Voimien vaikutus saattaa nostaa ajoneuvon uintisyvyyttä ja laskea varalaidan kokoa.

Ajoneuvon varustelu on iso varalaitavaatimukseen vaikuttava tekijä. Kun ajoneuvo on varusteltu tornilla ja muilla painavilla lisälaitteilla, se vie uintikapasiteettia matalammaksi.

Ajoneuvoja koskee myös kelluntavara. Kelluntavara on ennalta määritelty prosenttimäärä ajoneuvon kelluttavasta tilavuudesta ja sen massan syrjäyttämä vesitilavuudesta. Kelluntavara lasketaan seuraavalla kaavalla (kaava 24)

$$\frac{\text{(Ajoneuvon kokonais kelluttava tilavuus - Ajoneuvon massan syrjäyttämä vesitilavuus)}}{\text{Ajoneuvon kokonais kelluttava tilavuus}} \quad (24)$$

Kelluntavara on laskettu alkuperäisessä versiossa. Laskenta jätetään pois julkaistavasta versiosta.

4.3 Patrian yleisohje kellunta- ja kahlaustestaukseen

Patrialla on omat sisäiset kellunta- ja kahlaustestaus ohjeet. Seuraavassa kapaleessa on referoituna Tommi Lensun kirjoittamat viralliset yleisohjeet Patrian suorittamiin kellunta- ja kahlaustestaukseen uuintikoestusaltaassa.

Opinnäytetyön sisällön testaus toteutetaan Patrian uuintikoestusaltaassa. Työtä suoritettaessa noudatetaan Patrian yleis- ja turvallisuusohjetta kellunta- ja kahlaustestaukseen liittyen.

4.3.1 Varusteet ja käyttöön liittyvät huomiot

Uuintikoestualtaan varusteisiin sisältyy 2 kpl pelastusrenkaita ja 4 kpl kelluntapukineita. Kellunta- ja kahlaustestaus on sallittu vain tehtävään perehdytetyiltä henkilöiltä. Altaan maksimisyvyys saa olla enintään 4,5 m. Testausta suorittaessa on otettava huomioon ajoneuvon syrjäyttämä vesimäärä ja vedenpinnan nousu ajoneuvon ollessa altaassa. Testin aikana on huolehdittava hyvästä ilmanvaihdosta ja pakokaasujen poistosta. Ajoneuvon vinssin vaijeri, sekä poiju tulee asettaa ajoneuvon katolle. (Lensu 2006.)

Mikäli testauksen aikana ajoneuvossa ilmenee nestevuoto, on selvitettävä mikä neste on kyseessä. Jos neste jää kellumaan veden pinnalle, neste poistetaan vedestä öljynimeytyspuomin avulla. Jos vuotanut neste sekoittuu veteen, tulee ottaa yhteyttä osaston kemikaalivastaavaan ja selvittää mitä toimenpiteitä vuoto aiheuttaa. Ajoneuvon sisällä tulee olla kuljettajan lisäksi yksi henkilö tarkkailemassa mahdollisia sisään tulevia vuotoja ja altaan reunalla kaksi henkilöä ohjaamassa ajoneuvon kelluntatestausta. Testauksenjohtajan ja ajoneuvon kuljettajan välillä tulee olla radioyhteys. (Lensu 2006.)

4.3.2 Turvallisuusohjeet ja yleistiedot altaasta

Testausta suorittavien henkilöiden tulee tuntee kahlaus- ja kelluntatestaukseen liittyvät turvallisuusohjeet. Ohjeet voivat vaihdella ajoneuvon tyypin mukaan. Ajoneuvon sisällä, sekä altaan reunalla olevien henkilöiden on käytettävä kelluntapukineita testauksen aikana. Veden lämpötila voi minimissään olla 0 °C. (Lensu 2006.)

4.3.3 Valmistelut ja veteen ajaminen

Ajoneuvo valmistellaan sen uintitestin mukaisesti, jota ollaan suorittamassa. Kahlaustestauksessa on otettava huomioon ajoneuvon suurin sallittu kahlaussyvyys. Altaan reunalla on mitta-asteikko, josta veden syvyyden voi tarkistaa. Kellunta-testauksessa ajoneuvon kyljet tulee suojata lepuuttajien avulla. Kellutuskoetta suorittaessa ajoneuvo tulee ajaa aina perä edellä veteen. (Lensu 2006.)

5 SIMULOINTI

Simulointi on tietokoneella tehtyä jäljitelmää tosielämän prosesseista ja järjestelmien toiminnasta. Siinä käytetään valitun prosessin malleja tai järjestelmän ominaisia piirteitä. Simuloinnissa on tarkoituksena tutkia käytettävän mallin käyttäytymistä erilaisissa ympäristöissä ja olosuhteissa. (EP Logistics 2023.)

Jokainen prosessi, joka sisältää sarjan tapahtumia, voidaan simuloida. Sääntönä voidaan pitää sitä, jos prosessista pystyy tekemään vuokaavion, se pystytään simuloimaan. Simulointia on hyvä hyödyntää prosesseihin, jotka sisältävät muuttujia ja satunnaisia tapahtumia. (EP Logistics 2023.)

Simuloinnissa on useita hyötyjä käytännön kokeisiin verrattuna. Kun jotain asiaa kokeillaan, kehitetään tai suunnitellaan ensimmäistä kertaa, on simulointi kaikista kannattavin vaihtoehto. Simuloinnin avulla pystytään välttämään turhat investoinnit, kuten tilat, laitteet, ja henkilöstö. Tosielämän prosesseissa testausolosuhteet ovat haastavia pitää muuttumattomina. Tämän takia testaustulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään. Simuloinnissa olosuhteet saadaan pidettyä samana erilaisilla syötteillä ja tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Simulointi on myös turvallinen tapa testata erilaisia ideoita. Kaikkia seurauksia ei ole aina mahdollista ennustaa, mutta simuloinnin avulla pystytään välttymään epämiellyttäviltä ja vaarallisilta yllätyksiltä. (EP Logistics 2023.)

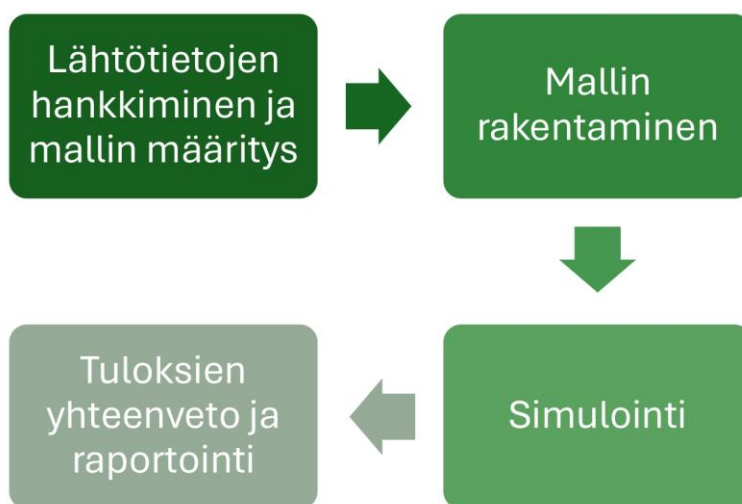
Seuraavissa kappaleissa käydään läpi simulointiprojektin vaiheet. Simulointia varten on kerättävä erilaisia lähtötietoja kuten käsiteltäviä volyymeja, erilaisia sääntöjä, resursseja ja kapasiteetteja. Huolellinen mallin määrittely on simuloinnin kulmakivi. Mikäli mallia ei ole määritetty huolella, voivat tulokset olla epäluotettavia ja käyttökelvottomia. Siksi tämä osa on usein kestoaltaan merkittävin osa projektia. (EP Logistics 2023.)

Simulointimallin rakentaminen onkin projektin konkreettisin työvaihe. Malli luodaan simulointityökalulla. Kun simulointimalli on rakennettu hyvin, voidaan sa-

maa mallia hyödyntää tulevaisuudessa ja testata esimerkiksi erilaisia ympäristöjä, olosuhteita, maastoja, sekä muiden ulkoisten tekijöiden vaikutuksia. (EP Logistics 2023.)

Kun malli on saatu valmiiksi, voidaan aloittaa simulointi. Tyypillisesti simulointi tehdään erilaisilla lähtötiedoilla, jolloin lopussa voidaan vertailla tuloksia. Ensimmäisten ajojen perusteella tehdään simulointimallin validointi. Monesti ensimmäisten simulointien pohjalta syntyy uusia ideoita, joita halutaan kokeilla. (EP Logistics 2023.)

Simuloinnin päätyttyä, tulokset käydään läpi ja niitä verrataan. Lopuksi tehdään tulosten lopullinen analysointi ja raportointi. (EP Logistics 2023.)



KUVIO 3. Simulointiprosessin kulku (Kuva: Jere Laakso).

Patrialla simulointia hyödynnetään jatkuvasti kehitystyössä. Käytännön kokeessa momenttivarren pituutta ei ole mahdollista mitata. Simuloinnilla saadaan momenttivarren mitta ja oikeaseva momentti kulman funktiona.

6 MITTALAITTEISTO JA TESTAUS

Opinnäytetyössä käytetään oikeasevan momentin mittaamiseen Dewesoftin mittalaittejärjestelmiä. Dewesoft on eurooppalainen mittalaittevalmistaja, jonka käyttäjäyrityksiä ovat isot, sekä pienet toimijat ympäri maailmaa. Työssä käytetään Dewesoftin valmistamaa DEWE-43A mittakonetta.

6.1 DEWE-43A

Dewe-43A on laajasti eri puolilla maailmaa palkittu monipuolinen 8-kanavainen USB-tiedonkeruujärjestelmä. Dewe-43A mittalaitteessa on analogiset tuloportit, jotka vastaanottavat jännite- ja täyssilta-antureita. DSI-sovittimen avulla myös IEPE-, lataus-, täys- ja puolisolta-, RTD-, termoelementti-, virta- ja LVDT- signaalit ovat tuettuja. Jokaisessa kanavassa on virtalähde anturin herättämistä varten (Dewesoft 2024).

Mittalaitteessa on kaksi nopeaa CAN 2.0b kanavaa, joiden tiedonsiirto nopeus on 1 Mbit/s. Jokainen tulokanava, analogiset, digitaaliset ja CAN- ovat täysin synkronoituja keskenään mikrosekunnin tarkkuudella. Useita laitteita voidaan liittää samaan ketjuun ja synkronoida samalla pistemäisellä synkronointitarkkuudella (Dewesoft 2024).

Tiedonkeruu- ja käsittelyohjelmanä käytetään DewesoftX. Ohjelmisto on helppokäyttöinen, mutta tehokas niin mittauksia suorittaessa, kuin tuloksia käsitellessä. Laadukas matematiikkakirjasto takaa laajat mittausmahdollisuudet, modiaalianalyysiin, tehoanalyysiin, FFT:hen, akustiikkaan ja moneen muuhun mittaukseen (Dewesoft 2024).

DSI-sovittimen avulla (kuva 11) saadaan kytkettyä anturi mittalaitteeseen. Sovittimesta lähtee kaksi kaapelia. Punainen on anturin herättämistä varten tuleva 10 V syöttöjännite. Musta on maajohto. Hopeasta BNC-liitimestä menee signaali eli anturin tiedonsiirto.



KUVA 11. DSI-sovitin kaapeli (Kuva: Jere Laakso).

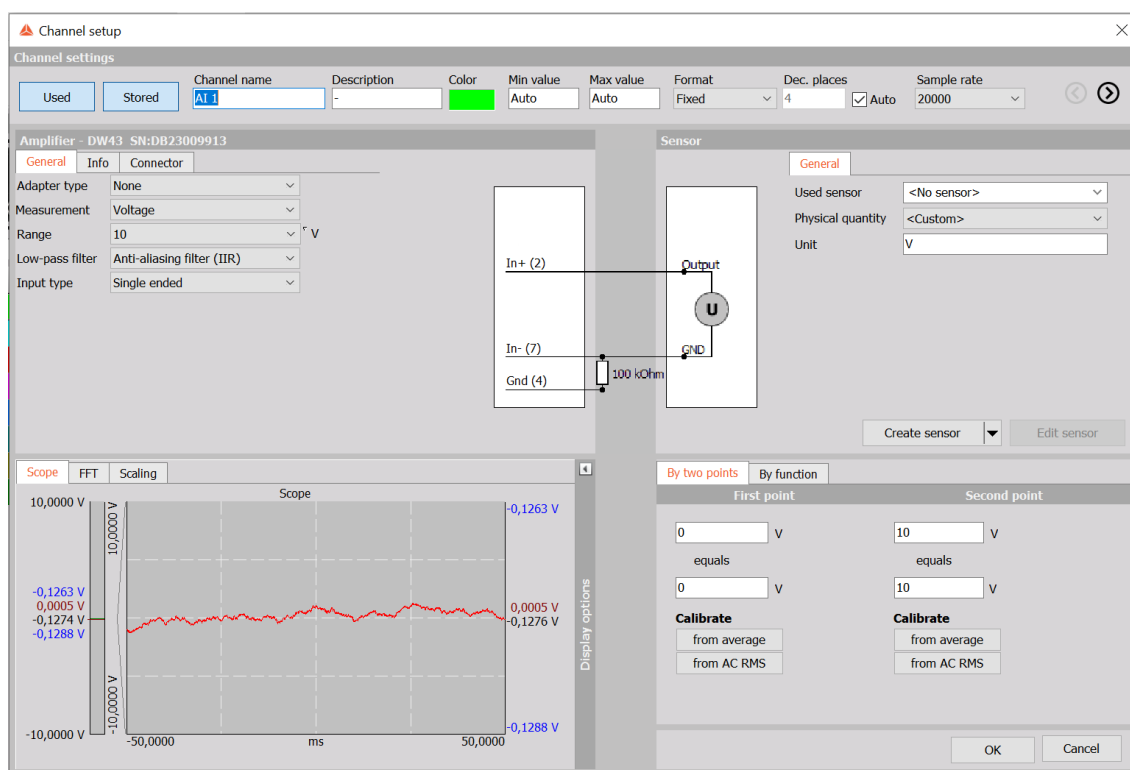
Anturin kytkettäessä mittaohjelmaan avataan mittakoneeseen kytketystä näyttöpäätteestä Dewesoftin käyttöohjelma. Ohjelmasta avataan Ch.setup välilehti (kuva 12) ja välilehdeltä valitaan Analog in, jossa näkyy analogiset kanavat. DSI-sovitin kytketään vapaaseen porttiin ja valitaan kyseinen portti kohdasta "Used" Unused → Used. Anturin tietojen syöttämiseksi painetaan "Setup" painiketta, jossa avautuu Channel setup välilehti (kuva 12).

Mittausten alussa anturit nollataan. Mittausten välissä nollaus ei ole tarpeen, jotta kulmatieto pysyy oikeana. Lähtömittauspiste nollataan kanavanäytöstä (kuva 12). Zero napista, kun painaa anturi alkaa mittaamaan nollasta.

ID	Used	C...	Name	Ampl. name	Range	Measurement	Min	Values	Max	Physical quantity	Units	Zero	Setup
1	Used		Voima	DW43	10 V	Voltage	-484,16	avg 3,14	495,84	Force	kN	Zero	Setup
2	Used		Ajoneuvon kulma	DW43	10 V	Voltage	-561,44	avg -0,09	338,56	Angle	deg	Zero	Setup
3	Used		Valjerin kulma	DW43	10 V	Voltage	-561,69	avg -15,57	338,31	Angle	deg	Zero	Setup
4	Unused		AI 4	DW43	10 V	Voltage	-10,00	avg 0,0434	10,00		V	Zero	Setup
5	Unused		AI 5	DW43	10 V	Voltage	-10,00	avg -0,0335	10,00		V	Zero	Setup
6	Unused		AI 6	DW43	10 V	Voltage	-10,00	avg 0,0781	10,00		V	Zero	Setup
7	Unused		AI 7	DW43	10 V	Voltage	-10,00	avg 0,0618	10,00		V	Zero	Setup
8	Unused		AI 8	DW43	10 V	Voltage	-10,00	avg -0,0792	10,00		V	Zero	Setup

KUVA 12. DEWE-43A Analogiset DSI-mittauskanavat (Kuva: Jere Laakso).

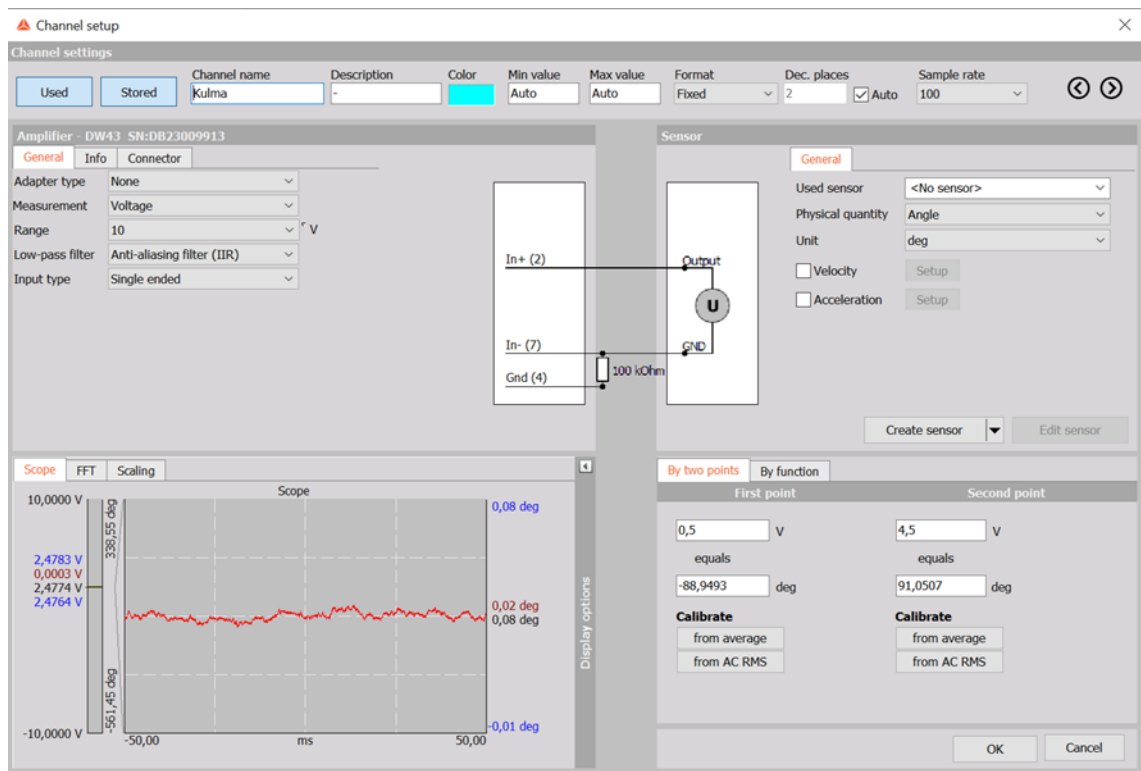
Kuvassa 13 on Channel setup välilehti, lähtötiedoilla. Välilehti on näillä lähtötiedoilla, kun sen avaa ohjelmasta. Anturin tietoja syöttäessä on tiedettävä anturista kytkentätiedot ja skaalaustiedot, jotta mittaus onnistuu.



KUVA 13. Channel setup, ilman anturin tietoja (Kuva: Jere Laakso).

Anturin mittalaitteesta selvitetään anturin skaalaustiedot, jotka syötetään "By two points" kohtaan. Kulma-anturissa skaalauspisteet ovat 0,5 - 4,5V ja $\pm 90^\circ$. Mittalaite osaa automaattisesti vaihtaa "First point" ja "Second point" jännitettä vastaavaan yksikköön, kun sen valittu oikeaksi. Kuvassa 14 on syötetty kulma-anturin tiedot channel setuppiin.

Kuvassa 14 on lähtötiedoilla oleva mittalaitteesta valitun tuloportin kanava-asetus välilehti. Ensimmäisenä lähdetään nimeämään haluttu anturi. Kuvassa 14 anturi on nimetty kulmaksi. Kulman mittauksessa riittää Sample rateksi 100, koska ei tarvitse ottaa niin monta näytettä sekunnissa, kuten esimerkiksi virtausta mitattaessa. Physical quantity valitaan käytettävälle anturille oikeaksi. Tässä tapauksessa se on Angle ja yksikkö on deg (kuva 14).



KUVA 14. Channel setup, kulma-anturin tiedot lisättynä (Kuva: Jere Laakso).

6.2 Anturit

Anturi, aistin ja sensori ovat laitteita, jotka altistuessaan fyysiselle ärsykkeelle muodostavat signaalin. Ärsyke voi olla esimerkiksi lämpötila, fyysisen voiman muutos, kappaleen muodon muutos, paineen muutos, nopeuden muutos, kappaleen aseman muutos tai kappaleen kulman muutos. Lähetettävä signaali on sähköinen impulssi tai magneettikentän muutos (Posa 2014, 12). Anturi ei itsessään pysty näyttämään tuloksia vaan tarvitsee jonkin päätteen tuloksien lukemiseksi.

6.2.1 Kulma-anturi

Kulma-anturi on anturi, jolla pystyy mittaamaan kulmaa. Opinnäytetyössä kulman mittauksella on suuri merkitys, koska halutaan selvittää oikeasevan voiman kulman funktiona.

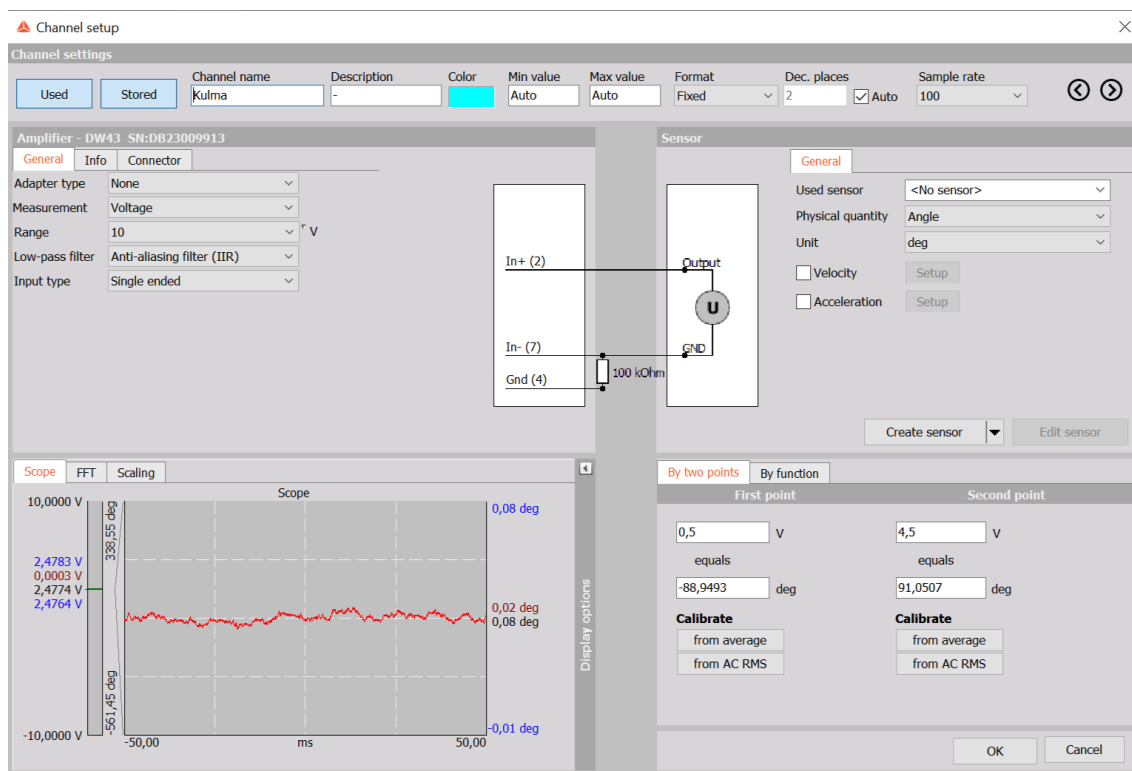
Anturina käytetään DIS sensorisin valmistamaa QG30-KI-090E-AV-K anturia. Anturi on yksi akselinen kulma-anturi, jolla kulma voidaan mitata anturin ollessa pystyssä tai vaakatasossa.

Anturi kytketään mittalaitteeseen DSI-sovittimen avulla. Anturi toimii jännitesignaalin avulla, joka muutetaan mittalaitteessa halutuksi yksiköksi, tässä tapauksessa asteiksi. Anturissa on kolme johtoa (kuva 15). Mustassa johdossa on BNC-liitin, jonka kautta menee signaalitieto anturin muuttuvasta kulmasta. Tämä ohjaa jännitetiedon muutosta ja siitä syntyvää kulman vaihtelua. Sininen johto on maa-johto. Ruskeaan johtoon tulee mittalaitteen DSI-liitimeltä 10V syöttöjännite anturin herättämistä varten.



KUVA 15. Kulma-anturi (Kuva: Jere Laakso).

Anturi skaalataan mittalaitteeseen mittakortin mukaisilla arvoilla. Kulma-anturin skaala on 0,5V – 4,5V ja $\pm 90^\circ$ (kuva 16).



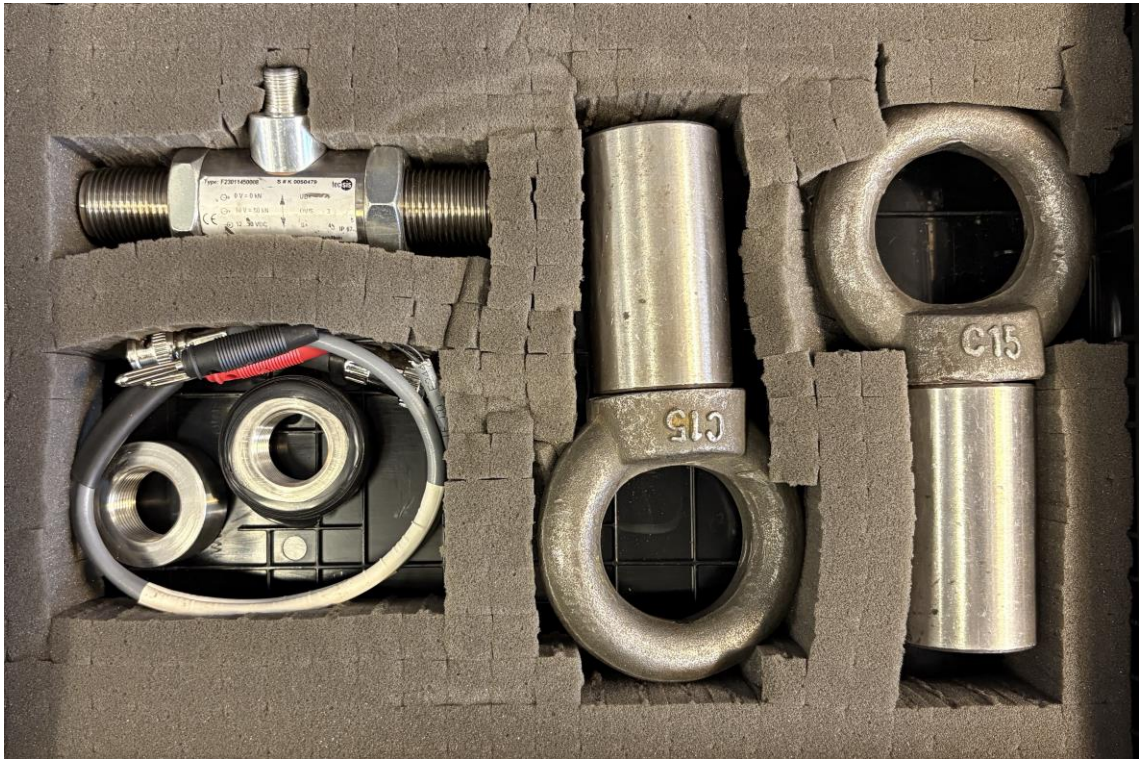
KUVA 16. Kulma-anturi skaalattuna (Kuva: Jere Laakso).

6.2.2 Voima-anturi

Voima-anturit ovat laitteita, jotka mittaavat kappaleeseen kohdistetun voiman määrän ja muuttavat mekaanisen voiman sähköiseksi signaaliksi. Voima-anturi on suunniteltu havaitsemaan jännitys, puristus ja leikkausvoimat (Fisossensor, 2024).

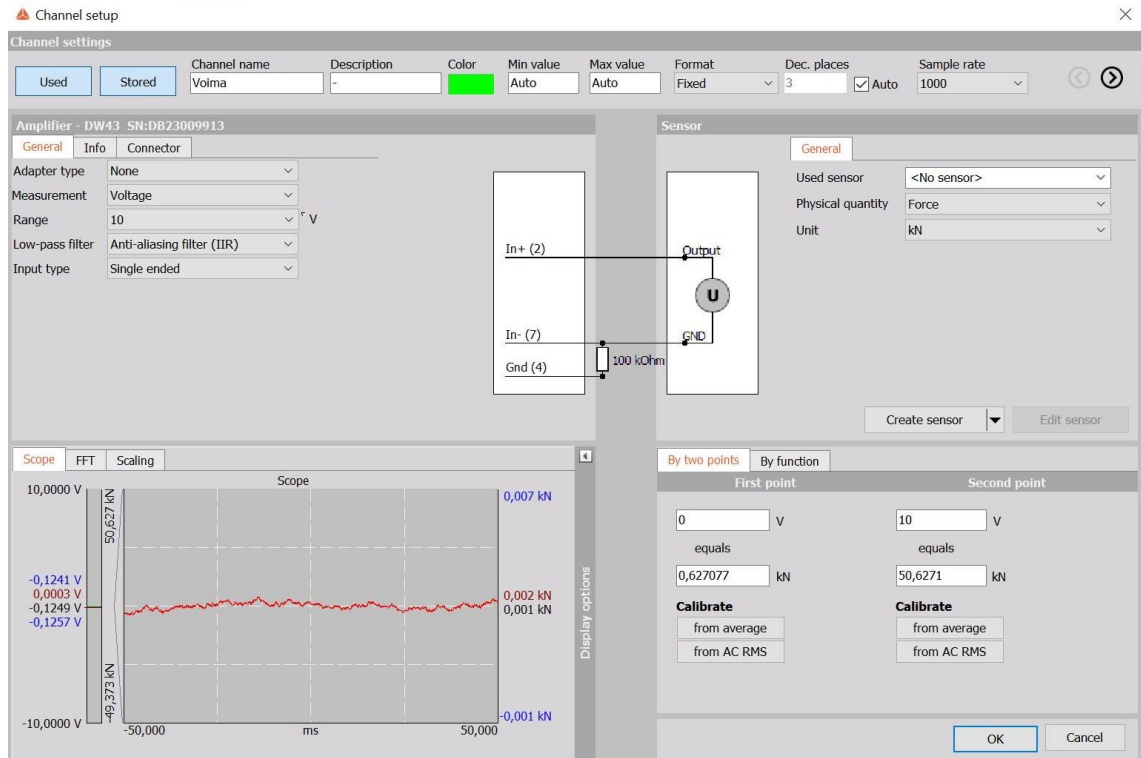
Voima-antureita on erityyppisiä erilaisiin mittauskohteisiin. Jännitysmitta-anturi on yleisin voima-anturi tyyppi. Anturit koostuvat ohuista langoista tai kalvoista, jotka on kiinnitetty substraattiin. Kun anturiin kohdistetaan voimaa, sähköinen vastus muuttuu. Muutosta voidaan mitata Wheatstonen silmukkapiiriin avulla. Piezoresistiiviset käyttävät materiaaleja, joiden sähkövastus muuttuu paineen vaikutuksesta. Kapasitiiviset anturit mittaavat kapasitiivisuuden muutoksia, jotka johtuvat kahden johtavan levyn välimatkan muuttumisesta, kun anturiin kohdistetaan voimaa. Piezoelektriset anturit tuottavat sähkövarauksen, kun anturi altistetaan mekaaniselle jännitykselle. Anturit sopivat hyvin dynaamisiin mittauksiin, koska ne reagoivat nopeasti voiman muutoksiin. Magneettiset anturit hyödyntävät magneettriktio-periaatetta ja anturit havaitsevat magneettisten ominaisuuksien muutokset mekaanisten jännitysten alaisena (Fisossensor, 2024).

Oikaiseva momentti on voiman mittausta. Voimaa mitataan voima-anturin avulla. Kuvassa 17 on 50 kN voima-anturi.



KUVA 17. Voima-anturi. (Kuva: Jere Laakso).

Voima-anturin asetukset laitetaan mittalaitteeseen samalla tavalla, kuin kulma-anturi. Sample ratena käytetään 100. Physical quantity on tässä tapauksessa "Force" ja "Unit" on kN. "First point" ja "Second point" katsotaan anturin mittakortista. Voima-anturin kohdalla näitä ei ole merkitty selkeästi. Kuitenkin tiedetään, että anturin skaalassa jännitteen ollessa 0V, on voima 0 kN. Anturin maksimi voima ilmoitetaan kilogrammoina. Opinnäytetyössä käytettävän anturin maksimi voima on 5000 kg. 5000 kg muutettuna newtoneihin on 49033 N. Anturia skaalattaessa otetaan huomioon kohta "Second point", jossa 10V vastaa 49 kN (kuva 18).



KUVA 18. Voima-anturi skaalattuna (Kuva: Jere Laakso).

6.3 Testisuunnitelma

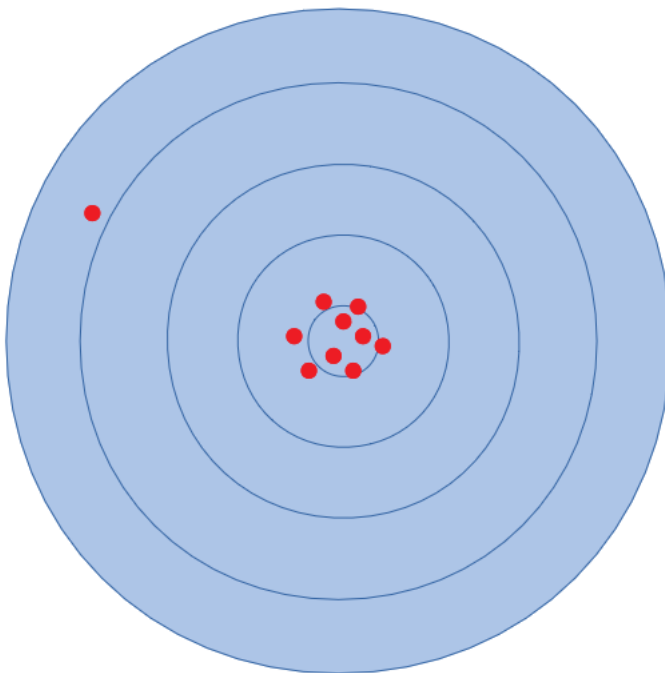
Testityö suoritetaan Patrian testausohjeiden mukaisesti. Testityössä ajoneuvona käytetään Patria AMV miehistönkuljetusajoneuvoa. Testityöstä on tehty erillinen suunnitelma ja raportti, jota ei julkaista tässä opinnäytetyössä.

7 TULOSTEN KÄSITTELY

7.1 Virhetarkastelu

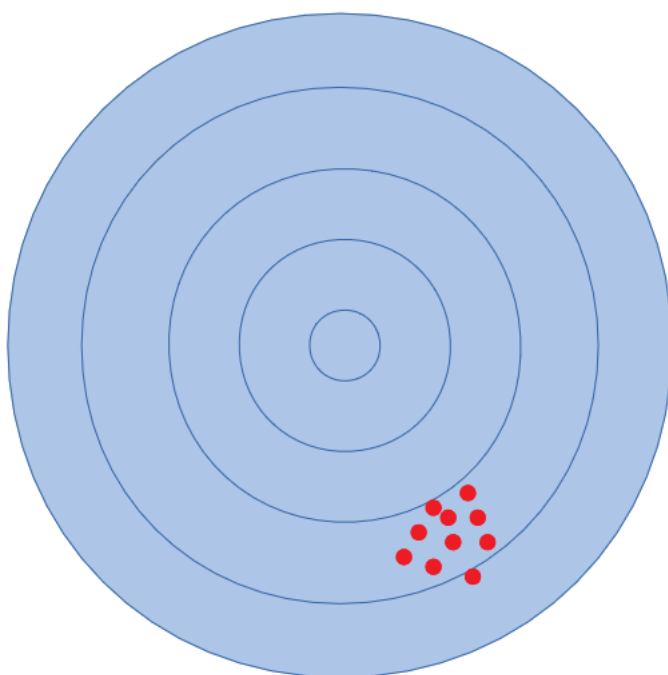
Mittaaminen on lopulta aina mitattavan suureen arviointia. Vaikka mittaus suoritettaisiin kuinka tarkasti, on tulos aina likiarvo. Mittaamiseen ja mittaustulokseen liittyy aina epätarkkuuksia ja virheitä. Virheitä on erilaisia ja ne vaikuttavat eri tavoin mittaustuloksiin (Jyväskylän yliopisto, 2025).

Karkea virhe syntyy esimerkiksi mittalaitteen vääränlaisesta käytöstä tai tulkinasta. Siinä tapauksessa kaikki mittatulokset voidaan havaita karkeaksi virheeksi tai vain yksi mittaustulos. Karkeat virheet kannattaa tulosten analysoinnissa jättää tarkastelun ulkopuolelle. Karkeaa virhettä ei saa kuitenkaan poistaa mittatuloista, koska se olisi tulosten manipulointia. Mittapistettä tai tulosta ei saa tulkita karkeaksi virheeksi, mikäli virheen syy ei ole tiedossa. Karkeita virheitä voidaan välttää tarkalla työskentelyllä, sekä varmistamalla mittalaitteiston toimivuus koko mittaustilanteen ajan. Karkeassa virheessä virhepiste eroaa aina selkeästi muista (Jyväskylän yliopisto, 2025).



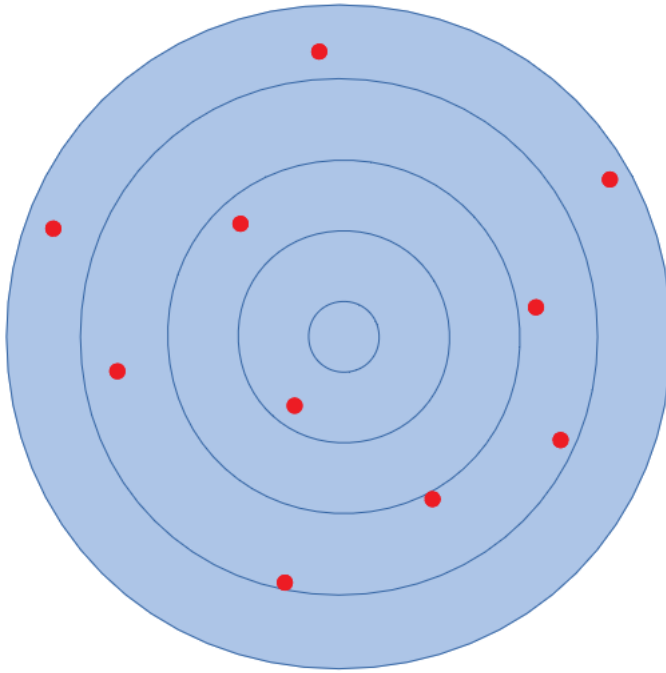
KUVA 19. Karkea virhe (Kuva: Jyväskylän yliopisto).

Systemaattinen virhe tarkoittaa, että epätarkkuutta on aina samaan suuntaan. Esimerkiksi systemaattista virhettä voi aiheutua, kun painoa mitattaessa vaakaa ei ole kalibroitu eli nolla kohtaa ei ole asetettu oikein. Tällöin vaaka näyttää kalibroituvirheen verran väärin. Joskus systemaattista virhettä on vaikea huomata, mutta saman mittauksen toteuttaminen eri menetelmällä voi paljastaa systemaattisen virheen. Systemaattisessa virheessä tulokset asettuvat lähelle toisiaan, mutta ei oikean mittaustuloksen alueelle (Jyväskylän yliopisto, 2025).



KUVA 20. Systemaattinen virhe (Kuva: Jyväskylän yliopisto).

Satunnainen virhe esiintyy kaikissa mittauksissa. Satunnainen virhe havaitaan, kun mitataan sama asia moneen kertaan. Mitattaessa samaa asiaa samalla tavalla, pitäisi mittaustulosten olla aina samat. Kuitenkin saadut arvot heittelevät suuntaan ja toiseen. Satunnaisvirheen poistaminen täysin on mahdotonta, mutta sen pienentäminen on mahdollista. Toistamalla samaa mittausta suuntaan ja toiseen, heittelevät arvot kumoavat toistensa vaikutusta ja näin päästään lähemmäksi oikeaa arvoa. Mittauslaitteen tai mittausmenetelmän kehittäminen ja parantaminen vähentää satunnaista virhettä (Jyväskylän yliopisto, 2025).



KUVA 21. Satunnainen virhe (Kuva: Jyväskylän yliopisto).

Tämän opinnäytetyön testauksen suorittamisessa tulleet virheet voidaan mieltää karkeina virheinä. Näitä olivat ajoneuvon punnituksessa tuleva vaakojen virhe, ajoneuvonmittojen mittauksessa tulleet mittavirheet, antureiden virheet, painon sijoittelusta johtuva virhe, nostoliinasta johtuva virhe ja tuloslaskennassa tullut virhe.

Edellä mainituista kaikki ovat karkeita tai satunnaisia virheitä. Testauksessa ei tapahtunut suuria virheitä, jotka estäisivät todenmukaisten tuloksien saamisen. Kahdessa ensimmäisessä kallistumamittauksessa oikealle puolelle, irtosi kulma-anturin maakaapeli liittimestä. Tämän takia 20kN ja 18kN mittauksissa ei ole kulmatietoa. Tuloksien vertailu on kuitenkin mahdollista, koska muilla mittauksilla kulma-anturi toimi.

Virhetarkastelussa ja virhelaskennassa voima-anturin virheeksi on ilmoitettu 3 % ja kulma-anturin virheeksi 1 %. Työssä virhettä aiheutti myös lisäpainojen massa, koska kaikki hiekkasäkit eivät olleet tasan 25 kg. Lisäksi yksi kilogramma on 9.80665 newtonia. 10 kN mittauksessa ajoneuvon nostaminen vedessä tasan 9860.6 newtoniin olisi ollut miltei mahdotonta. Tästä syystä nostovoimaa oli suhteessa hieman enemmän, kun vastapainoa. Ero oli niin pieni, ettei se vaikuta merkittävästi testituloksiin.

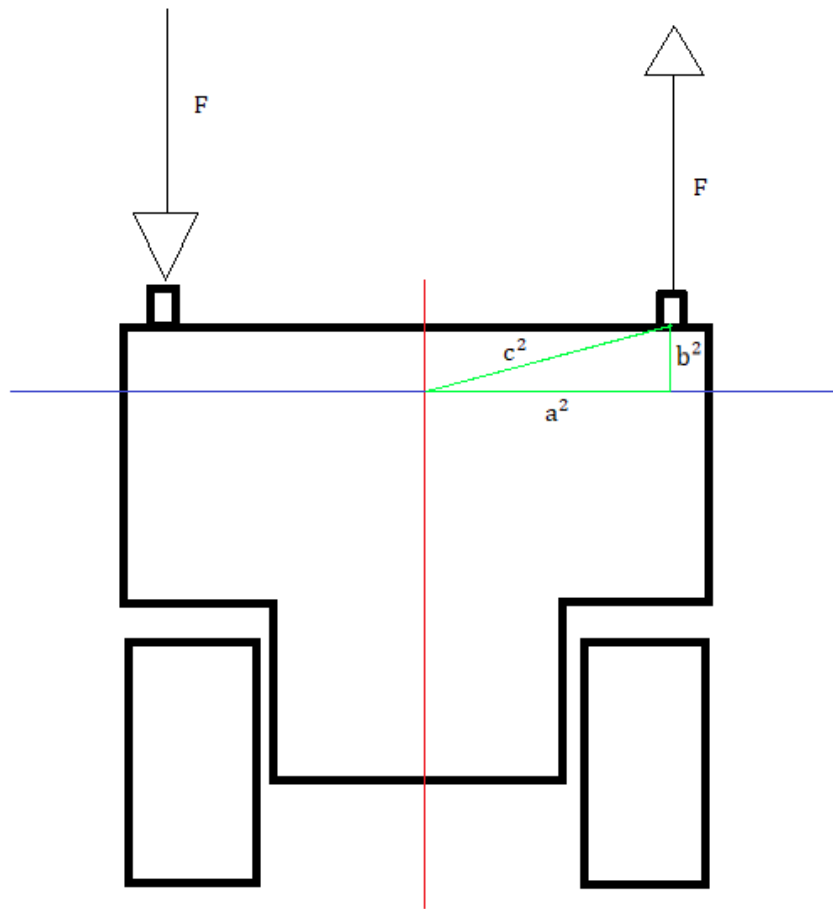
Yksi virheen aiheuttaja työssä oli se, miten ajoneuvoa pidettiin kiinni vedessä. Jos ajoneuvo olisi ollut kiinnitetty kiertoakselin kohdalta olisi tämä lisännyt hieman tulosten tarkkuutta. Tuloslaskennassa keskiakselin paikka sijaitsee keskellä ajoneuvoa.

7.2 Tuloslaskenta

Tuloslaskennassa käydään läpi testissä saadut tulokset. Taulukoissa on esitetty tulokset punaisella korostusvärillä. Tulokset on laskettu testissä saatujen arvojen perusteella ja teorian laskentakaavoja käyttämällä. Testissä ajoneuvoa nostettiin toiselta sivulta katossa olevista nostolenkeistä ja toiselle sivulle lisättiin nostoa vastaava määrä lisäpainoa. Oikaisevan momentin laskemiseksi on tiedettävä voiman vaikutuspisteen ja pyörimisakselin välinen vektori. Vektori saadaan lasketua käyttämällä Pythagoraan lausetta (kaava 25).

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (25)$$

Oletuksena on, että kateetti a^2 on vesiviivan kohdalla vaakatasossa oleva suora, joka mitattu nostolenkistä pitkittäisakseliin. Testityön aikana mitattiin varalaidan korkeus. Varalaidan korkeus on laskennassa kateetti b^2 . Varalaidan mitta, jota laskelmassa käytetään, mitattiin aina nostettavalta sivulta, joten kateetin b^2 pituus kasvoi jokaisen voiman lisäyksen yhteydessä. Tein Exceliin taulukon, joka laskee automaattisesti vektorin c^2 pituuden (kuva 22), kun varalaidan korkeuden syöttää taulukkoon.



KUVA 22. Voiman vaikutuspisteen ja pyörimisakselin välinen vektori vapaakappalekuvassa (Kuva: Jere Laakso).

TAULUKKO 1. Kallistukset vasemmalle (Jere Laakso).

Mittaus	Varalaidan korkeus oik. puoli miehistötilan luukku (m)	Kateetti a^2 (m)	Voiman vaikutuspisteen ja vesiviivan välinen vektori c^2 (m)
1	0,40	1,285	1,346
2	0,425	1,285	1,353
3	0,45	1,285	1,362
4	0,475	1,285	1,370
5	0,50	1,285	1,379
6	0,525	1,285	1,388
7	0,55	1,285	1,398

8	0,55	1,285	1,398
9	0,575	1,285	1,408
10	0,6	1,285	1,418

TAULUKKO 2. Kallistukset oikealle (Jere Laakso).

Mittaus	Varalaidan korkeus oik. puoli miehistötilan luukku (m)	Kateetti a ² (m)	Voiman vaikutuspisteen ja vesiviivan välinen vektori c ² (m)
1	0,4	1,285	1,339
2	0,425	1,285	1,325
3	0,475	1,285	1,325
4	0,475	1,285	1,320
5	0,5	1,285	1,314
6	0,525	1,285	1,305
7	0,575	1,285	1,305
8	0,575	1,285	1,300
9	0,6	1,285	1,297
10	0,625	1,285	1,339

Työssä mitattiin voimaa ja kulmaa, joista ei suoranaisesti saa oikeasevaa momenttia. Oikaiseva momentti lasketaan saaduilla voiman ja kulman tulolla, käyttäen kaavaa 1. Koska työssä lisättiin painoa ajoneuvon kannelle, on laskettava ensimmäisenä lisäpainon vaikutus. Lisäpainon vaikutus lasketaan kaavalla 3.

$$M_{\text{ulk}} = kg \cdot g \cdot r \quad (3)$$

TAULUKKO 3. Ulkoisen voiman arvot vasemmalle kallistaessa.

Mittaus	Lisätty massa (kg)	g (m/s ²)	Vektori c ² (m)	M.ulk (Nm)
1	200	9,81	1,346	2640,9
2	400	9,81	1,353	5309,2
3	600	9,81	1,362	8016,7
4	800	9,81	1,37	10751,8
5	1000	9,81	1,379	13528,0
6	1200	9,81	1,388	16339,5
7	1400	9,81	1,398	19200,1
8	1600	9,81	1,398	21943,0
9	1800	9,81	1,408	24862,5
10	2000	9,81	1,418	27821,2

TAULUKKO 4. Ulkoisen voiman arvot oikealle kallistaessa.

Mittaus	Lisätty massa (kg)	g (m/s ²)	Vektori c ² r (m)	M.ulk (Nm)
1	200	9,81	1,339	2626,3
2	400	9,81	1,325	5201,1
3	600	9,81	1,325	7801,7
4	800	9,81	1,320	10355,9
5	1000	9,81	1,314	12891,3
6	1200	9,81	1,305	15357,2
7	1400	9,81	1,305	17916,7
8	1600	9,81	1,300	20412,2

Ulkoisesti vaikuttavan momentin laskennan jälkeen, pystymme laskemaan oikeasevan momentin määrän. Oikaisevan momentin määrän laskemiseksi käytetään kappaleessa "Metakeskipiste" käytettyä kaavaa 6. Koska kulma-anturi ei toiminut

kahdessa viimeisessä kallistuksessa oikealle kallistaessa, on tulokset vain kahdeksasta mittauksesta. Vasemmalle kallistaessa kulma-anturi toimi jokaisessa mittauksessa.

$$GM = \frac{M_{ulk}}{W \cdot \sin \phi} \quad (6)$$

TAULUKKO 5. GM-varren pituudet.

Mittaus	GM Vasemmalle kallistaessa (m)	GM Oikealle kallistaessa (m)
1	6,70	11,10
2	7,42	9,34
3	7,69	9,26
4	7,38	10,24
5	8,73	8,10
6	9,46	11,66
7	9,26	8,31
8	8,47	8,28
9	8,43	
10	7,72	

7.3 Mittaustulokset

Alla oleva kuvaaja (kuvaaja 3) on Dewesoftin mittaohjelman tulostenkäsittely välilehdeltä. Kuvaajalla havainnoidaan miltä tulokset mittaohjelmassa näytävät. Kuvaajassa on testissä mitattu voima vihreänä käyränä ja ajoneuvon kulma sinisenä käyränä. Kuvaajasta on helppoa havainnoida kulman ja momentin nousu, kun vihreä käyrä alkaa nousemaan. Kuvaajassa mittaus esitetään ajan funktiona.

Olen ottanut jokaisesta mittauksesta voiman ja kulman Excelissä olevaan las-
kenta taulukkoon. Tulokset on käsitelty kappaleen lopussa.



KUVAAJA 3. Dewesoft mittaohjelma tulostenkäsittely kuvaaja (Jere Laakso).

Tulokset on käsitelty erillisessä Excel taulukossa, johon on tehty laskentakaava oikaisevan momentin laskemiseksi. Kaavassa W on ajoneuvon oma paino, johon on lisätty testauksessa käytetty lisäpaino. Tulokset on taulukoitu ja taulukoitujen arvojen perusteella on tehty kuvaajat. Kuvaajissa 4 ja 5 on momentti esitetty kulman funktiona. Ensimmäisessä taulukossa ja kuvaajassa on esitetty tulokset vasemmalle kallistaessa.

Oikaiseva momentti on laskettu käyttämällä kaavaa 1. Kaavassa yksi momentti lasketaan painon, painopisteen ja metakeskipisteen välisen etäisyyden, sekä kallistuskulman avulla.

$$W \cdot \overline{GM}_0 \sin \phi \quad (1)$$

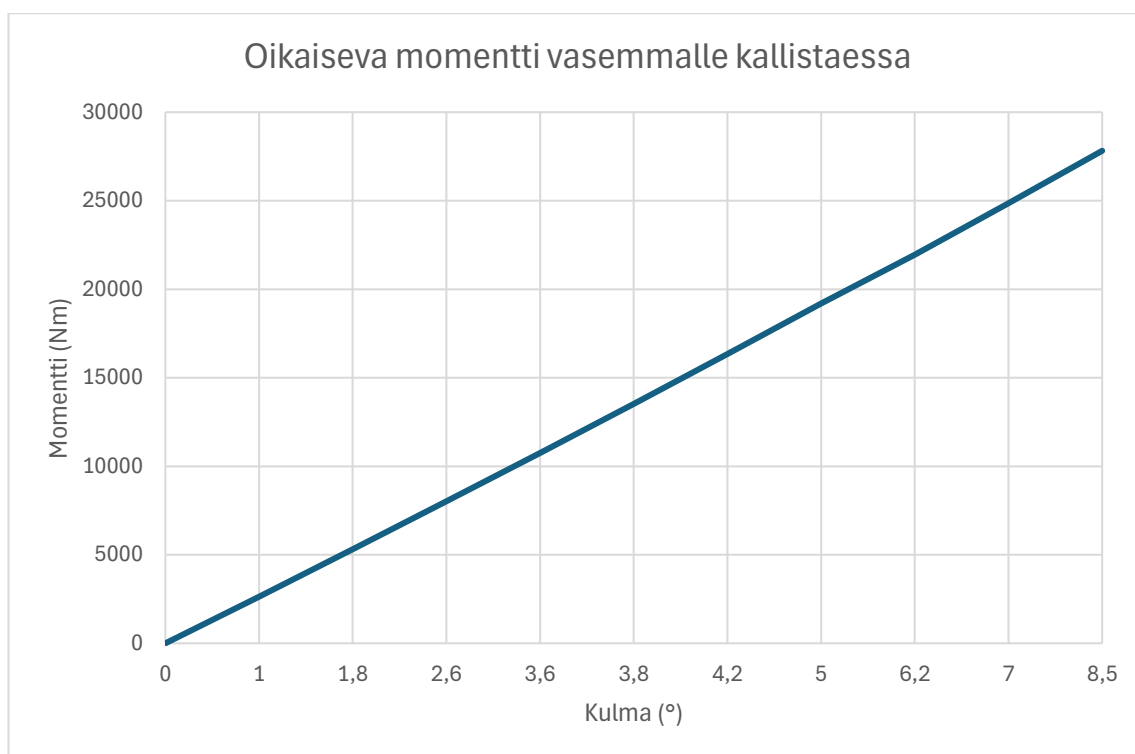
Mittaustuloksista vasemmalle kallistaessa huomataan, että oikaisevan momentin määrä nousee noin 3000 Nm / 2 Kn ulkoisen voiman lisäys. Oikaiseva momentti nousee viimeisessä vasemmalle kallistaessa mittauksessa 27824 Nm, joka on ajoneuvon painoon nähden ja ulkoisen vaikuttavan voiman sijaintiin nähden vaikuttaa paikkaansa pitävältä.

Taulukoihin 6 ja 7 on merkitty mittausnumero, ajoneuvon paino, painopisteen ja metakeskipisteen välinen etäisyys, kulma johon ajoneuvo kallistui lisäpainon vaikutuksesta ja laskettu oikeasevan momentin määrä. Taulukon perusteella on tehty kuvaaja, jossa oikeaseva momentti on esitetty kulman funktiona kuvaajat ja 4 ja 5.

TAULUKKO 6. Mittaukset vasemmalle kallistaessa.

Mittaus	Paino (kg)	GM (m)	θ (°)	Oikaiseva momentti (Nm)
1	22590	6,70	1	2640,9
2	22790	7,42	1,8	5309,2
3	22990	7,69	2,6	8016,7
4	23190	7,38	3,6	10751,8
5	23390	8,73	3,8	13528,0
6	23590	9,46	4,2	16339,5
7	23790	9,26	5	19200,1
8	23990	8,47	6,2	21943,0
9	24190	8,43	7	24862,5
10	24390	7,72	8,5	27821,2

Kuvaajista 4 ja 5 voidaan päätellä, että oikeaseva momentti kasvaa lineaarisesti. Syytä tähän on tasaisesti jakautunut paino, vaakatasossa oleva kellunta asento, pohjan muoto, alhaalla oleva painopiste ja ylhäällä oleva metakeskipiste.

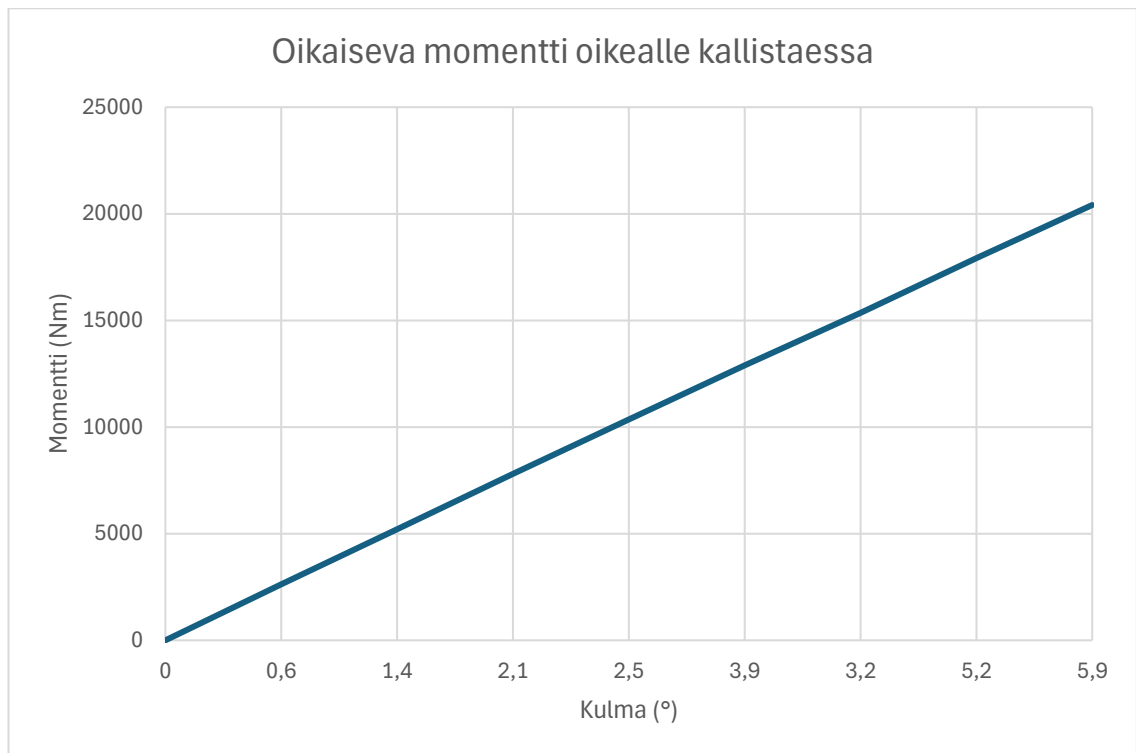


KUVAAJA 4. Oikaiseva momentti vasemmalle kallistaessa (Kuvaaja: Jere Laakso).

Taulukossa 7 on merkittynä mittaukset ja niiden tulokset oikealle kallistaessa. Mittauksia tehtiin kahdeksan kappaletta, koska viimeisissä mittauksissa kulmaanturi ei antanut kulmatietoa. Tulosvertailua mittauksen välillä pystyttiin kuitenkin tekemään. Vertailukelpoisia tuloksia on kahdeksan kappaletta eli riittävästi.

TAULUKKO 7. Mittaukset oikealle kallistaessa.

Mittaus	Paino (kg)	GM (m)	θ (°)	Oikaiseva momentti (Nm)
1	22590	11,10	0,6	2626,3
2	22790	9,34	1,4	5201,1
3	22990	9,26	2,1	7801,7
4	23190	10,24	2,5	10355,9
5	23390	8,10	3,9	12891,3
6	23590	11,66	3,2	15357,2
7	23790	8,31	5,2	17916,7
8	23990	8,28	5,9	20412,2



KUVAAJA 5. Oikaiseva momentti oikealle kallistaessa (Kuvaaja: Jere Laakso).

7.4 Johtopäätökset

Tuloksia vertailtaessa voidaan päätellä, että ajoneuvo kallistui hieman enemmän vasemmalle puolelle. Oletettavasti tämä johtuu voimapakettin sijoittelusta, joka on oikealla edessä.

Taulukoissa 6 ja 7 olevia tuloksia kun vertailtaessa, on oikaseva momentti jokaisessa mittauksessa korkeampi vasemmalle kallistaessa. Suurin vaikuttava tekijä tähän on AMV ajoneuvossa oikealla puolelle edessä sijaitseva voimapaketti. Voimapakettin paino on 2000–2500 kg välillä. Tämä paino lisää huomattavasti oikaisevaa momenttia vasemmalle kallistaessa.

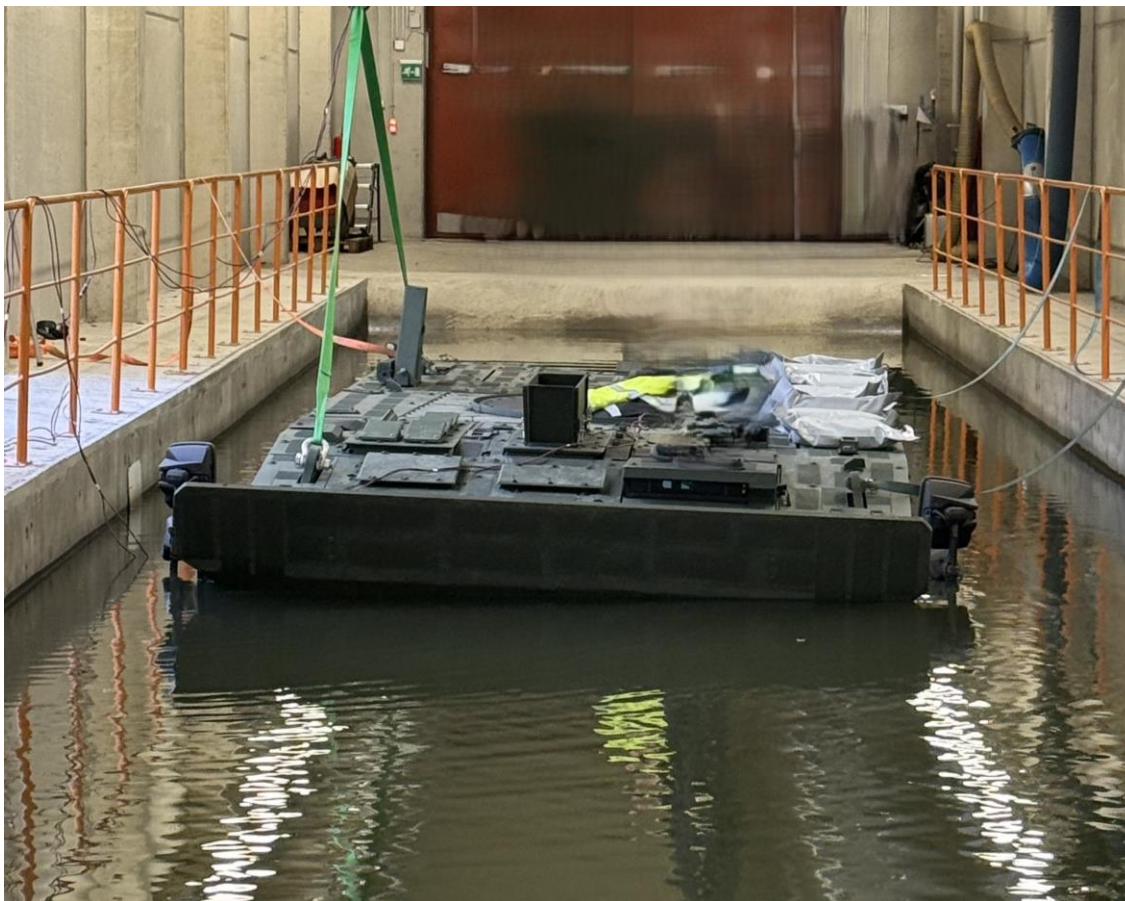
Testin aikana ajoneuvo kallistui maksimissaan 8,5 asteen kulmaan. Kulma on pieni ja voidaan päätellä, että ajoneuvo on vakaa uidessa. Tietenkin on otettava huomioon, että kyydissä ei ollut taistelijoita varusteineen, tai katolle ei ollut asennettu mitään asejärjestelmää. Nämä tekijät olisivat muuttaneet painopistettä ja massakeskipistettä, joka olisi vaikuttanut oikaisevaan momenttiin.

Pyöräajoneuvossa uintivakavuutta lisää rungon muoto ja renkaat (kuva 23). Vedessä kelluessa kaikki kahdeksan pyöräasemaa ovat ulosjoustossa. Tämä lisää uintivakavuutta huomattavasti. Tela-ajoneuvossa ei ole pyöräasemia, jotka laskeutuisivat ulosjoustoon, tästä syystä tela-ajoneuvo on vaapperampi, eli meta-keskipiste on lähempänä painopistettä. Tela-ajoneuvossa rungon muodolla ja painon sijoittelulla on suuri merkitys. Tela-ajoneuvon kohdalla oikeaseva momentti on myös matalampi.

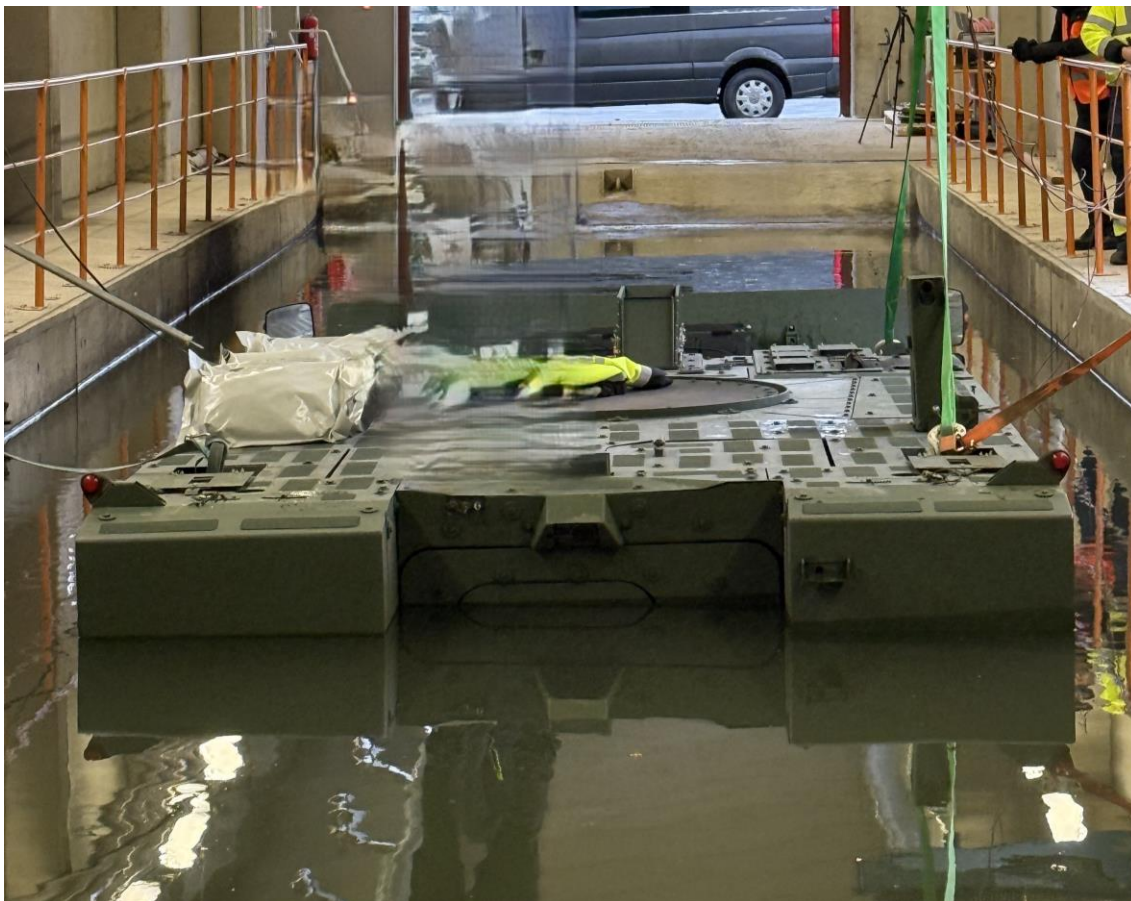


KUVA 23. AMV ajoneuvon kori ja pyöräasemat (STV GROUP).

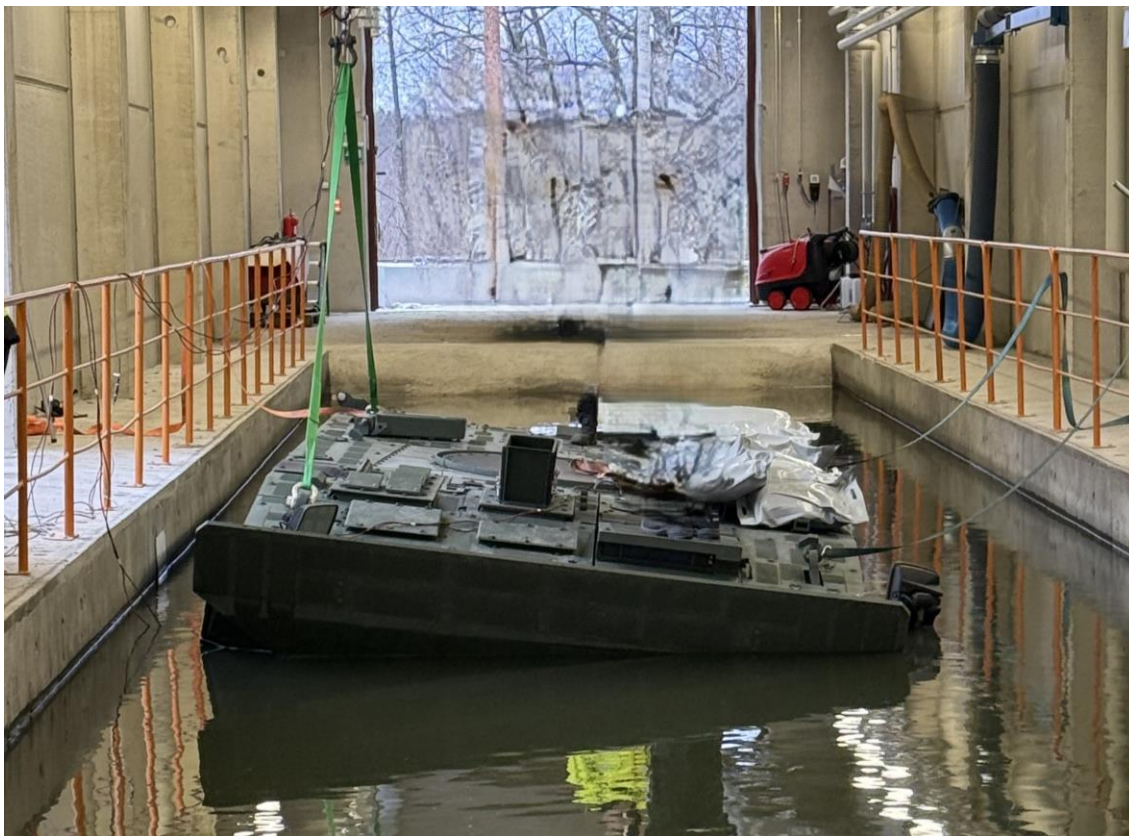
Testin aikana otetuista valokuvista voidaan havainnoida ulkoisen voiman vaikutus ajoneuvon kallistuskulmaan. Kuvissa 24 ja 25 on mittaus numero viisi vasemmalle kallistaessa, molemmista suunnista. Kuvissa 26 ja 27 on mittaus numero kymmenen vasemmalle kallistaessa, molemmista suunnista. Kuvia vertaillaessa on kallistuskulma huomattavasti suurempi kuvissa 26 ja 27. Tästä voidaan jo päätellä oikeasevan momentin olevan isompi kuvissa 26 ja 27 kuin kuvissa 24 ja 25.



KUVA 24. Mittaus numero viisi edestä päin vasemmalle kallistaessa (Kuva: Sakari Mökkälä).



KUVA 25. Mittaus numero viisi takaa päin vasemmalle kallistaessa (Kuva: Sakari Mökkälä).



KUVA 26. Mittaus numero kymmenen edestä päin vasemmalle kallistaessa (Kuva: Sakari Mökkälä).



KUVA 27. Mittaus numero kymmenen takaa päin vasemmalle kallistaessa (Kuva: Jere Laakso).

Kuvassa 28 on Patrian ohjeistuksen mukaisesti suljettu työskentelyalue. Työturvallisuus on Patrialla ehdoton kaikissa tilanteissa ja siihen panostetaan jatkuvasti. Vaikka ei työskennelty kovin lähellä kulkuväyliä, oli työskentelyalue suljettava asianmukaisesti. Nosturiauton työskentelyalue oli suljettu lippusiimalla ja sulkupylväillä. Lippusiiman sisäpuolelle ei ollut asiaa muilla, kun testisuorituksessa mukana olevilla.



KUVA 28. Nosturiauto (Kuva: Jere Laakso).

8 POHDINTA

Syksyllä 2024 minulle tarjottiin opinnäytetyön aihetta Hämeenlinnan Patrialta. Otin empimättä aiheen vastaan, koska Patria oli minulle tuttu työpaikka ja Patrialla valmistettavat tuotteet ovat mielenkiintoisia. Vaikka oikeaseva momentti ei ollut käsitteenä kovin tuttu, lähdin heti syksyllä selvittämään siihen liittyvän aineiston hankintaa. Aineistoa löytyä verkosta englanniksi todella paljon, mutta suomeksi hieman vähemmän. Kirjastosta löytyi kirja ”Laivan kelluvuus ja vakavuus”, jonka pohjalta teoria on pitkälti kirjoitettu.

Talvella 2025 lähdin suunnittelemaan työtä ja tutustumaan oikeasevaan momenttiin, sekä muihin ajoneuvon uintiturvallisuuteen liittyviin asioihin. Tutustuessani aiheeseen huomasin, että oikeasevalla momentilla on todella iso merkitys uintiturvallisuuden kannalta.

Lähdin toteuttamaan työtä niin, että otin aluksi selvää laivojen oikeasevasta momentista ja sen vaikutuksesta vakavuuteen. Ymmärrettyäni miten oikeaseva momentti vaikuttaa laivoihin, aloin miettimään sen vaikutusta sotilasajoneuvoon. Koska kölin muoto on täysin erilainen, oli asiaan perehdyttävä tarkemmin. Laivan kelluvuus ja vakavuus - kirjasta löytyikin hyvin tietoa kaikesta uintivakavuuteen liittyvästä.

Teoriaosuuden kirjoittaminen vei suurimman osan ajasta. Halusin, että tekemäni työ perustuu hyvään teoriaan, josta saattaa tulevaisuudessa olla apua jollekin toiselle. Koska fysiikka perustuu kaavoihin, teorian kirjoituksessa riitti yksi hyvä lähde, josta sain poimittua kaikki tarpeelliset kaavat.

Patrialla panostetaan työturvallisuuteen ja tässäkin työssä työturvallisuus oli prioriteetti yksi. Tiivistin yleisellä tasolla Patrian uintiturvallisuusohjeet. Vaikka ohjeet olivat 19 vuotta vanhat, ovat ne pysyneet samana tähän päivään asti. Työtä suorittaessa ei myöskään tingitty turvallisuudesta ja sen huomasi, koska yhtäkään läheltä piti tilannetta ei päässyt syntymään.

Halusin käsitellä työssäni myös simulointia. Oikaiseva momentti on aikaisemmin määritetty simuloimalla, joten se kulkee mukana tässä työssä. Työhön olisi ollut hyvä saada simulointitulokset vertailtavaksi käytännön testien tulosten kanssa. Aika ei olisi riittänyt työn suoritusajan puitteissa tehdä käyttämästämme ajoneuvosta simulointimallia. Eikä jonkun toisen tekemä simulointimalli ei olisi tuonut työlle lisäarvoa.

Työssä suurin painopiste on mittaamisessa. Mittaamisesta kirjoitin ns. muistiinpanoina, joita voin tarvittaessa jatkossa itsekin hyödyntää. Dewesoftin mittalaitteet olivat minulle nimeltä tuttuja, mutta käyttöliittymä ei. Aloitin heti teoriaosuiden kirjoittamisen jälkeen tutustumaan käyttöliittymään ja luomaan mittauksessa käytettävää mittaohjelmaa. Parin päivän käytön jälkeen sain luotua selkeän mittaohjelman, jolla mittaus pystyttiin suorittamaan. Mittaohjelmaa luodessani tutustuin erilaisiin antureihin ja niiden kytkentöihin.

Mittaaminen suoritettiin laadittujen työohjeiden mukaan. Mittaustilanne meni kuten suunnitelmassa oli kirjoitettu. Ajoneuvo pysyi paikallaan mittauksen aikana, eikä osunut altaan reunoihin. Ennen työn suoritusta pohdin, millä saadaan pidettyä ajoneuvo paikallaan vedessä ollessa. Tämä saatiin kuitenkin ratkaistua kiinnittämällä kuormaliinat katolla oleviin nostolenkkeihin. Tarvittaessa ajoneuvoa liikuteltiin kuormaliinojen avulla, jotta se pysyi keskellä allasta.

Kahdessa mittauksessa ei saatu kulmatietoa, koska kulma-anturin jatkojohdosta irtosi maajohto tietokoneen puoleisesta liittimestä. Johto saatiin nopeasti korjattua ja mittauksia jatkettua.

Kokonaisuudessa mittaus meni suunnitelmien mukaisesti ja kaikki toimivat kuten oli testisuunnitelmaan kirjoitettu. Jatkoa ajatellen olisi hyvä tehdä jonkinlaiset jiggit, joilla ajoneuvo kallistuisi kaikissa tilanteissa samasta kohdasta eli keskiakselinsa ympäri. Tällä saisi tarkempia tuloksia tuloslaskennassa.

Tulostenkäsittelyn suoritin Excelissä. Excelliin tein laskentataulukot, jotka mahdollistivat tuloksien laskennan nopeammin ja yksinkertaisemmin. Laskentataulukot mahdollistivat kaikkien mittausten tuloslaskennan yhtäaikaisesti ja taulukoita on mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa, mikäli tulee samantyyppinen mittaus.

Työssä päästiin asetettuihin tavoitteisiin ja oikeaseva momentti on tämän myötä mahdollista mitata. Kaikki halutut asiat saatiin selvitettyä ja tulokset laskettua oikein.

Yhteenvedona koko opinnäytetyö oli opettavainen ja todella mielenkiintoinen suorittaa. Työtä tehdessä tuli vastaan monta uutta asiaa ja opin paljon aiheesta. Aiheeseen syvennyttyäni huomasin, kuinka paljon asioita uintitilanteessa tapahtuu. Opinnäytetyö antoi myös hyvää pohjaa tulevaisuudelle ja siihen mitä tämänkaltaiset työtehtävät ovat. Haluan kiittää kaikkia, jotka auttoivat työn suorituksen aikana ja erityisesti Hämeenlinnan Patria Land Oy:tä, joka antoi aiheen työhön ja mahdollisti työn toteutuksen.

LÄHTEET

- Blomberg, O. 2003. *Yhteissisusta Vanajan ja Sisun kautta Patriaan*. Karisto Oy
- Britannica. n.d. metacentre. Viitattu 26.2.2025. <https://www.britannica.com/science/metacentre>
- Dewesoft. 2025. DEWE-43A 8-kanavainen USB-tiedonkeruujärjestelmä (DAQ). Viitattu 19.2.2025. <https://dewesoft.com/fi/tuotteet/dewe-43>
- Dewesoft. 2025. Tietoa meistä - Me olemme Dewesoft! Viitattu 19.2.2025. <https://dewesoft.com/fi/meista>
- EP LOGISTICS. 2023. Simulointi logistiikkasuunnittelun työkaluna. Viitattu 11.2.2025. <https://ep.fi/fi/simulointi-logistiikkasuunnittelun-tyokaluna/>
- Fibossensor. 2024. How Do Force Sensors Work? Viitattu 3.3.2025. <https://www.fibossensor.com/how-do-force-sensors-work.html>
- Laivatekniikan laboratorio. ei pvm. Amfibioajoneuvojen uppoamattomuus- ja vakavuuskriteeri. Patrian sisäinen dokumentti. Vaatii käyttöoikeuden. Viitattu 6.2.2025
- Jyväskylän yliopisto. 2025. 2. Mittaaminen. Viitattu 23.4.2025. <https://tim.jyu.fi/view/tau/toisen-asteen-materiaalit/fysiikka/fy1-1/mittausvirheet#mittaaminen>
- Lensu, T. 2006. YLEISOHJE KELLUNTA- JA KAHLAUSKOKEELLE UINTIKOESTUSALTAASSA. Patria sisäinen dokumentti. Vaatii käyttöoikeuden. Viitattu 3.2.2025
- Matusiak, J. 1995. Laivan kelluvuus ja vakavuus. 4. korj. painos. Hakapaino oy.
- Merenkululaitos. 1972. MERENKULKUHALLITUKSEN MÄÄRÄYKSET ALUSTEN VAKAVUUDESTA. Valtion painatuskeskus. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/141752/mkl78.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nato. 2022. Standardization. Viitattu 1.2.2025. https://www.nato.int/cps/su/natohq/topics_69269.htm
- Salminen, T. Tran, T. 2021. Noste. Omaan tahtiin fysiikkaa. Viitattu 3.3.2025. <https://fys.omaantahtiin.com/etusivu/fysiikka-4/noste>
- Onnettomuustutkintakeskus. 1999. Kahden kalastajan ja troolari LEAn katoaminen Selkämerellä 12.4.1999. Viitattu 26.2.2025. https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/vesiliikenneonnettomuuksientutkinta/1999/b21999m_tutkintaselostus/b21999m_tutkintaselostus.pdf

Patria. 2023. Vuosikertomus. Viitattu 20.1.2025. <https://patria.contenthub.fi/Ni-boWEB/patria/digipa-per.do?uuid=17383964&ticket=38d9190d9f8de172609d38a0b70c1626&lang=en&page=4>

Patria. 2025. Patria-konsernin talouskatsaus 2024 – ennakkotiedot. Viitattu 7.4.2025. <https://www.patriagroup.com/newsroom/news/2025/patria-konsernin-talouskatsaus-2024-ennakkotiedot>

Patria. ei pvm. Konsernirakenne ja osakkeenomistajien äänioikeudet. Viitattu 16.1.2025 <https://www.patriagroup.com/patria-in-finland/hallinnointi/konsernirakenne-ja-osakkeenomistajien-aanioikeudet>

Peda.net. ei pvm. Momentti. Viitattu 17.4.2025. <https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/lukiot/espoo/eyl/fysiikka/hellsten/arkisto-22-23/kertauskurssi23/ee1f093ccb4f11eaae06509a4c62f386/ce90ea8ecb5111eab23d509a4c62f362>

Posa, A. 2014. SULAUTETTUUN OHJAUSJÄRJESTELMÄÄN PERUSTUVAN HISSIN PIENOISMALLIN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS. Kandidityö Lappeenrannan teknillinen yliopisto. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/96701/Kandidaatinty%c3%b6_Atte%20Posa.pdf?sequence=2

Reserviläinen. 2018. Patria AMV – vaivihkaa vientimenestykseksi. Viitattu 16.1.2025. <https://reservilainen.fi/patria-amv-vaivihkaa-vientimenestykseksi/>

Reserviläinen. 2018. Patrian uusi ajoneuvo 6×6 on Pasin sukua. Viitattu 20.1.2025. <https://reservilainen.fi/patrian-uusi-ajoneuvo-6x6-on-pasin-sukua/>
<https://satl.fi/2023/12/05/patria-6x6/>

Salonen, T. Director. Test Engineering. 2025. Haastattelu 7.4.2025. Patria Land Oy Hämeenlinna.

Sotilasajoneuvolaki 3.3.2023/332. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230332#Pidm46263581238048>

4.3 Vapaakappalekuva (johdanto). 2024. Youtube video. ondemaths. Julkaistu 31.5.2024. Viitattu 30.1.2025 <https://www.youtube.com/watch?v=DKEoub6-pew>

Wärtsilä. 2025. Righting arm GZ. Viitattu 22.1.2025. <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/righting-arm>

KUVAT

Jyväskylän yliopisto. 2025. Virheet valokuva. <https://tim.jyu.fi/view/tau/toisen-asteen-materiaalit/fysiikka/fy1-1/mittausvirheet#X6uj2BOMSZaD>

Lensu, T. 2006. YLEISOHJE KELLUNTA- JA KAHLAUSKOKEELLE UINTIKOESTUSALTAASSA. Valokuva. Patria sisäinen dokumentti. Vaatii käyttöoikeuden.

Matusiak, J. 1995. Laivan kelluvuus ja vakavuus. 4. korj. painos. Valokuvat. Hakapaino oy.

Onnettomuustutkintakeskus. 1999. B2/1999M Kahden kalastajan ja troolari LEAn katoaminen Selkämerellä 12.4.1999 s.19. https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/vesiliikenneonnettomuuksientutkinta/1999/b21999m_tutkintaselostus/b21999m_tutkintaselostus.pdf

Patriagroup. 2021. Patria 6X6 valokuva. <https://www.patriagroup.com/news-room/news/2021/patria-showcasing-6x6-vehicle-and-other-state-of-the-art-products-at-dsei>

Patriagroup. 2024. Patria AMV valokuva. <https://www.patriagroup.com/news-room/news/2024/patria-at-the-international-armoured-vehicles-conference-london-2024>

Patriagroup. 2024. Patria FAMOUS valokuva. <https://www.patriagroup.com/patria-in-finland/media/patria-magazine/tekniikka/eurooppalainen-famous-ajoneuvohanke-etenee-konseptin-tarkasteluvaiheeseen>

Peda.net. 3.4 Momentti kuva. <https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/lukiot/es-poo/eyl/fysiikka/hellsten/arkisto-22-23/kertaus-kurssi23/ee1f093ccb4f11eaae06509a4c62f386/ce90ea8ecb5111eab23d509a4c62f362>

STV GROUP. n.d. A new armoured vehicle for the Czech Army? Valokuva. <https://www.stvgroup.cz/en/news/a-new-armoured-vehicle-for-the-czech-army>

Mökkälä, S. 2025. Testaustilanne. Valokuvat. Patria