



Lennonopetuksen vaatimukset lentosimulaattorille

Joona Saastamoinen

OPINNÄYTETYÖ
Lokakuu 2021

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Lentokonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Lentokonetekniikka

SAASTAMOINEN, JOONA:
Lennonopetuksen vaatimukset lentosimulaattorille

Opinnäytetyö 69 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Lokakuu 2021

Tampereen yliopiston Hervannan kampukselle valmistui vuoden 2021 keväällä lentosimulaattori, jolla voidaan simuloida useita yksi- ja kaksimoottorisia lentokoneita. Tässä opinnäytetyössä käsitellään lentosimulaattoria yksimoottorisen Cessna 172:n osalta. Lentosimulaattorin (jatkossa C172-lentosimulaattori) perustana on oikean Cessna 172:n ohjaamo ja siihen asennettu laitteisto sekä lentosimulaattoriohjelma tukevat kyseistä lentokonetyyppiä parhaiten.

Opinnäytetyössä perehdytään vaatimuksiin, joita Euroopan lentoturvallisuusvirasto on määrännyt lentokoulutuslaitteille. Näiden vaatimusten perusteella tehtiin arvio C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuudesta. Opinnäytetyössä laadittiin Euroopan lentoturvallisuusviraston ohjeita mukailien testilento-ohjelma, joka luo kattavan kuvan C172-lentosimulaattorin tasosta tällä hetkellä vahvuuksineen ja heikkouksineen. Testilento-ohjelmassa verrattiin C172-lentosimulaattorissa simuloidun Cessna 172:n käyttäytymistä oikeaan Cessna 172:een eri lentotiloissa. Testilento-ohjelma sisälsi lentämisen lisäksi kohtia simulaattorin ääni- ja kuvajärjestelmien testauksesta.

Testilento-ohjelmasta saatujen tulosten perusteella C172-lentosimulaattori on hyvin lähellä Euroopan lentoturvallisuusviraston määrittämää FNPT I -hyväksymistasoa. Tällaisen hyväksymistason lentokoulutuslaitteet on tarkoitettu lento- ja navigointimenettelytapojen koulutukseen. C172-lentosimulaattorilla voidaan mallintaa myös koko lentotoiminta, mutta parhaimmillaan se on yksittäisten proseduurien koulutuksessa. C172-lentosimulaattorin käyttötarkoitus on perehdyttää lentotekniikan opiskelijoita lentämiseen. Siihen tarkoitukseen C172-lentosimulaattori on erittäin pätevä laite, ja opiskelijat saavat hyvin todentuntuisen lentokokemuksen simulaattoriolosuhteissa.

Testilento-ohjelman aikana havaittiin myös ongelmia ja parannuskohteita C172-lentosimulaattorissa, esimerkiksi lennonvalvojan pisteen osalta. Näistä tehtiin listaus, jonka perusteella laadittiin parannusehdotuksia kyseisille kohteille. Opinnäytetyössä esitetään jatkotutkimusaiheiksi objektiivista testausta sekä liikejärjestelmän lisäämistä C172-lentosimulaattoriin.

Asiasanat: lentokoulutuslaite, lentosimulaattori, cessna 172, lentokoulutuskelpoisuus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Option of Aircraft Engineering

SAASTAMOINEN, JOONA:
Flight Training Requirements for a Flight Simulator

Bachelor's thesis 69 pages, appendices 5 pages
October 2021

In spring 2021, a flight simulator named C172 was built for Tampere University. The C172 flight simulator enabled simulating several single- and twin-engine aircrafts. This thesis focused on a single-engine Cessna 172. The purpose of this thesis was to find out how the C172 flight simulator fulfilled the requirements for Flight Simulator Training Devices (FSTD) set by the European Union Aviation Safety Agency (EASA).

The data were analysed using a test flight program which was a combination of validation tests and subjective tests set by the EASA. The test flight program was used to compare the C172 simulated aircraft to a true Cessna 172.

In addition to the current level of the C172 flight simulator, the results identified areas for further improvement. The results suggest that the C172 flight simulator is very close to the FNPT I qualification level set by the EASA. It is important to note that these results are not confirmed by any aviation authority. However, the main use of the C172 is to introduce aircraft engineer students to flying. For this purpose the C172 is a competent flight training device.

Key words: flight training device, flight simulator, cessna 172

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	SYNTEETTISET LENTOKOULUTUSLAITTEET	10
	2.1 Full Flight Simulator	10
	2.2 Flight Training Device	12
	2.3 Flight and Navigation Procedures Trainer	14
	2.4 Basic Instrument Training Device.....	15
3	FSTD-HYVÄKSYMISTODISTUKSEN HAKUPROSESSI	17
	3.1 Hyväksymisen hakeminen synteettisille lentokoulutuslaitteille	17
	3.2 FSTD:n tarkastus ja hyväksyminen.....	18
	3.3 FSTD-hyväksyntätodistuksen ylläpitäminen.....	18
4	C172-LENTOSIMULAATTORIN RAKENNE	19
	4.1 Cessna 172:n ohjaamo	19
	4.2 Lennonohjauspaneeli	21
	4.3 Ohjaimet.....	21
	4.4 Moottorien tehonsäätö	23
	4.5 Äänentoisto	23
	4.6 Projektorit ja valkokangas	24
	4.7 Tietokone	25
	4.8 X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelma.....	25
5	C172-LENTOSIMULAATTORIN OMINAISUUDET	27
	5.1 Lennon ja lentokonejärjestelmien simulointi X-Plane 11:llä.....	28
	5.1.1 Aerodynaaminen mallinnus	28
	5.1.2 Lento-olosuhteet ja lentokentät	29
	5.1.3 Vaurioiden mallintaminen	30
	5.2 Ohjaimet ja tehonsäätö	31
	5.3 Lennonohjauspaneelin toiminta	33
	5.3.1 Mittarit.....	33
	5.3.2 Avioniikka	38
	5.3.3 Kytkimet.....	40
6	C172-LENTOSIMULAATTORIN TARKASTELU JA TESTAUS	43
	6.1 Yleinen tekninen tarkastelu	43
	6.2 Testilento-ohjelma.....	45
	6.2.1 Maassa ennen nousua	46
	6.2.2 Rullaus	47
	6.2.3 Lentoonlähtö.....	47
	6.2.4 Nousu	48

6.2.5 Matkalento	48
6.2.6 Mittarilähestyminen ja -laskeutuminen.....	49
6.2.7 Näkölähestyminen	51
6.2.8 Laskeutuminen	52
6.2.9 Toimet maassa lennon jälkeen	53
6.2.10 Näyttöjärjestelmä ja lentokentän mallinnus	53
6.2.11 Lennonvalvojan ohjaamat	55
6.2.12 Äänijärjestelmä	55
6.2.13 Lentokoneen järjestelmät	55
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	57
7.1 C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuus	57
7.2 Parannuskohteet ja -ehdotukset.....	59
7.3 Jatkotutkimusaiheita.....	61
LÄHTEET.....	64
LIITTEET	65
Liite 1. C172-lentosimulaattorin testilento-ohjelma	65
Liite 2. Parannuskohteet ja -ehdotukset.....	69

LYHENTEET JA TERMIT

AI	Attitude Indicator
ADF	Automatic Direction Finder
ATC	Air Traffic Control
ATO	Approved Training Organisations
BITD	Basic Instrument Training Device
CS-FSTD(A)	Certification Specifications for Aeroplane Flight Simulation Training Devices
DH	Decision Height
DME	Distance Measuring Equipment
EADI	Electronic Attitude Direction Indicator
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EGT	Exhaust Gas Temperature
ESL	Equipment and Specifications List
ET	Elapsed Time
FAA	Federal Aviation Administration
FFS	Full Flight Simulator
FNPT	Flight and Navigation Procedures Trainer
FSTD	Flight Simulator Training Devices
FT	Flight Time
FTD	Flight Training Devices
GS	Glide Slope
IAS	Indicated Air Speed
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
IOS	Instructor Operating Station
KIAS	Knots-Indicated Air Speed
LOC	Localizer
LT	Local Time
MQTG	Master Qualification Test Guide
MCC	Multi-Crew Cooperation
MKR	Marker
MTBF	Mean Time Between Failures

NDB	Non-Directional Beacon
NM	Nautical Mile
OTD	Other Training Device
PAR	Precision Approach Radar
PPL	Privat Pilot License
QTG	Qualification Test Guide
RPM	Revolutions Per Minute
TAC	Terminal Area Charts
UPTR	Upset Prevention and Recovery Training
UT	Universal Time
VLOC	VOR / Localizer
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range
V_{ne}	Never Exceed Speed
XPDR	Transponder

1 JOHDANTO

Tampereen yliopiston Hervannan kampukselle valmistui vuoden 2021 keväällä lentosimulaattori, jolla voidaan mallintaa useita yksi- ja kaksimoottorisia lentokoneita. Lentosimulaattorin perustana oli oikean Cessna 172:n ohjaamo, johon laitteisto asennettiin. Näin ollen simulaattoria kutsutaan tässä opinnäytetyössä Cessna 172:sta yleisesti käytössä olevan lyhenteen mukaan C172-lentosimulaattoriksi. Lentosimulaattorin käyttötarkoitus tulee olemaan Tampereen korkeakoulu-yhteisön lentotekniikan opiskelijoiden perehdyttäminen lentämiseen mahdollisimman aidon lentotuntuman lentokoulutuslaitteella.

Ilmailuala on erittäin säädeltyä ja näin on myös lentokoulutuslaitteiden osalta. Tässä opinnäytetyössä selvitetään kaikkien synteettisten lentokoulutuslaitteiden keskeisimmät vaatimukset lentokoulutukseen. Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä arvio C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuudesta näiden vaatimusten pohjalta. Työssä käydään läpi myös hakuprosessi, jonka lentokoulutuslaitteiden hyväksyminen lentokoulutukseen Suomessa vaatii.

Opinnäytetyössä tehdään C172-lentosimulaattorille testilento-ohjelma, jonka tuloksista saadaan selville simulaattorin lentokoulutuskelpoisuus. Testilento-ohjelman tarkoitus on luoda kattava kuva C172-lentosimulaattorin tasosta tällä hetkellä vahvuuksineen ja heikkouksineen. Testilento-ohjelma on tehty Euroopan unionin lentoturvallisuusviraston (EASA) määräyksiä mukailleen ja siinä arvioidaan lentosimulaattorin toimintaa verrattuna oikeaan Cessna 172:een. Testilento-ohjelma sisältää myös kommenttiosion, jossa tehdään huomioita simulaattorin ja oikean lentokoneen eroavaisuuksista. Eroavaisuuksista laaditaan lista ja pohditaan kuinka näitä kohtia voisi parantaa, jotta C172-lentosimulaattorista tulisi entistäkin parempi.

Opinnäytetyö rajataan C172-lentosimulaattorin osalta koskemaan Cessna 172 -lentokonetyypin mallintamista, joten saadut tulokset eivät välttämättä päde muihin lentokonetyyppeihin. C172-lentosimulaattorille ei haeta virallista hyväksymistä lentokoulutuslaitteeksi, koska se ei ole tarpeellinen käyttötarkoitukseensa

nähdän. Näin ollen tässä opinnäytetyössä saadut tulokset eivät ole minkään ilmailuviranomaisen hyväksymiä.

Ilmailun yleiskieli on englanti, joten tässä opinnäytetyössä käytetään paljon englanninkielisiä termejä. Näitä termejä ei ole suomennettu, koska suomennokset eivät välttämättä olisi tarpeeksi tarkkoja ja ne voisivat aiheuttaa sekaannuksia ja väärinymmärryksiä. Termien lyhennyksiä käytetään paljon ja niiden selvennykset löytyvät kohdasta Termit ja lyhenteet sivuilta 6–7.

Ohjaajana opinnäytetyössä toimi Olavi Kopponen. Lentosimulaattoriprojektin vetäjänä toimi Tampereen yliopiston tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunnan tutkimuspäällikkö Jussi Aaltonen. Tampereen yliopiston yliopisto-opettaja Jouko Laitinen oli mukana C172-lentosimulaattorin rakentamisessa ja ennen kaikkea hän toimi koelentäjänä lentosimulaattorin testausvaiheessa.

2 SYNTEETTISET LENTOKOULUTUSLAITTEET

Synteettisillä lentokoulutuslaiteilla (FSTD) voidaan parhaimmillaan simuloida lento täydellisesti sisältäen kuvan, äänen ja liikkeen sekä oikean ohjaamoympäristön. Ohjaamossa lentokoneen hallintalaitteet ja niiden käyttämiseen tarvittavat voimat ja liikeradat ovat mallinnettu vastaamaan täysin haluttua lentokonetyyppejä. Tehokkailla simulaattorikäyttöön tarkoitetuilla tietokoneilla ja tietokoneohjelmissa voidaan simuloida vaativiakin aerodynaamisia malleja, joita syntyy lentokoneen liikehtimisestä, liikehtimiseen tarvittavien ohjainpintojen poikkeutuksesta, vastusvoimista, työntövoimasta ja muuttuvista sääolosuhteista sekä näiden kaikkien yhteisvaikutuksesta. Tällaisilla lentosimulaattoreilla on mahdollista koulutautua jopa liikennelentäjäksi asti ja vieläpä niin sanotusti suoraan reitille. Simulaattorilla toteutettuun koulutukseen ei välttämättä sisälly yhtään lentotuntia oikealla lentokoneella. Toisaalta yksinkertaisimmillaan synteettinen lentokoulutuslaite voi olla esimerkiksi tarkoitettu vain yksittäisen mittarin käytön opetukseen.

Synteettiset lentokoulutuslaitteet voidaan jakaa neljään osaan niiden hyväksymistasojen mukaan (Traficom, 2021). Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto EASA (2018) määrittelee synteettisten lentokoulutuslaitteiden hyväksymistasot lentokoneiden osalta CS-FSTD(A) Issue 2:ssa: FFS (Full Flight Simulator), FTD (Flight Training Device), FNPT (Flight and Navigation Procedures Trainer) ja BITD (Basic Instrument Training Device). Lisäksi on muut lentokoulutuslaitteet (OTD), mutta näille ei ole erillisiä määräyksiä. (EASA 2018, 7.)

2.1 Full Flight Simulator

EASA:n (2018) minimivaatimuksen mukaan FFS-koulutuslaite on täydellinen ja täysikokoinen kopio tietyn lentokonemallin ohjaamosta, millä pystytään simuloimaan lentokoneen käyttäytyminen ja sen hallinta kokonaisuudessaan, sisältäen sekä maatoiminnot että lennonaikaisen toiminnan. Siinä käytettävien hallintalaitteiden ja ohjelmistojen täytyy olla juuri samanlaiset kuin oikeassa lentokoneessa. FFS:n täytyy tuottaa realistinen kuva ohjaamon näkymästä ulospäin ja siinä on

oltava liikejärjestelmä mallintamaan lentokoneen liikehdinnästä aiheutuvia kiihtyvyyksiä. (EASA 2018, 7.)

FFS:t on jaettu neljään osaan niiden pätevyystasojen mukaan. Pätevyystasolla A on vähäisimmät yleiset tekniset vaatimukset ja pätevyystasolla D vaativimmat. Alla on listattuna pätevyystasojen tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset vapaasti suomennettuna (taulukko 1). Pätevyystasojen yleiset tekniset vaatimukset ovat kokonaisuudessaan EASA:n CS-FSTD(A) Issue 2:ssa (EASA 2018, 146).

TAULUKKO 1. FFS:n tärkeimmät tekniset vaatimukset (EASA 2018, 146)

Pätevyystaso	Tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset
A	<ul style="list-style-type: none"> -Simulaattorin ohjaamon tulee olla suljettu täysikokoinen kopia mallinnetun lentokonetyypin ohjaamosta, mikä sisältää mallinnuksen kaikista järjestelmistä, hallintalaitteista, navigointi- ja kommunikointivälineistä sekä huomio- ja varoitussjärjestelmistä. -Simulaattorissa täytyy olla istuimet lentokoneen miehistölle sekä lennonopettajalle, minkä lisäksi simulaattorissa täytyy olla kaksi istumapaikkaa lennontarkkailijoille. -Ohjausvoimien ja -liikkeiden täytyy vastata käyttötuntumaltaan mallinnettua lentokonetyyppejä ja niiden tulee aiheuttaa samanlaista käytöstä kuin oikeassa lentokoneessa. -Testauksessa käytettävän datan lentokonetyypikohtainen tarkkuus on riittävä. -Yleispätevät mallit maavaikutukseen ja lentokoneen las- taukseen ovat riittäviä. -Liike-, ääni- ja kuvajärjestelmä vaaditaan. -Ohjaamosta ulospäin näkyvän kuvan täytyy kattaa vähintään 45 astetta leveyssuuntaisesta ja 30 astetta korkeus- suuntaisesta ohjaajan näkymästä. -Ohjainten vasteaika ei saa olla yli 300 millisekuntia pidempi kuin mallinnetussa lentokoneessa.

B	<p>Vaatimukset ovat samat kuin kohdassa A ja niiden lisäksi:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Lennon, suorituskyvyn ja järjestelmien arvioinnissa käytettyjen vertailuarvojen tulee perustua vahvistettuun tietoon. -Koneen lastauksen ja aerodynaamisen mallintamisen, sisältäen maavaikutuksen ja käsittelyominaisuudet, tulee perustua vahvistettuun testidataan.
C	<p>Vaatimukset ovat samat kuin kohdassa B ja niiden lisäksi:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Visuaaliselta järjestelmältä vaaditaan päivänvalon, hämärän ja yön mallinnus. Näkymän tulee olla jokaisella ohjaajalla vähintään 180 astetta leveyssuunnassa ja 45 astetta korkeussuunnassa koko ohjaamon läpi. -Simulaattorissa täytyy olla kuuden vapausasteen liikejärjestelmä. -Äänijärjestelmältä vaaditaan sateen ja muiden lentokoneeseen kohdistuvien äänten mallintaminen. Lisäksi hätälaskun äänimallinnus vaaditaan. -Ohjainten vasteaika ei saa olla yli 150 millisekuntia pidempi kuin simuloidussa lentokoneessa. -Tuuliväänteen mallintaminen vaaditaan. -Valvojan palautemekanismi UPTR-koulutuksessa (Upset Prevention and Recovery Training) täytyy olla saatavilla.
D	<p>Vaatimukset ovat samat kuin kohdassa C ja niiden lisäksi:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Laajennetut ääni- ja liikealustatestit vaaditaan.

2.2 Flight Training Device

EASA:n (2018) määrittämän minimivaatimuksen mukaan FTD-koulutuslaite on täysikokoinen kopio tietyn lentokonetyypin ohjaamon välineistä, laitteista, paneeleista ja hallintajärjestelmistä. FTD:n asennettujen laitteistojen ja tietokoneohjelmien avulla voidaan simuloida konetyypin käyttöä ja toimintaa niin maassa kuin ilmassa. Toisin kuin FFS, FTD voidaan toteuttaa sijoittamalla laitteistot ja hallintajärjestelmät avoimeen tilaan. FTD 2 -tasolla ohjaamon tulee kuitenkin olla suljettu, jäljitellen näin oikean lentokoneen ohjaamo kokonaisuudessaan. FTD:lta

ei vaadita liikejärjestelmää, eikä näkymän tuottaminen ulos ohjaamosta kuvan avulla ole pakollinen. (EASA 2018, 7.)

FTD:t on jaettu pätevyystasoihin 1 ja 2 niiden yleisten teknisten vaatimuksien mukaan. FTD 2 on vaatimuksiltaan vaativampi kuin FTD 1. Alla on listattuna (taulukko 2) FTD:n pätevyystasojen tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset vapaasti suomennettuna. Pätevyystasojen yleiset tekniset vaatimukset ovat kokonaisuudessaan EASA:n CS-FSTD(A) Issue 2:ssa (EASA 2018, 147).

TAULUKKO 2. FTD:n tärkeimmät tekniset vaatimukset (EASA 2018, 147)

Pätevyystaso	Tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset
1	<ul style="list-style-type: none"> -Simulaattorilta vaaditaan lentokonetyyppikohtainen ohjaamo, jossa vähintään yksi järjestelmä on täysin mallinnettu. -Ohjaamo voi olla suljettu tai avoin. - Vastuu simuloitavien järjestelmien valinnasta on organisaatiolla, joka hakee kyseiselle lentokoulutuslaitteelle hyväksyntää. -Simuloidun lentokonejärjestelmän tulee täyttää järjestelmälle oleelliset subjektiiviset ja objektiiviset testit.
2	<ul style="list-style-type: none"> -Vaaditaan lentokonetyyppikohtainen ohjaamo, jossa kaikki sovellettavat järjestelmät ovat täysin mallinnettu. -Ohjaamon täytyy olla suljettu ja siinä on oltava paikka myös lennonopettajalle. -Lentokonetyyppikohtainen tai yleispätevä lentodynamiikka hyväksytään. -Primäärit lennonohjauslaitteet vaaditaan ja niiden tulee vastata oikean lentokoneen ohjainten käyttäytymistä. -Merkittävimmät äänet täytyy olla mallinnettu. -Eri säätilojen mallinnus vaaditaan. -Täytyy olla riittävä navigointitietokanta tukemaan simuloituja lentokonejärjestelmiä.

2.3 Flight and Navigation Procedures Trainer

FNPT-koulutuslaitteella simuloidaan lentokoneen tai lentokoneluokan lennon aikaista toimintaa. Koulutuslaite sisältää EASA:n määrittämien minimivaatimusten mukaan tietyn lentokoneen tai lentokoneluokan ohjaamoympäristön sekä tarvittavat tietokoneohjelmat. (EASA 2018, 7.)

FNPT on jaettu pätevyystasoihin I, II ja III MCC (Multi-Crew Cooperation) niiden yleisten teknisten vaatimusten mukaan. FNPT II MCC -pätevyystaso on monimiehistä lentokoulutusta varten ja sen vaatimukset ovat samat kuin FNPT II:ssa, mutta hallintalaitteita ja mittaristoja täytyy monistaa jokaiselle lentokoulutukseen osallistuvalla ohjaajalle. Alla on listattuna (taulukko 3) pätevyystasojen tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset vapaasti suomennettuna. Pätevyystasojen yleiset tekniset vaatimukset ovat kokonaisuudessaan EASA:n CS-FSTD(A) Issue 2:ssa. (EASA 2018, 147–148.)

TAULUKKO 3. FNPT:n tärkeimmät tekniset vaatimukset (EASA 2018, 147–148)

Pätevyystaso	Yleiset tekniset vaatimukset
FNPT I	<ul style="list-style-type: none"> -Ohjaamon on oltava tarpeeksi suljettu häiriötekijöiden poissulkemiseksi. -Navigointijärjestelmien, kytkimien ja ohjaimien täytyy vastata simuloitua lentokonetyyppiä. -Lennonvalvojalla tulee olla esteetön näkymä miehistön toimiin. -Vaaditaan aerodynaamisten muutoksien vaikutuksen mallintaminen erilaisilla vastus- ja työntövoimilla, mukaan lukien muutokset lentokoneen asennossa, korkeudessa, sivuliuksissa, kokonaismassassa, massakeskiössä sekä massan jakautumisessa. -Vaaditaan täydelliset navigointitiedot tarkkuus- ja ei-tarkkuuslähestymisiin vähintään viideltä eri Euroopan lentokentältä. -Vaaditaan sakkausvaroitin, joka vastaa lentokoneen tai lentokoneluokan vastaavaa.

FNPT II	<p>Vaatimukset ovat samat kuin tasolla I ja niiden lisäksi:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Ohjaamon tulee olla suljettu, sisältäen paikan valvojalle. -Ohjaajien istuimissa tulee olla riittävästi säätövaraa, jotta ohjaajan näkymä on samanlainen kuin simuloitavassa lentokoneessa tai lentokoneluokassa. -Ohjainvoimien ja -liikeratojen tulee vastata simuloidun lentokoneen tai lentokonetyypin vastaavia kaikissa lento-olosuhteissa. -Automaattikytkimien tulee toimia kuten simuloidussa lentokoneessa esimerkiksi häiriötilanteissa. -Aerodynaamisessa mallinnuksessa tulee näkyä lentorangon jäätymisen vaikutus sekä koneen kallistuksen aiheuttama luisu. -Laskeutumisen ja maakosketuksen vaikutusten simuloiminen tulee toteuttaa sekä äänen että kuvan avulla. -Järjestelmillä pitää pystyä simuloimaan lentokoneen tai lentokonetyypin normaalit ja epänormaalit toimenpiteet sekä hätätoimenpiteet. -Ohjaamon merkittävimpien äänien mallintaminen vaaditaan. -Kunkin ohjaajan näkymän tulee olla vähintään 45 astetta leveysuunnassa ja 30 astetta korkeussuunnassa, ellei simuloitavan lentokoneen tai lentokonetyypin rakenne itsessään rajoita sitä. -Visuaalisen järjestelmän ja hallintalaitteiden vasteen tulee olla tarkasti synkronoitu.
FNPT II MCC	<p>-Tätä käytetään monimiehistön lentokoulutukseen lisäämällä mittareita ja hallintalaitteita tarvittava määrä. Vaatimukset ovat muuten samat kuin FNPT II:ssa.</p>

2.4 Basic Instrument Training Device

EASA:n (2018) määrittämien minimivaatimusten mukaan BITD-koulutuslaitteella voidaan opetella lentokoneen mittareiden käyttöä ja se tarjoaa vähintäänkin mahdollisuuden koulutuslaskentaksi mittarilentomenettelyille. Kokonaista mittarilentoa

ei kuitenkaan tarvitse pystyä simuloimaan BITD:llä. Mittarit voidaan simuloida esimerkiksi näyttöjen avulla ja ohjainvoimia voidaan tuottaa jousiratkaisuilla. (EASA 2018, 7.)

Alla on listattuna (taulukko 4) BITD:n tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset vapaasti suomennettuna. Pätevyystasojen yleiset tekniset vaatimukset ovat kokonaisuudessaan EASA:n CS-FSTD(A) Issue 2:ssa (EASA 2018, 149).

TAULUKKO 4. FFS:n tärkeimmät tekniset vaatimukset (EASA 2018, 149)

Pätevyystaso	Yleiset tekniset vaatimukset
BITD	<ul style="list-style-type: none"> -Lentokoneluokkaa simuloiva koulutustila on tarpeeksi suljettu häiriötekijöiden poissulkemiseksi. -Kytkimet, hallintalaitteet ja ohjaimet ovat kooltaan, muodoltaan, sijainniltaan ja toiminnaltaan samanlaiset kuin mallinnetussa lentokoneluokassa. -Koulutuslaitteessa tulee olla järjestetty lennonopettajalle istuin sekä riittävä näköyhteys mittareihin ja hallintajärjestelmiin. -Ohjainvoimien ja -liikeratojen sekä lentokoneen käytöksen tulee vastata mallinnetun lentokoneluokan vastaavia. -Navigointivälineet ovat toteutettu IFR-lennoille (Instrument Flight Rules) sopivilla toleransseilla sisältäen myös kommunikointivälineet. -Vaaditaan täydelliset navigointitiedot tarkkuus- ja ei-tarkkuuslähestymisiin vähintään kolmelta eri lentokentältä. -Moottoriäänien mallintaminen vaaditaan. -Lennonopettajalla täytyy olla mahdollisuus ohjata sääolosuhteita ja häiriötilanteita, jotka liittyvät mittareihin, navigointilaitteisiin, ohjaukseen sekä moottorin toimintaan. -Vaaditaan sakkausvaroitin, joka vastaa lentokoneluokan vastaavaa.

3 FSTD-HYVÄKSYMISTODISTUKSEN HAKUPROSESSI

Ilmailu on hyvin tarkasti valvottua ja sille on tiukat säädökset ja määräykset, joita täytyy noudattaa, mikäli haluaa toimia alalla. Näin on myös lentosimulaattoreiden ja muiden lentokoulutuslaitteiden osalta. Suomessa ilmailusta vastaava viranomainen on liikenne- ja viestintävirasto Traficom.

Lentosimulaattoreiden ja muiden synteettisten lentokoulutuslaitteiden hyväksymisessä ja valvonnassa Traficom noudattaa Euroopan unionin lentoturvallisuusviraston määräyksiä ja Euroopan unionin lainsäädäntöä. Tämänhetkiset lentosimulaattoreiden ja lentokoulutuslaitteiden vaatimukset on määritelty EASA:n alun perin vuonna 2012 julkaisemassa CS-FSTD(A):ssa, josta EASA julkaisi uuden version CS-FSTD(A) Issue 2:n vuonna 2018. EASA julkaisi luonnoksen uusista määräyksistä vuoden 2020 lopulla. Uudistuksen tarkoitus on selkeyttää ja sitä kautta helpottaa lentokoulutuslaitteiden parissa toimivien tahojen toimintaa, säilyttäen kuitenkin ilmailun tärkeimmän osan eli turvallisuuden. Se on kaikkien saatavilla ja vapaasti kommentoitavissa. (Traficom 2021.) Tämä opinnäytetyö tehtiin vuonna 2021 ennen näiden uudistusten voimaantuloa, joten näihin uusiin luonnoksiin ei otettu tässä opinnäytetyössä kantaa.

3.1 Hyväksymisen hakeminen synteettisille lentokoulutuslaitteille

Hakuprosessi FSTD-hyväksyntään tulee aloittaa hyvissä ajoin ennen varsinaisen lentokoulutuslaitteen rakentamisen aloittamista. Suunnitelmat kannattaa käydä läpi Traficomien kanssa, jotta lentokoulutuslaite täyttää sille määrätyt vaatimukset. Tässä vaiheessa mahdolliset muutokset ovat huomattavasti helpompia ja halvempia toteuttaa kuin valmiiksi tehdyssä laitteessa. Hakijan täytyy itse määrittää lentokoulutuslaitteen lähtökohtainen hyväksymistaso käyttötarkoituksen mukaan. (Traficom 2021.)

Hyväksymistä synteettiselle lentokoulutuslaitteelle Suomessa voi hakea ainoastaan organisaatio, jonka ei kuitenkaan tarvitse olla hyväksytty lentokoulutusorga-

nisaatio (ATO). Traficom tarkastaa muun muassa organisaation hallintojärjestelmän sekä tulevan lentokoulutuslaitteen ylläpitoon liittyvät asiakirjat. Organisaation täytyy täyttää vaadittu taso ennen kuin hyväksymisprosessi voi jatkua. Tällä varmistetaan organisaation osaaminen FSTD-laitteen koulutuskäytössä sekä laitteen kunnon ylläpidossa. (Traficom 2021.)

3.2 FSTD:n tarkastus ja hyväksyminen

Ennen Traficomien suorittamaa FSTD:n tarkastusta, hyväksymistä hakevan tahon on testattava lentokoulutuslaite itse ja vakuutettava, että se täyttää EASA:n määrittämät yleiset tekniset vaatimukset. Varsinaiseen viranomaisen järjestämään testaukseen kuuluu subjektiiviset ja objektiiviset osat. Subjektiivisessä osassa testaus suoritetaan lentämällä kyseisellä lentokoulutuslaitteella. Objektiiviseen osaan kuuluu lentokoulutuslaitteesta saadun datan analysoiminen ja vertaaminen simuloidun lentokoneen tai lentokonetyypin vastaaviin. (Traficom 2021.)

3.3 FSTD-hyväksyntätodistuksen ylläpitäminen

FSTD-hyväksyntätodistuksen ylläpitämiseen vaaditaan vuosimaksun lisäksi laitteen vuosittaiset arvioinnit, jotka täytyy suorittaa aina ennen niiden määräajan umpeutumista. Vuosittaiset arvioinnit eivät ole laajuudeltaan yhtä suuria kuin lentokoulutuslaitteen ensimmäinen arviointi. Hyväksyntätodistuksen haltijan on pidettävä huolta, että Traficom saa tiedon tästä hyvissä ajoin. Traficom myös valvoo jatkuvasti organisaation hallintojärjestelmää määräaikaisten auditointien ja tarkastusten avulla. (Traficom 2021.)

4 C172-LENTOSIMULAATTORIN RAKENNE

C172-lentosimulaattori rakennettiin opiskelijatyönä kevään 2021 aikana Tampereen yliopiston Hervannan kampukselle. Lentosimulaattorin suunnittelusta ja rakentamisesta on tehty erillinen opinnäytetyö. Tästä syystä tässä opinnäytetyössä ei käydä simulaattorin suunnittelua ja rakentamista läpi, vaan tässä luvussa keskitytään laitteistoihin, joista C172-lentosimulaattori koostuu. Lentosimulaattorin ohjaamon rakenteen perustana oli Cessna 172:n ohjaamo (kuva 1) ja sen mukaan esimerkiksi näkymä ulos lentokoneen ohjaamosta, ohjaajan istuimen paikka sekä hallintalaitteiden ja ohjauspaneelin sijainnit määräytyivät.



KUVA 1. C172-lentosimulaattorissa käytetty Cessna 172:n ohjaamo

4.1 Cessna 172:n ohjaamo

Tarinan mukaan lentokone, josta C172-lentosimulaattorin ohjaamo on peräisin, oli aikoinaan pyörähtänyt katolleen laskeutumisen yhteydessä ja se oli vuosia

odottamassa Tampereen ammattikorkeakoululla pääsyä uusiokäyttöön lentosimulaattorina. Toinen tarina taas kertoo, että kyseistä lentokonetta oli yritetty korjata lentokuntoon opiskelijatyönä TAMKilla. Projekti ei kuitenkaan koskaan valmistunut ja lentokone vaihdettiin lopulta toisen Cessna 172:n ohjaamoon. Oli miten oli, C172-lentosimulaattorin pohjana toimii oikean Cessna 172:n ohjaamo.

Cessnan ohjaamosta poistettiin kaikki ylimääräinen ja jäljelle jäi ainoastaan ohjaamon runko. Uuden ohjauspaneelin ja hallintalaitteiden suuren koon ja mahdollisimman aidon lentotuntuman saavuttamiseksi, normaalisti kahden lentäjän Cessnasta tehtiin yksipaikkainen (kuva 2). Tällä saatiin siirrettyä ohjaajan penkkiä hieman kesemmälle koneen runkoa, samalla linjalle ohjaussauvan ja polkimien kanssa. Simulaattorin ohjaamon ulkokuori teipattiin kauttaaltaan alkupestä väritystä kunnioittaen.



KUVA 2. C172-lentosimulaattorin ohjaamo laitteiden asennuksen jälkeen

Ohjaamon tuulilasista päätettiin luopua sen huonon kunnon takia. Tuulilasi olisi myös luultavasti nostanut ohjaamon lämpötilan turhan korkeaksi. Ohjaamoon on tarkoitus hankkia ovi myös vasemmalle puolelle, jolloin ohjaajan näkyvyys molempiin suuntiin olisi yhtenevä. Tällä ohjaamosta saataisiin täysin suljettu, joka on yksi FFS:lle asetetuista vaatimuksissa.

4.2 Lennonohjauspaneeli

Lennonohjauspaneeli toteutettiin Virtual Fly SOLO Airlinerilla (kuva 3). Paneelissa on kosketusnäyttö, johon lentokoneen mittaristo mallinnetaan. Paneelissa on myös kytkimet kaikille lennon mallintamiseen tarvittaville hallintajärjestelmille. SOLO Airliner mahdollistaa mittariston simuloimisen useille yksi- ja kaksimoottorisille yleisilmailu- ja matkustajakoneille. Täysin simuloituja lentokonetyyppejä ovat Cessna 172, Cessna 182 RG, Mooney Bravo M20J, Baron B58 sekä Boeing 737. Lisäksi SOLO Airlinerin valikosta löytyy generinen mittaristo yleisilmailun lentokoneisiin. (SOLO Airliner n.d.) Cessna 172:n osalta lennonohjauspaneelin toiminnoista ja käytöstä on kerrottu tarkemmin kohdassa 5.4.



KUVA 3. Virtual Fly SOLO Airliner -lennonohjauspaneeli

4.3 Ohjaimet

C172-lentosimulaattorissa ohjaus toteutettiin ohjaussauvan ja polkimien avulla. Ohjaussauvaksi lentosimulaattoriin valittiin Yhdysvaltain kansallisen ilmailuviranomaisen (FAA) lennonopetuskäyttöön hyväksymä rattityyppinen (kuva 4) YOKO Plus (Flight Sim Yoke... n.d). Rattiohjaussauva on edelleen eniten käytetty sauvamalli yleisilmailussa, mutta myös useista matkustajakoneista löytyy tällainen,

esimerkiksi Boeing 737:stä. Sauvasta löytyy myös painikkeet korkeus- ja sivuvaikaimien trimmaukseen, autopilotin poiskytkemiseen sekä painike mikrofonille.



KUVA 4. YOKO Plus -ohjaussauva

Lentosimulaattorin sivuperäsimen ohjaukseen sekä pyörien jarrutuksen mallintamiseen käytettiin RUDDO-polkimia (kuva 5). Polkimet on suunniteltu simuloimaan oikeassa lentokoneissa tarvittavaa vähimmäisvoimaa sekä peräsinohjauksessa käytettävien polkimien että jarrutukseen tarkoitettujen varvasjarrujen osalta. (Flight Sim Rudder... n.d.)



KUVA 5. RUDDO-polkimet

4.4 Moottorien tehonsäätö

Yksimoottoristen lentokoneiden tehonsäädön simuloiminen toteutettiin V3RNIO PLUS TPM:llä (kuva 6), jolla pystytään säätämään moottorin tehoa, potkurin lapakulmia ja polttoaineen seostusta. Tehonsäätöjärjestelmä jäljittelee käyttötuntumaltaan oikean yksimoottorisen lentokoneen vastaavaa. (V3RNIO PLUS TPM n.d.)



KUVA 6. V3RNIO PLUS TPM -tehonsäätöjärjestelmä

Kaksimoottoristen tehonsäätöjärjestelmän simuloimiseen käytettiin Flight Sim Throttle Quadrant – TQ6 PLUSsaa. Tehonsäätöjärjestelmässä on omat vivut molemmille moottoreille. Vivuilla pystyy säätämään moottorin tehoa, potkurin pyörimisnopeutta ja polttoaineseostusta. Tehonsäätöjärjestelmässä on myös moottorijarrutus. Järjestelmän käyttötuntuma on säädettävissä sen kyljessä olevan ki-ristysnupin avulla. (Flight Sim Throttle... n.d.)

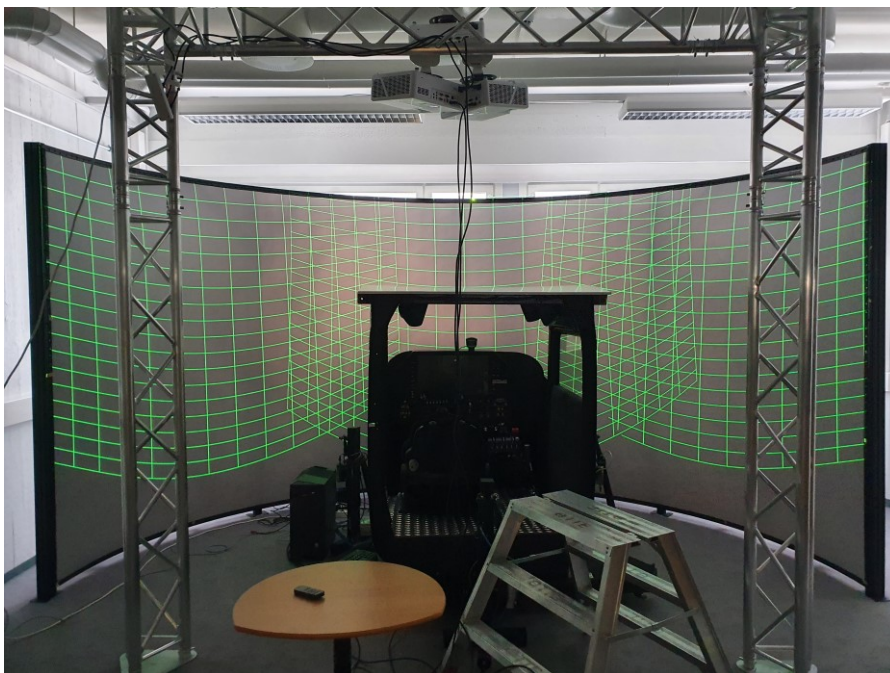
4.5 Äänentoisto

Äänentoisto toteutettiin C172-lentosimulaattorissa Logitechin digitaalisella äänentoistojärjestelmällä. Järjestelmään kuuluu bassokaiutin, joka asennettiin ohjaamon jalkatilaan. Bassokaiutin tuottaa äänen lisäksi painetta ja näillä simuloidaan pääasiassa lentokoneen moottorin ääniä ja moottorista johtuvaa tärinää.

Äänentoistojärjestelmään kuuluu myös viisi pienempää kaiutinta, joista neljä sijoitettiin ohjaajan ympärille lentokoneen kattoon ja yksi ohjaajan etupuolelle jalkatilaan. Nämä kaiuttimet mallintavat lentokoneen ääniä, muun muassa laskuteli-neistä ja laipoista johtuvia sekä lentokoneen ulkopuolelta tulevia ääniä. Lennon-ohjauspaneelissa on omat kaiuttimet, jotka mallintavat sen hallintalaitteista tule-via ääniä esimerkiksi autopilotin poiskytkemisen -merkkiääntä.

4.6 Projektorit ja valkokangas

Näkymä lentokoneen ohjaamosta ulospäin C172-lentosimulaattorissa toteutettiin kaarevalle valkokankaalle heijastetulla kuvalla (kuva 7), joka saatiin X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelmasta. Valkokankaan halkaisija on 4,2 metriä, korkeus 2,3 metriä ja pinta-ala 16,5 neliömetriä. Valkokangas on puoliympyrän muotoinen, joten kuva kattaa 180 astetta ohjaajan näkymästä. Tällä saatiin luotua aidontun-tuinen näkymä lentokoneen ohjaamosta korkeus- ja leveys-suunnassa.



KUVA 7. Valkokangas sekä siihen heijastetut projektoreiden testikuviot

Lentosimulaattorin kuvan heijastaminen toteutettiin kolmella Optoma ZH406ST -projektorilla, jotka on suunniteltu lyhyisiin projektioetäisyyksiin. Projektorit asen-nettiin lentokoneen ohjaamon yläpuolelle. Projektoreiden heijastamat kuvat (kuva 7) suunnattiin olemaan hiukan lomittain ja kuvan sekoitukseen käytettiin X-Plane

11:n omaa sekoitusohjelmaa, jolla kuvasta saatiin yhtenäinen. Projektioetäisyydellä saatiin säädettyä kuvan leveyttä, jotta se peitti leveyssuunnassa koko valkokankaan. Kuvan korkeudeksi saatiin 1,5 metriä, joka peittää valkokankaan 80 senttimetrinä aina ylös asti.

4.7 Tietokone

Lentosimulaattorin ohjelman pyörittäminen vaatii tietokoneelta todella paljon laskentatehoa ja muistia. Lisäksi tietokoneen näytönohjaimelta vaaditaan paljon, jotta simulaattorin tuottama kuva on grafiikaltaan tarpeeksi hyvä. C172-lentosimulaattori toteutettiin yhdellä tietokoneella, joka ohjaa lentosimulaattorin ohjelmaa, hallintalaitteita, äänijärjestelmää, projektoreita sekä lennonvalvojan näyttöä. C172-lentosimulaattorissa käytetyn tietokoneen tärkeimmät tekniset tiedot ovat taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Tietokoneen tärkeimmät tekniset tiedot

Komponentti	Malli
Prosessori	Intel(R) Core (TM) i9-10900KF @ 3.70 GHz
RAM	128 GB
Näytönohjain	NVIDIA GeForce RTX 2080 SUPER

4.8 X-Plane 11 -lentosimulaattorin ohjelma

C172-lentosimulaattorissa simulaattorin ohjelmajana käytettiin Yhdysvaltalaisen Laminar Research -ohjelmistoyrityksen kehittämää X-Plane 11:tä. X-Plane 11 on julkaistu vuonna 2017, mutta sen kehitystyö jatkuu edelleen. C172-lentosimulaattorissa on tällä hetkellä käytössä versio 11.53.

X-Plane 11 on saanut Yhdysvaltain ilmailuhallinnon FAA:n hyväksynnän lentäjien lennonopetukseen. Tämä tosin vaatii yhtenäisen simulaattoripaketin, johon kuuluu lentosimulaattorin ohjelma ja -laitteisto hankkimista yhdessä. Tällaisia valmiita X-Plane 11:een perustuvia lentosimulaattoreita valmistaa muun muassa Pre-

cision Flight Controls ja Fidelity. (FAA-Certified X-Plane n.d.) X-Plane 11 -lentosimulaattoriprograman ominaisuuksista ja käyttömahdollisuuksista on kerrottu tarkemmin kohdassa 5.2.

5 C172-LENTOSIMULAATTORIN OMINAISUUDET

C172-lentosimulaattorin lentokonetyypiksi tarkasteluun valittiin Cessna 172, koska simulaattorin rakenne perustuu oikean Cessna 172:n ohjaamoon ja hallintalaitteiden paikat sekä näkymä koneesta ulos ovat yhtenevät simuloidun lentokonetyypin kanssa. X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelma ja Virtual Fly'n ohjauspaneeli sekä lennonohjausjärjestelmä tukevat myös kyseistä lentokonetyyppiä.

Cessna 172 (kuva 8) on maailman yleisin kaupallinen yksimoottorinen lentokone. Niitä on valmistettu vuodesta 1955 lähtien yli 44 000 kappaletta. Cessna 172 on yhdysvaltalaisen Textron Aviationin tuote, mutta niitä valmistetaan lisenssillä muuallakin. Nelipaikkainen Cessna 172 on erittäin suosittu lentokoulutuskone, koska sillä on hyvin alhaiset laskeutumis- ja sakkausnopeudet. On jopa sanottu, että sillä on naurettavan helppo lentää. Lentokoulutustilanteessa kouluttaja istuu ohjaajan oikealla puolella, jossa hänelle on oma ohjaussauva sekä omat polkimet. Huvi- ja liikennelentokäytössä Cessna 172:een mahtuu ohjaajan lisäksi kolme matkustajaa, jolloin yksi matkustajista istuu ohjaajan vierellä ja kaksi heidän takanaan. (Cessna n.d.)



KUVA 8. Cessna 172 (Lockwood 2017)

Uusissa Cessna 172:ssa on Garminin G1000 NXi-lasiohjaamo, johon on mahdollista saada avioniikan uusinta teknologiaa, mukaan lukien täydellisen autopilotin (Cessna n.d.). C172-lentosimulaattorissa ei kuitenkaan ole käytössä lasiohjaamo, vaan Virtual Fly'n ohjauspaneelilla mallinnetaan perinteistä mittaristoa.

5.1 Lennon ja lentokonejärjestelmien simulointi X-Plane 11:llä

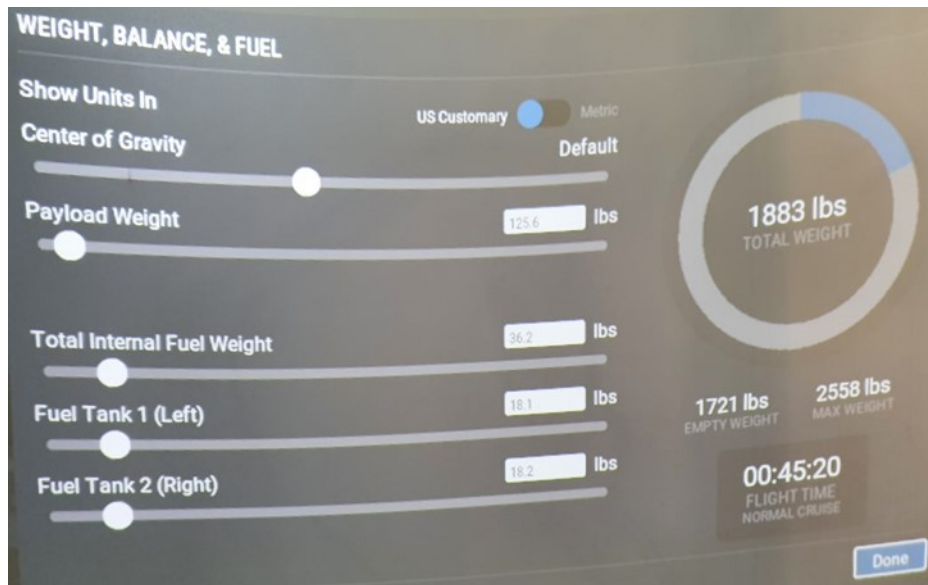
X-Plane 11 -lentosimulaattoriorjelmaa pidetään tällä hetkellä maailman parhaana kaupallisena lentosimulaattoriorjelmalla aerodynaamisen mallinnuksen kannalta. Tämä mahdollistaa hyvin aidontuntuisen lentokokemuksen simulaattorioriolosuhteissa juuri lentokoneen käsittelyn ja käyttäytymisen osalta. X-Plane 11 mahdollistaa myös monipuolisen sääolosuhteiden, lentokoneen vaurioiden sekä lentoympäristön mallintamisen.

5.1.1 Aerodynaaminen mallinnus

X-Plane 11 -lentosimulaattoriorjelman aerodynaaminen mallinnus perustuu matemaattiseen teräelementtiteoriaan, jossa siivistä, peräsimestä, korkeusvakaa- jasta ja potkurista jokainen jaetaan noin kymmeneen osaan. Ohjelmisto laskee jokaisen osan vaikutuksen toisiin osiin monta kertaa sekunnissa ja luo tällä tavoin tarkan aerodynaamisen mallin koko lentokoneelle kaikissa lennonvaiheissa. Mallinnuksessa otetaan huomioon muun muassa ilmapinnan nopeus ja suunta, koh- tauskulma, ilmantiheys, paineaallot, kiertymät ohjainpinnoissa sekä lentokoneen massa ja sen jakautuminen. Näiden avulla pystytään simuloimaan tarkasti poik- keuksellisiakin lentotilanteita, kuten turbulensseja, sakkauksia, moottoririkkoja sekä potkurin aiheuttamia dynaamisia muutoksia. (How X-Plane Works n.d.)

Lentokoneen painopisteen sijainnilla on suuri merkitys lentokoneen staattiseen vakavuuteen. Yleisilmailukoneissa, kuten Cessna 172:ssa, painopisteen tulee si- jaita lentokoneen aerodynaamisen keskiön etupuolella, jotta lentokone on hallit- tavissa ihmisen aistein ja voimin. Lentokoneet, joissa on automaattiset aktiiviset ohjausjärjestelmät, voivat olla hyvin staattisesti epävakaita. Tällä tavoin niille saa- daan erinomaiset liikehtimisominaisuudet. Tällaisia ominaisuuksia halutaan esi- merkiksi hävittäjille. Yleisilmailukoneen painopisteen kuitenkin halutaan olevan lähellä aerodynaamista keskiötä. Tohtori Jaakko Hoffrenin ja professori Olli Saa- relan (2019) mukaan liian edessä oleva painopiste vähentää ohjaustehokkuutta ja liian takana oleva painopiste vaikuttaa haitallisesti vakavuuteen ja lisää lento- koneen hallitsemiseen tarvittavia ohjainvoimia. Näiden perusteella lentokoneille määritellään sallittu painopistealue (Hoffren & Saarela 2019, 84.) X-Plane 11 -

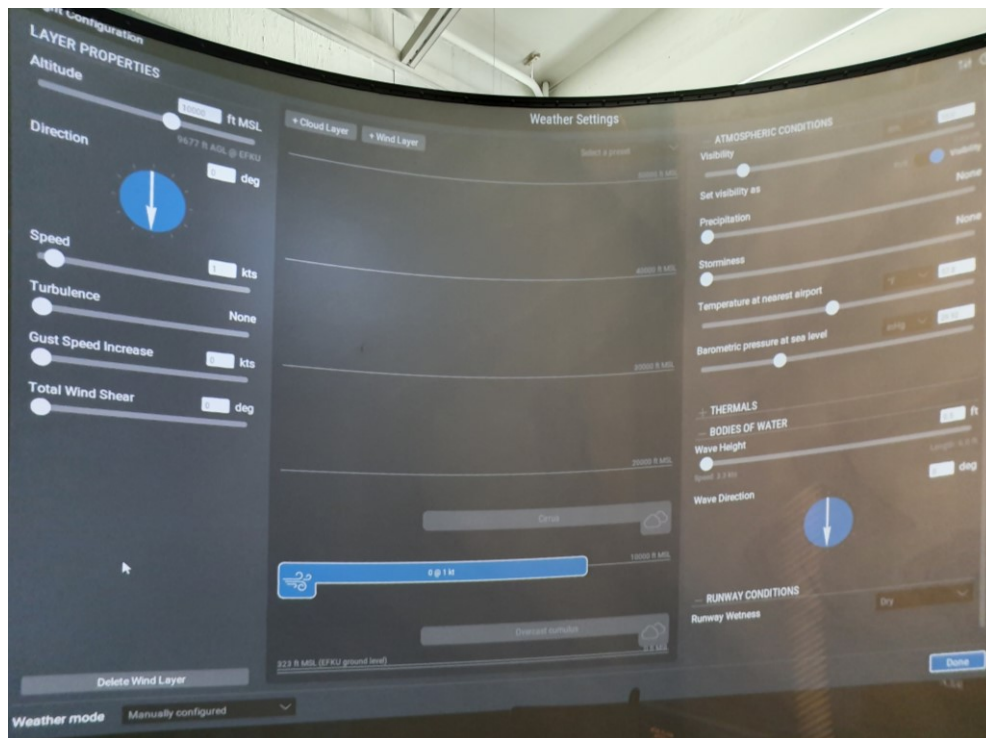
simulaattorihjelmassa Cessnan kuormauksessa (kuva 9) massa voidaan vaikuttaa polttoainemäärän ja hyötykuorman osalta. Koneen painopisteeseen asemaa voidaan muuttaa pituussuunnassa, mutta myös koneen kallistusvakavuuteen voidaan tehdä muutoksia polttoaineen sijoittelulla vasemman ja oikean siipitankin osalta. (How X-Plane Works n.d.)



KUVA 9. Painon, painopisteen ja polttoaineen valinta Cessnaan

5.1.2 Lento-olosuhteet ja lentokentät

X-Plane 11 -lentosimulaattorihjelmassa on mahdollista valita lento-olosuhteet useista eri vaihtoehdoista. Ohjelmassa on valmiiksi tehtyjä säätiloja tynestä ja selkeästä kelistä aina myrskyyn asti. Lisäksi lento-olosuhteita voidaan muokata halutunlaiseksi lämpötilan, tuulensuunnan ja -voimakkuuden, sateensuunnan ja -määrän, sadepisaroiden koon sekä näkyvyyden suhteen (kuva 10). Säätila on mahdollista muokata erilaiseksi eri lentokorkeuksille. Kiitotien pinnan olosuhteet ovat vielä erikseen valittavissa.



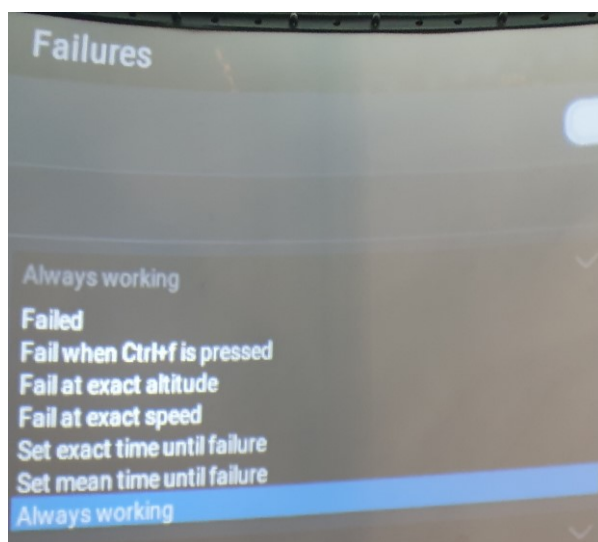
KUVA 10. Lento-olosuhteiden muokkaaminen X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelmassa

Simuloidun lennon voi X-Plane 11:ssä asettaa alkamaan kaikkina vuorokauden aikoina, joten pimeä- ja hämärälentojen mallintaminen onnistuu myös. X-Plane 11 sisältää yli 35,500 lentokenttää ympäri maailman ja ohjelmaan saatavalla lisäosalla on mahdollista luoda oma lentokenttä lentosimulaattoriohjelmaan (See all of... 2017).

5.1.3 Vaurioiden mallintaminen

X-Plane 11:ssä on mahdollista mallintaa yli 250 erilaista vauriota ja vikaantumista. Näitä voidaan simuloida lentokoneen järjestelmiin, laitteisiin, moottoreihin, siipiin sekä ohjainpintoihin. Kaikissa näissä pääluokissa on useita vikaantumiskohteita valittavana. Lisäksi X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelmassa voidaan mallintaa lentokoneen ympäristössä tapahtuvia häiriöitä, esimerkiksi linnun törmäyksen lentokoneeseen tai kiitotien valojen vikaantumisen. Vaurio, häiriö tai vikaantuminen voidaan ajoittaa tarkasti haluttuun ajankohtaan. Pettämisajankohta voidaan sijoittaa tiettyyn lentokorkeuteen tai -nopeuteen, tarkkaan kellonaikaan tai halutulle/halutuille laitteille voidaan asettaa keskimääräinen aika vikaantumiseen

(MTBF). MTBF mahdollistaa hyvin vikaantumisen simuloinnin koko lentokoneen osalta olettaen, että kaikille osatekijöille löytyy tarpeeksi täsmälliset MTBF:t. X-Plane 11 -simulaattorihjelmassa on vikaantumisen osalta valittavissa myös, että haluttu kohde on aina kunnossa tai että se on jo valmiiksi vikaantunut (kuva 11). Lennonvalvoja pystyy myös aiheuttamaan vikaantumisen kaikissa lennonvaiheissa.



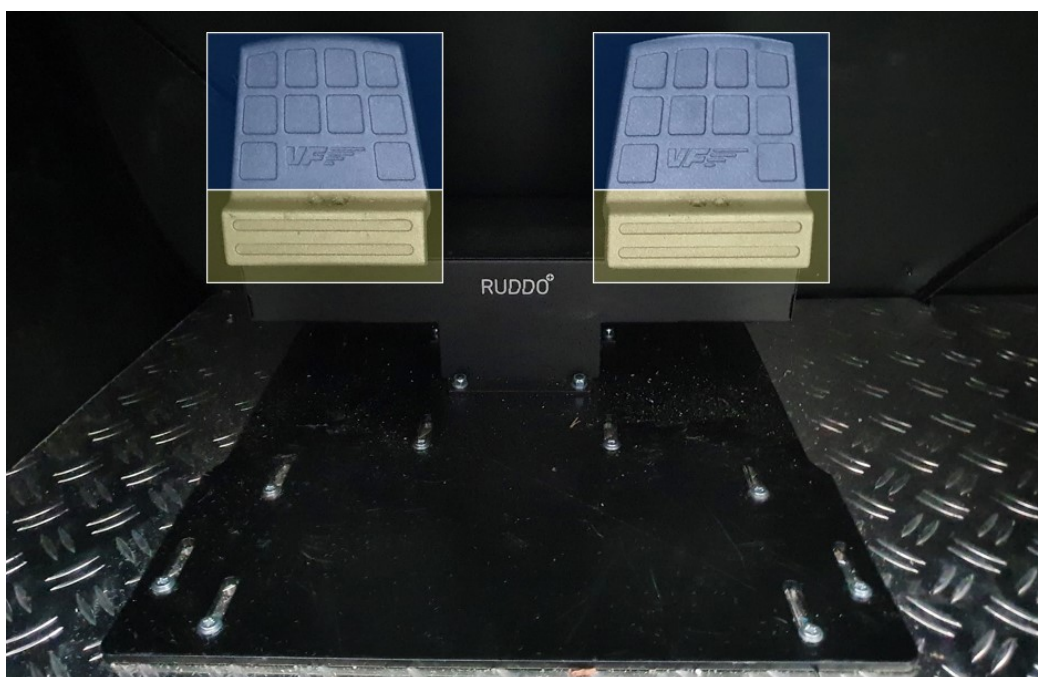
KUVA 11. Vikaantumisajankohdan valinta X-Plane 11 -simulaattorihjelmassa

5.2 Ohjaimet ja tehonsäätö

C172-lentosimulaattorin ohjaimet ja tehonsäätö ovat toteutettu Virtual Fly'n laitteilla ja ne ovat toiminnaltaan aivan kuin oikeassa Cessna 172:ssa. Ohjainvoimat on toteutettu kaikissa näissä laitteissa mekaanisesti jousien avulla.

C172-lentosimulaattorissa lentokoneen kallistusohjaus toimii kääntämällä ohjaussauvaa, jolloin siivissä olevien ohjainpintojen muutokset saavat aikaan koneen kallistumisen, joka johtaa kääntymiseen. Ohjaussauvaa työntämällä saadaan lentokoneen nokka painumaan alaspäin ja vastaavasti vetämällä sauvaa, koneen nokka nousee ylöspäin. Ohjaussauvan eteen–taakse-liike siis aiheuttaa poikkeutuksen korkeusperäsimestä, millä vaikutetaan lentokorkeuteen. C172-lentosimulaattorin ohjaussauvasta löytyy kytkin korkeusperäsimen trimmaamiseen. Ohjaussauvassa on myös kytkimet autopilotille ja kallistusvakavuuden trimmaamiselle, mutta nämä eivät ole käytössä Cessna 172 simuloitessa.

Polkimet (kuva 12) toimivat C172-lentosimulaattorissa samalla tavalla kuin oikeassa koneessa. Painettaessa koko jalalla oikeaa poljinta lentokoneen nokka kääntyy oikealle ja vastaavasti vasemmalla polkimella vasemmalle. Kääntymisen aiheuttaa sivuperäsimen poikkeutus, joten jos polkimia painaa yhtä aikaa niin mitään ei tapahdu. Polkimien yhtäaikainen painaminen ei ole edes mahdollista, koska Cessnassa ohjaus välittyy vaijerien avulla ohjainpinnoille ja peräsin voi olla vain yhdessä asennossa kerrallaan. Maassa polkimilla käännetään lentokoneen nokkapyörää ja sen avulla ohjataan konetta.



KUVA 12. Keltaisella on merkitty sivuperäsimen poikkeutukseen käytettävät polkimien osat ja sinisellä varvasjarrut

Polkimissa on myös varvasjarrut (kuva 12), jotka vaikuttavat lentokoneen takapyöriin ja nimensä mukaisesti niillä hiljennetään lentokoneen nopeutta maassa ollessa. Varvasjarruja täytyy todellakin painaa vain varpailla ja liike on enemmänkin poljinta kääntävä sen leveysakselin ympäri kuin suoraan eteenpäin painettu. Tämä ominaisuus on sitä varten, että lentäjä ei vahingossa paina jarrua samalla, kun ohjaa konetta polkimien avulla.

Tehonsäätö toimii C172-lentosimulaattorissa kaasu- ja seosvivun avulla. Moottori on tyhjäkäynnillä, kun kaasuvipu on vedetty täysin ulos ja taas vastaavasti täysillä, kun kaasuvipu on sisään työnnettynä. Polttoaineen seostusta säädetään

seosvivun avulla. Seostus on rikkaimmillaan vivun ollessa sisään työnnettynä ja köyhimmillään vivun ollessa kokonaan ulos vedettynä.

5.3 Lennonohjauspaneelin toiminta

C172-lentosimulaattorin ohjauspaneeli, sisältäen mittarit, avioniikan sekä kytkimet, toteutettiin kuten kohdassa 4.2 mainittiin Virtual Fly:n SOLO Airlinerilla. SOLO Airlinerilla on mahdollista toteuttaa useiden eri lentokoneiden mittaristoja ja niiden kytkimiä sekä avioniikkaa. Tässä opinnäytetyössä keskitytään Cessna 172:n simuloinnissa käytettävään laitteistoon.

5.3.1 Mittarit

C172-lentosimulaattorin mittaristo on jaettu primäärisiin ja sekundaarisii mittareihin. Primäärimittareihin luetaan ilmanopeusmittari, elektroninen keinohorisontti (EADI), hyrräkompassi, kaarto- ja luisumittari, korkeusmittari ja variometri eli pystynopeusmittari (kuva 13). Primäärimittarit ovat lentämisen kannalta ensiarvoisen tärkeitä. Ne mahdollistavat lentämisen näkyvyyden ollessa syystä tai toisesta huono.



KUVA 13. Primäärimittarit

Ilmanopeusmittarissa (kuva 14) vihreä kaari kuvaa normaalin lentotoiminnan nopeusalueita. Keltaisen kaaren lentonopeuksilla voidaan toimia tyynessä lentosäässä. Valkoinen kaari kuvaa lentonopeuksia, joilla voidaan käyttää laippoja.

Punainen viiva osoittaa nopeuden, jota ei saa ylittää missään tilanteessa (V_{ne}). (Lockwood 2017, 15.)



KUVA 14. Ilmanopeusmittari vasemmalla, elektroninen keinohorisontti keskellä ja korkeusmittari oikealla

Elektroninen keinohorisontti (EADI) ilmaisee lentokoneen asennon suhteessa oikeaan horisonttiin (kuva 14). EADI on elintärkeä lennettäessä olosuhteissa, joissa ei ole mahdollista nähdä oikeaa horisonttia. (Lockwood 2017, 16.)

Korkeusmittari (kuva 14) ilmaisee nimensä mukaisesti lentokorkeutta. Lentokorkeus mitataan merenpinnasta ja mittayksikkö on jalka (ft). Mittarin paksumpi ja lyhyempi viisari ilmaisee tuhansia ja pitkä ja ohut viisari satoja jalkoja. Mittari käyttää painetta korkeuden mittaamiseen, joten se on kalibroitava ennen lento-oloihin lähtöä vallitsevan ilmanpaineen mukaan. Jos lennon aikana ilmanpaine muuttuu, on mittari kalibroitava uudelleen paikallisen ilmanpaineen mukaan. Kalibrointia varten mittarissa on asteikot hehtopascleina (hPa) eli millibaareina sekä pääsääntöisesti amerikkalaisten käyttäminä elohopeatuumina (InHG). (Lockwood 2017, 17.)

Kaarto- ja luisumittari (kuva 15) auttaa ohjaajaa käännöksen tekemisessä. Alemmat valkoiset viivat näyttävät kallistuskulman täydellisen 360 asteen käännöksen tekemiseen kahden minuutin aikana. Tästä on suuri apu mittarilennon aikana. Alhaalla oleva pallo ilmaisee luisua. Pallon liikuessa keskialueelta pois kaarto ei ole puhdas. Sivuluisu voidaan korjata sivuperäsimen poikkeutuksella. Hyrräkompassi näyttää lentokoneen suunnan (kuva 15). Se täytyy kalibroida ennen lentoa ja lennon aikana magneettisen kompassin avulla. Hyrräkompassiin mittariin myös syötetään autopilotille haluttu suunta. (Lockwood 2017, 16.)



KUVA 15. Kaarto- ja luisumittari vasemmalla, hyrräkompassi keskellä sekä variometri eli pystynopeusmittari oikealla

Variometri eli pystynopeusmittari näyttää lentokoneen ohjaajalle korkeuden muutosnopeuden (kuva 15). Muutosnopeus ilmaistaan jalkoina minuutissa. (Lockwood 2017, 17.)

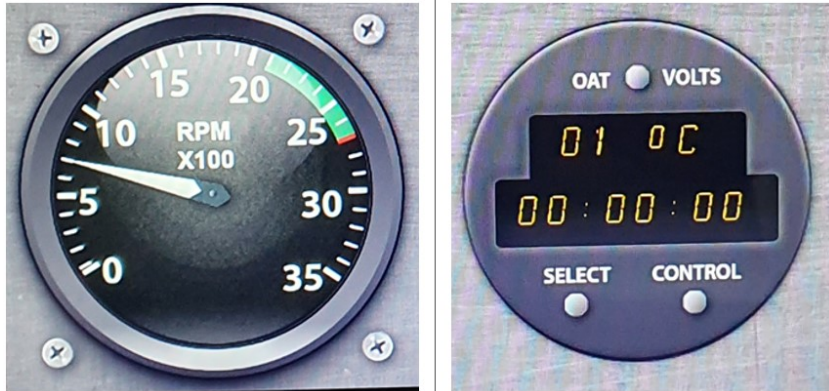
Sekundaarimittareihin (kuva 16) kuuluvat kronometri, polttoainemittari, pakokaasun lämpötila- ja polttoaineen virtausmittari, öljynlämpötila- ja öljynpainemittari, alipaine- ja virtamittari, kierrosluku- ja moottorin käyntiaikamittari sekä VOR1/ILS-, VOR2- ja ADF-vastaanottimien ilmaisimet. Sekundaarimittarit ovat toki tärkeitä lentokoneen toiminnan ja lennonaikaisen suunnistamisen kannalta, mutta ne eivät suoranaisesti ilmaise lentokoneen ilmassa pysymisen kannalta oleellisia asioita.



KUVA 16. Sekundaarimittarit

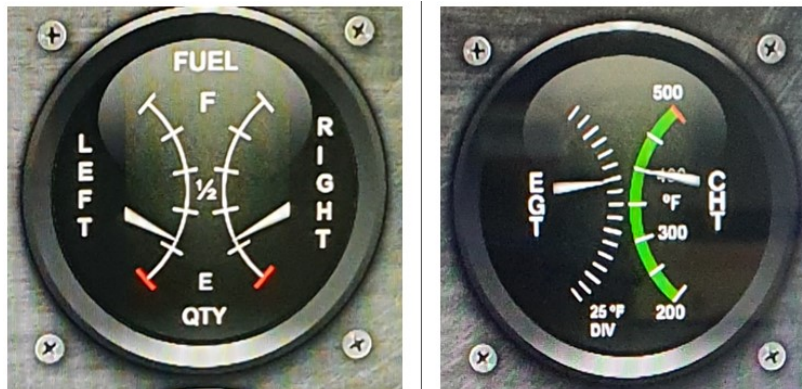
Kierroslukumittari (kuva 17) näyttää potkurin pyörimisnopeuden kierroksina minuutissa (RPM). Pyörimisnopeutta säädetään kaasuvivusta. Matkalennossa Cessna 172:lla pyörimisnopeus pyritään pitämään 21000–27000 rpm:n välillä.

Kronometri (kuva 17) ilmaisee lentokoneen ohjaajalle yleisajan (UT), paikallisen ajan (LT), lentokoneella lennetyn kokonaisajan (FT), kyseisen lentokerran keston (ET) sekä ulkolämpötilan (OAT) (Lockwood 2017, 18).



KUVA 17. Kierroslukumittari vasemmalla ja kronometri oikealla

Polttoainemittari (kuva 18) näyttää polttoaineen määrän gallonissa. Oikealle ja vasemmalle polttoainesäiliölle on omat osoittimensa. (Lockwood 2017, 18.)



KUVA 18. Polttoainemittari vasemmalla sekä pakokaasun lämpötilamittari (EGT) ja sylinterinpään lämpömittari (CHT) oikealla

Pakokaasun lämpötilamittarin (EGT) ilmaisee polttoaineen palamispuhtautta (kuva 18). Puhdas palaminen tuottaa enemmän tehoa moottorista ja näin ollen vähentää polttoaineen kulutusta. Samalla myös pakokaasun lämpötila nousee. Palamispuhtautta säädetään polttoaineseostusvivusta. Sylinterinpään (kuva 18) lämpömittari (CHT) ilmaisee moottorin lämpötilaa. Lämpötilaan vaikuttaa moottorin tehonsäätö ja moottorin jäähdytys. Lämpötila nousee jyrkästi, kun moottorilta otetaan paljon tehoa ulos.

Öljynlämpömittarit ja -painemittarit ovat moottorin kestämisen kannalta erittäin tärkeitä (kuva 19). Lämpötilan tulee olla vihreän alueen sisällä. Moottori voi hajota korkeilla kierrosluvuilla, jos öljy on liian kylmää. Toisaalta liian korkea öljynlämpötila tuhoaa myös moottorin. Öljynpainemittarin tulee olla myös vihreällä alueella, jotta moottori pysyy toimintakunnossa. Liian korkea paine voi johtua esimerkiksi liian paksusta öljystä tai kylmästä ilmasta. Liian matalan paineen syyt ovat yleisimmin vajaassa öljysäilössä, joka voi johtua vuodosta tai öljyä ei vain ole lisätty tarpeeksi säiliöön. (Lockwood 2017, 19.)



KUVA 19. Öljynlämpömittari ja -painemittari vasemmalla sekä tyhjiömittari (VAC) ja virtamittari (AMP) oikealla

Tyhjiömittari ilmaisee (VAC) gyroskooppiin perustuvien lentolaitteiden tyhjiön painetta (kuva 19). Viisarin täytyy olla vihreällä alueella, jotta kaikki laitteet toimivat normaalisti. Virtamittari (AMP) ilmaisee generaattorin sähköntuottoa (kuva 19). Positiivisilla arvoilla lentokoneen akku latautuu ja negatiivisilla arvoilla akunvaraus tyhjenee. (Lockwood 2017, 19.)

VOR1/ILS-vastaanottimen ilmaisimien (kuva 20) näyttää suunnan kohti valittua VOR-majakkaa tai ILS-laskeutumisessa oikealle liukupolulle ja siinä pysymiseen. Haluttu taajuus asetetaan NAV1:een. VOR2-vastaanottimen ilmaisimien (kuva 20) näyttää myös suunnan kohti valittua VOR-majakkaa. Halutun majakan taajuus asetetaan NAV2:een. ADF-vastaanottimen ilmaisimien (kuva 20) näyttää suunnan valittuun suuntaamattomaan- eli NDB-radiomajakkaan. Halutun NDB-majakan taajuus asetetaan ADF-hallintapaneeliin. (Lockwood 2017, 20–21.)



KUVA 20. VOR1/ILS-, VOR2- ja ADF-vastaanottimien ilmaisimet

5.3.2 Avioniikka

C172-lentosimulaattorin avioniikkalaitteiden hallintapaneelit ovat mallinnettu samalle näytölle kuin mittaristokin (kuva 21). Avioniikkalaitteiden hallintapaneelit tulevat näkyviin painettaessa ohjainpaneelista XPDR-säätönappia. Lentosimulaattorin mallinnetut avioniikkalaitteet ovat: XPDR (Transponder), ADF (Automatic Direction Finder), DME (Distance Measuring Equipment), COM1/NAV1 ja COM2/NAV2, AP (Autopilot) sekä edellä mainittujen äänenhallintapaneeli.



KUVA 21. Hallintapaneelien sijainti C172-lentosimulaattorissa

Kuvassa 22 ylimmäisenä on avioniikkalaitteiden äänenhallintapaneeli. Sen hallinta on toteutettu kosketusnäytön avulla. Äänenhallintapaneelilla voidaan kytkeä ja katkaista eri avioniikkalaitteiden äänet. Toiseksi ylimpänä on autopilotin hallin-

tapaneeli (kuva 22). Autopilotin toimintoja ohjataan kosketusnäytön, ALT- (korkeus) ja HEADING-säätönappien (suunta) avulla. ALT-säätönappi sijaitsee autopilotin hallintapaneelin oikealla puolella ja HEADING-säätönappi sijaitsee kokomittariston vasemmalla puolella.



KUVA 22. Avioniikkalaitteiden hallintapaneelit

Seuraavat kaksi samannäköistä hallintapaneelia ovat COM1/NAV1 ylempänä ja COM2/NAV2 alempana (kuva 22). Näiden hallintapaneelien käyttö on toteutettu oikealla puolella olevien säätönappien sekä kosketusnäytön avulla. COM1 ja COM2 ovat tarkoitettu lentokoneen ohjaajan ja lennonjohdon väliseen kanssakäymiseen. NAV1:stä ja NAV2:sta käytetään eri navigointiavusteiden kanssa. Näitä ovat muun muassa ILS ja sen majakat (MKR), VOR ja NBD.

COM2/NAV2-hallintapaneelin alapuolella on DME (kuva 22), jota käytetään kokonaisuudessaan kosketusnäytöllä. DME ilmoittaa lentokoneen viistoetäisyyden valittuun radiomajakkaan.

Kuvassa 22 toiseksi alimmaisena on ADF-hallintapaneeli. Sitä käytetään ADF-säätönupin ja kosketusnäytön avulla. Hallintapaneeliin voidaan asettaa minkä tahansa NBD-majakkan radiotaajuus, kunhan lentokone on sen kantaman alueella. (Lockwood 2017, 24.)

Alimmaisena kuvassa 22 on transponderin (XPDR) hallintapaneeli, jota käytetään kosketusnäytön ja vieressä olevan XPDR-säätönupin avulla. Transponderi toimii lennonjohdon tutkan kanssa ja ilmoittaa lennonjohdolle lentokoneen korkeuden ja sijainnin. Yksilöllisen koodin avulla lennonjohto tunnistaa lentokoneen. Transponderin tulee olla päällä aina lennettäessä valvotussa ilmatilassa. (Lockwood 2017, 23.)

5.3.3 Kytkimet

Kuvassa 23 on esiteltynä C172-lentosimulaattorin lennonohjauspaneelissa olevat eri järjestelmien hallintalaitteet. Edellisessä luvussa käytiin läpi avioniikan hallintaan käytettävät kytkimet, jotka sijaitsevat mittariston oikealla puolella, kuvassa 23 kohta 1. Mittariston vasemmalla puolella, kuvassa 23 kohta 2, sijaitsevat säätönupeilla säädetään, kalibroidaan ja hallitaan mittareita. A.I.-säätönuppi (Attitude Indicator) on elektronisen keinohorisontin ja siinä olevan FD-osoittimen (Flight Direction) hallintaan. Korkeusmittariin asetetaan ALTIMETER-säätönupilla paikallinen ilmanpaine tarkkojen korkeustietojen saamiseksi. OBS1- ja OBS2-säätönupit ovat VOR1/ILS- ja VOR2-vastaanottimien ilmaisimia varten. HEADING-säätönupilla valitaan haluttu lentosuunta hyrräkompassiin. Tätä käytetään myös halutun suunnan antamiseen autopilotille. GYRO ADJ -säätönupilla hyrräkompassi kalibroidaan näyttämään magneettisen kompassin suuntaan. Kronometrin näkymää vaihdetaan ulkolämpötilan ja akun varauksen välillä O.A.T/VOLTS-painikkeella. SELECT-painikkeella vaihdetaan kronometrin näkymää kyseisen lennon keston ja lentokoneen lentotuntien välillä.



KUVA 23. Järjestelmien hallintalaitteet

C172-lentosimulaattorin hallintapaneelin vasemmassa alareunassa, kuvassa 23 kohta 3 ja kuva 24, sijaitsee moottorin käynnistyspainike (START), päävirtakytkin (BAT ON), avioniikan päävirtakytkin (M. AVIONICS), magneeton kytkimet (MAGNETO ON, L ja R), laturin kytkimet (ALT ON, L ja R) sekä polttoaineen esisyöttö (PRIME). START-, MAGNETO ON- ja ALT ON-kytkimiä on kaksin kappalein, koska samalla hallintapaneelia voidaan käyttää monimoottoristen lentokoneiden mallintamiseen.



KUVA 24. Moottorinkäynnistyksen ja sähköjärjestelmien kytkimiä

Mittariston alapuolella, kuvassa 23 kohta 4 ja kuva 25, sijaitsee kytkin parkkijarrulle (PARKING BRAKE). Parkkijarru on päällä, kun kytkin on ulosvedettynä. Valokytkimiä on hallintapaneelille (PANEL LIGHT), peräsimen merkkivalolle (BEACON), laskeutumis- (LAND) ja rullausvaloille (TAXI), siivenkärjen ja peräsimen punaisille ja siivenkärjen vihreälle navigointivaloille (NAV), siivenkärkien vilkkuville navigointivaloille (STROBE) sekä tunnistusvaloille (RECOGN). Samasta rivistä löytyy myös kytkimet pitot-putkien lämmitykselle (PITOT HEAT) ja vasemmalle ja oikealle polttoainepumpulle (FUEL PUMP-L ja FUEL PUMP-R). Potkurin jäänpoisto (PROP DE-ICE) ja potkurien synkronointi (PROP SYNC) ovat monimoottorikoneita varten.



KUVA 25. Parkkijarru ja valo-, pitot-putken lämmitys- ja polttoainepumpunkytkimet

C172-lentosimulaattorin hallintapaneelin oikeasta alareunasta, kuvassa 23 kohta 5 ja kuva 26, löytyy hallintakytkimet laipoille (FLAP UP/FLAP DOWN), korkeusperäsimen trimmille (NOSE DN/NOSE UP), sivuperäsimen trimmille (RUDDER TRIM), polttoainetankin valitsimelle (FUEL SELECTOR), kaasuttimen lämmitykselle (CARBURETOR HEAT) sekä moottorin lisjäähdytykselle (COWL FLAP). Cessna 172:ssa on kiinteät laskutelineet ja siinä ei ole ilmajarruja, joten GEAR UP/GEAR DOWN-, AUTOBRAKE- ja SPEED BRAKE-kytkimet eivät ole käytössä C172-lentosimulaattorissa.



KUVA 26. Laippoihin, trimmaukseen ja moottorin toimintaan liittyviä kytkimiä

6 C172-LENTOSIMULAATTORIN TARKASTELU JA TESTAUS

C172-lentosimulaattorin testaus suoritettiin lentämällä testilento-ohjelma, joka tehtiin EASA:n CS-FSTD(A) Issue 2:ssa julkaistuja validointitestejä ja subjektiivisia testejä mukaillen. Nämä kaksi erillistä testiä yhdistettiin yhdeksi testilento-ohjelmaksi, koska oikeassa hakuprosessissa testit suorittavat eri henkilöt eri hakuprosessin vaiheissa. Tälle lentosimulaattorille ei kuitenkaan haeta virallisia hyväksymistä lentokoulutuslaitteeksi, joten testien yhdistäminen oli tässä kohtaa riittävä C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuuden arvioimiseen.

Yleisen teknisen tarkastelun perusteella testiohjelma luotiin FNPT I-tason vaatimusten mukaan. Testiohjelma sisälsi yhteensä 87 kohtaa, jotka oli jaettu 13 osioon. Yhdeksän kohdista liittyi eri lennonvaiheisiin, jotka olivat: rullaus, lentoonlähtö, nousu, matkalento, näkölähestyminen, mittarilähestyminen, laskeutuminen sekä toimet maassa ennen lentoa ja lennon jälkeen. Muut kohdat liittyivät lentokentän mallinnukseen, äänijärjestelmään, lentokoneen järjestelmiin sekä lennonvalvojan toimintoihin. EASA:n mukaiset testiohjelmat FNPT I -hyväksymistason lentokoulutuslaitteille sisälsivät kohtia, joissa käsitellään monimoottoristen lentokoneiden simulointia. Nämä osat jätettiin pois testiohjelmasta, koska ne eivät olleet valideja yksimoottorisen Cessnan kohdalla.

6.1 Yleinen tekninen tarkastelu

Yleinen tekninen tarkastelu perustui EASA:n CS-FSTD(A) Issue 2:ssa julkaistuun synteettisen lentokoulutuslaitteiden yleisiin teknisiin vaatimuksiin. Tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset eri hyväksymis- ja pätevyystasoisille on kerrottu luvussa 2. C172-lentosimulaattori täytti kokonaisuudessaan EASA:n määräyksien mukaiset FNPT I -tason vaatimukset ja myös osan FNPT II -tason vaatimuksista.

FNPT I -tason mukainen yleisten teknisten vaatimuksien tarkastelu:

- Simulaattorin ohjaamo oli riittävän suljettu häiriötekijöiden poissulke-
miseksi. Kaareva valkokangas, jolle näkymä koneen ohjaamosta heijas-
tettiin, kattoi 180-astetta ohjaajan horisontaalisesta näkökentästä ja lähes

täysin vertikaalisesta. Toki lentokoneen ohjaamon rakenne rajoitti näkyvyyttä aivan kuten oikeassa Cessnassa.

- Lennonvalvojan paikka oli koneen ohjaamon vasemmalla takapuolella, josta valvojalla oli hyvä näkymä ohjaajan toimiin (kuva 27). Lennonvalvojan paikka oli kuitenkin riittävän kaukana ohjaamosta, jottei se aiheuttanut häiriötekijöitä ohjaajalle.
- Ohjaamon navigointijärjestelmät, mittarit, katkaisimet, kytkimet ja ohjaimet olivat tuntumaltaan ja ulkonäöltään yhtenevät oikean Cessna 172:n kanssa. Myös sakkausvaroitin toimi samalla tapaa kuin oikeassa koneessa.



KUVA 27. Lennonvalvojan paikka on kuvan vasemmassa alareunassa

- X-Plane 11 -simulaattoriohjelmalla voitiin simuloida aerodynamiikan muutokseen vaikuttavia tekijöitä esimerkiksi moottorin tehosta, koneen liikehinnästä sekä eri lentoasuista johtuvia. X-Plane 11 -simulaattoriohjelma otti huomioon myös koneen lastauksen vaikutuksen aerodynamiikkaan sekä lentokorkeuden vaikutukset työntövoimaan ja aerodynamiikkaan.
- C172-lentosimulaattoriin oli ohjelmoitu suurin osa Euroopan lentokentistä ja lentokentille oli saatavilla täydelliset navigointitiedot. Lisäpäivityksillä on

mahdollista saada lentokenttien tarjonta kattamaan lähes kaikki maailman kentät.

C172-lentosimulaattori täytti näiltä osin FNPT II -tason vaatimukset:

- Lentosimulaattori oli rakennettu oikean Cessna 172:n ohjaamon pohjalle ja istuimen eteen-taakse-säätövara oli noin 30 senttimetriä. Tämä mahdollisti eri pituisille ohjaajille oikeanlaisen näkymän ulos ohjaamosta.
- C172-lentosimulaattorin ohjaimet vastasivat oikean Cessnan ohjaimia niiden liikeratojen suhteen.
- Laskeutuminen ja maakosketus simuloitiin X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelmalla äänen ja kuvan avulla.
- Ohjaamon merkittävimmät äänet oli mallinnettu.
- Visuaalisen järjestelmän ja hallintalaitteiden vasteaika oli erittäin hyvä, eikä lentäessä huomannut minkäänlaista viivettä toiminnoissa.

6.2 Testilento-ohjelma

Testilento-ohjelmassa C172-lentosimulaattorin toimintaa arvioitiin verrattuna testilentäjän tuntemuksiin oikeasta Cessna 172:sta ja sen käyttäytymisestä eri lennonosa-alueilla. Testattu toiminto sai hyväksynnän, jos se vastasi tuntumaltaan oikean lentokoneen käyttäytymistä vastaavassa tilanteessa. EASA määrittelee tällaisen hyväksymiskriteerin termillä CT&M (Correct Trend & Mangitude) (EASA 2018, 39). Testiohjelmaan sisällytettiin myös testilentäjän havainnot ja kommentit, varsinkin eroavaisuuksien osalta. Tällä saatiin luotua paremmin kokonaiskuva C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuudesta tällä hetkellä vahvuksiin ja heikkouksiin kuin käyttämällä hyväksyty/hylätty -arviointia.

Testilentäjänä toimi Tampereen yliopiston yliopisto-opettaja Jouko Laitinen, jolla on PPL-lentolupakirja ja lentokokemusta Cessna 172:lla. Tekstissä testilento-ohjelmassa testattu toiminta on lihavoituna. Käytetty testilento-ohjelma on kokonaisuudessaan liitteissä (liite 1).

6.2.1 Maassa ennen nousua

C172-lentosimulaattorin ohjaamon **yleisilme** oli suurelta osin yhtenevä oikean Cessnan ohjaamon kanssa. Simulaattorin painikkeet, kytkimet, järjestelmät ja hallintalaitteet vastasivat toiminnoiltaan ja ulkonäöltään simuloidun konetyypin vastaavia melko tarkasti. Suurimmat erot olivat simulaattorin potkurikulman säätövipu ja sivuperäsimen trimmi, joita oikeasta Cessna 172:sta ei löydy. C172-lentosimulaattorissa polttoainetankin valinta (FUEL SELECTOR) sijaitsi ohjauspaneelissa, kun taas Cessnassa se normaalisti sijaitsee lattialla. Niissä on myös käytön kannalta eroavaisuuksia, koska simulaattorissa voidaan valita käytettävä polttoainetankki. Oikeassa Cessna 172:ssa on vain valinta kiinni/auki, jolloin polttoainetta virtaa moottorille tasaisesti molemmista tankeista.

Polkimien **ohjainvoimat ja -liikeradat** olivat suurelta osin yhtenevät oikean Cessna 172:n kanssa. Ohjaussauvan liike oli aavistuksen pienempi ja lentokoneen ollessa paikallaan maassa se oli hiukan jäykempi kääntää kuin oikeassa koneessa. Tehonsäädön liikeradat olivat oikeanlaiset, mutta tehovipu oli hieman liian herkkä käyttää.

C-172-lentosimulaattorissa **moottorin käynnistyksen** proseduri poikkesi aavistuksen oikeasta Cessna 172:sta. Oikeassa Cessnassa on auton tapaan avaimella toimiva virtalukko, jota kääntämällä laitetaan magneetit päälle, kun taas simulaattorissa tämä tehdään erillisten kytkimien avulla. Muilta osin moottorin käynnistys meni saman proseduurin mukaan. Testilento-ohjelman aikana lentosimulaattoriohjelma kaatui muutaman kerran moottoria käynnistettäessä.

C172-lentosimulaattorin **korkeusperäsimen trimmaus** vastasi simuloidun lentokoneen korkeusperäsimen trimmausta. Yleisilmailukoneissa trimmaus tehdään aiemman kokemuksen perusteella painojakauman mukaan ja näin ollen Cessna 172:lle ei löydy valmiita taulukoita trimmaamiselle.

6.2.2 Rullaus

Rullauksen aikana testilento-ohjelmassa käytiin maassa liikkumiseen liittyviä kohtia läpi. C172-lentosimulaattorin **tehovivun asennon ja halutun moottoritehon suhde** oli samanlainen kuin oikeassa Cessna 172:ssa. Simulaattorin **tehovivun kitka** oli pienempi kuin oikeassa koneessa ja näin ollen se oli aavistuksen liian herkkä käyttää. Lentokone käyttäytyi simulaattorissa kiihdytyksen aikana aivan kuin oikea Cessna, joten **työntövoiman vaste** oli oikeanlainen. Moottoriteho reagoi hyvin tehovivun asennon muutokseen, eikä siinä ollut huomattavaa viivettä.

Rullausnopeudessa lentokoneen **ohjaaminen** polkimilla oli tuntumaltaan erittäin hyvä. Polkimissa olevat **varvasjarrut toimivat** myös rullausnopeudessa moitteettomasti.

6.2.3 Lentoonlähtö

Testilento-ohjelman lentoonlähtövaihe sisälsi testejä kiihtyvyydestä, nopeuksista ja ohjattavuudesta. Testiohjelmassa oli myös kohta **laippojen toiminnasta**, mutta normaalissa lentoonlähdössä Cessna 172:lla noustaan laipat sisään vedettynä. Laippoja käytetään lähinnä lyhyissä nousukiidoissa, jolloin rotaationopeutta saadaan laskettua. Lentoonlähtötestit tehtiin täysin tyynessä ilmassa.

Lentokoneen ja moottorin parametrinen suhde sekä **kiihtyvyys** olivat, kuten jo rullausvaiheessa todettiin, vastaavat oikeaan Cessna 172:seen. Rotaationopeudeksi testeissä saatiin noin 55 KIAS, joka on hyvin lähellä todellista Cessnan rotaationopeutta normaalissa lentoonlähdössä. **Nousukiidon keskeyttämisen** aikana, jossa moottoriteho vaihdettiin täydestä tehosta tyhjäkäynnille, lentokoneen nopeus laski aivan liian hitaasti.

Cessna 172:sta ohjataan maassa polkimien avulla, jotka vaikuttavat nokkapyörän asentoon. Simulaattorissa **nokkapyöräohjaus** oli nousukiidon aikana aivan liian herkkä ja se vaikeutti lentokoneen pitämistä keskellä kiitotietä. Toisaalta simu-

laattorissa oli hyvin mallinnettu potkurin pyörimisestä johtuva lentokoneen taipumus kääntyä vasemmalle. Heti lentoonlähdön jälkeen pienellä lentonopeudella suoritettut **sivuperäsinohjaukset** olivat tuntumaltaan liian kevyitä ja lentokone reagoi turhan tehokkaasti ohjausliikkeisiin.

6.2.4 Nousu

Testilento-ohjelmassa **normaali nousu** sujui kuten oikealla Cessna 172:lla lennettäessä. Maksiminousunopeudeksi saatiin 110 ft/min ilmanopeudella 72 KIAS. **Sakkauskäyttäytyminen nousuasussa** (laipat sisään vedettynä) vastasi rauhallisessa sakkauksessa hyvin oikean Cessna 172:n käytöstä ja nopeassa sakkauksessa käytös oli hyvin samantapainen. Kummassakin tilanteessa **sakkausvaroitus** (summeri) tuli oikealla ilmanopeudella, joka oli noin 48 KIAS.

6.2.5 Matkalento

Matkalennossa lentokoneen **nokan nostamiseen ja laskemiseen tarvittava voima, ohjainten liikeradat ja ohjauksen vaste** olivat hyvällä tasolla. Ohjausliikkeen jälkeen tosin lentokone jäi ”keinumaan”, eikä palannut normaaliin asentoon tarpeeksi nopeasti. Sama ongelma toistui **korkeusperäsimen trimmauksessa**. Lentokone oli vaikea saada tasaiseen vaakalentoon ja liikehdinnän jälkeen paluu vaakalentoon oli liian hidas. Lentonopeuden muutoksesta johtuva **phugoid-liike**, jossa nopeuden laskiessa koneen nokka laskee ja sitä seuraa nopeuden nousu, joka saa koneen nokan nousemaan ja nousu johtaa nopeuden laskuun ja niin edelleen, oli myös varsin voimakas ja pitkäkestoinen. Kaiken kaikkiaan pitkittäissuuntainen vakavuus ei ollut yhtä hyvä kuin oikeassa Cessna 172:ssa.

Lentokoneen kallistusohjaus ei ollut yhtä hyvä ohjainten liikeratojen ja ohjainvoimien suhteen kuin pituussuuntaisessa ohjauksessa. Ohjaukseen tarvittiin voimaa enemmän kuin oikean Cessnan ohjaamiseen. Ja kuten jo aiemmin mainittiin, ohjainsauvaa käännettäessä sen liikerata oli aavistuksen lyhyt. **Kallistusoh-**

jauksen vaste oli vastaavasti erinomainen. **Peräsinohjaukseen tarvittavat voimat ja ohjainten liikeradat** vastasivat oikeaa Cessna 172:sta. Samanlaista keinumista ei ollut havaittavissa kallistusohjauksessa kuin oli pitkittäissuuntaisessa ohjauksessa. Testilento-ohjelmassa tehty **spiraaliliike** oli **vakaudeltaan** hyvä, mutta lentokoneen nopeus pyrki laskemaan sen aikana hieman liikaa.

Lentokoneen **hallintaa korkealla** testattiin 10 000 jalan korkeudessa, jolloin maksimi lentonopeus oli 80 KIAS. Lentotuntuma oli muuten hyvä, mutta ohjaus oli hieman liian tehokas. **Sakkausnopeus** nousi korkealla lennettäessä noin 5 KIAS, joka on hyvin linjassa oikean Cessna 172:n sakkausnopeuksien muutokseen. Lentokoneen **suorituskykyominaisuudet** olivat kaikilla lentokorkeuksilla verrattavissa oikeaan Cessna 172:seen. Tehonsäädön ja nopeuden suhde pysyi koko ajan hyvänä.

Lentokoneen **hallintaa moottori sammuneena** testattiin nopeudella 68 KIAS, joka on Cessna 172 Pilot's Operating Manualin määrittämä paras liukunopeus (Lockwood 2017, 50). Lentokoneen käyttäytyminen oli hyvin aidontuntuista ja sen hallittavuus oli hyvällä tasolla. **Moottorin uudelleenkäynnistys** onnistuu myös ilmassa. Testilento-ohjelman aikana tosin lentosimulaattori kaatui moottorin uudelleenkäynnistykseen yhteydessä, mutta tämä oli jo testattu aiemmin C172-lentosimulaattorilla ja todettu sen olevan mahdollista.

Sivu- ja korkeusperäsin ohjauksiin tarvittaviin voimiin kaivattiin muutosta eri lentotiloissa. Suurella nopeudella lennettäessä ohjainpintojen poikkeutukseen tarvittavien voimien tulisi olla suurempia kuin hitailla nopeuksilla, jotta täysin oikeanlainen lentotuntuma saavutettaisiin.

6.2.6 Mittarilähestyminen ja -laskeutuminen

Testilento-ohjelmassa mittarilähestymisiä ja -laskeutumisia tehtiin sekä kirkkaalla että sumuisella säällä. **PAR-lähestymistutkan käyttöä** ei testattu, koska ainaakaan tällä hetkellä C172-lentosimulaattorissa ei ole mahdollista toteuttaa lentäjän

ja lennonjohdon välistä keskustelua. PAR-lähestymistutkista on luovuttu Suomessa ja muutenkin se oli enimmäkseen sotilasilmailun käytössä. Tilalle ovat tulleet kehittyneemmät järjestelmät kuten ILS-tarkkuusmittarilähestyminen.

Testilento-ohjelmassa ILS (kuva 28) toimi erittäin hyvin sekä tarkkuus- että ei-tarkkuuslähestymisissä. Tarkkuuslähestymisessä ILSin LOC ja GS ohjasivat tarkasti lentokoneen sumun läpi kohti kiitotietä. Pelkän ILS LOC:n käyttöä testattiin lähestymällä kiitotietä ”väärästä suunnasta”, jolloin ILSin liukupolku ei ollut käytössä. Tällöin tietysti myös LOC näytti suunnan peilikuvana. Muutkin **ei-tarkkuuslähestymisissä** käytettävät majakat (VOR, NDB ja DME) ja niiden käyttöön tarvittavat proseduurit vastasivat oikean Cessna 172:n vastaavia.



KUVA 28. ILS-lähestyminen Kuopion lentoaseman kiitotielle 33

6.2.7 Näkölähestyminen

Näkölähestymiset (kuva 29) suoritettiin testilento-ohjelmassa kirkkaassa säässä ja keskellä päivää, joten näkyvyys oli paras mahdollinen. **Normaali lähestymisen ja laskeutuminen moottori toiminnassa ilman visuaalisia lähestymisopasteita** oli hyvin aidontuntuinen. Kiitotien näki riittävän kaukaa ja etäisyyden arviointi sille oli helppoa. Lentonopeuden ja -korkeuden hahmottaminen oli myös hyvin realistista. Lentokoneen **pitkittäissuuntainen staattinen vakaus** oli hyvällä tasolla lähestymisen aikana. **Korkeus- ja kallistusohjaus** toimivat moitteettomasti ja kaaroksissa **sivuluisu** oli otettu huomioon. Ohjaukset olivat myös täsmällisiä, eikä niissä havaittu viiveitä. Ylimoitettut ohjainpintojen poikkeutukset aiheuttavat lentokoneelle **poikittaisheilautelua** ja tämä oli myös mallinnettu onnistuneesti C172-lentosimulaattoriin.



KUVA 29. Näkölähestymisen testausta

Lähestyminen ja laskeutuminen toimimattomalla moottorilla testattiin samuttamalla moottori 1000 jalan korkeudessa lähestymisen aikana. Lentokoneen käyttäytyminen ja ohjattavuus ilman työntövoimaa oli hyvä ja todentuntuinen. Tie-

tenkään lentokoneen liito-ominaisuudet eivät riittäneet kiitotielle asti, mutta muuten sen toiminta oli realistista. Toki testi ei ole välttämättä validi yksimoottoriselle lentokoneelle, vaan se on tarkoitettu ennemminkin monimoottorikoneille.

Testilento-ohjelmassa tehtiin **lähestymisiä ja laskeutumisia sivutuulella**. Tasaaisessa 5 solmun sivutuulella laskeutuminen tuntui helpolta. Tämä johtuu siitä, että normaalisti ei ole aivan tasaista tuulen suuntaa ja nopeutta. Lisäämällä puuska ja turbulenssia sivutuulilaskeutumisiin tuli lisähaastetta.

Moottoritehon muutokset lähestymisen aikana olivat hyvin mallinnettu C172-lentosimulaattorissa. Työntövoiman lisäämisen suhde **kiihtyvyyteen** oli varsin realistista ja siitä **aiheutuva muutos dynamiikkaan** oli hienosti mallinnettu. Kiihtyvyyden lisäksi myös **laippa-asetuksien muutos** on huomioitu lentokoneen dynamiikan mallintamisessa ja sekin on hyvin aidontuntuinen. **Sakkausikäyttäytymisessä** laskuasussa laippojen ulkona olon vaikutus näkyi selvästi. Sakkausnopeus laski 48 solmusta 40 solmuun. Alhaisen sakkausnopeuden ja hyvän työntövoiman vasteen ansiosta **ylösveto** epäonnistuneen lähestymisen aikana onnistui helposti niin kuin sen täytyy Cessna 172:lla ollakin.

6.2.8 Laskeutuminen

Testilento-ohjelmassa laskeutumisvaiheen testeissä arvioitiin lentokoneen käyttäytymistä juuri ennen maakosketusta sekä laskeutumisen jälkeisen maakiidon aikana. Laskeutumisesta tehtiin kuivalle kiitotielle kirkkaassa tuulettomassa säässä. Lentokoneen hallittavuus **sivuttaissuuntaisessa ohjauksessa** laskeutumisen aikana pysyi hyvänä aina sakkausnopeuteen asti, mikä on tyypillistä Cessna 172:n käyttäytymiselle. **Peräsinohjaus** vastasi täsmällisesti polkimien liikkeisiin, eikä siinä havaittu viiveitä.

Laskeutumisen jälkeisessä maakiidossa **etupyöräohjaus** oli tuntumaltaan liian herkkä, aivan kuten oli nousukiidon aikanakin. Tämä aiheutti liian voimakkaita ohjausliikkeitä ja keskellä kiitotietä pysyminen oli haastavampaa kuin oikean

Cessna 172:n kohdalla. Cessna 172:ssa ei ole varsinaista **moottorijarrua** eli reverssiä, mutta simulaattorissa nopeuden tulisi kuitenkin hidastua nopeammin, kun moottori asetetaan tyhjäkäynnille laskeutumisen yhteydessä.

6.2.9 Toimet maassa lennon jälkeen

Testilento-ohjelmassa arvioitiin lennon jälkeisiä toimia maassa lentokoneen parkkeeraamisen ja moottorin sammutuksen osalta. **Parkkijarru** toimi moitteettomasti. **Moottorin sammuttamisen** proseduuri poikkesi hieman oikean Cessna 172:n vastaavasta. Samalla tavalla kuten moottorin käynnistyksen yhteydessä mainittiin, niin myös sammutuksessa magneettojen käyttö eroaa simulaattorin ja oikean lentokoneen välillä. Simulaattorissa magneetit suljetaan erillisestä katkaisimesta, kun taas oikeassa Cessnassa se hoidetaan virtalukkoa avaimella kääntämällä.

6.2.10 Näyttöjärjestelmä ja lentokentän mallinnus

C172-lentosimulaattorin näyttöjärjestelmän luoma yleiskuva oli erittäin hyvä. X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelma keskittyy lentämiseen ja lennon kannalta olennaisiin visuaalisiin elementteihin. Testilento-ohjelmassa arvioitiin näyttöjärjestelmää ja lentokentän mallinnusta juuri lentotoimintojen kannalta sekä kirkkaassa päivänvalossa että pimeässä.

Rullaustie ja kiitotie näkyivät selkeästi ja niiden rajaus ympäröivään maastoon oli tarkka. Rullaustien opasteet olivat helposti luettavissa ja rullaustien keskiviivaa oli helppo seurata. Rullaustien merkkkaus oli myös pimeässä hyvin aidontuntuinen. **Kiitotien pinta ja merkinnät** (kuva 30) oli hienosti mallinnettu. Kiitotien pinnasta pystyi näkemään pintamateriaalin lisäksi, kiitotien olosuhteet ja lentokoneiden laskeutumisjäljet. Kiitotien merkinnät olivat hyvin nähtävissä ja ne sisälsivät kaiken tarpeellisen: kynnysmerkinnän, kiitotien numeron, tähtäyspistemerkinnän, sekä keski- ja reunaviivat.



KUVA 30. Kiitotien pinta ja merkinnät Kuopion lentoaseman kiitotiellä 15

Kiitotie näkyi selkeästi pimeässä lähestyttäessä (kuva 31). Sen **lähestymisvaloja** oli helppo seurata ja ne erottuivat hyvin itse kiitotien **reunavalosta**. Ainoastaan kiitotien **keskiviivan valo** puuttui. Näkölähestymisen apuvalot, PAPI ja kiitotien kynnyksvalo, olivat mallinnettu erinomaisesti ja niiden avulla laskeutuminen pimeässä sujui vaivattomasti.



KUVA 31. Kiitotien lähestymis-, kynnyks- ja reunavalot sekä PAPI

6.2.11 Lennonvalvojan ohjaamat

C172 -lentosimulaattorissa lennonvalvoja pystyi vaikuttamaan vallitsevaan **lentosäähän** tuulen, näkyvyyden ja sateen suhteen. Sääolosuhteet sai muokattua tarkasti halutunlaisiksi. Muokkaaminen oli nopeaa ja helppoa ja sen pystyi tekemään myös kesken lennon. C172 -lentosimulaattorin tietokoneen suorituskyky ei aivan riittänyt äärimmäisten sääolosuhteiden mallintamiseen.

Lentokentän valinta oli yksinkertaista C172 -lentosimulaattorissa. Valittavana oli lähestulkoon kaikki Euroopan lentokentät ja niiden kaikki kiitotiet. Lentokentällä oli mahdollista valita lennon lähtöpaikaksi portti, asemataso tai kiitotie. Kaikissa näissä oli myös useita vaihtoehtoja, riippuen tietysti lentokentästä. Lennon pystyi myös laittaa alkamaan kesken lähestymisen. Valittavat etäisyydet kiitotiestä olivat 3 NM ja 10 NM.

6.2.12 Äänijärjestelmä

C172 -lentosimulaattorissa lentokoneen äänet olivat suurelta osin hienosti mallinnettu. Ohjaamon **merkittävimmit äänet**, kuten varoitusäänet ja katkaisimien käyttämisestä kuuluvat äänet olivat hyvin aidonkuuloisia. **Moottorin äänet** sekä **laippojen** liikkeestä johtuvat **äänet** olivat myös realistisia. Äänimaailmaan olisi kaivattu lisää lentokoneen ulkopuolelta kuuluvia ääniä esimerkiksi ilmavirrasta johtuvaa ääntä.

6.2.13 Lentokoneen järjestelmät

Lentokoneen järjestelmien osalta testilento-ohjelmassa tarkasteltiin järjestelmiä, jotka kuuluvat oikean Cessna 172:n varustukseen. **Viestiyhteydet ja navigointijärjestelmä** laitteineen näyttivät aidoilta ja ne toimivat juuri oikealla tavalla. **Sähköjärjestelmä** oli sen hallinnan kannalta yhtä yksinkertainen kuin oikeassa Cessna 172:ssa ja siinä oli kaikki tarvittava mallinnettuna. **Polttoaine- ja öljyjärjestelmät** olivat suurimmalta osalta yhtenevät oikeaan lentokoneeseen. Ainut ero oli polttoainetankin valitsemisen kanssa, mistä kerrottiin jo kohdassa 6.2.1.

Voimalaitejärjestelmä vastasi hallintalaitteiden ja mittareiden osalta täysin oikean Cessna 172:n vastaavia. Simulaattorin **sakkauksen varoitusjärjestelmä** oli hyvin todentuntuinen. Sakkausvaroitus tapahtui äänen (summeri) avulla ja se tuli oikeilla lentonopeuksilla.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

C172-lentosimulaattorin testilento-ohjelman avulla saatiin arvioitua simulaattorin lentokoulutuskelpoisuutta ja mikä sen hyväksymistaso voisi olla EASA:n määräysten mukaan. Testeissä arviointiperusteena käytettiin testilentäjän tuntemuksia oikeasta Cessna 172:sta verrattuna simuloituun koneeseen. Testiohjelman sisältämän testilentäjän kommenttiosion perusteella, missä kiinnitettiin huomiota etenkin eroavaisuuksien osalta, tehtiin listaus parannuskohteista ja -ehdotuksista. Näiden avulla luotiin kokonaiskuva C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuudesta tällä hetkellä ja kuinka sitä voisi tulevaisuudessa parantaa entisestään. Parannuskohteet ovat pääsääntöisesti helposti toteutettavissa. Tässä luvussa on myös esitetty jatkotutkimusaiheita, jotka vaativat hieman enemmän omistautumista ja ne voisivat sopia esimerkiksi insinööriopiskelijan opinnäytetyöksi.

7.1 C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuus

Kuten luvussa 6.1 mainittiin, C172-lentosimulaattori täyttää FNPT I -tason tärkeimmät yleiset tekniset vaatimukset, joskin pienellä hienosäädöllä simulaattorista saisi näiltäkin osin vielä paremman ja helpomman käyttää. Varsinkin lennonvalvontapisteessä on tarvetta muutoksille. Tästä kerrotaan lisää kohdassa 7.2 Parannuskohdat ja -ehdotukset.

Testilento-ohjelmasta saadut tulokset vahvistavat suurelta osin C172-lentosimulaattorin FNPT I -hyväksymistasoa. C172-lentosimulaattorin yleisilme on oikeaa konetta vastaava. Hallintalaitteet, mittarit ja avioniikka näyttävät muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta oikeilta ja niiden käyttö on yhtenevää oikean Cessna 172:n vastaaviin. C172-lentosimulaattorissa on tehonsäädössä vipu potkurikulman säädölle, jota oikeassa koneessa ei ole. Myös magneettojen käytössä sekä polttoainetankin valinnassa on eroavaisuuksia. Oikeassa Cessnassa magneetit laitetaan päälle virtalukossa olevaa avainta kääntämällä, kun taas simulaattorissa se tapahtuu erillisen vipukytkimen avulla. Polttoainetankin valinnan kääntökytkin

on C172-lentosimulaattorissa sijoitettu ohjauspaneeliin, kun taas oikeassa koneessa se sijaitsee lattialla. Ohjauspaneelissa on muutama ylimääräinen kytkin, jotka eivät ole käytössä Cessna 172:sta simuloitaessa. Nämä eroavaisuudet ovat kuitenkin kokonaiskuvaa ajatellen vähäisiä ja ohjaamosta löytyy kaikki tarvittavat laitteet hyvinkin kokonaisvaltaiseen lentokoulutukseen.

Lentokoneen käyttäytyminen ilmassa on pääsääntöisesti hyvällä tasolla eri lennonvaiheissa. Varsinkin moottoritehonsäätö sekä laippojen käyttö ja niiden vaikutukset lentokoneen käyttäytymiseen ovat erinomaista. Lentokone vastaa ohjainpintojen poikkeutukseen nopeasti ja näistä johtuva lentokoneen liikehdintä on mallinnettu hienosti. Lentokoneen ohjaamiseen sen sijaan kaivattaisiin mallinnusta ohjainvoimien muutoksesta eri lentotiloissa. Ohjaukseen tarvittavan voiman tulisi kasvaa lentonopeuden kasvaessa, mutta C172-lentosimulaattorissa ohjainvoimat on toteutettu mekaanisesti jousien avulla, joten voimat eivät pysty muuttumaan lentotilojen mukaan. Simulaattorin ohjainvoimat ovat jonkinlainen keskiarvo tarvittavista voimista, koska esimerkiksi sauvaohjaimen kääntäminen koneen ollessa maassa on liian raskas ja taas ilmassa suurella ilmanopeudella liian kevyt. Ohjainvoimien muutoksen puute toistui läpi koko testilento-ohjelman.

C172-lentosimulaattorissa on kaikki tarvittavat laitteet mittarilähestymisen ja -laskeutumisen koulutukseen (ILS, VOR ja DME). Näiden käyttö on myös mallinnettu erittäin hyvin. Muutenkin lentokoneen käytös lähestymisen ja laskeutumisen aikana on hyvin aidontuntuista. Tosin maakiidon aikana ohjaus on liian herkkä ja lentokoneen nopeuden tulisi hidastua nopeammin moottorin ollessa tyhjäkäynnillä.

C172-lentosimulaattori tuottaa erittäin hyvää ja selkeää kuvaa ympäristöstä. 180 asteen kuvantuotto on erittäin tärkeä lentokoulutuksen kannalta, koska pienko-neita lennetään pääsääntöisesti näön perusteella ja tällainen näyttö mahdollistaa esimerkiksi kiitotien havaitsemisen myös sivuilta. Ainoastaan pimeälaskeutumisessa kiitotiestä puuttuu keskiviivan valot, mutta muilta osin lentokenttä ja sen tarvittavat opasteet, merkinnät ja valot on mallinnettu hyvin. Myös kaikki merkittävät äänet on mallinnettu simulaattorissa. Näiltä osin C172-lentosimulaattori täyttää FNPT I -tason vaatimukset.

C172-lentosimulaattorissa on mallinnettu kaikki tarvittavat lentokoneen järjestelmät, ja ne toimivat aivan kuten oikeassa Cessnassa. Näistä lentokoulutuksen kannalta tärkeimmät ovat navigointijärjestelmä sekä sakkauksen varoitusjärjestelmä.

Kaiken kaikkiaan C172-lentosimulaattorin lentokoulutuskelpoisuus on hyvin lähellä FNPT I -hyväksymistasoa. Simulaattori on parhaimmillaan juuri yksittäisten proseduurien koulutuksessa, mihin FNPT-hyväksymistason lentokoulutuslaitteet ovat tarkoitettukin. Simulaattori on erittäin pätevä koulutuslaite muun muassa mittarilähestymisten, lentoonlähtöproseduurien sekä navigoinnin harjoitteluun. Hyviä käyttökohteita C172-lentosimulaattorille ovat myös haastavat laskeutumiset ja toiminnot häiriötilanteissa. Simulaattorilla voidaan tehdä useita toistoja vaikeista lentotoimista pelkäämättä koneen hajoamista. Toistojen avulla lentäjä oppii tekemään oikeita ratkaisuja oikeassa järjestyksessä, mikä auttaa toimintaa ylittävässä tilanteissa oikealla lentokoneella. Tietysti kaikkien muidenkin laitteiden opettelu simulaattoriolosuhteissa on tärkeää, jotta varsinaisen lennon aikana lentäjän kapasiteetista ei kulu voimavaroja laitteiden käytön opetteluun.

C172-lentosimulaattorilla pystytään tietysti harjoittelemaan lentotoimintaa kokonaisuudessaankin, mutta silloin täytyy olla tietoinen simulaattorin ja oikean lentokoneen eroavaisuuksista. C172-lentosimulaattorin käyttötarkoitus tulee olemaan lentotekniikan opiskelijoiden perehdyttäminen lentämiseen. Siihen tarkoitukseen C172-lentosimulaattori on erittäin pätevä lentokoulutuslaite. Perehdyttämistarkoituksessa lentosimulaattori on riittävän todellinen koko lentotoiminnan osalta ja käyttäjät saavat hyvän tuntuman millaista on lentää Cessna 172:n kaltaisella pienkoneella.

7.2 Parannuskohteet ja -ehdotukset

C172-lentosimulaattorin ohjaamosta puuttuu vasemman puolen ovi, mistä joutuessa vasemmalle katsottaessa näkyy muutakin kuin simulaattorin tuottama kuva. Oven lisääminen tekisi ohjaamosta täysin suljetun, joka mahdollistaisi täysin autenttisen lentokokemuksen näkyvyyden osalta. Optimaalisessa tilanteessa ohjaaja ei näe ulkona muuta kuin simulaattorin tuottaman kuvan.

Nykyisellään lennonvalvojan piste on melko hyvä, mutta pienillä muutoksilla siitä saisi vieläkin toimivamman. Lennonvalvojan käyttöön olisi hyvä saada oma näyttölaite, jotta hänen olisi helpompi muuttaa simulaattoriohjelman asetuksia. Tällä hetkellä kuva valikoista heijastetaan valkokankaan vasempaan reunaan. Ongelmana oli, ettei C172-lentosimulaattorissa käytettävä tietokone jostain syystä hyväksynyt neljättä kuvan ulostuloa (näyttö ja 3 projektoria). Ongelma on varmaan-kin helposti ratkaistavissa.

Lennonvalvojan ja lentäjän välinen mikrofonijärjestelmä oli suunnitelmassa, mutta ainakaan vielä sitä ei ole toteutettu. Se mahdollistaisi lennonjohdon ja lentäjän välisen kanssakäymisen harjoittelun, mutta se myös helpottaisi normaalia keskustelua lennonvalvojan ja lentäjän välillä. Testilento-ohjelman aikana huomattiin, että lentokoneen äänien takia on vaikea kuulla mitä toinen puhuu.

Testilento-ohjelman aikana X-Plane 11 -simulaattoriohjelma kaatui muutaman kerran. Nämä tapahtuivat lentokoneen käynnistyksen yhteydessä sekä lennettäessä todella huonossa säässä. Huomattiin, että nämä toimet vaativat tietokoneelta hyvin paljon suorituskykyä, eikä sen kapasiteetti meinannut riittää. Grafiikka-asetuksilla toki voidaan vaikuttaa tähän, mutta pidemmällä tähtäimellä voisi olla järkevää jakaa C172-lentosimulaattorin aiheuttamaa taakkaa useammalle tietokoneelle.

C172-lentosimulaattorin tuottama kuva tulee kolmelta projektorilta, jotka heijastavat kuvan kaarevalle valkokankaalle. Näiden projektoreilta tulleiden kuvien yhdistäminen on tehty X-Plane 11 -lentosimulaattoriohjelman omalla kuvan sekoitusohjelmalla. Tuotetussa kuvassa on nähtävissä kohdat, joissa kuvat yhdistyvät. Kuvassa on muutenkin nähtävissä virheitä tietyissä kohdissa, johtuen juuri käytetystä sekoitusohjelmasta. Näistä virheistä luultavasti pääsisi eroon käyttämällä jotakin muuta kaupallista sekoitusohjelmaa. Simulaattoriprojektin aikana kokeiltiin tehdä yhtenäinen kuva erään sekoitusohjelman kokeiluversiolla. Kuvan tekeminen oli yllättävän helppoa ja nopeaa. Kuvan laatu oli myös erinomainen, eikä siinä näkynyt ollenkaan epäjatkuvuuskohtia.

C172-lentosimulaattorilla on hyvät valmiudet kokonaisvaltaiseen navigointikoulutukseen, koska sekä X-Plane 11 -simulaattoriohjelma että Virtual Flyn lennonohjauspaneeli tukevat tätä. Tällä hetkellä navigointiin tarvittavat tiedot kuitenkin täytyy hakea lennonvalvojan pöydällä olevien hiiren ja näppäimistön avulla, eikä niitä näin ollen ole mahdollista saada suoraan ohjaamosta käsin. Lisäämällä ohjaamoon taulutietokoneen, jossa olisi täydelliset kartta- ja navigointitiedot saatavilla, tästä ongelmasta päästäisiin eroon ja simulaattorista tulisi erittäin hyvä koulutuslaite navigoimiseen.

C172-lentosimulaattoria käynnistettäessä tietokoneella on vaikeuksia tunnistaa polkimia, ohjaussauvaa ja tehonsäätöjärjestelmää, jotka ovat kiinnitetty tietokoneeseen USB-portin kautta. Tietokone tunnistaa ohjaimet, kun ne käytetään irti USB-portista ja kytketään uudelleen kiinni. Tämä ei ole käyttömukavuuden kannalta kovin hyvä asia, koska ohjaimet täytyy irrotuksen jälkeen kalibroida uudelleen X-Plane 11 -simulaattoriohjelmassa. Uskoisin, että tämä ongelma johtuu tietokoneen asetuksista ja on varmasti helposti ratkaistavissa, jos on osaamista kyseisestä aiheesta.

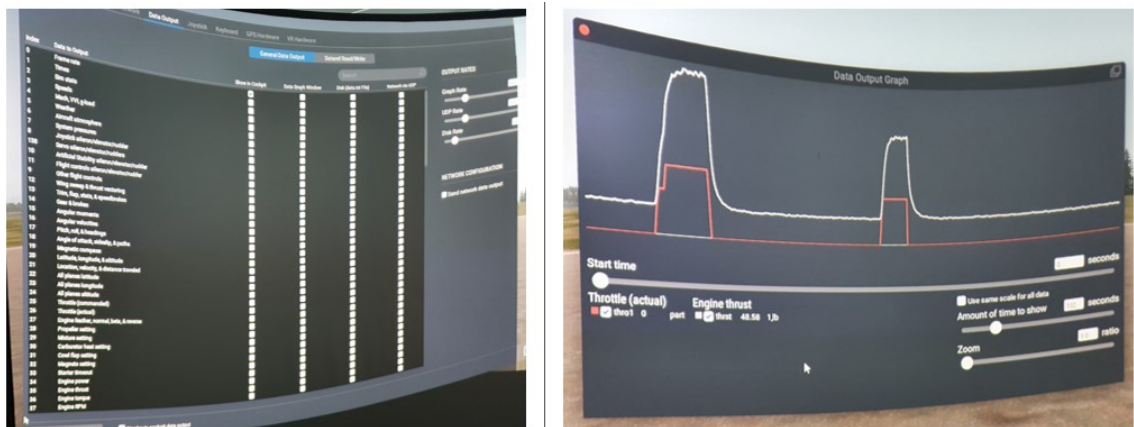
7.3 Jatkotutkimusaiheita

Itseäni jäi eniten harmittamaan **objektiivisen testauksen** puuttuminen tästä opinnäytetyöstä. Tässä olisi varsin mielenkiintoinen ja varmasti myös kohtuullisen helposti toteutettava jatkotutkimusaihe. Objektiivisen testauksen lisääminen testiohjelmaan mahdollistaisi täysinmittaisen EASA:n mukaisen simulaattorin lentokoulutuskelpoisuuden arvioimisen. Objektiivisessä testauksessa testilento-ohjelmasta saatua dataa verrataan oikean lentokoneen suoritusarvoihin vastaavissa lentotiloissa. Tietysti, jos aikoo tehdä objektiivisen testauksen niin silloin myös testilento-ohjelmaa täytyy muuttaa ja sen tuloksien täytyy perustua numeerisiin arvoihin, jotta vertailu voidaan suorittaa.

Tämän opinnäytetyön aikana huomasin, että Cessna 172:sta on vaikea löytää tarpeeksi dataa ja vielä tarpeeksi tarkkaa sellaista, jotta vertailu voitaisiin tehdä. Tästä syystä tässä opinnäytetyössä ei ole tehty objektiivista testausta Cessna

172:n osalta. Toisen lentokonetyypin valinta testaukseen olisi taas paisuttanut tätä työtä liian suureksi ja se myös olisi mennyt ainakin osittain aiheen ohi.

X-Plane 11 -simulaattoriorhjelmasta sen sijaan saa helposti lentoarvoja ulos (kuva 32). Valittavana on noin 140 erilaista arvoa, joita voidaan seurata lennon aikana. Arvoja voidaan seurata reaaliaikaisesti numeerisesti sekä graafisena esityksenä. X-Plane 11 -simulaattoriorhjelmassa on myös mahdollista tallentaa halutut lentoarvot tekstitiedostoksi.



KUVA 32. Vasemmassa kuvassa on mitattavien lentoarvojen valikko ja oikeassa graafinen esitys kaasuvivun asennon ja työntövoiman suhteesta

Kuten edellä mainittiin, Cessna 172:sta on vaikea löytää tarkkaa ja monipuolista lentodataa. Tämä voi johtua siitä, että Cessna 172:sta on valmistettu valtavia määriä ja näin ollen variantteja on myös useita. Näiden varianttien osalta voi olla eroavaisuuksia suoritusarvoissa. Todennäköisempää lentodatan vaikealle löytämiselle on kuitenkin se, että Cessnan kaltaisissa pienkoneissa ei ole samanlaisia lennontallennusjärjestelmiä kuin esimerkiksi matkustajakoneissa ja hävittäjissä. Objektiviiseen testaamiseen tällä simulaattorilla voisi olla järkevä valita Boeing 737. Sekä X-Plane 11 -lentosimulaattoriorhjelma että Virtual Flyn lennonohjauspaneeli tukevat kyseistä lentokonemallia ja siitä maailman yleisimpänä matkustajalentokoneena on varmasti paljon dataa tarjolla. Virtual Flyn kohdalla Boeing 737:n käyttöönotto vaatii lisenssin ostamista.

C172-lentosimulaattorissa lentämisestä puuttuu niin sanottu perstuntuma, joka on hyvin tärkeää pienillä yleisilmailukoneilla lennettäessä. Simulaattorin mallin-

nus on tällä hetkellä hyvin kliininen, koska simulaattorissa ei ole **liikejärjestelmää**. Toki kuvan avulla pystytään mallintamaan heilumista, tärinää ja nopeuden muutoksia aika hyvin, mutta liikejärjestelmä parantaisi varmasti näitä tuntemuksia. Liikejärjestelmä saattaisi aiheuttaa ohjaamoon myös natinaa ja muita ääniä, jotka ovat oikealle Cessna 172:lle tyypillisiä.

C172-lentosimulaattori on tällä hetkellä kiinni vanhan lentosimulaattorin liikejärjestelmän alustassa, mutta itse järjestelmä ei ole käytössä, eikä sen toiminnasta ole varmuutta. Järjestelmä vähintäänkin vaatisi ohjelmoinnin ja tietysti kiinnityksen paineilmaverkkoon. C172-lentosimulaattori on aika painava, joten sen alle täytynee laittaa esimerkiksi paineilmapalje, jotta nykyinen liikejärjestelmä jaksaisi liikuttaa sitä.

Liikejärjestelmän lisääminen voisi olla mielenkiintoinen jatkotutkimuksen kohde jo pelkästään kiihtyvyyden tunteen lisäämisen kannalta. Ja jos aiheeseen haluaa lisää haastetta, niin ehdotukseni olisi tutkia mahdollisuutta tarvittavien ohjainvoimien muutoksien mallintamiseen. Se voisi olla mahdollista juuri paineilman avulla. Tämä tietysti vaatisi myös rakenteellisia muutoksia ohjaimiin. Tiedossa ei ole myöskään, että onnistuuko ohjainvoimien mallintaminen X-Plane 11:llä vai vaatisiko se mahdollisesti jonkin toisen lentosimulaattoriohjelman.

LÄHTEET

Cessna. n.d. Engineered for training. Built for adventure. Verkkosivu. Luettu 3.8.2021. <https://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-skyhawk>

EASA. 2018. Certification Specifications for Aeroplane Flight Simulation Training Devices. Pdf-dokumentti. Luettu 14.5.2021. <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-FSTD%28A%29%20%E2%80%94%20is-sue%202.pdf>

FAA-Certified X-Plane. n.d. X-Plane. Verkkosivu. Luettu 3.8.2021. <https://www.x-plane.com/pro/certified/>

Flight Sim Rudder Pedals – Ruddo PLUS. n.d. Virtual-Fly. Verkkosivu. Luettu 13.5.2021. <https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/ruddo-step-on-for-real>

Flight Sim Throttle Quadrant – TQ6 PLUS. n.d. Virtual-Fly. Verkkosivu. Luettu 13.5.2021. <https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/tq6>

Flight Sim Yoke – Yoko “the Yoke” PLUS. n.d. Virtual-Fly. Verkkosivu. Luettu 13.5.2021. <https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/flight-sim-yoke-yoko-the-yoke-plus>

Hoffren, J. & Saarela, O. 2019. Lentotekniikan perusteet. 2. painos. Helsinki: Opetushallitus.

How X-Plane Works. n.d. X-Plane. Verkkosivu. Luettu 3.8.2021. <https://www.x-plane.com/desktop/how-x-plane-works/>

Lockwood, J. 2017. Cessna 172 Pilot’s Operating Manual. Pdf-dokumentti. Luettu 6.8.2021. https://www.x-plane.com/manuals/C172_Pilot_Operating_Manual.pdf

See all of X-Plane 11’s airports in under 10 minutes. 2017. X-Plane. Verkkosivu. Luettu 3.8.2021. <https://www.x-plane.com/2017/02/see-x-plane-11s-airports-10-minutes/>

SOLO Airliner. n.d. Virtual-Fly. Verkkosivu. Luettu 13.5.2021. <https://www.virtual-fly.com/en/shop/flightpanels/solo-airliner>

Traficom. 2021. Lentosimulaattorit ja muut koulutuslaitteet, eli FSTD:t. Verkkosivu. Luettu 8.5.2021. <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/lentosimulaattorit-ja-muut-koulutuslaitteet-eli-fstdt>

V3RNIO PLUS TPM. n.d. Virtual-Fly. Verkkosivu. Luettu 13.5.2021. <https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/v3rnio>

LIITTEET

Liite 1. C172-lentosimulaattorin testilento-ohjelma

1(4)

C172-lentosimulaattorin testilento-ohjelma

A. Maassa ennen nousua		Kommentit
1)	Yleisilme: Simulaattorin painikkeet, katkaisimet, järjestelmät ja hallintalaitteet vastaavat toimintoiltaan ja ulkonäöltään simuloitun konetyypin vastaavia	
2)	Ohjainvoimat ja -liikeradat (ohjaussauva, polkimet ja tehonsäätö)	
3)	Moottorin käynnistys	
4)	Korkeusperäsimen trimmaus	
B. Rullaus		Kommentit
1)	Tehovivun asennon ja halutun moottoritehon suhde	
2)	Tehovivun kitka	
3)	Työntövoiman vaste	
4)	Ohjaus maassa	
5)	Jarrujen toiminta	
6)	Hätäjarru	
C. Lentoonlähtö		Kommentit
1)	Lentokoneen ja moottorin parametrien suhde	
2)	Kiihtyvyys	
3)	Hidastaminen/nousukiidon keskeyttäminen (moottoriteho täydestä tyhjäkäynnille)	
4)	Peräsinohjaus	
5)	Ohjaussauvaohjaus	
6)	Laippojen ja solakoiden toiminta	
7)	Rotaationopeus	
8)	Sivuttaissuuntainen ohjaus lähellä sakkausnopeutta (minimi ohjausnopeus)	
D. Nousu		Kommentit
1)	Normaali nousu	
2)	Nousu moottorivian kanssa	
3)	Laippojen vaikutus	
4)	Sakkauskäyttäytyminen, nousuasussa laipat ulkona (ei täydet)	
E. Matkalento		Kommentit
1)	Koneen nokan nostamiseen ja laskemiseen tarvittava voima ja ohjainten liikeradat	
2)	Suurin laskeutumisnopeus	

2(4)

3) Koneen kallistamiseen tarvittava voima ja ohjainten liikeradat		
4) Kallistusohjauksen vaste		
5) Peräsinohjaukseen tarvittava voima ja ohjainten liikeradat		
6) Spoilerien / lentojarrujen vaikutus dynamiikkaan		
7) Korkeusperäsimen trimmaus		
8) Sakkauskäyttötymien lähellä lakikorkeutta (matkalentoasussa)		
9) Phugoid-liikkeen dynamiikka (3 täyttä sykliä)		
10) Spiraaliliikkeen vakaus		
11) Poikittaisheilahtelu (vähintään 6 sykliä)		
12) Suorituskykyominaisuudet (nopeus/teho)		
13) Hallinta korkealla		
14) Hallinta suurella nopeudella		
15) Moottorin sammutus ja uudelleen käynnistys		
16) Liikehdintä moottori sammuneena		
F. Mittarilähestyminen ja -laskeutuminen		
(1) Tarkkuuslähestyminen		
(a) PAR, tarkkuuslähestymistutka		
(b) Manuaalilähestyminen päätöskorkeuteen (DH)		
(c) Manuaalilähestyminen päätöskorkeuteen (DH) moottori sammuneena		
(2) Ei-tarkkuuslähestyminen		
(a) NDB		
(b) VOR, VOR/DME, VOR/TAC		
(c) ILS LLZ (LOC), LLZ (LOC)/BC		
G. Näkölähestyminen		Kommentit
1) Normaali lähestyminen ja laskeutuminen moottori toiminnassa ilman visuaalisia lähestymisopasteita		
2) Lähestyminen ja laskeutuminen toimimattomalla moottorilla		
3) Lähestyminen ja laskeutuminen sivutuulella		
4) Kiihdyttäminen moottorilla		

3(4)

5) Moottoritehon muutoksen vaikutus dynamiikkaan		
6) Laippa-asetuksen muutoksen vaikutus		
7) Laskutelineiden vaikutus dynamiikkaan		
8) Pitkittäissuuntainen staattinen vakaus		
9) Sakkaukäyttäytyminen (laskuasussa)		
10) Kallistusohjauksen vaste		
11) Peräsinohjauksen vaste		
12) Poikittaisheilahtelu (vähintään 6 sykliä)		
13) Sivuluisu käänöksessä		
14) Epäonnistunut lähestyminen, ylösveto		
H. Laskeutuminen		Kommentit
1) Miniminopeus sivuttaissuuntaiseen ohjaukseen		
2) Moottorijarrutus		
3) Suunta- ja maaohjaus		
4) Peräsinohjauksen vaste		
5) Spoilerien toiminta		
I. Maassa laskeutumisen jälkeen		Kommentit
1) Parkkijarru		
2) Moottorin sammutus		
J. Näyttöjärjestelmä, lentokentän mallinnus		Kommentit
1) Rullaustie		
2) Kiitotie		
3) Kiitotien rajaus		
4) Kiitotien pinta ja merkinnät		
5) Kiitotien valot, sisältäen reuna- ja keskiviivan		
6) Näkölähestymisen apuvalot		
7) Kiitotien lähestymisvalot		
K. Lennonvalvojan ohjaamat		Kommentit
1) Sääolosuhteet		
2) Lentokentän valinta		
L. Äänijärjestelmä		Kommentit
1) Ohjaamon merkittävimmät äänet (varoitusaänet, kytkimet)		
2) Moottori		
3) Laipat, ulos ja sisään		
4) Laskutelineet		
5) Spoilerit, ulos ja sisään		
6) Moottorijarrutus		

4(4)

M. Lentokoneen järjestelmät		Kommentit
1) Jäänpoisto/-esto		
2) Viestiyhteydet		
3) Sähköjärjestelmä		
4) Polttoaine ja öljy		
5) Hydrauliiikka ja pneumatiikka		
6) Laskutelineet		
7) Voimalaitejärjestelmä		
8) Navigointijärjestelmä		
9) Sakkauksen varoitusjärjestelmä		

Liite 2. Parannuskohteet ja -ehdotukset

Havaittu parannuskohde/ongelma	Parannusehdotus
Lennonvalvojan on vaikea muuttaa simulaattorihjelman asetuksia	Lennonvalvojalla on tällä hetkellä jo oma näyttö, mutta sitä ei saatu yhdistettyä tietokoneeseen. Näyttö olisi hyvä saada käyttöön, jotta lennonvalvoja pystyisi muuttamaan asetuksia helpommin. Omalla näytöllä voisi tehdä myös muutoksia ilman, että lentäjä niitä näkee. Tämä on tarpeellinen esimerkiksi koneen vikaantumista simuloitessa.
Tietokone/ simulaattorihjelma kaatuilee, kun simuloitavaa on paljon, esim. lentokoneen moottoria käynnistettäessä sekä lennettäessä huonossa säässä	Simulaattorihjelman asetuksista pystyy vähentämään grafiikan tarkkuutta, mikä auttaa tietokonetta pyörittämään simulaattorihjelmaa paremmin. Pitkällä tähtäimellä voisi miettiä toisen tietokoneen asentamista nykyisen rinnalle, jotta yhdelle koneelle ei kasautuisi niin paljon tehtäviä.
Valkokankaalle heijastettu kuva ei ole täysin yhtenäinen	Heijastettavan kuvan saa täysin yhtenäiseksi siihen tarkoitettujen sekoitusohjelmien avulla. Simulaattoriprojektin aikana kokeiltiin yhden ohjelman kokeiluversiota ja yhtenäisen kuvan tekeminen oli aika nopeaa ja helppoa.
Kartta- ja navigointitiedot on vaikea saada kesken lennon	Simulaattorin ohjaamoon voisi ottaa käyttöön erillisen taulutietokoneen, jossa olisi saatavilla kartta- ja navigointitiedot.
Simulaattorista vasemmalle katsottaessa näkyy muutakin kuin simulaattorin tuottama kuva	Vasemman oven asentaminen simulaattoriin toisi lentotuntuman kannalta suuren lisän. Tällöin ohjaaja ei näkisi ohjaamosta ulospäin muut kuin simulaattorin tuottaman kuvan.
Lennonvalvojan ja lentäjän on vaikea kommunikoida simulaattorin äänien takia	Lennonvalvojan ja lentäjän välinen mikrofonijärjestelmä helpottaisi kommunikointia. Lisäksi se mahdollistaisi lentäjän ja lennonjohdon välisen vuorovaikutuksen mallintamisen.
Tietokone ei tunnista simulaattorinohjaimia: polkimet, sauvaohjain ja tehonsäätövivut	Ongelma on todennäköisesti tietokoneen asetuksissa, koska tietokone ei joka kerta tunnista USB-porttiin kiinnitettyjä ohjaimia. Tietokone tunnistaa ohjaimet, kun ne käytetään irti USB-portista ja kytketään uudelleen kiinni. Käytettävyyden kannalta tälle ongelmalle olisi hyvä löytää pysyvämpi ratkaisu.
Ohjainvoimien muutoksen puuttuminen	Tämä aihe toistui läpi koko testilento-ohjelman ja sen ratkaisu ei todennäköisesti ole kovin yksinkertainen. Tämän takia lisäsin sen jatkotutkimusaiheisiin, josta toivottavasti joku ottaa sen tarkemman tutkimuksen alle.