



# Miehittämättömän ilma-aluksen säähavainnointi

Jäätymisen vaikutukset

Pekka Leppänen

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2020

Ajoneuvotekniikka  
Älykkäät koneet

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Ajoneuvotekniikka  
Älykkäät koneet

LEPPÄNEN, PEKKA:  
Miehittämättömän ilma-aluksen säähavainnointi  
Jäätymisen vaikutukset

Opinnäytetyö 46 sivua  
Huhtikuu 2020

---

Miehittämättömien ilma-alusten määrä ja kehitys on ollut suuressa kasvussa viime vuosikymmenten ajan niin siviili- kuin sotilasilmailussakin. Niiden käyttö kohdentuu yleisimmin ympäristön kuvantamiseen sekä tilannetiedon luomiseen, mutta kehityksen ja autonomisuuden myötä käyttöalueet laajentuvat. Ilma-aluksen lentotoimintaa rajoittavat tällä hetkellä sääolosuhteet sekä kiristyvät lait, joilla halutaan lisätä turvallisuutta.

Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Insta ILS Oy:lle. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää sääolosuhteista ja erityisesti jään muodostumisesta koituvaa haittaa ilma-alukselle. Työssä tutustuttiin erilaisiin tutkimuksiin miehittämättömien ilma-alusten autonomisuudesta sekä yleisesti sään vaikutuksista ilmailussa. Käytännön tutkimuksen tavoitteena oli havaita, miten pyöriväsiipisen ilma-aluksen potkureiden lapoihin muodostunut jää vaikuttaa sen suorituskykyyn ja miten alus käyttäytyy lennon aikana. Ilma-alukselle määritettiin ennalta reitti, jota se lensi potkurit puhtaina sekä jäätyneenä. Suurimmaksi ongelmaksi koitui jääkerroksen tasainen mallintaminen, kun lentotoimintaa ei voitu suorittaa luonnollisesti jäätävissä olosuhteissa.

Tutkimuksen tuloksista havaitaan, miten jääkertymät potkurin lavoissa vaikuttavat aluksen virrankulutukseen. Ennustettu lentoaika ja -matka lyhenevät selvästi, kun moottoreiden pyörimisnopeutta joudutaan kasvattamaan, jotta alus pysyy ilmassa. Käytännön tutkimuksesta olisi saatu enemmän hyödyllistä tietoa, jos ilma-aluksen sisäänrakennetusta inertiaali-yksiköstä (IMU) olisi voitu saada luetua sen tuottamaa numeraalisia arvoja lentotoiminnan aikana. Työtä voitaisiin jatkokokehtaa niin, että ilma-alus tunnistaisi itse sensoreilta saadun tiedon perusteella, milloin sen suorituskyky alkaa heiketä jäätymisen tai muun sääolosuhteen takia ja näin lisätä miehittämättömän ilma-aluksen autonomisuutta.

---

Asiasanat: miehittämätön ilma-alus, kauko-ohjattu ilma-alus, autonomisuus, jäätyminen, lentotoiminta, lentotyö

## **ABSTRACT**

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

LEPPÄNEN, PEKKA:  
Weather observation of unmanned aerial vehicles  
Effects of icing

Bachelor's thesis 46 pages  
April 2020

---

The ever-increasing use and development of unmanned aerial vehicles (UAVs) in civil and in military use is creating increasing demands to the aircraft's capabilities. The autonomy of these aircrafts is increasing along with the work they can be used in. Their use nowadays is targeted to photography and updating real-time situational awareness of a wanted area. The two biggest things affecting unmanned aircrafts operation are weather and tightening laws in aviation.

This thesis was commissioned by Insta ILS Oy. The main purpose for this thesis was to examine how weather phenomena and especially icing affects the unmanned aircrafts performance in flight. The work explored theoretical side of flying, autonomous unmanned aerial vehicles, and atmospheres weather phenomena.

The aim in practical section of this thesis was to get inflight data from sensors which could tell the user from possible icing of rotor's blades and loss of lift. The goal was to see which sensors and what information from them could indicate that the aircraft's blades are accumulating ice. From this data in future work it could be possible to program the aircraft so that itself could take actions needed to mitigate the effects of icing.

---

Key words: unamanned aircraft, remotely piloted aircraft, autonomy, icing conditions, atmosphere

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	ILMAILUN TEORIA .....	8
	2.1 Lentäminen väliaineessa .....	8
	2.2 Vaikuttavat voimat .....	8
3	AUTONOMISUUS ILMAILUSSA .....	11
	3.1 Autonomisuuden määritelmä .....	11
	3.2 Miehitämättömät ilma-alukset .....	12
	3.3 RPAS -järjestelmä .....	14
	3.4 Ilma-alusten autonomisuus .....	15
	3.5 Autonomisuuden haasteet .....	17
4	SÄÄN VAIKUTUS .....	18
	4.1 Säärajoitteet miehitämättömälle ilma-alukselle .....	18
	4.2 Jäätymisen aiheuttavat tekijät ilmakehässä .....	19
	4.3 Jään havaitseminen .....	21
	4.4 Jään vaikutus miehitämättömään ilma-alukseen .....	22
	4.4.1 Aerodynamiikka .....	23
	4.4.2 Avioniikka .....	26
	4.5 Jäänpoisto .....	27
5	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS .....	29
	5.1 Tutkittava aihe .....	29
	5.1.1 Jäätävien olosuhteiden luominen .....	30
	5.1.2 Jäätymisen havaitseminen .....	31
	5.2 Käytännön tutkimus suorittaminen .....	32
6	TULOKSET .....	35
	6.1 Jäätymisen havainnointi .....	35
	6.1.1 Mekaaniset tulokset .....	35
	6.1.2 Visuaaliset tulokset .....	39
7	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	41
	7.1 Tulosten yhteenveto .....	41
	7.2 Miehitämättömän ilma-aluksen kehittäminen .....	42
	LÄHTEET .....	43

**LYHENTEET JA TERMIT**

API	Ohjelmointirajapinta (Application Programming Interface)
BVLOS	Suoran näköyhteyden ulkopuolella tapahtuva (Beyond visual line-of-sight)
CAC	Asiayhteydestä riippuvainen autonomisuuden kyvykyys (Contextual Autonomous Capability)
IPS	Jäätymisenesto järjestelmä (Ice Protection System)
RPA	Kauko-ohjattu ilma-alus (Remotely Piloted Aircraft)
RPAS	Kauko-ohjatun ilma-aluksen kokonaisjärjestelmä (Remotely Piloted Aircraft System)
UA	Miehittämätön ilma-alus (Unmanned Aircraft)
UAS	Miehittämätön ilma-alusjärjestelmä (Unmanned Aircraft System)
VLOS	Suoraan näköyhteyteen perustuva (Visual line-of-sight)

## 1 JOHDANTO

Yrityksillä on liiketaloudellisena motiivina olla alansa kehityksen edelläkävijöinä ja tuottaa sellaista tekniikkaa, jolle on suurta kysyntää. Suurta huomiota saaneella sekä alati kasvavalla digitalisaatiolla on vaikutusta yritysten ydintoimintaan sekä markkinoiden dynamiikkaan (Ilmarinen 2015). Digitalisaation mukana on tullut uusia mahdollisuuksia sekä niiden mukana uusia ongelmia. Toisinaan tekniikan kehitys joutuu pysähtymään kohdatessaan liian suuria esteitä, mikä tietää pysähdystä myös digitalisaation kasvulle. Yhtenä esteenä voidaan pitää sääolosuhteiden vaikutusta käytettäviin laitteisiin sekä niillä toimimiseen. Yritykset haluavat löytää ratkaisuja ja kehittää tekniikkaa, jotta heidän liiketoimintansa ei kärsisi johtuen sääolosuhteiden tuomista ongelmista.

Ilmailussa huono sää sekä vallitsevat olosuhteet voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa kuolettavia tapaturmia. Jäätyminen, tuuliväänteet eli äkilliset tuulen suunnan muutokset joko pysty- tai vaakasuorassa ja sakea sumu ovat ilmailun suurimpia riskitekijöitä. (Williams, A 2019.) Näitä vastaan on kehitelty erilaisia keinoja ja laitteita, jotka mahdollistavat lentämisen huonoimmissakin olosuhteissa. Esimerkiksi jäänpoistoon sekä tuuliväänteiden havaitsemiseen on kehitetty tekniikkaa, osin autonomista, minkä avulla lentämisestä saadaan turvallisempaa.

Työssä toteutettavan tutkimuksen kohteena on miehittämättömän ilma-aluksen toiminta huonoissa sääolosuhteissa, joista erityistä huomiota kohdistetaan jääty-misen vaikutuksiin. Miehittämättömässä ilmailussa sää täytyy huomioida erityisesti ilma-alusten ollessa kooltaan liikennelentokoneita pienempiä. Ilmailulain (864/2014) mukaan ilma-aluksen päälliköllä on aina ensisijainen vastuu ilma-aluksen turvallisesta sekä vastuullisesta toiminnasta. Ilma-aluksen näköyhteyden tai sen hallinnan menetys sääolosuhteista johtuvista syistä on koettu ongelmaksi, joka voi mahdollisesti johtaa lentotoiminnan keskeytymiseen. Ennen lentotoimintaa laaditun lentosuunnitelman toteutus on ilma-alukselta saadun hyödyn kannalta oleellista. Jos lentotoiminta joudutaan keskeyttämään tai ilma-alus vaurioituu lennon aikana, voivat siitä koituvat kustannukset olla suuria. (Siquig, R. A 1990.)

Työn tavoitteena on myös perehtyä autonomiaa sisältäviin ratkaisuihin miehittämättömässä ilmailussa ja selvittää, olisiko laitteen tietoisuuden lisääminen sitä ympäröivästä tilasta mahdollista työssä toteutetun tutkimuksen pohjalta.

## 2 ILMAILUN TEORIA

### 2.1 Lentäminen väliaineessa

Ilma voidaan lukea fluidiksi, joiden yleisiin ominaisuuksiin kuuluu viskositeetti, turbulenttinen virtaus suurilla nopeuksilla sekä kokoonpuristuminen. Ilman molekyylien tiheys on todella suuri, eivätkä ne ota vastaan niihin kohdistuvia voimia vaan siirtävät sitä vain eteenpäin. Ilmalle on myös määritelty termodynaamisia ominaisuuksia. Oleellisimpina niistä lentämisen kannalta ovat paine, tiheys ja lämpötila, jotka ovat kaikki vaikutuksessa toisiinsa. Samassa lämpötilassa tapahtuva paineen nousu korreloi suoraan tiheyden nousuun, eli jos paine tuplaantuu, myös tiheys tuplaantuu. Lämpötilan noustessa ilman tiheys laskee, kun oletetaan paineen pysyvän samana. Vaikka lämpötila laskee noustaessa ylös ilmakehässä, ei ilman tiheys silti kasva vaan laskee, sillä ilmanpaineen lasku on määrittelevämpi tekijä ilman tiheyden muutoksessa. Ilma myötäilee ihanteellisille kaasuille määriteltyjä fysiikanlakeja, jotka yksinkertaistavat ilman ominaisuuksien mallintamista erilaisissa muunnostilanteissa. (Panaras 2012; Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 4-2.)

### 2.2 Vaikuttavat voimat

Voimat, jotka vastustavat ilma-aluksen lentämistä ovat maanpintaan kohti vaikuttava paino (*weight*) ja liikkeen vastakkaisen suuntaan vaikuttava ilmanvastus (*drag*). Paino on voima, joka vaikuttaa kaikkiin massaa omaaviin kappaleisiin. Mahdollisen jään muodostuminen ilma-aluksen pintoihin lisää tätä painoa merkittävästi ja vaikuttaa näin aluksen suorituskykyyn. Ilmanvastukseen ja sen voimakkuuteen vaikuttaa kaksi asiaa. Ilman liikettä hidastaa edellisessäkin kappaleessa mainittu ilman viskositeetti eli molekyylien toisiinsa vaikuttava kitka. Toinen suuri tekijä on ilman molekyylien ja materiaalin pinnan välinen kitka, jota kutsutaan myös rajapinnaksi. Pienetkin epätasaisuudet, kuten jääkertymät materiaalinpinnassa, vaikuttavat sen ylitse kulkevaan ilman virtaukseen. (Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 5-2.)



For every action, there is an equal and opposite reaction  
(Isac Newton)

Niin kuin Isac Newtonin kolmas laki määrittää, on jokaiselle kappaleeseen kohdistetulle voimalle olemassa kappaleen itse tuottama vastakkaissuuntainen yhtä suuri voima. Jotta lentäminen ja liike olisi ylipäättään mahdollista, pitää saada aikaan enemmän voimaa vastakkaisiin suuntiin kuin liikettä vastustavat voimat tuottavat. Nämä liikettä tuottavat voimat ovat liikkeen suuntainen työntövoima (*thrust*) ja ylöspäin suuntautuva nostovoima (*lift*). Voimat ovat esitettynä kuviossa 1.



KUVIO 1. Ilma-alukseen vaikuttavat voimat (Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 5-2)

Liikevoima tuotetaan siirtämällä ilmaa vastakkaiseen suuntaan kuin mihin halutaan liikkeen suuntaavan. Ilmaa siirretään moottoriin kiinnitetyillä potkurin lavoilla tai suihkumoottorissa ahtimen siivillä, jotka myös imevät ulkoilmaa moottoriin. Taaksepäin työnnetty ilma saa aikaan potkurilla varustetuissa ilma-aluksissa sen lapoihin yhtä suuren vastakkaissuuntaisen voiman. Suihkumoottori taas työntää kuumat pakokaasut taaksepäin voimalla, joka on yhtä suuri mutta vastakkais-suuntainen, kuin tästä aiheutuva työntövoima. (Panaras 2012; Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 5-3.)

Niin kiinteäsiipisten lentokoneen siipien kuin pyöriväsiipisissä ilma-aluksissa, kuten helikopterissa, käytettävien potkurien lapojenkin muoto on suunniteltu hyödyntämään tiettyjä fysiikan lakeja, jotta saavutettaisiin paras mahdollinen hyötysuhde nostovoimalle. Bernoullin lain mukaan fluidin liikenopeuden kasvaessa sen sisäinen paine pienenee. (Hall 2015, Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 4-6.) Siipien ja potkurien lapojen muoto onkin suunniteltu kaarevaksi, jolloin ilman kohdatessa siiven etureunan sen yläpinnalle syntyy ilman liikenopeuden kasvaessa paineen laskua ja alapinnalle ilmanpaineen nousua. Suurin ylöspäin kohdistettu voima tuotetaan kuitenkin työntämällä ilmaa alaspäin samalla periaatteella kuin työntövoimassa. (Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 4-8.)

### 3 AUTONOMISUUS ILMAILUSSA

#### 3.1 Autonomisuuden määritelmä

Autonomisuus on yleisessä merkityksessä määritelty kykynä toimia itsenäisesti ja määrätä sekä hallita omia toimintoja ilman muiden ohjausta. Autonominen järjestelmä on kykenevä arvioimaan ja tekemään ratkaisuja saavuttaakseen sille määritetyn tavoitteen sen nykyisen tiedon sekä havainnoinnin pohjalta kehittyvässä ja muuttuvassa ympäristössä. Päätöksentekokykyä edellyttävissä tehtävissä järjestelmältä vaaditaan elin, joka pilkkoo päätavoitteet pienempiin, yksinkertaisempiin toimintoihin. Suunnittelukykyä tarvitaan asettamaan toiminnot tavoitteen saavuttamiseksi oikeaan järjestykseen. Lisäksi vaaditaan tekniikkaa, kuten sensoreita ja toimilaitteita, joilla paikannetaan, liikutaan sekä tunnistetaan tarvittaessa haluttuja kohteita. Vielä yhtenä mahdollisena osana on koneoppiminen, jolla voidaan haluttaessa laajentaa järjestelmän kykyä sopeutua uusiin tilanteisiin ja kehittyä niissä. (Nonam, Kendoul, Suzuki, Wang & Nakazawa 2010; Baudin, Blanquart, Guiochet & Powell 2007.)

Autonominen järjestelmä on siis kykenevä tuottamaan harkittuja toimintoja pohjautuen päätöksentekologiikoihin, jotta osataan tehdä oikeat päätökset oikeassa paikassa (Baudin ym. 2007). Yleinen väärinymmärrys onkin sekoittaa automaattinen ja autonominen järjestelmä keskenään. Niitä erottaa autonomisen järjestelmän kyky tehdä ratkaisuja vapaasta tahdostaan ilman erillistä vaikuttavaa tekijää, kun taas automaattinen järjestelmä tekee ne toiminnot mitä käyttäjä on sille syöttänyt. (Clough 2002). Käyttäjän ja laitteen työmäärän jako määrittää autonomisuuden tasot. Mitä vähemmän tehtävää suorittava laite vaatii ihmisen sille laatimia komentoja, sitä autonomisempi laite on. (Johnson, Leen, Goldberg & Chiu 2005.)

Kehittyneen robotiikan ansiosta uusia autonomisia sovellutuksia voidaan hyödyntää yhä enemmän riskialttiimmista sekä tarkkuutta vaativista tehtävissä. Mielenkiinto tällaista tekniikkaa kohtaan on auttanut sen kehitystä viime vuosikymmenien aikana. (Nonam ym. 2010.)

### 3.2 Miehitämättömät ilma-alukset

Ilma-alusta, jonka ohjaaja ei ole itse aluksen kyydissä lennon aikana, kutsutaan miehitämättömäksi ilma-alukseksi tai kansankielisemmin droneksi. Kyseiset ilma-alukset ovat kokoluokaltaan miehitettyjä aluksia pienempiä ja niitä ohjataan etänä linkkiyhteyden välityksellä. (Valavanis, Vachtsevanos 2015.) Liikenteen turvallisuusvirasto määrittää kauko-ohjatun ilma-aluksen 7.12.2018 voimaantullessa ”OPS M1-32” -määräyksessä sanoin: ”miehitämättömän alus, jota ohjataan kauko-ohjauspaikalta ja käytetään lentotyöhön” (Liikenteen turvallisuusvirasto 2018).

Lentotyöllä tarkoitetaan aluksen käyttöä erikoistehtäviin eli toisin sanoen muuhun kuin urheilu- tai harrastekäyttöön. Ilma-aluksia voidaan jakaa monilla eri tavoilla luokkiin muun muassa sen perusteella, onko kyseessä hupi- vai ammatillentoiminta. Toinen tapa on luokitella ilma-alukset käyttötarkoituksen mukaan määrittämällä, tapahtuuko lentotoiminta sisällä vai ulkona sekä millaista hyötykuormaa (*payload*) ilma-alus kantaa. Kolmas yleisesti käytössä oleva tapa on luokitella ilma-alukset mallin mukaan. (Dykowitz 2019.)

Mallityyppejä on yleisesti ottaen kahdenlaisia: pyöriväsiipisiä ja kiinteäsiipisiä. Pyöriväsiipiset ilma-alukset (*multi-rotor*) ovat markkinoiden suosituimpia niin kaupallisessa kuin ammattikäytössä niiden tekniikan kehityksen myötä laskeneiden hintojen takia. Niiden käyttö ja hallinta on helppoa, ja ne ovat useamman potkurin ansiosta vakaita lennon aikana. Pyöriväsiipisten alusten huonona puoleena on niiden lyhyt lentoaika sekä rajoittunut kyky kantaa kuormaa. Ne sopivatkin siis parhaiten ympäristön kuvantamiseen niihin kiinnitettyjen kehittyneiden kameroiden avulla. (David 2018.) Kiinalainen DJI-niminen yritys on maailman johtava pyöriväsiipisten ilma-alusten sekä niissä käytettävän tekniikan valmistaja. Kuvassa 1 lentää yrityksen myydyimpiin malleihin kuuluva Phantom 4.



Kuva 1. Pyöriväsiipinen DJI Phantom 4 -merkkinen ilma-alus lentämässä (Blackeye 2016)

Toinen mallityyppi on kuvan 2 mukainen kiinteäsiipinen ilma-alus (*fixed wing*). Se on enemmän lentokonetta muistuttava malli, jossa on kiinteä siipirakenne, joka luo nostetta eteenpäin suuntautuvasta liikkeestä. Tämän takia ne eivät voi nousta pystysuoraan ylös liikkeelle lähdössä vaan vaativat tähän kiitotien tai katapultin. Toisaalta kiinteäsiipiset alukset kykenevät lentämään korkeammalla ja kauemman aikaa, kuin pyöriväsiipiset alukset. Lentotoiminta vaatii enemmän taitoa sekä kokemusta aluksen kovemman liikenopeuden takia ja ei siitä syystä ole suosittu laite harrastajien käytössä. Ilma-alukset ovat yleisimmin armeijan käytössä, kun miehitetyn aluksen lähettäminen tehtävälle on liian riskialtista. Alusta hyödynnetään myös muuan muassa pinta-alaltaan suurien alueiden kartoittamisessa, valvonnassa (rajavalvonta) ja maataloudessa. (David 2018; Dykowitz 2019.)



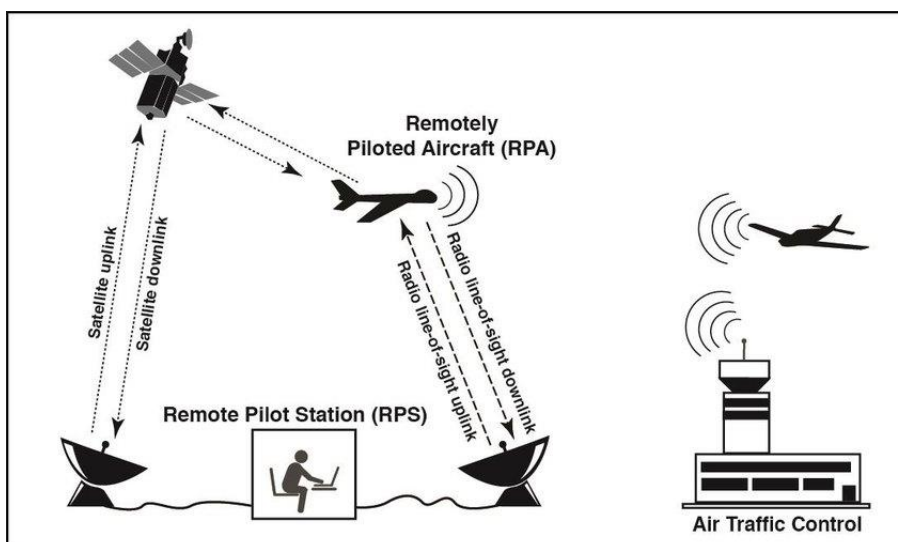
KUVA 2. Suomen puolustusvoimien Orbiter 2b -merkinen kiinteäsiipinen ilma-alus (Maavoimat)

Vaikka miehittämättömien ilma-alusten käyttö pienentää henkilövahinkojen riskiä, voivat laitteita kohtaan olevat vaarat olla ilmeisempiä. Sää, törmäys tai ilmatilan säädökset ovat suurimpia tekijöitä, jotka vaikuttavat lentotoimintaan ja joista ilma-aluksen päällikön pitää olla tietoinen. Näihin riskeihin onkin haluttu luoda tietoisuutta erilaisilla mobiilisovelluksilla sekä tiedottamalla miehittämättömien järjestelmien käyttäjiä. Uusi EU:n droneasetus tulee Suomessa voimaan 1.7.2020, jolloin koulutusvaatimus lennättäjille tulee pakolliseksi, jos ilma-aluksen massa ylittää 500 grammaa. Näin varmistetaan ilma-alusten käyttäjien koulutuksesta ja tietoisuudesta lentotoimintaan ja lennätykseen liittyen. (Trafin ilmailumääräys OPS M1-32 2018; Droneinfo.fi, EU dronesäännöt 2020.)

### 3.3 RPAS -järjestelmä

Kauko-ohjattu ilma-alus (RPA) toimii osana laajempaa järjestelmien yhteistyötä, jonka osat edesauttavat aluksen toimintaa. Liikenteen turvallisuusvirasto määrittää kuvion 2 mukaisen, kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmän (RPAS) tarkoittavan: ”kauko-ohjattua ilma-alusta, sen kauko-ohjauspaikkoja, tarvittavia ohjaus- ja seurantayhteyksiä ja muita erikseen määrättyjä kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön edellyttämien järjestelmän osia”. (Liikenteen turvallisuusvirasto 2018.)

RPAS on siis monen järjestelmän kokonaisuus, joita sen käyttäjän tai käyttäjien tulee hallita turvallisen toiminnan takaamiseksi. RPAS -toiminnalla on niin taloudellisia kuin yhteiskunnallisiakin hyötyjä ja sen on huomattu olevan myös ympäristölle ystävällistä. Tämä on aiheuttanut järjestelmien kysynnässä suurta kasvua ja luonut uusia vaatimuksia kokonaisjärjestelmälle, kuten esimerkiksi mahdollisuuden lennättää ilma-alusta suoran näköyhteyden ulkopuolella (BVLOS). Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAO:n mukaan RPAS -toiminnalle onkin ollut tarve luoda toimintaperiaatteet, jotta turvallisuusriskit saadaan minimoitua ja EU:n uudella droneasetuksella pyritään juuri tähän (Vann 2019). Liikenne- ja viestintävirasto on luonut internetsivun ”droneinfo.fi”, jossa on säädöksiä sekä ohjeistuksia RPAS -lentotyötoiminnalle (Droneinfo.fi, RPAS Lentotyötoiminta 2020).



KUVIO 2. RPAS -järjestelmä kokonaisuutena miehittämättömässä ilmailussa (Hobbs 2018)

### 3.4 Ilma-alusten autonomisuus

Täyttä autonomisuutta miehittämättömiltä ilma-aluksilta ei vielä sallita, vaan käyttäjän on aina kyettävä puuttumaan aluksen toimintaan. Miehittämättömien ilma-alusten autonomisuuden määrittämiselle on monimutkaista löytää yhdenlaista arvoa tai tiettyä ominaisuutta mitä mitata. Ongelmana on myös se, että erilaiset autonomisuutta määrittelevät mittarit tai diagrammit yhdistetään aina

tiettyyn tehtävään. Erilaisia keinoja määrittämiseen on kyllä luotu, mutta ne ovat kohdennettu usein tiettyyn robotiikan osa-alueeseen, kuten liikkumiseen tai järjestelmän kykyyn hahmottaa ympäristöä. (Clough 2002; Atyabi, MahmoudZadeh & Nefti-Meziani 2018, 197.) NIST -virastolla (National Institute of Standards and Technology) on jatkuvassa kehityksessä rakenne nimeltä ALFUS, jonka tarkoituksena on luoda työkalut, nimitykset, määritelmät sekä yleiset standardit autonomisuudelle. Tämä viitekehys toimii apuna tilanteissa, joissa vaaditaan ongelman arviointia ja tietoa onko autonominen järjestelmä kykeneväinen ratkaisemaan tätä ongelmaa. Yksi ALFUS:n kahdesta pääkäsitteestä on asiayhteydestä riippuvainen autonomisuuden kyvykkyys CAC. Se kuvailee, kuinka autonomisen järjestelmän kyvykkyys ja taso määritellään tehtävän luonteen mukaan ja sen, onko järjestelmä kykeneväinen suorittamaan tehtävää sen vaatimassa ympäristössä. Se ottaa myös huomioon järjestelmän riippuvaisuuden ihmisestä. (Huang 2007.)

Kuten aikaisemmin työssä mainittiin, autonomisuus vaatii sensoreita ja tekniikkaa, kuten tietokoneita ja logiikoita ympäristön sekä ilma-aluksen tilan määrittämiseen. Niihin luottaminen sekä niiden toiminnan takaaminen on kriittistä tehtävän kannalta. Osaltaan kännykkäteollisuuden ansiosta kehittyneet kooltaan pienet ja tehokkaat tietokoneet sekä muut aistivat sensorit, kuten gyrometrit ja kiihtyvyyssanturit, mahdollistavat kaikkien tarvittavien komponenttien sijoittelun ilmaalukseen. (Jha 2016) Yhtenä käytännön esimerkkinä ilma-alusten autonomisuudesta voidaan pitää järjestelmän kykyä suunnitella ja kulkea reitti, joka on ennestään kartoitetulla alueella. Samalla järjestelmä tiedostaa oman kykynsä suorittaa tehtävä loppuun ja kykenee keskeyttämään sen turvallisesti havaitessaan esimerkiksi laitteen käytettävissä olevan virran olevan vähissä. (Atyabi ym. 197.)

Tietokoneilta vaaditaan siis useilta sensoreilta saadun tiedon käsittelykykyä ja samanaikaisesti kykyä syöttää tarvittavia käskyjä moottoreille tai servoille, jotka ohjaavat ilma-aluksen liikehdintää. Mitä autonomisempi järjestelmä on, sitä enemmän sensoreita tarvitaan. Tällöin vaaditaan tehokkaampia sekä monimutkaisempia tietokoneita, jotka pystyvät prosessoimaan montaa tietoa samanaikaisesti.



### 3.5 Autonomisuuden haasteet

Ilmailu on ala, jossa virheet sekä hätätilanteet otetaan aina vakavasti ja niiden sattuessa tärkeintä on varmistaa ihmisten turvallisuus. Autonomisen järjestelmän suorituskyky esimerkiksi ilma-aluksen pakkolaskun aikana on tärkeä järjestelmän ominaisuus. Miehittämättömien ilma-alusten kasvava käyttö asutusten ja infrastruktuurin läheisyydessä korostaa järjestelmältä vaadittua luotettavuutta hätätilanteen sattuessa. Kyseistä järjestelmän kykyä käytetään myös miehiteytyssä ilmailussa avustamaan lentäjää mahdollisesti huonojen sääolosuhteiden seurauksena. (Warren, Mejias, Kok, Yang, Gonzalez & Upcroft 2015.)

Järjestelmä voi joutua tilanteisiin, joissa sen, ihmisten tai omaisuuden turvallisuus on vaarassa. Tällaisiin tilanteisiin voivat johtaa esimerkiksi laitteen suorituskyvyssä havaitut puutteet, ulkoisista tekijöistä johtuvat vikatilanteet sekä linkki- tai näköyhteyden kadottaminen laitteeseen. Riippuen laitteen käyttötarkoituksesta sekä ympäristöstä missä se toimii, on järjestelmän kyettävä sammuttamaan laite tai muutettava sen suorituskykyä niin, että sen toiminta ei enää olisi vaaraksi turvallisuudelle. Esimerkiksi DJI:n ilma-alukset ovat varusteltu ”palaakotiin” -toiminnolla, joka tuo ilma-aluksen ennalta määritettyyn paikkaan, kun laitteen toiminnassa tai ohjausyhteydessä havaitaan häiriöitä (DJI Support. 2017).

## 4 SÄÄN VAIKUTUS

### 4.1 Säätörajoitteet miehittämättömälle ilma-alukselle

Suomessa miehittämättömän ilma-aluksen lentotoiminta on sallittua alle 150 metrin korkeudessa, pois lukien kiinteän esteen läheisyydessä tai erikseen anotulla erikoisluvalla lentotoiminta (Trafin ilmailumääräys OPS M1-32 2018). Ilma-alusten lentotoiminta tapahtuu siis suhteellisen lähellä maanpintaa verraten muuhun ilmailuun. Tämä johtaa osaltaan siihen, että alukset ovat alttiina samoille epäsuotuisille sääolosuhteille, joita ihmiset kokevat. Esimerkiksi ukonilmalla on hyvä olla lennättämättä ilma-aluksen ja lennättäjän turvallisuuden takaamiseksi. Pakkanen, lumi-, räntä- tai vesisade, kovat tuulet sekä sumu ovat pahimmat lentotoimintaa vaikeuttavat tekijät sään puolesta. Tekijät vaikuttavat ilma-aluksen suorituskykyyn muuttamalla aluksen ympäröivän ilman epätasaiseksi sekä aerodynamiikan kannalta epäsuotuisaksi. Jotta ilma-alus pysyisi ilmassa, joutuu se tekemään enemmän työtä näitä olosuhteita vastaan, jolloin lentoaika vähenee merkittävästi.

Valmistajat ovat määrittäneet laitteilleen tuulirajat, joiden ulkopuolella lentotoiminta voi aiheuttaa aluksen hallinnan menetyksiä ja arvaamatonta liikehdintää. Tuulen vaikutus ilma-alukseen vaihtelee tekijöiden, kuten potkureiden koon ja aluksen painon mukaan, joten vaikutukset eivät ole verrattavissa alusten kesken. Tuulen nopeuden maksimirajat liikkuvat ilma-aluksen koon mukaan noin 8-14 m/s. Ilma-aluksen lennättäjä ei voi aina olla tietoinen vallitsevista tuuliolosuhteista. Riippuen lentotoimintapaikasta voivat olosuhteet olla korkeammalla erilaiset kuin maanpinnalla. Esimerkiksi rakennukset ja muut esteet tuulen tiellä aiheuttavat siihen pyörteilyä. Ilmanvirtaus voi olla nopeampaa satunnaisissa paikoissa ja hetkellisiä tuuliväänteitä voi ilmetä ilmanpaineen vaihtelun seurauksena. (International Civil Aviation Organization 2015; ANAC 2018.) Ilma-aluksen pitää vastata näihin ilmapirtausten vaihteluihin tekemällä työtä niitä vastaan esimerkiksi silloin, kun halutaan leijua paikoillaan. Tällöin virrankulutus kasvaa tehdyin lisätyön takia.

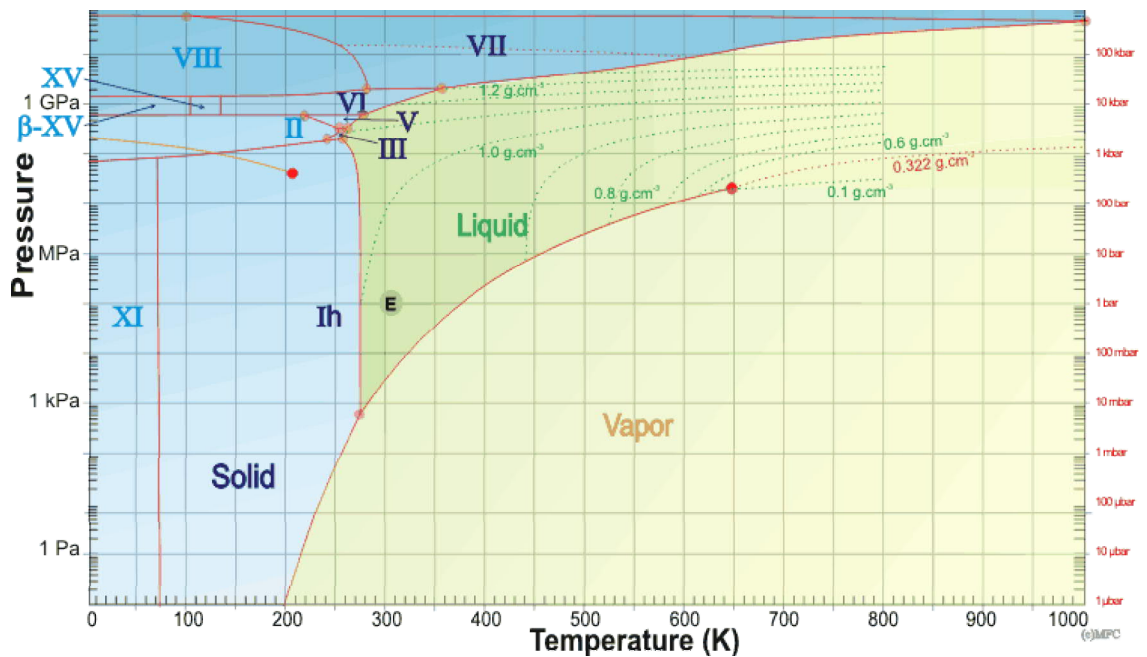
Myös pakkasella laitteiden akkujen käyttöaika vähenee ja jotkin laitteet eivät ylipäättään toimi, kun lämpötila laskee miinukselle (International Civil Aviation Organization 2015; ANAC 2018). Useimmat miehittämättömät ilma-alukset eivät ole suojattuja tai niiden komponentteja ei ole tehty kestäämään vettä tai edes kosteutta, joten lumi-, räntä- ja vesisade voivat pahimmillaan vaurioittaa alusta pysyvästi. Pienempien alusten pinnoille jäädessään lumi ja räntä vaikuttavat aluksen painoon ja näin suorituskykyyn, oli kyseessä sitten kiinteä- tai pyöriväsiipinen ilma-alus. Rankat sateet ja eritoten sumu vähentävät merkittävästi myös näkyvyyttä. Ongelma ei ole ainoastaan käyttäjän näköyhteys ilma-alukseen vaan myös alukseen liitettyjen sensoreiden sekä kameroiden kyky nähdä maastoa. (ANAC 2018; Kuss, M 2020.) Jos BVLOS -lentotoiminnassa autonominen ilma-alus luottaa sen kameran tuottamaan visuaaliseen havainnointiin ympäristöstä, voi heikentynyt näkyvyys tai vesipisarot kameran linssillä väärentää kuvaa, eikä alus pysty paikantamaan itseään. Tällöin aluksen on kyettävä käyttämään muita sensoreita hyväksi navigoinnissa tai keskeytettävä tehtävä.

## 4.2 Jäätymisen aiheuttavat tekijät ilmakehässä

Vedellä on kolme olomuotoa, joista jää esiintyy kiinteässä muodossa. Olomuotojen vaihtelu on riippuvaista molekyylien liikkeestä aineen sisällä. Kiinteän aineen eli jään muodostuessa nesteestä veden molekyylit menettävät energiaa ympäröivään ilmaan, jolloin niiden liike hidastuu ja jäätyminen alkaa. Jotta jäätymistä voisi tapahtua, veden lämpötilan pitää laskea 0 asteeseen celsiusta. Tällöin molekyylit tarttuvat toisiinsa kiinni ja muodostavat kiinteän jään. Molekyylien liike ei lopu jäätymisessä kokonaan, se vain hidastuu. (Science Learning Hub 2007.)

Kuten kappaleessa kaksi mainittiin, ilma-aluksen siipien tai potkurien tuottaessa nostetta Bernoullin lain mukaan, niiden yläpinnalle muodostuu alipainetta. Tämä paine on riippuvainen siiven yli virtaavasta ilman nopeudesta sekä vallitsevasta ilman tiheydestä (Hall 2015). Kuviosta 3 huomataan miten veden olomuotoon vaikuttavat ilman lämpötila ja ilmanpaine, joka tässä tapauksessa on siiven yläpinnalla vaikuttava ilmanpaine (Journaux, Brown, Pakhomova, Collings, Petitgirard, Espinoza, Boffa Ballaran, Vance, Ott, Cova, Garbarino & Hanfland 2019,

125). Kun tämä paine laskee tarpeeksi, saa se aikaan ilmassa olevan veden kondensoitumisen, jolloin siiven yläpinnalla voi havaita pilven tapaista vesihöyrykerrosta. Lennettäessä kylmissä olosuhteissa, tämä vesihöyry voi jäättyä siiven pinnalle. Jään muodostuminen sekä sulaminen on myös riippuvainen vallitsevasta paineesta. Tätä ilmiötä kutsutaan englanniksi termillä *regelation*. Käytännössä se tarkoittaa aineen jäätymispisteen alenemista, kun siihen vaikuttava paine alenee. (Jones, M.)



KUVIO 3. Veden olomuotojen muutokset ilmanpaineen ja lämpötilan mukaan (Journaux ym. 2019, 125)

Ilmakehän alinta kerrosta, jossa kehittyy suurin osa kaikista ilmakehän sääilmiöistä, kutsutaan troposfääriksi. Mitä korkeammalle tässä kerroksessa nousee sitä ohuempaa ja kylmempää ilma on. Yhtenä syynä sääilmiöiden syntyyn sekä sen muutoksiin on troposfääriin sisältämä vesihöyry. Se saa ilmakehässä aikaan kosteuden, jonka määrä on riippuvainen ilman lämpötilasta. Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilmassa olevan todellisen kosteuden määrää verrattuna siihen, kuinka paljon ilma olisi kykenevä pitämään vettä (absoluuttinen kosteus) sisällään vallitsevassa lämpötilassa ja paineessa. Ilmakehässä muodostuu pilviä ja sumua, kun suhteellinen kosteus on korkea. (National Geographic, Atmosphere 2011; Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016,12-2.) Ilman kosteuteen liittyy myös vaikuttavana tekijänä kastepistelämpötila eli lyhyemmin kastepiste. Sillä kuvataan lämpötilaa, jossa ilma ei kykene pitämään sisällään

enempää vesihöyryä. Jotta kastepiste saavutettaisiin, pitää ilman tavallisemmin jäähtyä. Ilman lämpötilan laskiessa kastepisteeseen suhteellinen kosteus nousee 100 prosenttiin ja tällöin ilmassa oleva kosteus tiivistyy kesällä kasteeksi ja talvella kuuraksi. (Huutonen 2014.)

Ilma-aluksissa esiintyvä jää on peräisin tästä ilmakehän kerroksen vesihöyrystä. Kun ilman lämpötila laskee alle veden jäätyksen lämpötilan, vedestä tulee alijäähtynyttä ja se on tällöin epävakaassa tilassa. (National Geographic, Atmosphere 2011; Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 12-13; Sørensen 2016, 7-9.) Tämä alijäähtynyt vesi jäätyy kohdatessaan ilma-aluksen rakenteen törmäyksen seurauksena. Syntynyt jää on silojäätä, jonka muodostumista voi havaita millä lentokorkeudella tahansa, mutta korkealla lennettäessä voi myös esiintyä huurretta tai rosojäätä, jotka muodostuvat pienemmistä alijäähtyneistä vesipisaroista. (Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 12-24; Sørensen 2016, 7-9.)

Ilmakehän kosteudella, lämpötilalla ja paineella on siis suuri vaikutus jään muodostumiseen sekä ylipäätään vallitseviin olosuhteisiin. Pilvet ovat yksi jäätyksen suurin aiheuttaja. Pilvistä voi sataa vettä, lunta, räntää tai pahimmillaan jäätävää vettä, joka on ilmailussa vaarallisin jäätyksen aiheuttava tekijä. Jos paikallisen ilman lämpötila on pakkasella, voidaan olettaa, että siinä lämpötilassa säilyvät pilvet pitävät sisällään alijäähtynyttä vettä ja tällöin vallitsevat jäätävät olosuhteet. (Sørensen 2016, 7-9.) Ilma-aluksella lentotoimintaa pilvissä ja sumussa kannattaa tällöin välttää. Alimmat pilvikerrokset ulottuvat vajaan 2000 metrin korkeudelle, joten kaupallisesti saatavilla oleville matalalla lennätettävälle ilma-aluksille pilvet eivät ole ensimmäinen ongelma jäätyemisessä (Zuckerman 2019). Käyttäjän tulee olla enemmän tietoinen sumusta ja alijäähtyneestä vesisateesta.

### **4.3 Jään havaitseminen**

Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto NASA:n tärkeimpiin tavoitteisiin ilmailussa kuuluu jäätymisestä aiheutuvien riskien torjuminen. Tähän luetaan muun muassa erilaisten jäänpoistotekniikoiden sekä jään havaitsemisen

kehitys. (Lockney 2010; Sørensen 2016, 14-16.) Turvallisuuden ja taloudellisten tappioiden vähentämiseksi on siis tärkeää löytää ratkaisuja jäätämistä vastaan miehittämättömässä ilmailussa ja näin mahdollistaa lentotoiminta huonoissakin olosuhteissa, kun tilanne sitä vaatii.

Liikennelentokoneiden jäätymisenestojärjestelmään (IPS) kuuluu aktiivinen tai passiivinen jäänpoistoelementti. Jään havaitseminen tapahtuu optisilla antureilla tai lentäjän visuaalisella tarkastuksella, mutta ei ole osa IPS -järjestelmää. Sørensenin (2016) mukaan pienempien miehittämättömien ilma-alusten ainoa keino jäätämistä vastaan on tällä hetkellä vain olla lentämättä, sillä jäänestoratkaisut ovat liian laajoja, kalliita sekä painavia. Jääntunnistuslaitteita on kyllä kehitetty ja niitä on kaupallisesti saatavilla suuremman kokoluokan miehittämättömiin ilma-aluksiin (Sørensen 2016; Rotondo, Cristofaro, Johansen, Nejjari & Puig 2017).

Jäätymistä voidaan kuitenkin havaita erilaisilla algoritmeihin pohjautuvilla menetelmillä. Näiden perustana toimivat ilma-aluksen suorituskyvystä luodut mallit ja niissä lennon aikana havaitut virheet tai epäkohdat. Käytännössä ilma-aluksen sensoreilta saatua tietoa verrataan suorituskyvyn arvoihin ja näin voidaan laskea, johtuuko esimerkiksi aluksen liiallinen värinä tai epävakaa leijuminen paikallaan tuulesta, vai onko jäätä mahdollisesti kertynyt aluksen pinnoille tai pyöriväsiipisen ilma-aluksen potkurin lapoihin. (Tousi, Khorasani 2011; Caliskan, Hajiyev 2013.) Riippuen käytettävissä olevan laitteen kehittyneisyydestä myös ilma-aluksen virrankulutus kertoo virhetilasta silloin, kun moottorit joutuvat tekemään ylimääräistä työtä mahdollistaakseen saman suorituskyvyn. Poikkeavasta virrankulutuksesta ilma-aluksen käyttäjä voi ohjauslaitteeltaan havaita, että tapahtuu mahdollista jäätämistä ja näin voi alkaa tarvittaviin toimenpiteisiin turvallisuuden säilyttämiseksi.

#### **4.4 Jään vaikutus miehittämättömään ilma-alukseen**

Jäätymisen ongelma miehittämättömässä ilmailussa siinä missä miehitetyssäkin, mahdollisesti suurempikin. Miehittämättömien ilma-alusten jäätymistä vastaan toimivia järjestelmiä on saatavilla vain suuremman kokoluokan ilma-aluksille. Toisaalta kaupallisten miehittämättömien ilma-alusten lennätystoiminta on

erilaista, lyhytkestoisempaa ja tapahtuu suhteellisen matalalla. Jäätymisen havaitsemiseen on olemassa ratkaisuja, mutta vastuu ilma-aluksen turvallisesta lentotoiminnasta jäätämistä havaittaessa on vielä aluksen käyttäjällä varsinkin silloin, kun jäätä ei voida poistaa lennon aikana. (Sørensen 2016, 14-15.) Jäätymisen vaikutuksista miehittämättömään ilma-alukseen on tehty monia tutkimuksia sekä voitu simuloida jäätymistä erilaisissa tuulitunneissa. Olemassa olevat tutkimukset on toteutettu kiinteäsiipisillä ilma-aluksilla, joten jään vaikutuksista pyöriväsiipisiin aluksiin on vähän tutkimusperäistä materiaalia. Jäätymisestä voidaan luoda 2- sekä 3d-malleja, joista nähdään teoriassa, mihin jäätä kertyy ja kuinka se vaikuttaa aluksen suorituskykyyn. (Habashi, Aubé, Baruzzi, Morency & Tran 2004; Hann, Wenz, Gryte & Johansen 2017)

#### **4.4.1 Aerodynamiikka**

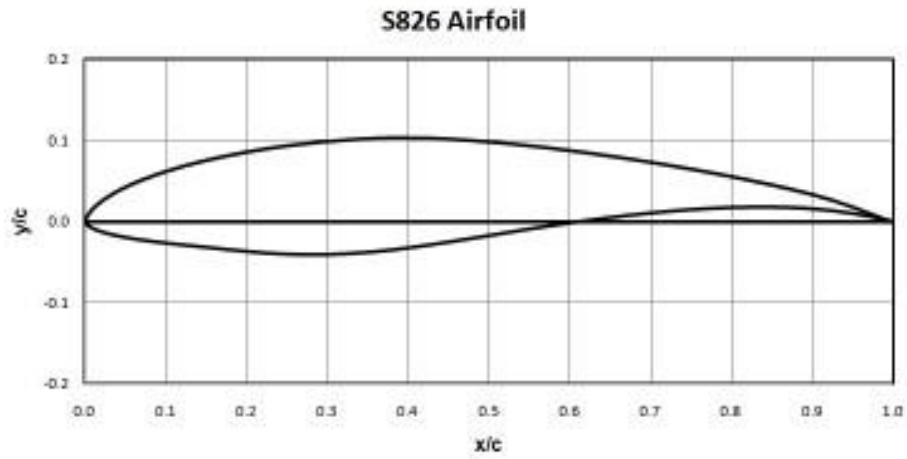
Jään vaikutus ilma-aluksen suorituskykyyn vaihtelee aluksen mallin ja koon mukaan. Mitä kevyempi alus on kyseessä sitä suuremmat ovat pientenkin jääkertymien vaikutukset. Jään mukanaan tuoma paino lisää lentoa vastustavia voimia, jolloin pitää lisätä myös nostetta, jotta pysytään ilmassa. Kuvan 3 mukaisesta pyöriväsiipisen ilma-aluksen potkureiden jäätymisestä seuraa turbulenttista virtausta potkurin lavan ympärillä. Virtaus ei ole enää laminaarista eikä kiinni lavassa vaan pyörteilee sen pinnalla, jolloin nosteen tuottaminen heikentyy. Tästä voi koitua epätasapainoa nosteen tuotossa, kun potkurit jäätyvät eri tavalla ja eri aikaan. Nosteentuoton ollessa epätasapainossa on aluksen hallinta vaikeaa ja sen liikehdintä ennalta-arvaamatonta. Jäätymisen voi aiheuttaa myös värinää potkurin lapoihin ja vaurioittaa niitä tai niiden kiinnitysosia moottoriin. Toinen tärkeä tekijä nosteen tuottamiselle on lavan kohtauskulma sitä vastaan tulevaa ilmaa kohtaan. Jään kertymät muuttavat tätä kohtauskulmaa ja saavat mahdollisesti aikaan potkurin lavan sakkauksen eli nosteen menetyksen. (Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016; Sørensen 2016, 8-11.)



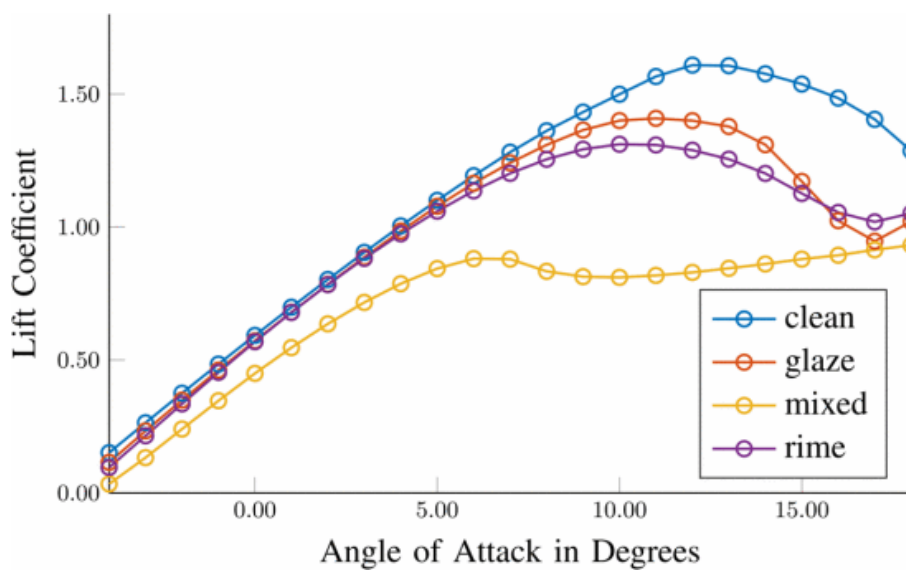
KUVA 3. Pyöriväsiipisen ilma-aluksessa sumun aiheuttamaa jääkerrostumaa (Decker 2017)

Kiinteäsiipisillä miehittämättömillä ilma-aluksilla jään vaikutukset aerodynamiikkaan ovat vastaavanlaiset, kuin tavallisilla liikennelentokoneilla. Jään vaikutukset ovat paljon riippuvaisia jään tyypistä, paikasta sekä rakenteen muodosta, johon jäätä kertyy. (Sørensen 2016, 9-11.) Jään muodostuminen esimerkiksi siipien etureunaan lisää vastusta ja saa aikaan turbulenttista virtausta siiven ympärille. IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) julkaisemassa tutkimuksessa havaitaan, että jään muodostuminen siivelle saa sen sakkaamaan helpommin, eli se menettää nostokyvyn pienemmillä kohtauskulmilla. Jäätymistä mallinnettiin FENSAP ICE 3d -simulaattorilla ja tutkimuksessa käytettiin kuvion 4 mukaista S826 -siipiprofilia. Kuvioissa 5 ja 6 huomataan, kuinka huurre (*rime*), roso (*mixed*) ja silojää (*glaze*) selvästi heikentävät nostetta sekä lisäävät ilmanvastusta suuremmilla kohtauskulmilla. (Hann ym. 2017)

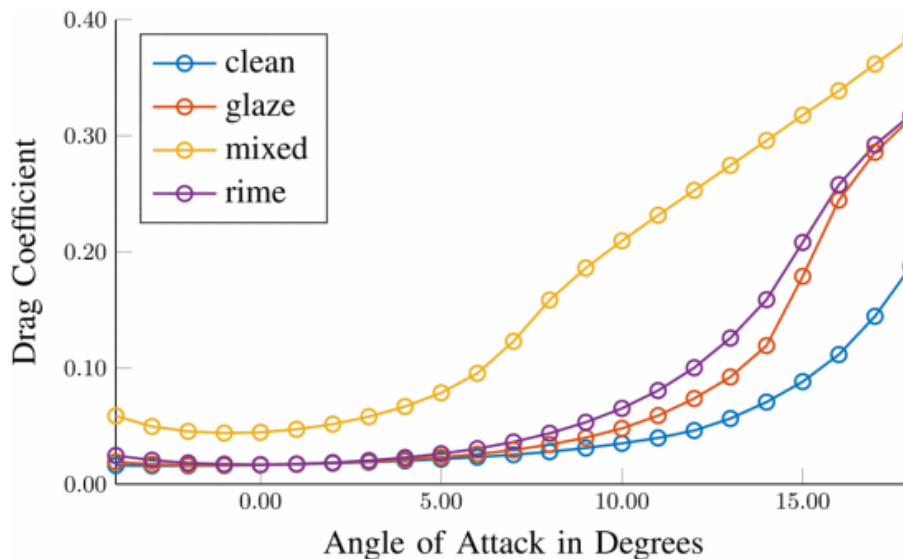




KUVIO 4. S826-siipiprofiili (Jonkman 2014)



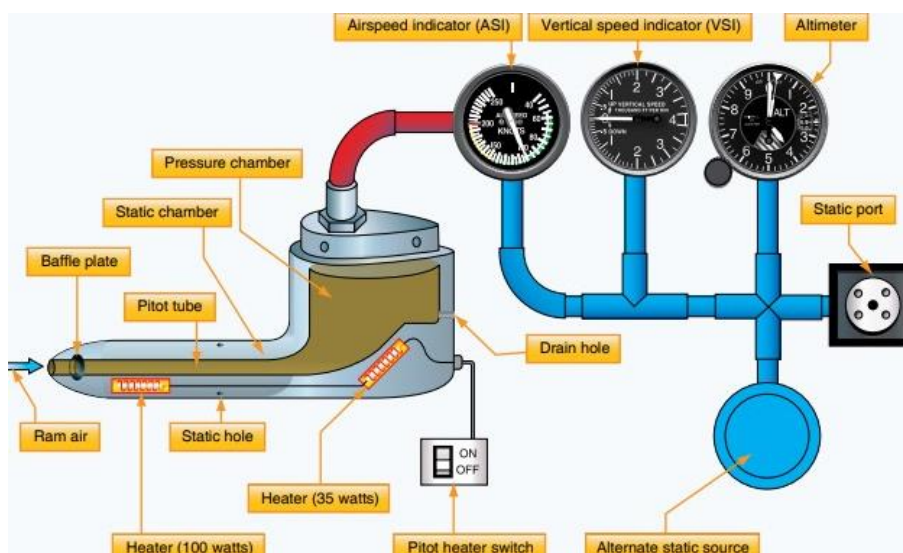
KUVIO 5. S826-siipiprofiilin nostetta verrattuna kohtauskulmaan eri jäättyyppien mukaan FENSAP-ICE -simulaattorilla (Hann ym. 2017)



KUVIO 6. S826-siipiprofiilin vastusta verrattuna kohtauskulmaan eri jäättyyppien mukaan FENSAP-ICE -simulaattorilla (Hann ym. 2017)

#### 4.4.2 Avioniikka

Suuremman kokoluokan miehittämättömät ilma-alukset, yleisemmin kiinteäsiipiset, on varustettu kuvion 7 mukaisella pitot-staattisella järjestelmällä. Järjestelmän tarkoitus on mitata ilma-aluksen korkeutta sekä vaaka- ja pystysuoraa nopeutta vallitsevasta staattisesta sekä dynaamisesta ilmanpaineesta. Reiät, joista ilma pääsee järjestelmään, voivat jäättyä umpeen ja näin mittareiden näyttämä arvo vääristyy. Autonomisuutta omaavalle ilma-alukselle on tässä tilanteessa tärkeää saada lentämiseen tarvittavat tiedot muilta sensoreilta, kuten GPS:stä, jotta alus kykenee jatkamaan lentoa haluttuun suuntaan. Näistä syistä pitot-putki (*pitot-tube*), joka mittaa dynaamista painetta, sekä staattisen paineen aukko (*static port*) on varustettu lämpövastuksilla, jotka lennättäjä tai alus itse voi kytkeä päälle havaitessaan jäätävät olosuhteet. (Hansen, Blanken 2013; Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 8-2.)



KUVIO 7. Pitot-staattinen järjestelmä (Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge 2016, 8-2)

#### 4.5 Jäänpoisto

Jäätäminen ei ole suuri ongelma ainoastaan ilmailussa vaan myös muilla sääolosuhteille alttiina olevilla teollisuuden aloilla kuten merenkulussa, sähkön siirrossa tai tuulivoimassa. Jään muodostuminen rakenteiden pinnoille tuottaa niille ylimääräistä painoa sekä kuormitusta, joka pitää niiden suunnittelussa ottaa huomioon. Lisääntynyt paino ja muuttunut rakenteen pinnanmuoto saa aikaan esimerkiksi lentoaluksissa suuria muutoksia aerodynamiikkaan sekä painoon. Ilma-alusten jäätyminen ja virheelliset toimenpiteet sen estämiseksi ovatkin joutaneet moniin kuolettaviin onnettomuuksiin. (Williams 2019) Kaupallisessa ilmailussa on erittäin vaikeaa välttää olosuhteita, joissa jään muodostumista ei esiintyisi (Stenroos, C. 2015).

Ilmailussa jäänpoistotekniikat ovat kehittyneet paljon vuosien varrella, osin onnettomuuksien ja toisaalta laajentuneiden tutkimusten kautta, mikä on taas vähentänyt onnettomuusriskejä merkittävästi. Lisäksi tietoisuus jään luonteesta sekä sen vaikutuksista lentoalusten toimivuuteen on lisääntynyt. (Cao, Wu, Su & Xu 2015.)

Aikaisemminkin mainitut liikennelentokoneiden jään poistoon tarkoitetut IPS - järjestelmät jakautuvat kolmeen eri luokkaan. Lämpöä hyödyntävällä järjestelmällä voidaan moottorin ohivirtausilmasta tai pakokaasusta ottaa lämmintä ilmaa ja ohjata sitä lämmittämään jäätyneitä pintoja. Jotkin ilma-alukset ovat varustettu sähköisillä vastuslevyillä, jotka ovat asennettu jäätymiselle alttiille paikoille, kuten siiven etureunaan. Vastusta lämmitetään aluksen tuottamalla sähköllä ja näin saadaan jää pysymään poissa pinnoilta tai tarvittaessa sulatettua pois. Mekaanisessa järjestelmässä jää poistetaan fyysisesti paisuttamalla tai liikkuttamalla ilma-aluksen tälle tarkoitukseen suunniteltuja rakenteita paineilmalla, jotta jää saadaan murtumaan ja näin irtoamaan pinnasta. Jäätä voidaan irrottaa myös sähkömagneettisella impulssilla, joka syötetään pinnan mukaisesti asennettuun johteeseen, mikä saa johteen värähtämään ja jään irtoamaan. Kolmas tapa eli kemikaalinen jäänpoisto hyödyntää erilaisia jäänpoistoon tarkoitettuja kemikaalisia yhdisteitä, kuten propyleeniglykolia sekoitettuna kuumaan veteen, jolla poistetaan ilma-aluksen pinnoille muodostunut jääkerros. Vallitsevista olosuhteista riippuen pinnoille lisätään vielä kerros jäänestoainetta, jotta kiitotielle rullattaessa aluksen nosteen kannalta kriittiset pinnat eivät kerää jäätä ja näin heikennä nostetta. Kemikaalinen jäänpoisto on ainoa menetelmä, jota käytetään ilma-aluksen ollessa maan pinnalla. (Lockney 2010; Sørensen 2016.)

## 5 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

### 5.1 Tutkittava aihe

Opinnäytetyön käytännön tutkimuksessa oli tarkoituksena tehdä selvitystä jään vaikutuksista miehittämättömän ilma-aluksen suorituskykyyn lentotoiminnassa. Teorian pohjalta tiedetään, että kertynyt jää lisää ilma-aluksen painoa sekä ilmanvastusta (Sørensen 2016, 9-10). Tämä lisää virrankulutusta, kun moottorit joutuvat pyörimään nopeammin säilyttääkseen tarvittavan nosteen tuottamisen. Lisäksi tiedetään, että kylmällä ilmalla laitteiden virrankulutus on suurempaa ja niiden käyttöajat laskevat. Pahimmassa tapauksessa laitteet eivät toimi kylmissä olosuhteissa lainkaan. Jään kertymisestä potkurin lapoihin on visuaalisia todisteita kuvassa 3, kun miehittämättömällä aluksella on lennetty jäätävissä olosuhteissa kuten sumussa.

Tutkimuksessa käytettiin TAMKilta lainattua kuvan 4 mukaista DJI:n Mavic 2 Zoomia. Ilma-aluksessa on neljä moottoria ja taittavat potkurin lavat, jotka avautuvat keskipakoisvoiman vaikutuksesta. Alus painaa akun kanssa 905g ja on leveydeltään 24cm sekä pituudeltaan 33cm. Ilma-alus toimii sähköllä ja käyttää 15,4 voltin jännitettä. Virta on varastoitu nelikennoiselle lithiumpolymeeriakulle, joka painaa n. 300g, eli kolmasosan laitteen kokonaispainosta. Akun kapasiteetti on 3850 mAh, jolla valmistaja lupaa n.30 minuutin lentoaikaa. (DJI 2018.) Käyttäjä saa lentotoiminnan aikana jatkuvaa tietoa ohjaimelle akun tilasta kuten lämpötilasta, kennojen jännitteistä sekä jäljellä olevan virran määrästä prosentteina.



KUVA 4. Käytännön tutkimuksessa käytetty DJI:n Mavic 2 Zoom

### 5.1.1 Jäätävien olosuhteiden luominen

Ensimmäisenä käytännön työssä lähdettiin selvittämään, kuinka jäätä voitaisiin tarkoituksellisesti kerryttää potkurin lapoihin. Tämä vaati jäätymisen kannalta vallitsevalta säältä ihanteelliset olosuhteet. Jotta työ voitiin suorittaa joustavammalla aikataululla ja kaikkia turvallisuuden säädöksiä mukaillen, nähtiin parhaaksi muodostaa jäätä itse. Tämäkin vaati ilman lämpötilan laskun pakkaselle, mutta se oli alkukeväällä vielä hyvin mahdollista. Jään muodostaminen lapojen pinnoille onnistui parhaiten suihkupullon avulla. Tällöin suihkutettu vesi oli mahdollisimman hienojakoista, jolloin jääkerroksesta tuli mahdollisimman todenmukainen.

Vettä ei saa jäämään tasaisesti lavan pinnalle sen ollessa epätasainen, mutta tärkeintä tutkimuksessa oli saada jää pysymään kiinni lavassa lennon ajan. Vettä ei saa myöskään suihkuttamalla jäämään lavan etureunalle ja näin muodostettua kuvan 3 mukaista jäätymistä. Työ ei siis mallintanut todenmukaista jäätymistä lennon aikana, mutta tärkeintä työssä olikin selvittää, mitä jää saa ilma-aluksen suorituskyvyssä aikaan.

### 5.1.2 Jäätymisen havaitseminen

Kun olosuhteiden mallintaminen oli tiedossa, lähdettiin selvittämään mitkä ilma-aluksen sisältämät sensorit tai aluksen käyttäjälle tuottamat tiedot voivat ilmaista aluksen pinnoille kertyneestä jäädästä. DJI:n ilma-alus on varusteltu aluksen kiihtyvyyksiä sekä liikettä kaikkiin kolmeulotteisen koordinaatiston akselien suuntiin (*roll, pitch, yaw*) mittaavalla inertiaaliyksiköllä (IMU). Sensori vertaa ilma-aluksen liikettä maan horisonttiin eli vaakatasoon nähden (Dezső, D., Sarvajcz K. 2018). Sensorilta oli tarkoituksena saada reaaliaikaista tietoa aluksen liikehdinnästä ja tietoa, jos alus alkaa heittelehtimään nosteen vähentyessä. Kyseiseltä sensorilta voidaan havaita lennon aikana ilmentyviä pienimpiäkin epäta-saisuuksia, mikä ei visuaalisesti ole välttämättä mahdollista.

Inertiaaliyksikön tietojen taltioimiseksi oli päästävä käsiksi ilma-aluksen ohjelmointirajapintaan (API), joka mahdollistaa ilma-aluksen eri sensoreilta julkaise-man tiedon hyödyntämisen. Tämä voidaan Mavic 2 Zoomin tapauksessa toteuttaa joko luomalla mobiili- tai Windows-sovellus. (DJI Developer, Mobile SDK 2019; DJI Developer, Windows SDK 2019.) Tämä koitui yhdeksi työn suurimaksi haasteeksi, sillä itselläni ei ollut aikaisempaa kokemusta sovellusten kehittamisestä. Sensoreiden luomaa tietoa yritettiin taltioida myös DJI Assistant 2 For Mavic -sovelluksella. Sen kautta pääsi näkemään tallennettuja lennon tietoja, mutta inertiaaliyksikön tiedot olivat salattuja eikä niitä päässyt millään näkemään. (DJI, Assistant 2 For Mavic 2019.) Näiden ongelmien myötä inertiaaliyksiköltä toivottu hyöty jouduttiin hylkäämään ja siirryttiin muihin keinoihin jäätymisen havaitsemisessa.

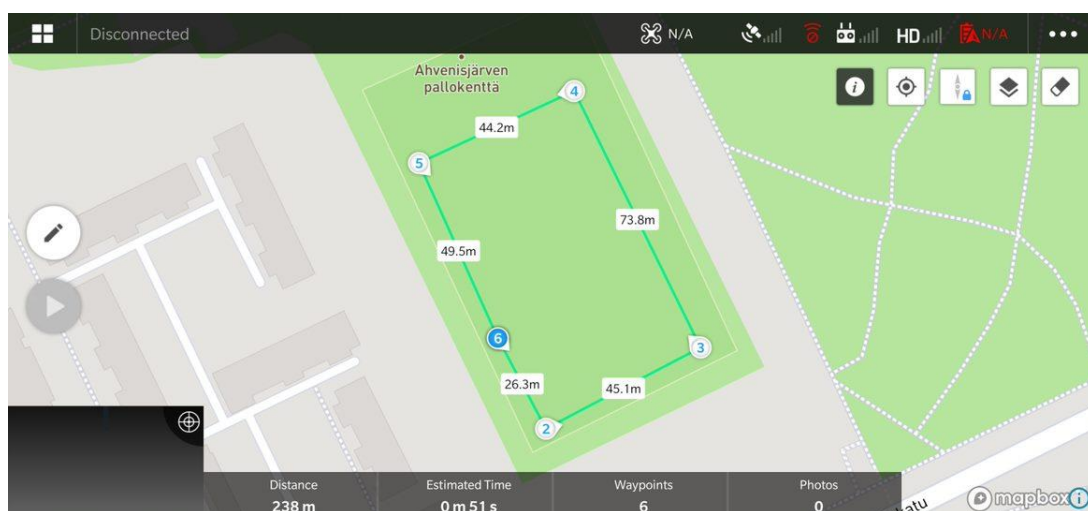
Työn kannalta oli tärkeää päästä vertailemaan ilma-aluksen käyttäytymistä potkurin lavat puhtaina verrattuna siihen, kun lavoissa on jäätä. Mavic 2 Zoomin ohjainlaite kertoo käyttäjälle reaaliajassa moottoreiden kierrosluvun lentotoiminnan aikana. Tästä voitiin päätellä lisääntynyt nosteen säilyttämisen tarve sekä näin lentoa vastustavien voimien kasvu. Moottoreiden kierrosluvun nostattaminen lisää virrankulutusta. DJI Pilot -nimisestä kännykkäsovelluksesta nähtiin reaaliajassa akun tietoja kuten varaustasoa prosentteina sekä lämpötilaa. Sovelluksella voitiin myös määrittää ennalta reitti, jota ilma-alus seurasi. Näin voitiin

verrata visuaalisesti sekä edellä mainittujen havaitsemistapojen avulla jään vaikutuksia ilma-alukseen, kun lennettävä reitti pysyi täysin samana.

## 5.2 Käytännön tutkimus suorittaminen

Tutkimuksen käytännön osio suoritettiin tyhjällä jalkapallokentällä aikaisin aamulla, jolloin kentän läheisyydessä liikkui mahdollisimman vähän ihmisiä ja ilman lämpötila oli kylmän yön jälkeen vielä pakkasella. Laaja avonainen kenttä mahdollisti ilma-aluksen lentotoiminnan suorittamisen VLOS-periaatteella eli suoralla näköyhteydellä alukseen sekä varoalueet läheisimpiin asutuksiin pysyivät sallittujen rajojen sisäpuolella. Tutkimuspäiviä oli kaksi. Ensimmäisenä päivänä lämpötila oli alhaisempi, jolloin lavoille suihkutetun veden jäätyminen oli nopeampaa verrattuna toiseen päivään.

Työ aloitettiin määrittelemällä ilma-alukselle lennettäväksi kuvion 8 mukainen suorakulmion muotoinen reitti. Sen pituus oli DJI Pilot -sovelluksen mukaan 238 metriä ja sitä lennettiin yhteensä 10 kertaa. Ilma-alukselle määritettiin lentokorkeudeksi 5 metriä ja nopeudeksi 5, 10 ja 15 m/s. Näin voitiin taata turvallinen välimatka esteisiin sekä selvittää vaikuttaako lentonopeuden kasvattaminen merkittävästi ilma-aluksen suorituskykyyn. Jotta jokainen mittaus olisi mahdollisimman tasavertainen, ennen lento-ohjelmointia odotettiin akkujen lämpötilan laskevan 20°C:een.



KUVIO 8. DJI Pilot -sovelluksella voitiin ennalta määrittää ilma-alukselle lennettävä reitti



Ensimmäisen päivän mittaukset aloitettiin lentämällä kaksi kierrosta kuvion 8 mukaista reittiä lapojen ollessa vielä puhtaat jäädästä. Seuraavana suihkutettiin vettä lapojen pinnoille. Vettä pyrittiin suihkuttamaan kauttaaltaan koko lavan alueelle, mutta se ehti valua paikoittain pois ennen jäätymistä. Kuvasta 5 nähdään, miten jäätä on saatu muodostumaan myös lavan etureunaan, millä saadaan aikaan suurempaa ilmanvirtauksen muutosta. Kuva on ensimmäisen päivän mittauskerralta. Sama reitti lennettiin vielä kahdesti lapojen ollessa jäätyneenä samalla lentonopeudella. Reitin lennettyään ilma-alus palasi aina tarkalleen siihen kohtaan, mistä se oli lähtenyt. Voidaan myös olettaa, että lennetty reitti oli jokaisella kerralla lähes identtinen. Akku vaihdettiin toisen lennon jälkeen, jotta voitiin saada vertailua akkujen suorituskyvystä ja havaita mahdollisia eroja. Lisäksi molempina mittauspäivinä otettiin ylös akun lämpötila sekä varaustaso ennen ja jälkeen jokaisen lennon.



KUVA 5. Jääkerros potkurin lavassa ensimmäisenä mittauspäivänä

Ensimmäisen mittauskerran pohjalta työtä voitiin kehittää kiinnittämällä enemmän huomiota moottoreiden kierroslukuihin sekä kasvattamalla porrastetusti ilma-aluksen lentonopeutta. Toisena mittauspäivänä lentokertoja suoritettiin yhteensä kuusi. Ensimmäiset kolme lentoa suoritettiin ilma-aluksen lavat puhtaina ja lentonopeutta kasvatettiin portaittain 5, 10 ja 15 m/s. Sama tehtiin lavat jäätyneinä. Ohjaimen näytöltä luettiin reaaliaikaista tietoa moottoreiden kierrosluvusta lentojen aikana. Lisäksi ilma-aluksen videokamera käynnistettiin liikkeelle lähdössä, kun nopeudeksi oli viimeisenä valittu 15m/s. Veden jäätyminen ei ollut yhtä nopeaa eikä lavan pinnalle saatu muodostetta yhtä hyvää jääkerrosta kuin ensimmäisellä mittauskerralla. Kuvan 6 mukainen jääkerros sai kuitenkin aikaan samanlaisia vaikutuksia kuin aikaisemmalla mittauskerralla.



KUVA 6. Toisena mittauspäivänä aikaan saatu lavan jäätyminen

## 6 TULOKSET

### 6.1 Jäätymisen havainnointi

Tutkimuksen tulokset on jaoteltu kahteen osioon. Ensimmäisenä syvennytään mekaanisiin havaintoihin eli sensoreilta sekä akuilta saatuihin tietoihin ilma-aluksen virrankulutuksesta sekä jäljellä olevasta arvioidusta lentoajasta. Toisena perehdytään visuaalisiin havaintoihin ilma-aluksen lentovakauksesta eli heittelehtiikö ilma-alus jään vaikutuksesta. Mekaanisiin tuloksiin akkujen virrankulutuksesta sekä jäljellä olevasta arvioidusta lentoajasta saatiin tietoa Airdata-sovelluksen kautta. Sovelluksesta löytyy tietoja muun muassa ilma-aluksella lennetyistä matkasta, maksimi lentonopeudesta sekä -korkeudesta ja oleellisimpana tietona työn kannalta akun suorituskyvystä. (Airdata 2015.)

#### 6.1.1 Mekaaniset tulokset

Ensimmäisen mittauspäivän tulokset painottuvat Airdata-sovelluksesta saatuihin tietoihin arvioidusta ilma-aluksen jäljellä olevasta lentoajan kestosta. Lentoaikaan vaikuttavat sekä ilma-aluksen sisäiset että lentoympäristön ulkoiset tekijät. Sisäisistä tekijöistä oleellisimpana ominaisuutena lentoaikaan vaikuttaa sähkökäytössä ilma-aluksessa akun kapasiteetti eli kuinka monta milliampeerituntia virtaa akku pystyy varaamaan. Toisaalta mitä isompi akku sitä painavampi ilma-alus yleisimmin on. Tämä vaikuttaa siihen, kuinka paljon työtä ilma-alus joutuu tekemään kumotakseen lentoa vastustavan painovoiman. Lisäksi jos ilma-alukseen kiinnitetään ulkoista hyötykuormaa, kuten esimerkiksi kuljetettavaa tavaraa tai useampia kameroita, vaaditaan moottoreilta lisää työtä. Ulkoisista tekijöistä oleellisimpana virrankulutukseen vaikuttaa vallitseva sää ja etenkin tuuli. Ilma-alus joutuu tekemään enemmän töitä näitä luonnonvoimia vastaan verrattuna siihen, jos ilma olisi tyyni eikä taivaalta sataisi esimerkiksi vettä. (The Drone Logic 2020.) Lisäksi lapoihin kertynyt jää lisää aluksen painoa ja lentämistä vastustavia voimia (Sørensen 2016, 9-10).

Kuviosta 9 voidaan lukea lennetyn reitin aiheuttamasta virrankulutuksesta lasketua jäljellä olevaa lentoaikaa, kun akusta on jäljellä 64% lentoonlähdössä. Jäljellä olevaa lentoaikaa on n. 32 minuuttia. Kuviossa 10 lentoaika on n. 21 minuuttia, kun akkujen varaustaso on laskenut 46%:iin. Molemmissa mittauksissa ilma-aluksen potkurin lavat ovat puhtaina jäästä.



KUVIO 9. Arvioitu jäljellä oleva lentoaika ilma-aluksen lavat puhtaina ja akun varauksen ollessa lähdössä 64% (Airdata-sovellus)



KUVIO 10. Arvioitu jäljellä oleva lentoaika ilma-aluksen lavat puhtaina ja akun varauksen ollessa lähdössä 46% (Airdata-sovellus)

Kuviot 11 ja 12 kuvaavat Airdata-sovelluksen laskemaa jäljellä olevaa lentoaikaa, kun potkurin lavan pinnalla on jäätä. Akun varaustaso kuviossa 11 on 97% eli suurempi kuin aikaisemmissa mittauksissa ja lentoajan odote n. 21 minuuttia. Kuviossa 12 varaustaso on hieman laskenut 88%:iin ja niin on myös lentoajan odote n. 19 minuuttiin.



KUVIO 11. Arvioitu jäljellä oleva lentoaika ilma-aluksen lavat jäätyneenä ja akun varauksen ollessa lähdössä 97% (Airdata-sovellus)



KUVIO 12. Arvioitu jäljellä oleva lentoaika ilma-aluksen lavat jäätyneenä ja akun varauksen ollessa lähdössä 88% (Airdata-sovellus)

Toisena mittauspäivänä huomio painottui enemmän moottoreiden pyörimisnopeuden tarkasteluun sekä lentonopeuden muutoksesta johtuvien seurauksien tutkimiseen. Työssä käytetyn Mavic 2 Zoomin moottoreiden pyörimisnopeus ilma-aluksen leijuessa paikallaan oli 5000 rpm. Kuvan 6 jääkerroksella ilma-alus joutui kasvattamaan moottoreiden kierroslukua 5400 rpm, jotta se pysyi leijumassa. Moottoreiden kierrosluvuissa huomattiin selvää kasvua myös kuvion 8 reittiä lennettäessä. Lukema ohjaimen näytöllä vaihteli nopeasti, mutta siitä voitiin havaita, että kierrosluvun kasvu oli järjestelmällisesti n. 200 – 300 rpm luokkaa, kun lavat olivat jäässä.

Ilma-aluksen lentonopeuden kasvattaminen lisäsi Airdata-sovelluksen arviota lentomatkan pituudesta kuten kuvioista 13-16 huomataan. Sovelluksen mukaan

nopeammin lennettäessä ilma-alus pystyisi lentämään pidemmälle ja tekemään saman työn kuin jos se lentäisi hitaammin, ja näin ollen pystyisi lentämään lyhyemmän matkan. Ilma-aluksen lentäessä 10m/s sen arvioitu jäljellä oleva lentomatka oli yli kilometrin pidempi kuin lennettäessä 5m/s lavat puhtaina. Lisäksi lentomatkan pituus lyheni, kun tuloksia tarkasteltiin lapojen ollessa jäätyneenä verrattuna niiden ollessa puhtaina.



KUVIO 13. Arvioitu jäljellä oleva lentomatka lavat puhtaina lentonopeuden ollessa 5m/s ja akunvaraus lähdössä 92% (Airdata-sovellus)



KUVIO 14. Arvioitu jäljellä oleva lentomatka lavat puhtaina lentonopeuden ollessa 10m/s ja akunvaraus lähdössä 85% (Airdata-sovellus)



KUVIO 15. Arvioitu jäljellä oleva lentomatka lavat jäätyneenä lentonopeuden ollessa 5m/s ja akunvaraus lähdössä 99% (Airdata-sovellus)



KUVIO 16. Arvioitu jäljellä oleva lentomatka lavat jäätyneenä lentonopeuden ollessa 10m/s ja akunvaraus lähdössä 92% (Airdata-sovellus)

### 6.1.2 Visuaaliset tulokset

Visuaaliset tulokset painottuvat ilma-aluksen lennon vakauden tulkitsemiseen. Ilma-aluksen vakauteen vaikuttaa sensoreilta kuten inertiaaliyksiköltä saatu tieto aluksen liikkeistä. Tämän tiedon perusteella ilma-alus määrittää mitä moottoreita pitää pyörittää ja kuinka nopeasti, jotta lennon vakaus ja haluttu liike säilyy. Lennon vakauteen vaikuttavat myös olennaisesti ympäristöstä alukseen kohdistuvat voimat kuten esimerkiksi tuuli ja tuuliväänteet. (Dezső, Sarvajcz 2018).

Kun inertiaaliyksikön julkaisemaa tietoa ei ollut työhön saatavilla, turvauduttiin lennon vakautta tulkitsemaan ihmissilmällä. Ilma-aluksen lapojen ollessa jäässä ja aluksen leijuessa paikallaan merkittävää huojumista tai havaintoa aluksen vaikeudesta säilyttää vakautta ei huomattu. Toisen mittauspäivän lentokerrat videoitiin ilma-aluksen omalla videokameralla ja ne ovat nähtävissä Youtube-kanavallani (Youtube 2020). Videoimisen tarkoituksena oli verrata puhtaan ja jäätyneen ilma-aluksen lennon vakautta. Lentokerroilla lennettiin lentonopeudella 10m/s.



## 7 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

### 7.1 Tulosten yhteenveto

Käytännön tutkimuksen tarkoituksena oli mallintaa jään vaikutuksia autonomisen miehittämättömän ilma-aluksen lentotoimintaan. Tutkimuksen mittauksissa lento-toiminta oli lyhytkestoista verrattuna normaaliin ilma-aluksen käyttöön, mutta se ei vaikuttanut tulosten käyttökelpoisuuteen. Tutkimus suoritettiin pyöriväsiipisellä miehittämättömällä ilma-aluksella, joten tulokset ovat verrattavissa vain kyseisiin ilma-alusmalleihin.

Tutkimuksen suurimpana havaintona oli virrankulutuksen merkittävä kasvu, kun potkurin lavat olivat jäätyneenä. Tähän vaikuttaa alaluvussa (4.4.1) ilmennyt jäästä aiheutuva ilmanvastuksen sekä aluksen massan kasvu. Lentoa vastustavien voimien kasvuun viittaa myös moottoreiden pyörimisnopeuden kasvu. Ilma-alus joutui lisäämään moottoreiden pyörimisnopeutta, kun lavat olivat jäässä, jotta potkureilta saatu noste kyettäisiin pitämään samana, yhtä suurena kuin lappojen ollessa puhtaina. Ilma-aluksen käyttäjän pitää siis kohdentaa erityistä huomiotaan akun tilaan olosuhteissa, joissa voi esiintyä jäätämistä. Normaaliin aluksen virrankulutukseen voi tulla odottamattomia muutoksia, kun potkurin lapoihin muodostuu jäätä eikä aluksen käyttäjä tätä visuaalisesti huomaa lentotoiminnan aikana.

Työssä ei visuaalisesti havaittu jäällä olevan merkitystä ilma-aluksen lennon vakaisuuteen, vaikka jäätä oli muodostettu epätasaisesti eri potkureille. Työssä käytetty ilma-alus kykeni siis vastaamaan tähän nosteen epätasaisuuteen ja lentämään sille määritetyn reitin ilman merkittäviä vaikeuksia. Alus kykeni myös kantatelemaan jään tuottaman massan, jolla on sitä suurempi vaikutus mitä pienempi ilma-alus on kyseessä. Miehittämättömien ilma-alusten suunnittelussa pitää selvästi ottaa huomioon turvallisuus- ja suorituskyvynkertoimia, joilla mahdollistetaan ilma-alukseen kohdistuvien voimien vastustaminen ja lentotoiminnan jatkuminen poikkeavissa olosuhteissa.

## 7.2 Miehitämättömän ilma-aluksen kehittäminen

Ulkona tapahtuva lentotoiminta on alttiina paikallisille sääilmiöille ja toiminnalle on valmistajien puolesta asetettu tiettyjä rajoituksia sään kannalta (luku 4.2). Lopullinen päätös siitä, voidaanko lentotoimintaa suorittaa, on kuitenkin miehitämättömän ilma-aluksen päälliköllä. Opinnäytetyön yhtenä tarkoituksena oli sään vaikutuksen selvittämisen lisäksi kartoittaa, onko ilma-aluksen tietoisuuden kehittäminen mahdollista sen sensoreilta saamien tietojen perusteella. Ilma-aluksen tietoisuuden kehittäminen merkitsee sen autonomisuuden kehittämistä.

Saatujen tulosten perusteella ilma-alusta voitaisiin kehittää havaitsemaan sen moottoreiden kierrosluvun kasvua ja poikkeamaa normaalista suorituskyvyn arvoista. Ilma-alus tietäisi moottoreiden kierroslukujen raja-arvot, joita vaaditaan, kun lennetään haluttuun suuntaan tai suoritetaan tiettyä liikehdintää. Näiden raja-arvojen ylittyessä ilma-alus voisi ilmoittaa käyttäjälle kohonneesta moottoreiden pyörimisnopeuden tarpeesta. Jos käyttäjä ei huomioi aluksen varoituksia, voisi alus itsenäisesti aloittaa toimenpiteet mahdollisen onnettomuuden välttämiseksi. Toimenpiteet voisivat olla esimerkiksi lentokorkeuden ja -nopeuden vähentäminen tai hätätapauksessa return-to-home -toiminnon suorittaminen. Kehittämällä voitaisiin ennakoida virrankulutusta sekä varautua akun varaustason normaalista poikkeavaan vähenemiseen. Tällä kehittämisellä voitaisiin myös osaltaan varmistaa ilma-aluksen luotettava ja turvallinen toiminta olosuhteissa, joissa lentotoiminta voisi vaarantua sään takia.

Työstä löytyi mahdollisuuksia myös jatkokehitykselle. Inertiaaliyksikön tuottamasta kiihtyvyyden- ja asentotiedosta saatuja tuloksia voisi tarkentaa eikä lennon vakauden tulkitseminen olisi vain visuaalisten havaintojen pohjalla. Ylipäätään tietyn ilma-alusmallin ohjelmoinnin mahdollisuus ja sensoreilta saatujen tietojen käytettävyys on hyvä selvittää ennen työn aloittamista. Miehitämättömät ilma-alukset luovat hyvän alustan kehitykselle niiden mahdollistaessa tehtäviä, joihin ihminen ei kykene tai joissa ihmisen turvallisuus olisi vaarannettuna.

## LÄHTEET

Atyabi, A., MahmoudZadeh, S. & Nefti-Meziani, S. 2018. Current advancements on autonomous mission planning and management systems: An AUV and UAV perspective. Annual Reviews in Control.

Airdata. 2015. Fly with Confidence. Luettu 24.4.2020. <https://airdata.com/>

Blackeye, J. 2016. White drone mid-flight. Luettu 5.3.2020. <https://unsplash.com/photos/XYrj3j7smo>

Baudin, E., Blanquart, J-P., Guiochet, J. & Powell, D. 2007. Independent Safety Systems for Autonomy: State of the Art and Future Directions. Toulouse: Laboratory for Analysis and Architecture of Systems.

Caliskan, F., Hajiyev, C. 2013. A review of in-flight detection and identification of aircraft icing and reconfigurable control. Progress in Aerospace Sciences 60, 12-34.

Cao, Y., Wu, Z., Su, Y. & Xu, Z. 2015. Aircraft flight characteristics in icing conditions. Progress in Aerospace Sciences 74, 62-80.

Clough, B.T. 2002. Metrics, Schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy. Wright-Patterson: Air Force Research Laboratory.

David. 2018. Different categories, and types of drones for you to know. Luettu 5.3.2020. <https://skilledflyer.com/types-of-drones/>

Decker, C. 2017. Facebook. OFFICIAL DJI OWNERS GROUP. Luettu 20.3.2020. <https://www.facebook.com/groups/dji.owners/permalink/1594980020517121/>

Dezső, D., Sarvajcz, K. 2018. Measuring drone flight-stability using computer vision. MATEC Web of Conferences 184 (022016).

DJI. 2019. DJI Assistant 2 For Mavic. Luettu 22.4.2020. <https://www.dji.com/fi/downloads/software/assistant-dji-2-for-mavic>

DJI. 2018. Mavic 2 Specs. Luettu 16.4.2020. <https://www.dji.com/fi/mavic-2/info>

DJI Developer. 2019. Mobile SDK. Luettu 22.4.2020. <https://developer.dji.com/api-reference/android-api/Components/SDKManager/DJISDKManager.html>

DJI Developer. 2019. Windows SDK. Luettu 22.4.2020. <https://developer.dji.com/api-reference/windows-api/SDKManager/DJISDKManager.html>

DJI Support. 2017. How to use DJI's Return to Home (RTH) Safely. Luettu 18.3.2020. <https://store.dji.com/guides/how-to-use-the-djis-return-to-home/>

DJI Mavic 2 Zoom flight with clean rotor blades. 2020. Youtube-video. Julkaistu 24.4.2020. Viitattu 26.4.2020. <https://www.youtube.com/watch?v=TWmUeMbR8zk>

DJI Mavic 2 Zoom flight with ice on rotor blades. 2020. Youtube-video. Julkaistu 24.4.2020. Viitattu 26.4.2020. <https://www.youtube.com/watch?v=AT8ZacblcKg>

Droneinfo.fi. 2020. EU dronesäännöt. Luettu 10.3.2020. [https://www.droneinfo.fi/fi/eu\\_dronesaanot](https://www.droneinfo.fi/fi/eu_dronesaanot)

Droneinfo.fi. 2020. RPAS Lentotyötoiminta. Luettu 10.3.2020. [https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyto/rpas\\_lentotyto](https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyto/rpas_lentotyto)

Dykowitz, Z. 2019. What Types of Drones Are There? A Guide to All the Different Drone Types on the Market. Luettu 5.2.2020. <https://uavcoach.com/types-of-drones/>

Federal Aviation Administration. 2016. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge. New York: Skyhorse Publishing.

Habashi, W. G., Aubé, M., Baruzzi, G., Morency, F & Tran, P. 2004. FENSAP-ICE: A Full-3D In-Flight Icing Simulation System for Aircraft, Rotorcraft and UAVs. 24th International Congress of the Aeronautical Sciences 2004, Japan.

Hall, N. 2015. Bernoulli's Equation. National Aeronautics and Space Administration.

Hann, R., Wenz, A., Gryte, K. & Johansen, T. A. 2017. Impact of atmospheric icing on UAV aerodynamic performance. Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS), Linköping 2017, 66-71.

Hansen, S., Blanken, M. 2013. Diagnosis of Airspeed Measurement Faults for Unmanned Aerial Vehicles. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 50 (1), 224-239.

Hobbs. A. 2018. Chapter: Remotely Piloted Aircraft. Luettu 10.3.2020. [https://www.researchgate.net/figure/The-Remotely-Piloted-Aircraft-System-RPAS-consists-of-the-Remotely-Piloted-Aircraft\\_fig1\\_323393128](https://www.researchgate.net/figure/The-Remotely-Piloted-Aircraft-System-RPAS-consists-of-the-Remotely-Piloted-Aircraft_fig1_323393128)

Huang, H-M. 2007. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: Safety and Application Issues. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

Huutonen, M. 2014. Mitä tarkoittaa kastepiste? Luettu 15.4.2020. [https://yle.fi/saa/mita\\_tarkoittaa\\_kastepiste/7015130](https://yle.fi/saa/mita_tarkoittaa_kastepiste/7015130)

Ilmailulaki 7.11.2014/865.

Ilmarinen, V. 2015. Digitalisaatio. Yritysjohdon käsikirja. Helsinki: Talentum Oyj.

- International Civil Aviation Organization (ICAO). 2015. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Canada, Montréal: International Civil Aviation Organization.
- Jha, A.R. 2016. Theory, Design, and Applications of Unmanned Aerial Vehicles. Boca Raton: CRC Press.
- Johnson, R. Leen, M, Goldberg, D. Chiu, M. 2005. Adaptive Levels of Autonomy (ALOA) for UAV Supervisory Control. Whittier CA: Air Force Research Laboratory.
- Jones, M. n.d. Regelation. Brightstorm. Opetus-video. Viitattu 12.4.2020. <https://www.brightstorm.com/science/physics/heat-transfer-and-change-of-phase/regelation/>
- Jonkman, B. 2014. NREL's S826 Airfoil Graphic and Coordinates. Luettu 20.3.2020. [https://wind.nrel.gov/airfoils/Shapes/S826\\_Shape.html](https://wind.nrel.gov/airfoils/Shapes/S826_Shape.html)
- Journaux, B. Brown, J. M. Pakhomova, A. Collings, I. E. Petitgirard, S. Espinoza, P. Boffa Ballaran, T. Vance, S. D. Ott, J. Cova, F. Garbarino, G & Hanfland, M. 2019. Holistic Approach for Studying Planetary Hydrospheres: Gibbs Representation of Ices Thermodynamics, Elasticity, and the Water Phase Diagram to 2,300 MPa. Journal of Geophysical Research: Planets.
- Kuss, M. 2020 Can drones fly in rain? – or will it crash? Tips For Drones. Luettu 18.3.2020. <https://tipsfordrones.com/can-drones-fly-in-rain/>
- Lockney, D. 2010. Energy-Efficient Systems Eliminate Icing Danger for UAVs. NASA Spinoff 2010.
- Maavoimat. n.d. Minilennokkijärjestelmä (MUAS). Luettu 9.3.2020. <https://maa-voimat.fi/muas>
- National Civil Aviation Agency – Brazil (ANAC). 2018. RPA flight in bad weather conditions. Luettu 18.3.2020. <https://www.anac.gov.br/en/safety/aeronautical-meteorology/drones-and-meteorology#rpa>
- National Geographic. 2011. Atmosphere. Luettu 20.3.2020. <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/atmosphere/>
- Nonam, K., Kendoul, F., Suzuki, S., Wang, W. & Nakazawa, D. 2010. Autonomous Flying Robots. Tokyo: Springer.
- Panaras, A. G. 2012. Aerodynamic Principles of Flight Vehicles. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Rotondo, D., Cristofaro, A., Johansen, T. A., Nejjari, F. & Puig, V. 2017. Diagnosis of icing and actuator faults in UAVs using LPV unknown input observers. Journal of Intelligent & Robotic Systems 91, 651-665.
- Science Learning Hub - Pokapū Akoranga Pūtaiao. 2007. Water and ice. Luettu 7.2.2020. <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1008-water-and-ice>

Siquig, R. A. 1990. Impact of Icing on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Operations. Kalifornia: Naval Environmental Prediction Research Facility.

Stenroos, C. 2015. Properties of icephobic surfaces in different icing conditions. Materiaalitekniiikan koulutusohjelma. Tampereen yliopisto. Diplomityö.

Sørensen, K. L. 2016. Autonomous Icing Protection Solution for Small Unmanned Aircraft. Degree of philosophiae doctor. Norwegian University of Science and Technology NTNU. Doctoral theses.

The Drone Logic. 2020. How Long Can You Fly a Drone. Luettu 24.4.2020. <https://www.thedroneologic.com/how-drones-work/drone-flight-time/>

Tousi, M. M., Khorasani, K. 2011. Robust observer-based fault diagnosis for an unmanned aerial vehicle. New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Valavanis, K. P., Vachtsevanos, G. J. 2015. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Dordrecht: Springer.

Vann, R., ICAO. 2019. Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) Concept of Operations (CONOPS) for International IFR Operations. Luettu 3.3.2020. <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/RPAS%20CONOPS.pdf>

Warren, M., Mejias, L., Kok, J., Yang, X., Gonzalez, F. & Upcroft, B. 2015. An Automated Emergency Landing System for Fixed-Wing Aircraft: Planning and Control. Journal of Field Robotics.

Williams, A. 2019 Exploring the weather hazards behind 5 deadly, notorious plane crashes. AccuWeather.

Zuckerman, C. 2019. Clouds, explained. National Geographic. Luettu 20.3.2020. <https://www.nationalgeographic.com/science/earth/earths-atmosphere/clouds/>