

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikan koulutus

2022

Jori Koskinen

Hydrauliöljysumun kulkeutuminen kaivoskoneen rungon sisällä ja konetilassa

Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikan koulutus

2022 | 50 sivua

Jori Koskinen

Hydrauliöljysumun kulkeutuminen kaivoskoneen rungon sisällä ja konetilassa

Tämä opinnäytetyö tehtiin Sandvik Mining and Construction Oy:lle, joka on globaalisti merkittävä kaivoskoneiden toimittaja. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää käytännön kokeen avulla, mihin kaivoskauhakuorman rungon sisäosan letkuun syntyneestä reiästä vapautuva hydrauliöljysumu rungon sisäosissa virtaavan ilman toimesta kulkeutuisi. Erityisen kiinnostuneita oltiin siitä, kulkeutuuko öljysumua kuorman peräpäähän vasemmalle puolelle alueelle, jossa moottorin turboahdin sijaitsee. Tämän alueen lämpötila nousee ajon aikana korkealle, ja voi aiheuttaa öljyn syttymisvaaran.

Kokeen taustatyöksi perehdyttiin erilaisiin tapoihin visualisoida virtauksia, sekä valittiin tähän kokeeseen soveltuva tekniikka. Kokeessa ruiskutettiin UV-väriä rungon sisällä koneen käydessä, ja tämän jälkeen kuvattiin kulkeuma UV-valoa ja kameraa hyödyntäen.

Tuloksissa havaittiin, ettei väriä ollut kulkeutunut ollenkaan moottorin kuumalle alueelle, eikä sen välittömään läheisyyteen. Opinnäytetyö täytti sille asetetut tavoitteet.

Asiasanat:

Hydrauliikka, paloturvallisuus, liikkuvat työkonet

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Degree Programme in Mechanical Engineering

2022 | 50 pages

Jori Koskinen

Drift of Hydraulic Oil Mist Inside a Mining Vehicle's Frame and Engine Compartment

This thesis was commissioned by Sandvik Mining and Construction corporation, a globally significant supplier of mining machinery. The aim was to find out, through practical experiments, where the hydraulic oil mist leaking from the hose would drift inside the mining loader vehicle's frame and engine compartment. Focus was on finding out whether the oil mist drifts to the engine's left side that runs exceptionally hot and can cause a fire hazard.

Different kind of fluid visualization techniques were researched, and the most practical one was picked for the final experiment. In the test, UV paint was sprayed inside the vehicle frame while the engine was on. Afterwards, the drifted paint was photographed using a camera and a UV light.

The results revealed that no UV paint was found in the engine's hot side or its proximity. Thus, the thesis met the objectives set for it.

Keywords:

Hydraulics, fire hazard, mobile machines

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
1.1 Opinnäytetyön tausta	8
1.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja laajuus	10
2 Fluidin visualisoinnin teoriaa	11
2.1 Virtausmekaniikka yleisesti	11
2.1.1 Fluidin ominaisuudet	12
2.1.2 Virtauksen peruskaavoja	13
2.1.3 Tietokoneavusteinen virtauslaskenta	15
2.2 Virtauksen kuvantamistekniikat	16
3 Käytännön kokeen kehitysprosessi	20
3.1 Yleiset koejärjestelyt	20
3.2 Savukone ja videokamera	21
3.3 Vesisumu ja lämpökamera	22
3.4 Muita ideoita	23
4 Lopullinen koejärjestely	24
4.1 Valmistelut	24
4.2 Maaliruisku	24
4.3 UV-värin ruiskuttaminen	27
4.4 Valokuvaaminen	28
5 Kokeen tulokset	31
6 Yhteenveto ja yleinen pohdinta	36
6.1 Johtopäätökset kokeesta	36
6.2 Pohdinta ja kehityskohteet	36
6.2.1 Koeympäristö	36
6.2.2 Ruisku	37
6.2.3 UV-maali	37

6.2.4 UV-lamppu	37
6.2.5 Valokuvauskamera	38
6.2.6 Lämpökamera	39
6.2.7 Savukone	39
6.3 Muita soveltuvia tekniikoita	40
Lähteet	42

Liitteet

Liite 1. Muistiinpano 12.4.2022 käydyn Teams-keskustelun pohjalta

Liite 2. Lisää valokuvia UV-ruiskutuskokeesta

Liite 3. Lisää valokuvia ilman imeytymisestä yläkannen läpi

Kaavat

Kaava 1. Bernoullin yhtälö (Laine ym. 2006, 16).....	13
Kaava 2. Reynoldsin luku (Laine ym. 2006, 32).....	14
Kaava 3. Stokesin kaava ilmanvastukselle (Kambe 2007, 68).....	14

Piirroksset

Piirros 1. Nopeusjakautuma (Wuori 1994, 2).	12
Piirros 2. Lasersäteen muokkaaminen (Smits & Lim 2012, 275, 277).....	41

Kuvat

Kuva 1. Ilmavirtaukset (1,2), kuuma puoli (3) ja palosuojalevy (4).	9
Kuva 2. Reynoldsin koe (Nakayama ym. 1998, 45).	16
Kuva 3. Smoke-wire tekniikka (Smits & Lim 2012, 62).	18
Kuva 4. Visualisointitekniikoiden eroja (Smits & Lim 2012, 67).	19

Kuva 5. Keskirungon sisäosia.	20
Kuva 6. Gunt HM 170.52 Fog Generator täysillä.	21
Kuva 7. Maaliruisku 1, painemittari 2, paineensäädin 3 ja sulkuventtiili 4.	25
Kuva 8. Ruiskun kiinnityskohta ja ruiskutussuunta.	26
Kuva 9. Maaliruisku asennettuna.	26
Kuva 10. Kaikki valmiina ruiskutukseen.	27
Kuva 11. Kamera asetettuna kuvaamista varten.	28
Kuva 12. Näkymä puhelimella valaistuna.	29
Kuva 13. Näkymä UV-valolla valaistuna, jolloin UV-väri hehkuu oranssina.	29
Kuva 14. Kompleksinen kuvausympäristö haasteineen.	30
Kuva 15. Valokuvien kuvauspaikat ja -suunnat.	31
Kuva 16. Näkymä ruiskun kiinnityskohdasta ruiskutus-suuntaan päin.	32
Kuva 17. Näkymä moottorin etupuolen luukusta taaksepäin.	33
Kuva 18. Palosuojaseinän nurkka, jonka takana on moottorin kuuma puoli.	34
Kuva 19. Kuminen palosuojarakenne ulkopuolelta kuvattuna.	34
Kuva 20. Vasemman puolen hydraulijäähdytin.	35
Kuva 21. Takatuulettimen imuvirtaus.	40
Kuva 22. Kuva ruiskulta yläviistosta taaksepäin.	45
Kuva 23. Kuva takaluukulta etuviistoon vasemmalle.	45
Kuva 24. Kuva takaluukulta taaksepäin.	46
Kuva 25. Kuva takaluukulta taaksepäin ilman UV valoa.	46
Kuva 26. Paloseinä UV-valaistuna.	47
Kuva 27. Paloseinä ilman UV-valoa.	47
Kuva 28. Vasemman puolen jäähdytin UV-valolla.	48
Kuva 29. Vasemman puolen jäähdytin ilman LED-valoa.	48
Kuva 30. Paloseinä ulkopuolelta UV-valolla.	49
Kuva 31. Paloseinä ulkopuolelta LED-valolla.	49
Kuva 32. Oikea hydraulijäähdytin imee ilmaa ulkopuolelta tästä.	50
Kuva 33. Vasen hydraulijäähdytin imee ilmaa ulkopuolelta tästä.	50

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Analyysi	Ongelman purkaminen perustaviin osasiinsa (Sanastokeskus ry 2022).
CFD, Computational Fluid Dynamics	Tietokoneavusteinen virtausdynamiikka.
Fluidi (eng. fluid)	Neste. Jaetaan edelleen ”varsinaiisiin” nesteisiin ja kaasuihin. (Wuori 1994, 1).
Rajakerros	Jonkin pinnan tuntumassa kulkevan virtauksen osa, jossa virtausnopeus on pienempi, kuin päävirtauksessa. Virtausnopeus kasvaa etäämmällä pinnasta. (Wuori 1994, 129)

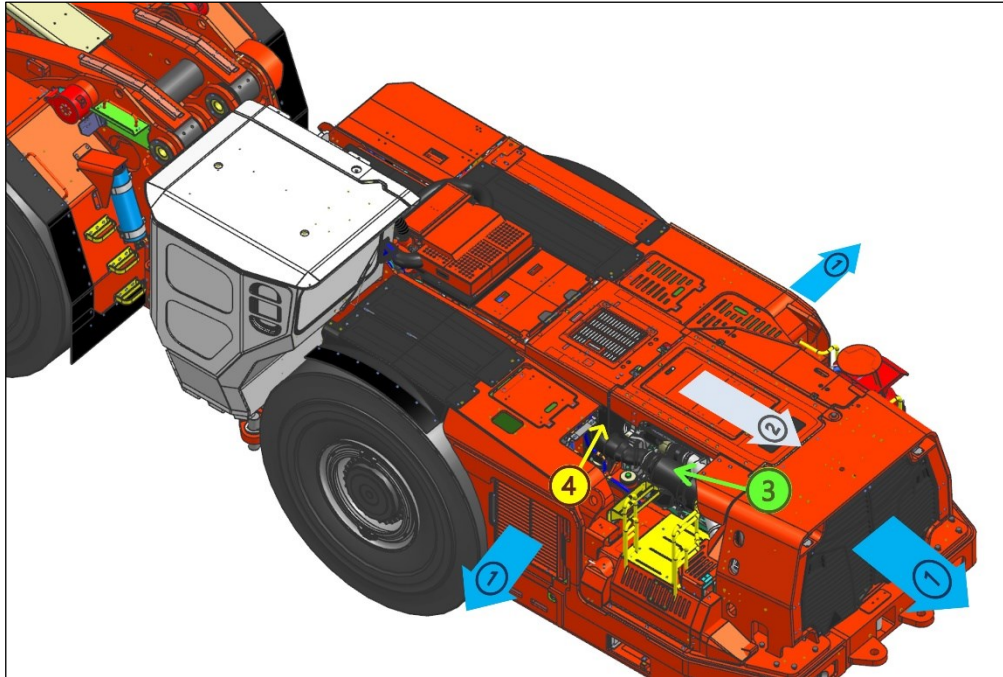
1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehtiin Sandvik Mining and Construction Oy:lle, joka on globaalisti merkittävä kaivoslaitteiden ja teknisten ratkaisujen toimittaja. Lisäksi Sandvik toimittaa lastuavan työstön työkaluja ja työkalujärjestelmiä, sekä kiven ja mineraalien murskaus ja seulonta ratkaisuja. Näistä liiketoiminta-alueista kaivosteollisuus oli vuonna 2021 suurin 42 % osuudellaan koko liikevaihdosta. Toiseksi suurin oli lastuavan työstön työkaluratkaisujen liiketoiminta-alue 37 % osuudellaan. (Sandvik and Narva 2022, 2–3.)

Sandvik Group on perustettu vuonna 1862, ja se on heti alusta lähtien panostanut laatuun, tutkimukseen, tuotekehitykseen sekä vientiin. Sama strategia on käytössä vielä nykyäänkin. Yrityksen tavoitteisiin kuuluu kestävän kehityksen mukainen liiketoimintamalli, ja tämän osana myös paremman turvallisuuden kehittämiseen. Kaivosteollisuus onkin yksi Sandvik Groupin liiketoiminta-aloista, jossa se työskentelee läheisesti asiakkaidensa kanssa kehittäen tuotteitaan saavuttaakseen turvallisemman työympäristön. (Sandvik AB 2022.)

1.1 Opinnäytetyön tausta

Opinnäytetyön lähtökohtana oli hypoteettinen tilanne, jossa keskisuuren kaivoskauhakuormaajan hydraulikkaöljyletku on hajoamassa. Vaikka letkut ovatkin suunniteltu kestämään koneen sisällä, on silti mahdollista, että ne voivat ajan myötä väsyä jatkuvan tärinän, vaihtelevan lämpökuorman ja letkun korkean sisäisen paineen vaikutuksesta. Ennen täydellistä hajoamistaan letkusta suihkuu hydraulioöljyä koneen rungon sisälle. Vuoto on niin pieni, ettei sitä huomata heti, vaan ehkä vasta, kun letku hajoaa lopullisesti, ja aiheuttaa toimintahäiriön.



Kuva 1. Ilmavirtaukset (1,2), kuuma puoli (3) ja palosuojalevy (4).

Työssä tutkittava konemalli oli LH517i, joka toimii polttomoottorilla. Moottorin ja hydraulikkajärjestelmän jäähdytysilman tarve on suuri, ja ilmaa imee usea tuuletin (Kuva 1, 1) koneen rungon ja kansirakenteiden aukkojen läpi. Moottori sijaitsee kuormaajan perässä, jossa myös suurin ja tehokkain yksittäinen tuuletin sijaitsee. Tämä tuuletin jäähdyttää moottoria, ja imee suuren osan ilmastaan suoraan rungon ulkopuolelta, koska moottoritila on sivuiltaan osittain avoin. Osa jäähdytysilmasta tulee silti myös moottorin etupuolelta rungon sisäosista (Kuva 1, 2). Tarkoituksena oli selvittää, voiko moottorin etupuoleisessa rungossa sattuneen letkurikon seurauksena hydraulijäähdytyssumua kulkeutua moottorille asti. Erityisen kiinnostuneita oltiin moottorin vasemmasta, niin sanotusta ”kuumasta puolesta” (Kuva 1, 3), jossa turboahdin sijaitsee. Itse turbon pintalämpötila voi olla normaali käytössä 600–700°C, ja voi kohota tästäkin selvästi jäähdytyksen äkillisesti katketessa esimerkiksi ns. hot shut down:n takia. Turbon päällä on kattavat suojarakenteet, joiden lämpötila on paljon edellä mainittua matalampi. Lisäksi moottorin etuosan vasemmalla puolella on palosuojarakenne, joka katkaisee suoran tien moottorin kuumalle puolelle, mutta tämä suojarakenne ei ole aukoton (Kuva 1, 4).

Konepalon seuraukset syvällä kaivoksessa olisivat erittäin vakavat. Koneen syttyessä palokuormaa olisi polttoaineen ja hydraulioöljyn lisäksi myös esimerkiksi ajoneuvon renkaat, joissa on yhteensä noin 6000 kg kumia. Kaivoskäytävät ovat mitoitettu kulloinkin käytettävän konemallin kokoon niin tarkasti, että paikoin koneen sivuilla ja yläpuolella on tilaa vain noin 1 metrin verran. Tällaisessa ympäristössä voisi kestää pitkään, ennen kuin konetta pystyttäisiin edes yrittää lähestyä, ja alkaa sammuttamaan paloa. Henkilövahingoilta voitaisiin välttyä, mutta ainakin osa kaivoksesta saatettaisiin joutua sulkemaan, ennen kuin palo olisi saatu sammutettua ja jäljet siivottua. Tällaisen konepalon mahdollisuuden arvioiminen, ja todennäköisyyden minimoiminen ovat oleellinen osa koneen tuotekehitystyötä, ja pohjimmiltaan myös tämän opinnäytetyön tarkoitus.

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja laajuus

Opinnäytetyön tavoite oli pyrkiä selvittämään käytännön kokein, mihin hydraulioöljysumu koneen rungon sisällä todellisuudessa kulkeutuu. Konkreettisten tuloksien lisäksi tietoa voitaisiin käyttää varmentamaan tietokoneavusteisen virtauslaskennan avulla tehdystä simulaatiosta saatua ratkaisua. Koneesta oli jo olemassa tarkka 3D malli, jonka pohjalta tietokonesimulaatio voitaisiin tehdä.

Käytännön kokeen ensimmäinen idea oli tehdä koe kuormaajan liikkua työnopeudella, ja käyttää apuna savukonetta ja pientä videokameraa, joilla ilmapirtauksen liikkeitä saataisiin tallennettua rungon sisällä. Erityisesti oltiin kiinnostuneita siitä, miten öljysumu käyttäytyy moottorin kuumien puolen läheisyydessä, ja kulkeutuuko sitä jopa turboahtimelle asti. Onnistuneen koejärjestelyn löytyessä, tuli se dokumentoida riittävällä tarkkuudella, jotta kuka tahansa saattaisi toistaa sen, ja saada vastaavia tuloksia. Lisäksi kokeen pohjalta voitaisiin tarvittaessa pyrkiä paremmin kontrolloimaan ilman liikkeitä koneen sisällä, muuttamalla koneen olemassa olevia rakenteita, tai tarvittaessa tekemällä kokonaan uusia. Esimerkiksi jonkinlainen ilmapirtauksen ohjain voisi olla tästä esimerkki.

2 Fluidin visualisoinnin teoriaa

Tämän opinnäytetyön aihe käsitteli lähinnä virtausdynamiikkaa ja ilmavirran visualisoimista. Niinpä soveltuva teoriapohja löytyi juuri virtausmekaniikasta, jonka osa virtausdynamiikka on, sekä erilaisista kuvantamistekniikoista, joilla ilman virtausta voidaan tehdä näkyväksi. Virtauksen kuvantamistekniikoissa pitäydettiin lähinnä vain juuri tämän kokeen kannalta käytännöllisimmissä vaihtoehdoissa. Virtausmekaniikassa oltiin kiinnostuneempia kaasujen virtauksesta yleisellä tasolla.

2.1 Virtausmekaniikka yleisesti

Virtausmekaniikka käsittelee fluidin virtauksen ilmiöitä. Sen ymmärtäminen on tärkeää niin fyysikoille, jotka haluavat ymmärtää itse ilmiön luonnetta, kuin myös insinööreille, jotka pyrkivät ratkomaan käytännön ongelmia virtausmekaniikan avulla. Esimerkiksi ilmailuinsinööri käyttää virtausmekaniikan oppeja lentokoneen suorituskyvyn parantamiseen, rakennusinsinööri kastelujärjestelmän tai padon suunnitteluun, ja koneinsinööri turbiinin tai lämmönsiirtimen suunnitteluun. (Cohen ym. 2007, 1.)

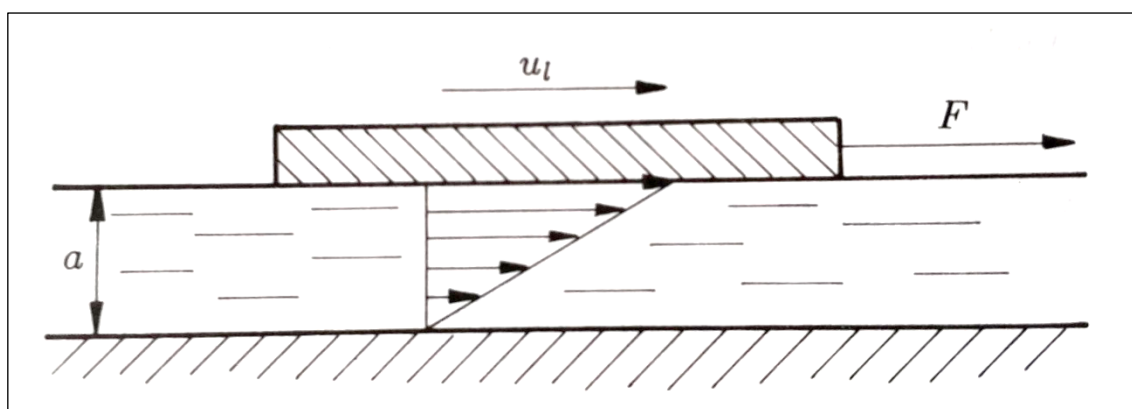
Virtausmekaniikka tarvitsee matemaattisen teorian lisäksi tuekseen myös käytännön kokeita. Samalla analyyttinen lähestymistapa kuitenkin auttaa, yksinkertaistetun mallin avulla, käytännön virtausmekaanisten ongelmien taustalla vaikuttavien ilmiöiden välisten yhteyksien ymmärtämistä. Käytännön tilanteiden kompleksisuuden takia rajustikin yksinkertaistetut mallit ovat usein tarpeen. Oltiinpa sitten kiinnostuneita virtausmekaniikasta fysiikan ilmiöinä, tai käytännön sovelluskohteissa, nojaa virtausmekaniikka pitkälti käytännön kokeisiin ja havaintoihin, eivätkä näiden ilmiöiden tutkijat voi tukeutua pelkästään matemaattisiin malleihin. (Cohen ym. 2007, 2.)

2.1.1 Fluidin ominaisuudet

Fluidit jaetaan kahteen ryhmään, nesteisiin ja kaasuihin. Virtausmekaniikan kannalta eräs tärkeä ero näiden kahden välillä on niiden kokoon puristuvuus. Nesteet ovat vaikeasti puristettavissa, kun taas kaasut puristuvat helposti. Kaasut myös laajenevat vapaasti ympäröivään tilaan, täyttäen sen kokonaan. Kaasuun kohdistetun puristavan voiman muuttuessa myös kaasun sisäinen paine muuttuu vastaavasti. Tällöin myös kaasun tiheys muuttuu, kun taas nesteen tiheyden voidaan yleisesti ottaen katsoa pysyvän samana. (Nakayama ym. 1998, 6.)

Fluidit koostuvat molekyyleistä. Vaikka nämä molekyylit ovat jatkuvassa liikkeessä, on niiden keskimääräinen etäisyys esimerkiksi huoneen lämpöisellä ilmalla normaalissa ilmanpaineessa vain 0,06 mikrometriä. Tämän takia fluideja voidaan pitää jatkuvana aineena, kunhan tarkastelun mittakaava on reilusti molekyylitasoa suurempi. (Nakayama ym. 1998, 6.)

Kaikille fluideille yhteistä on, ettei niissä esiinny vetojännityksiä, sen sijaan niillä on eräänlainen sisäinen kitka. Tätä kutsutaan **viskositeetiksi**. Piirroksessa 1 on nestettä kahden levyn välissä, joista ylempi on liikkeessä ja alempi paikallaan. Nesteen nopeusjakauma kuvastaa liikkeen nopeuden eroa nesteen eri kerroksien välillä. (Wuori 1994, 1–2.)



Piirros 1. Nopeusjakautuma (Wuori 1994, 2).

Lämpötilan muutos vaikuttaa fluidien viskositeettiin. Kaasun tapauksessa lämpötilan nousu johtaa molekyylien rajumpaan liikkeeseen ja sekoittumiseen, joka johtaa viskositeetin nousemiseen. Nesteiden viskositeetti taas käyttäytyy käänteisesti ja laskee lämpötilan noustessa, koska molekyylit erkanevat toisistaan, jolloin niiden väliset vetovoimat pienenevät. Joka tapauksessa nesteiden viskositeetti on yleensä huomattavasti suurempi kuin kaasujen.

Kinemaattinen viskositeetti ν taas on edellä kuvatun dynaamisen

viskositeetin μ ja nesteen tiheyden ρ suhde, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

(Nakayama ym. 1998, 11–12.)

2.1.2 Virtauksen peruskaavoja

Bernoullin yhtälö

Bernoullin yhtälö kuvaa paineen ja virtausnopeuden välistä riippuvuutta yksinkertaistetussa tilanteessa kitkattomassa ja puristumattomassa virtauksessa. (Laine ym. 2006, 15–16.)

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_t$$

Kaava 1. Bernoullin yhtälö (Laine ym. 2006, 16).

Kaava 1 p on staattinen paine, ρ on virtaavan fluidin tiheys, V on virtausnopeus ja p_t on kokonaispaine. $\frac{1}{2}\rho V^2$ osaa kutsutaan kineettiseksi paineeksi.

Bernoullin yhtälössä staattisen paineen ja kineettisen paineen summa on vakio, ja se on yhtä suuri kuin kokonaispaine. Tästä voidaan päätellä, että virtausnopeuden muuttuessa myös staattinen paine muuttuu. (Laine ym. 2006, 16.)

Laminaarinen tai turbulentti virtaus ja Reynoldsin luku

Kun nesteen tai kaasun virtausnopeus on pieni, aineen eri kerrokset eivät sekoitu toisiinsa. Tällaista virtausta kutsutaan laminaariseksi virtaukseksi. Kun virtausnopeus kasvaa riittävän suureksi, syntyy virtaukseen pyörteitä. Tällaista virtausta kutsutaan turbulentiksi. Reynoldsin luvun pohjalta voidaan yksinkertaistetusti päätellä, onko virtaus laminaarista vai turbulenttia. (Laine ym. 2006, 22, 30–32.)

Luku saadaan seuraavalla kaavalla:

$$Re = \frac{U_{\infty} l}{\nu}$$

Kaava 2. Reynoldsin luku (Laine ym. 2006, 32).

Kaavassa Re on Reynoldsin luku, U_{∞} on tulovirtauksen nopeus, ν on kinemaattinen viskositeetti ja l on jokin kappaleen edustava mitta. Putkivirtauskokeella on selvitetty, että virtaus on laminaarista, kun Reynoldsin luku on 2000–2300, tai pienempi. Tätä suuremmilla arvoilla virtaus muuttuu turbulentiksi. Kokeessa l arvona käytettiin putken halkaisijaa. (Laine ym. 2006, 31)

Stokesin laki

Stokesin laki kertoo ilmanvastuksen pyöreillä kappaleilla, ja se on voimassa pienillä nopeuksilla (Kambe 2007, 68).

$$-F = 6\pi\mu aU$$

Kaava 3. Stokesin kaava ilmanvastukselle (Kambe 2007, 68).

Kaavassa $-F$ liikettä vastustava voima, α on pallon säde, U on tasaisen virtauksen nopeus ja μ on viskositeetti (Kambe 2007, 68).

2.1.3 Tietokoneavusteinen virtauslaskenta

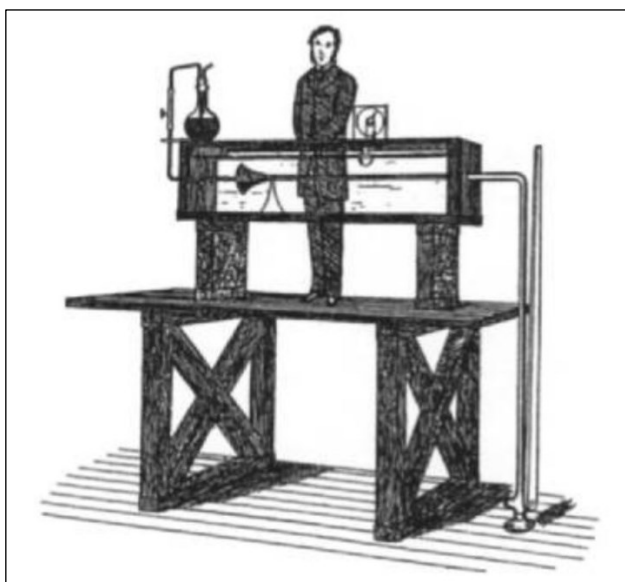
Tietokoneavusteinen virtauslaskenta, johon usein viitataan lyhenteellä CFD, oli alun perin vain korkeamman teknologian käytössä, kuten ilmailu- ja avaruusinsinöörien työkaluna. Nykyään se on kuitenkin kaikkien saatavilla myös esimerkiksi prosessi-, kemian-, rakennus- ja ympäristötekniikan insinöörien parissa. CFD juontaa juurensa virtausdynamiikkaa ja lämmönsiirtymistä tutkivien tieteenalojen pohjalta, ja keskittyy erityisesti liikkuvien fluidien, ja tämän virtauksen aiheuttaman lämmön siirtymisen ilmiöihin. (Tu ym. 2012, 1–5.)

Aiemmin käytännön kokeiden ja matematiikan avulla saatuja tuloksia voidaan nyt ratkoa yhä nopeammin tietokonemallien avulla. Nämä CFD ohjelmat ratkaiset ongelmien vaatimia differentiaaliyhtälöitä koko ajan luotettavammin ja tehokkaammin, ja niiden antamiin tuloksiin luotetaan aina vain enemmän. CFD:tä käytetään nykyään perinteisten insinöörialojen lisäksi myös mm. biolääketieteen tarpeisiin. (Tu ym. 2012, 1–5.)

CFD:n käyttämisellä on etuja mallien perinteiseen matemaattiseen ratkaisemiseen ja tehtäviin käytännön kokeisiin nähden. Ensinnäkin CFD:n käyttö on kustannustehokkaampaa ja nopeampaa etenkin monimutkaisempia ongelmia ratkaistaessa. Nykyajan tehokkaat tietokoneet ovat tässä avainasemassa. Toiseksi tietokoneohjelman käyttäminen mahdollistaa sellaisten mallien tekemisen, jotka eivät oikeassa elämässä olisi mahdollisia esimerkiksi kokonsa tai sijaintinsa takia. Esimerkkinä tsunami vuonna 2004. Lisäksi CFD:n avulla voidaan tuottaa yksityiskohtainen visualisointi sekä tarkkaa tietoa, verrattuna käytännön kokeisiin tai ongelmien puhtaaseen matemaattiseen ratkaisemiseen. Huonoja puoliakin toki on, kuten laskennalliset virheet, koska tietokonemalli on aina jonkinlainen yksinkertaistus oikeasta tilanteesta. Kaikki tulokset pitää analysoida ja tutkia kriittisesti ja oikeaoppisesti ennen kuin niihin voidaan uskoa. (Tu ym. 2012, 1–5.)

2.2 Virtauksen kuvantamistekniikat

Savun tai värin käyttäminen on yksi vanhimmista tavoista tehdä virtaus näkyväksi. Tekniikka on halpa ja helppo toteuttaa, ja sen avulla pystytään näkemään olennaisia yksityiskohtia monimutkaisessa virtauksessa. Yksi esimerkki tästä tekniikasta on Osborne Reynoldsin koe vuonna 1883 (Kuva 2), jolla hän näytti virtauksen muuttumisen putken sisällä laminaarisesta turbulentiksi käyttäen apunaan väriainetta. (Smits & Lim 2012, 47.)



Kuva 2. Reynoldsin koe (Nakayama ym. 1998, 45).

Väri

Kaikista nesteen virtauksen visualisointitekniikoista värin käyttäminen on ehkä kaikkein helpoin toteuttaa. Väreinä käytetään usein elintarvikevärejä, sillä ne ovat helposti saatavilla. Punainen, sininen ja vihreä tuottavat parhaan kontrastin kuviin. Kaupasta saatavat elintarvikevärit ovat tiivistetyssä muodossa, ja saattavat poiketa tiheydeltään virtaavasta nesteestä huomattavasti. Tämä johtaa virheelliseen koetulokseen, sillä tiheämpi neste painuu pohjaan, eikä seuraa virtausta. Jos virtaavana nesteenä käytetään vettä, väriliuokseen

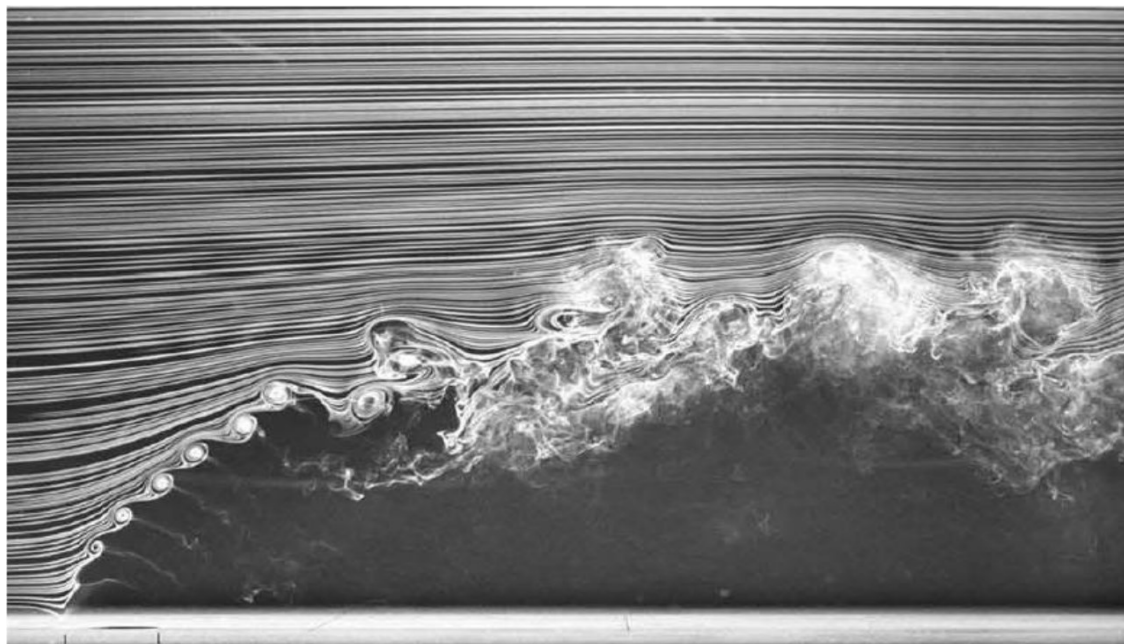
sekoitetaan yleensä pieni määrä alkoholia, jotta sen tiheys saadaan lähelle veden tiheyttä. Oikea sekoitussuhde täytyy selvittää kokeilemalla, sillä alkoholeja on saatavana eri puhtausasteisia. (Smits & Lim 2012, 48.)

Savu

Ilman virtausta visualisoidessa voidaan käyttää savua merkkiaineena. Savu voidaan tuottaa polttamalla jotakin sopivaa materiaalia, kuten puuta tai tupakkaa, tai höyrystämällä öljyä. Myös savukonetta voidaan käyttää. Ehkäpä parhaiten kontrolloitavissa oleva savu saadaan öljyn höyrystämällä, mutta savun alkuperällä ei ole suurta merkitystä. Tärkeämpää on, että savun partikkelikoko on riittävän pieni, noin 0,5µm luokkaa, jotta savu seuraa virtausta riittävällä tarkkuudella. Lisäksi on tärkeää, ettei savu vaikuta merkittävästi tutkittavaan virtaukseen. Savulla on myös hyvä olla hohtavia ominaisuuksia, jotta se erottuu kuvassa. (Smits & Lim 2012, 57–58.)

Smoke-wire tekniikka

Smoke-wire tekniikassa (Kuva 3) savu tuotetaan höyrystämällä öljyä rautalangasta, joka kuumennetaan sähkövirralla. Tämä tekniikka on suhteellisen edullinen toteuttaa. Periaatteessa tarvitaan vain ohutta rautalankaa, mineraaliöljyä ja virtalähde. Langan materiaalilla ei ole muuta väliä, kunhan sillä on riittävä lujuus ja resistiivisyys. Esimerkiksi ruostumatonta terästä käytetään yleisesti. Nopeammassa virtauksessa käytetään paksumpaa lankaa kuin hitaammassa. Langan paksuuden valintaan vaikuttaa myös sen Reynoldsin luku. Jotta lanka ei häiritse tutkittavaa virtausta, tulee langan halkaisijan perusteella määritellyn Reynoldsin luvun olla alle 20. Yleensä noin 0,1 mm langan halkaisijaksi on sopiva. (Smits & Lim 2012, 59.)



Kuva 3. Smoke-wire tekniikka (Smits & Lim 2012, 62).

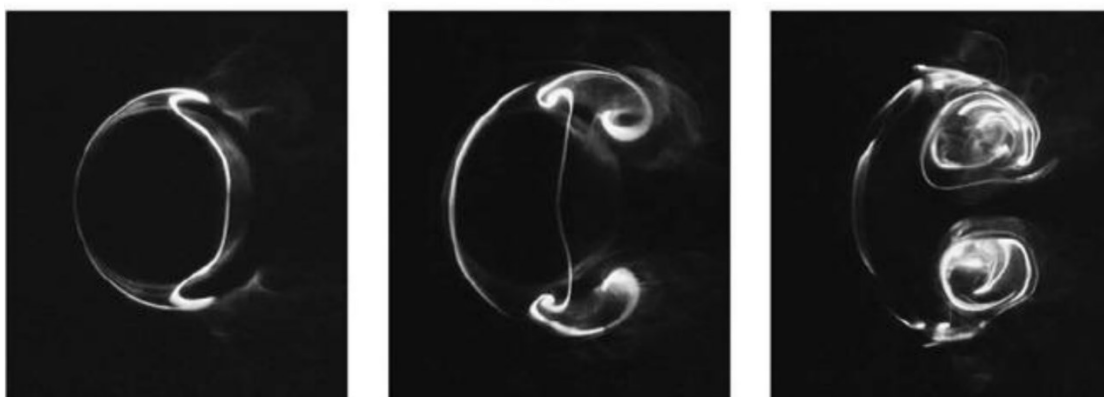
Valaiseminen

Kokeen valokuvaamisessa kaikkein tärkeintä on kohteen oikeanlainen valaiseminen. Valaisuun voidaan käyttää perinteisiä valokuvausvaloja, kuten spotti, halogeenivalo, salama tai strobovalo. Näillä saadaan kuvattua virtauksen ulkopinnan ominaisuuksia ja yksityiskohtia. Jos virtausnopeus on suuri, joudutaan käyttämään salamaa, jotta liike saadaan pysäytettyä kuvaan, ja valokuvista tulee tarkkoja. Valoja käytettäessä täytyy kokeilla, minkälainen valojen asettelu toimii parhaiten. Voidaan käyttää yhtä valonlähdettä edessä keskellä, tai kahta valonlähdettä asetettuna kameran molemmille puolille 45-asteen kulmaan kuvauskohteeseen nähden. Myös ylävalo tai ylätakavallo voi toimia tietyissä tilanteissa. Ongelmia voivat tuottaa heijastavat pinnat, sekä liian huono kontrasti lopullisessa kuvassa. (Smits & Lim 2012, 63–65.)

Laser sheet -tekniikka

Laser sheet -tekniikan avulla voidaan kuvata virtauksen sisäisiä osia pala palalta. Laservalo sijoitetaan esimerkiksi virtauksen yläpuolelle, ja lasisauvan tai

pyörivän peilin avulla muodostetaan ”valotaso”, joka valaisee virtauksesta pienen poikkileikkauksen. Siirtämällä saatua valotasoa kuvan syvyys suunnassa, voidaan virtauksesta tallentaa useita ohuita poikkileikkauksia eri syvyydeltä. Yleensä 4–5 watin tehoinen laseri on riittävä tällaisten kuvien ottamiseen. (Smits & Lim 2012, 66.)



Kuva 4. Visualisointitekniikoiden eroja (Smits & Lim 2012, 67).

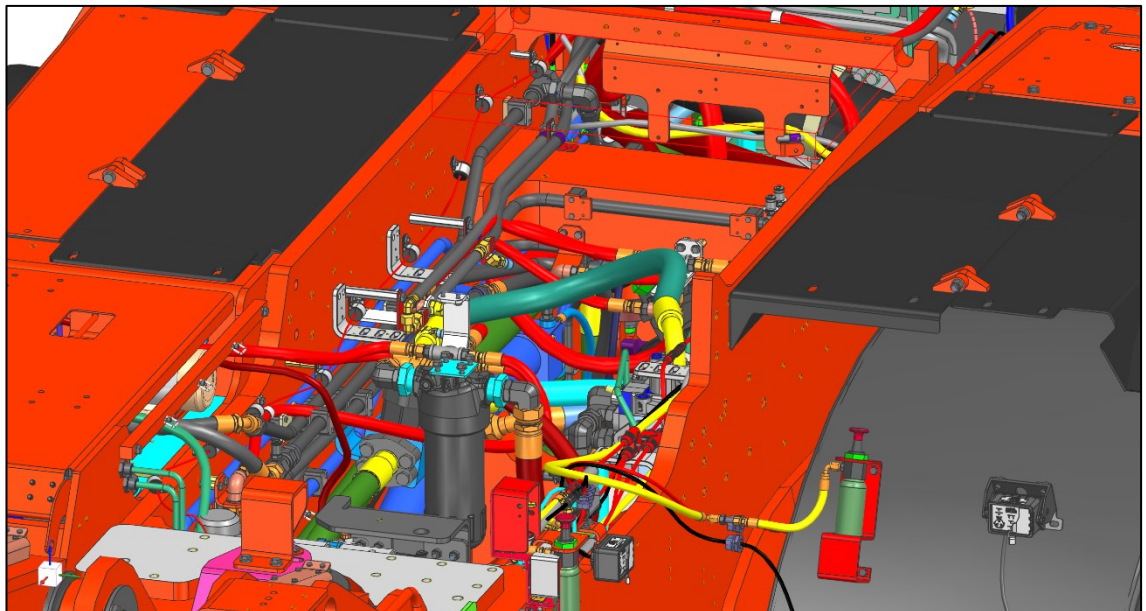
Kuva 4 ylhäällä on väriä käyttäen visualisoitu virtaussuihku, joka purkautuu alhaalta päin kuvassa vallitsevaan vasemmalta oikealle liikkuvaan poikittaiseen virtaukseen. Alemmissä kuvissa on samantapainen virtaustilanne, mutta tässä virtausta on kuvattu ylhäältä alaspäin laser sheet -tekniikalla. Kaikki kolme kuvaa on otettu eri syvyyksiltä. (Smits & Lim 2012, 67.)

3 Käytännön kokeen kehitysprosessi

Alkuperäinen idea oli, kaivoskoneen täydessä ajonopeudessa, selvittää savukoneen ja pienen videokameran avulla, minne mahdollinen hydraulioöljysumu kulkeutuu koneen rungon sisällä. Samalla kuitenkin ideoitiin muita mahdollisia tapoja kulkeuman simuloimiseksi, sillä mitään varmaa ja testattua keinoa ei vielä ollut tiedossa.

3.1 Yleiset koejärjestelyt

Työ alkoi LH517i lastauskoneen sekä sen täydellisen 3D-mallin tutkimisella (Kuva 5). Pyrittiin löytämään sopivia kohtia koneen sisältä, josta laskea kulkeutuva merkkiaine rungon sisäisen ilmavirran kuljetettavaksi. Sopivia kohtia olivat menopuolen suurikokoiset ja suuripaineiset hydraulioöljyletkut, sekä näiden letkujen liittimet. Juuri suuripaineletkuista hydraulioöljy tulisi todennäköisemmin ulos sumuna, joka voisi kulkeutua ilmavirran mukana pidemmälle rungon takaosiin.



Kuva 5. Keskirungon sisäosia.

Toiseksi piti löytää mahdollisia kiinnityskohtia kameralle, jotta savu saatiin kuvattua selvästi. Tämä tuntui haastavalta, sillä rungon sisätilat olivat todella ahtaat, pimeät ja epämääräisen muotoiset. Ensin ajatuksena oli, että suunnittelun apuna voisi käyttää nopealla ja yksinkertaisella virtauslaskentasimulaatiolla saatua mallia. Mallin pohjalta etsittäisiin kokeen kannalta oleellisia kohtia virtauksessa, jotka olisi hyvä saada tallennettua myös videokameralla. Mallin tekeminen todettiin kuitenkin tulokseltaan epäluotettavaksi sekä työmäärältään liian mittavaksi opinnäytetyön osana toteutettavaksi, joten tietokonesimulaatio jätettiin tekemättä (liite 1).

3.2 Savukone ja videokamera

Saatavilla oleva savukone oli malliltaan Gunt HM 170.52 Fog Generator. Se on tarkoitettu tilanteisiin, joissa halutaan visualisoida ilman kulkua esimerkiksi tuulitunnelissa, tuulettimen, ilmanotto- tai ilmanpoistoaukon läheisyydessä, sekä muissa vastaavissa käyttötarkoituksissa (G.U.N.T. 2022). Savukoneessa ei käytetty kokeen aikana siihen kuuluvaa suutinta. Näin savuntuotto oli mahdollisimman hyvä. (Kuva 6.)



Kuva 6. Gunt HM 170.52 Fog Generator täysillä.

Testi lyhyesti: Työkone käynnistettiin ja kierrokset nostettiin korkealle. Näin ilma liikkui kunnolla koneen rungon sisällä. Savukoneen pilliä pidettiin koneen luukun kautta rungon sisäpuolella. Tällä pikaisella testillä savukoneen tuottama savu hävisi heti koneen sisään, eikä sitä näyttänyt tulevan ulos mistään. Savua tuntui joko olevan liian vähän, tai sitten se oli liian kevyttä suhteessa liikkuvan ilman määrään, nopeuteen ja turbulenssiin. Monimutkaisempia testejä ei edes tehty.

3.3 Vesisumu ja lämpökamera

Savukoneen ja videokameran lisäksi oli idea käyttää kylmää vesisumua ja lämpökameraa. Vesi on harmitonta ainetta ja veden viskositeetin, painon ja muiden ominaisuuksien muuttaminen enemmän hydraulioöljysumun kaltaiseksi voisi onnistua paljon helpommin, kuin esimerkiksi savukonesavun.

Vesisumun aikaan saamiseksi koitettiin käsisumutinpulloa, johon ensin pumpataan käsin painetta, ja sitten suihkutetaan. Tällaisessa pullossa paine laskee nopeasti, eikä hienoa sumua saada montaa sekuntia. Toinen vaihtoehto oli maaliruisku, joka toimikin paljon sumutinpulloa paremmin. Sumun laatua ja ilmavirran määrää pystyi maaliruiskulla säätämään portaattomasti halutunlaiseksi, jonka jälkeen säätimet voitiin kiinnittää paikoilleen.

Ongelmaksi muodostui kunnollisen lämpökameran saaminen lainaan. Saatavilla oli halvempi lämpökamera, jolla sai kuvattua valokuvia, muttei videota. Videon kuvaus ominaisuus löytyi vain kalliimmista kameroista.

Videokuvausominaisuuden katsottiin olevan tärkeä käytännöllisyyden sekä laadukkaamman kuvamateriaalin kannalta.

Yksi testi kuitenkin tehtiin saatavilla olevalla kameralla, jossa hanakylmää vettä suihkutettiin koneen luukun päällä. Tilannetta katsottiin lämpökameran takanäytön läpi, joka siis näyttää lämpökuvaa reaaliajassa. Vesisumu ei näkynyt kovinkaan hyvin näytön kuvassa, sillä tätä ”kylmäjälkeä” ei pystynyt helposti erottamaan taustasta. Tulos nosti vahvoja epäilyksiä, ettei kylmäaineen kuvaaminen koneen sisällä onnistuisi, ja lämpökameraidean kehittämisessä ei edetty pidemmälle.

3.4 Muita ideoita

Savun ja kylmän veden lisäksi oli myös muita ideoita aineista, jotka kulkisivat ilman mukana samalla tuoden virtausta näkyväksi. Hiilihappojääsavu oli kylmän veden lisäksi toinen kylmään perustuva aine, jonka kuvaamiseen tarvittiin lämpökamera. Hiilihappojäätä ei kokeiltu. Tulokset riippuisivat tässäkin kokeessa paljon käytettävän lämpökameran laadusta.

Seuraavina ideoina olivat tavallinen maali tai väriaine, fluoresoiva maali sekä savukoneen nesteeseen lisättävä fluoresoiva lisäaine. Näistä tavallinen maali on yksinkertaisin ratkaisu. Maalia ruiskutetaan koneen rungon sisälle kiinnitetystä maaliruiskusta tuulettimien käydessä. Tämän jälkeen tarkastetaan, mihin pinnoille maalia on ilmavirran toimesta kulkeutunut. Tästä erikoistapaus on fluoresoivan maalin käyttö. Maali sisältää fluoresoivaa ainesosaa, joka hohtaa, kun siihen osuu ihmissilmälle näkymätöntä ultraviolettisäteilyä. Väri hohtaa jonkin verran esimerkiksi normaalissa päivänvalossa, mutta hohto korostuu, kun maalin valaisussa käytetään erityistä UV-lamppua.

Yhtenä ajatuksena oli käyttää kauppanimellä ”UV Fluorescent Agent” myytävää tuotetta, jota kuuluu sekoittaa lumihiutale- tai kuplakoneen nesteeseen. Lumihiutale- ja kuplakoneet ovat kuin savukoneita, mutta ne tuottavat savun sijaan lumihiutaleita ja kuplia. UV Fluorescent agent lisäaine saa lumihiutaleet tai kuplat hohtamaan UV-valossa. Näitä koneita ja aineita valmistaa ja myy Antari Lighting & Effects Ltd. (Antari Lighting & Effects Ltd. 2021.)

Tätä Antarin UV Agenttia koitettiin löytää Suomen ja Euroopan verkkokaupoista, mutta huonoin tuloksin. Sitä ei tuntunut olevan helposti saatavilla. Lisäksi tämä aine ei ollut tarkoitettu käytössämme olleelle savukoneelle. Tätä ideaa ei päästy kokeilemaan.

4 Lopullinen koejärjestely

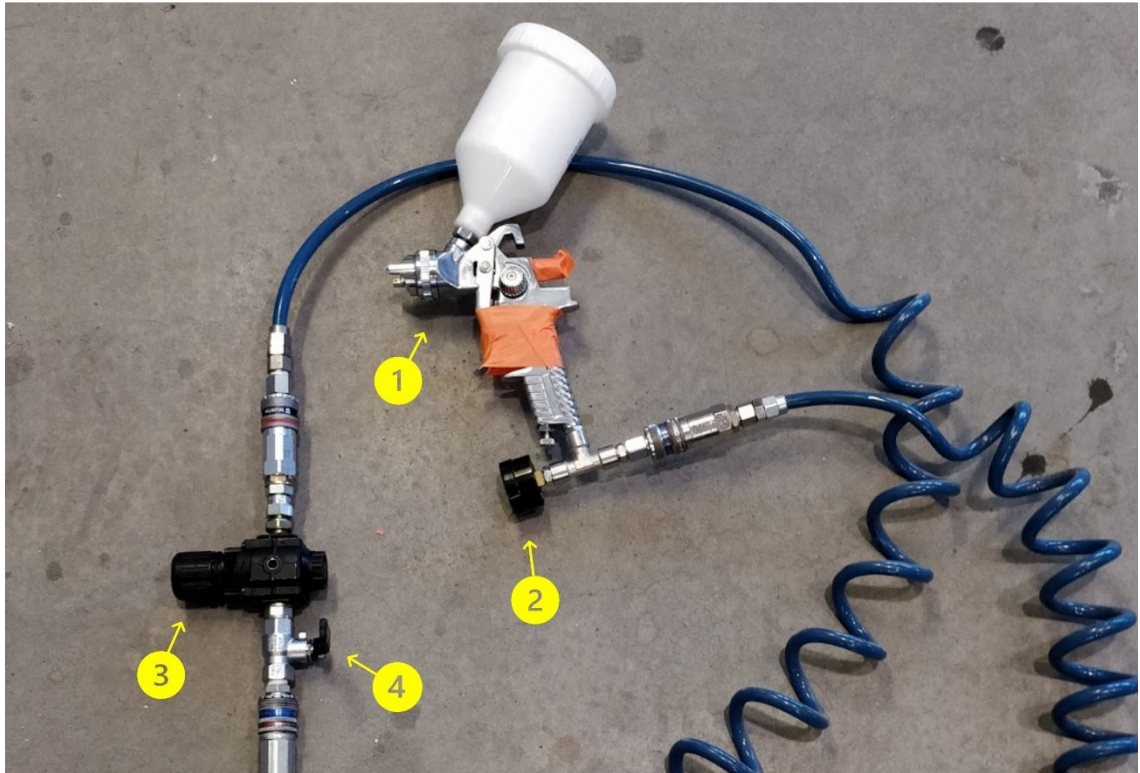
Lopullinen koeasetelma muuttui alkuperäisestä suunnitelmasta. Savukoneen sijaan käytettiin maaliruiskua, jolla ruiskutettiin UV-väriä, ja videokuvan sijaan koe taltioitiin valokuvoin. Koe myös päätettiin tehdä työkoneen ollessa paikallaan. Tämä teki kokeen järjestämisestä yksinkertaisempaa. Seuraavassa tarkempi kuvaus kokeen suorittamisen yksityiskohdista.

4.1 Valmistelut

Aluksi työkone tuotiin konehalliin, jossa kaikki maalin ruiskuttamiseen tarvittava laitteisto oli lähellä. Sähköä, paineilmaa ja vettä sai helposti. Työkoneen kansiluukut avattiin, ja UV-valon avulla tutkittiin, minkä verran UV-maalia oli koneen sisällä mahdollisesti aiempien kokeiden jäljiltä. Pahimmat roiskeet pestiin pois, jotteivat ne sotke uuden kokeen tuloksia. Kokeessa käytettiin Kryolan UV Aquacolor maalia, joka on turvallista käyttää, vaikka ihon maalaamiseen, ja pois pestävissä helposti vedellä ja saippualla (Kryolan Corp. 2022).

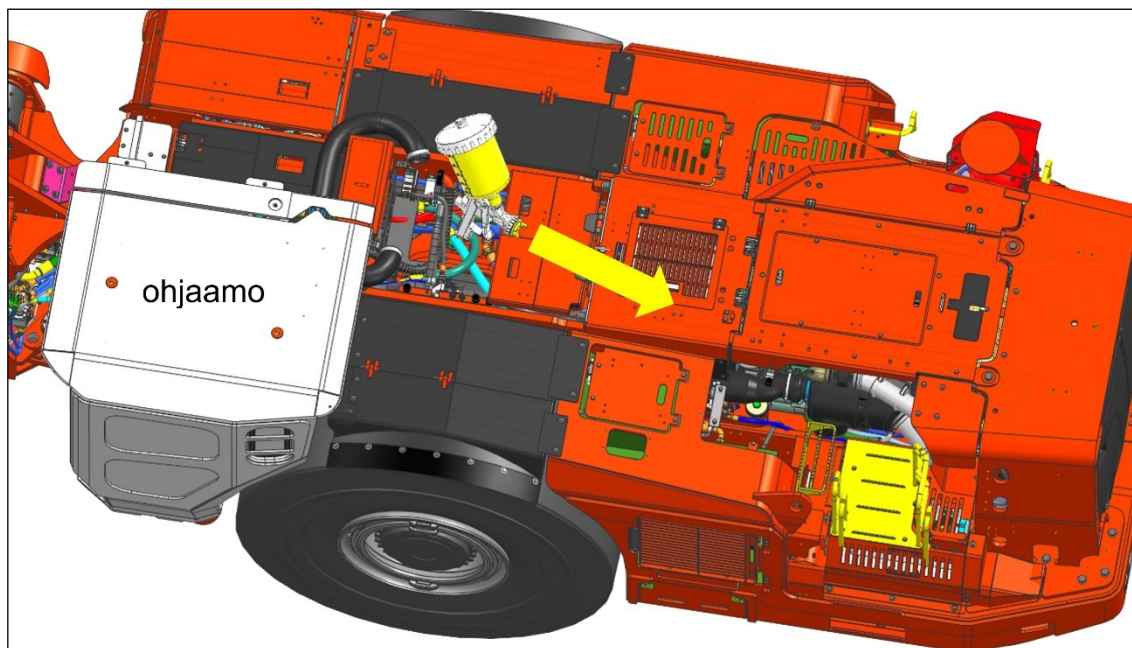
4.2 Maaliruisku

Maaliruiskuna toimi kuvan 7 halpa perusruisku, jonka suositeltava käyttöpaine oli 2 baaria. Niinpä paineletkuun kytkettiin paineensäädin. Samalla letkuun asennettiin painemittari painetason varmistamiseksi, sekä sulkuventtiili ja kierreletku kokeen yleisen sujuvuuden takaamiseksi.



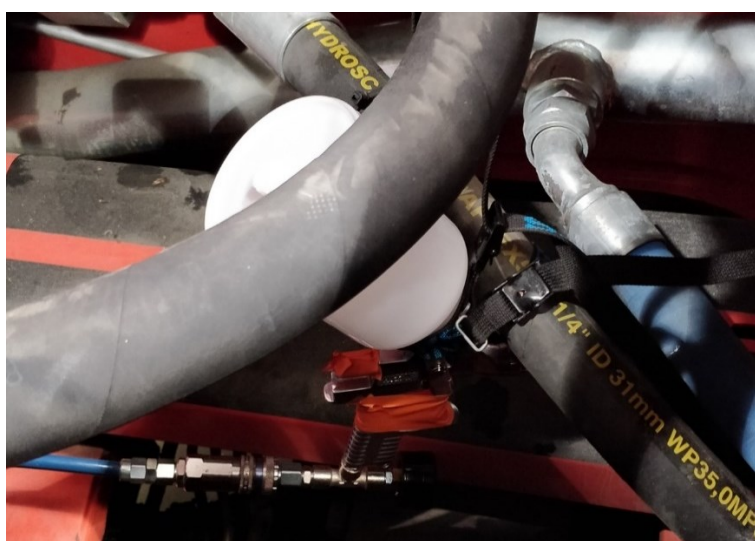
Kuva 7. Maaliruisku 1, painemittari 2, paineensäädin 3 ja sulkuventtiili 4.

Maaliruiskun säätimet asetettiin niin, että sumu oli laadultaan hienoa, ja sitä tuli paljon. Näin ruiskun säiliö saatiin tyhjennettyä lyhyessä ajassa. Tämän jälkeen säätönupit kiinnitettiin paikoilleen, joka näkyy kuvassa Kuva 7. Maaliruiskun liipaisin kiinnitettiin siis täysin auki-asentoonsa. Huomioitavaa oli, että vaikka paine oli täysin kiinni, maaliruiskusta alkoi nyt valua maalia ulos heti, kun ruiskun maalisäiliö täytettiin. Tämän takia maaliruisku tuli kiinnittää koneen sisälle sellaiseen paikkaan, että säiliö saatiin täytettyä vielä ruiskun kiinnittämisenkin jälkeen. Valitun mallinen ruisku pitää myös asentaa pystyasentoon, jotta maali valuu kunnolla ulos säiliöstä.



Kuva 8. Ruiskun kiinnityskohta ja ruiskutussuunta.

Maaliruiskulle löytyi sopiva paikka koneen ohjaamon takana olevan luukun alta (Kuva 8, Kuva 9 ja Kuva 10). Paikkaan on helppo pääsy luukun kautta, ja siinä sijaitsee korkeapaineisia letkuja sekä näiden liittimiä, joista hydrauliöljysumua saattaisi vuotaa (Kuva 9). Ruisku kiinnitettiin suoraan letkuihin, ja suunnattiin taakse päin kohti moottorin kuumaa puolta suurimman vaikutuksen aikaan saamiseksi.



Kuva 9. Maaliruisku asennettuna.

4.3 UV-väriin ruiskuttaminen

UV-väriä sekoitettiin valmiiksi 5 dl juomapulloihin. Kun kaikki muu oli valmista, käynnistettiin lastauskone, ja moottorin kierrokset nostettiin korkealle, jotta tuulettimet pyörivät kunnolla. Paineilman sulkuventtiili avattiin, maali kaadettiin maaliruiskun säiliöön, ja jos kaikki toimi oikein, maalia alkoi heti suihkuta ruiskusta. Säiliön kansi suljettiin. Lopuksi koneen kansiluukku suljettiin kokeen ajaksi, ettei se vaikuta koetulokseen. (Kuva 10.)



Kuva 10. Kaikki valmiina ruiskutukseen.

Ruiskutus kesti noin 3 minuuttia. Välillä luukku raotettiin ja tarkistettiin, minkä verran maalia vielä oli jäljellä ruiskussa. Jäljellä olevan maalin määrä näkyi helposti säiliön seinän läpi. Kun maalisäiliö oli tyhjentynyt, letkun paine katkaistiin ja työkone sammutettiin. Ruiskutuksen jälkeen varmistettiin pikaisesti UV-valolla koneen eri luukkujen kautta, että ruiskutus oli onnistunut. Tämän jälkeen kone siirrettiin toiseen tilaan valokuvattavaksi.

4.4 Valokuvaaminen

Kone siirrettiin kuvattavaksi halliin, jonka valaisun tasoa pystyttiin kontrolloimaan konehallia paremmin. Tilan ei tarvinnut olla aivan pimeä, mutta heikkotehoista UV-lamppua käytettäessä UV-maalin hohto tallentui valokuviiin sitä paremmin, mitä vähemmän muuta valoa kuvassa oli. Toisaalta aivan pimeässä toimiminen oli hankalaa, riskialtista, sekä vaatii kameralta pidempää valotusaikaa, joten sopiva yleisvalon taso löytyi kokeilemalla.



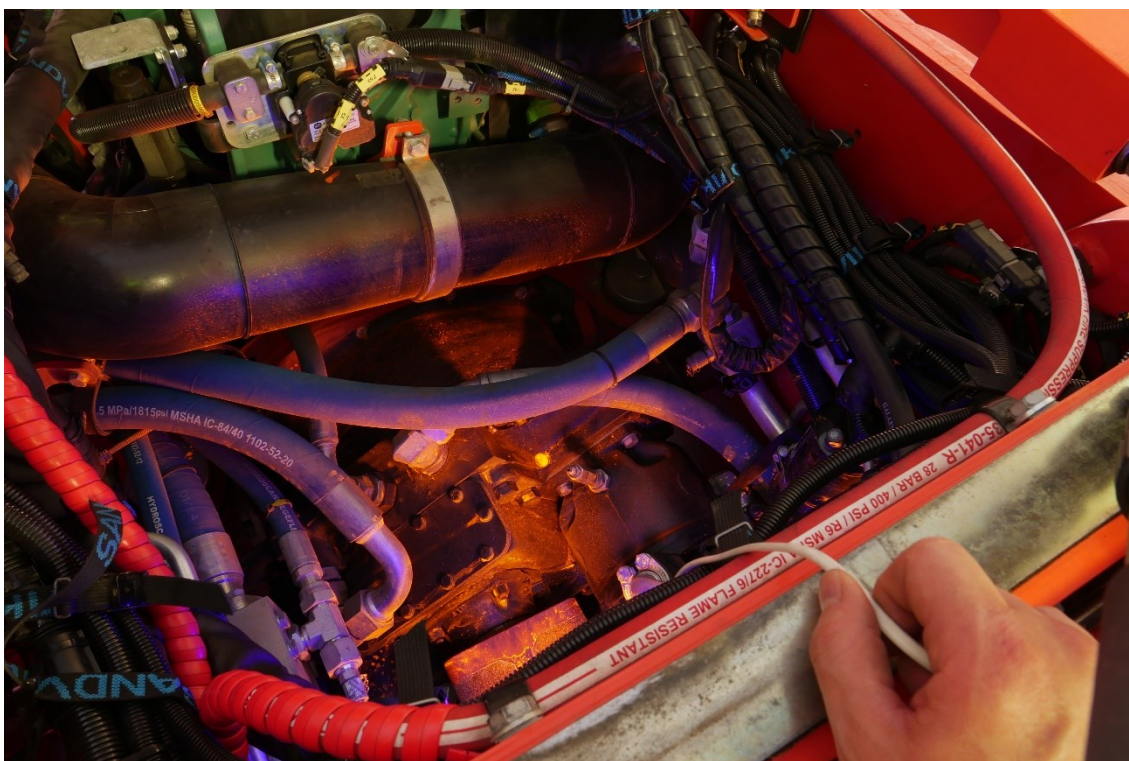
Kuva 11. Kamera asetettuna kuvaamista varten.

Kameran valotusaika vaihteli 5 ja 30 sekunnin välillä, joten kamerajalustan käyttäminen oli välttämätöntä. Sopivien paikkojen löytäminen UV-valolle ja kamerajalustalle oli hankalaa. (Kuva 11.)

UV-valo toi UV-väriin hyvin esiin, kuten kuvista Kuva 12 ja Kuva 13 voi nähdä. Käytetty UV-väri oli oranssia, joten UV-valon sininen sävy ei haitannut maalin erottuvuutta kuvissa. Toisaalta Sandvikin työkonien oma oranssi väri hieman heikensi UV-väriin tehoa. Erityisesti kuvaparien kuvia vertailemalla oli helppo nähdä missä maalia on. Kuvaparista siis toinen kuva valaistiin UV-valolla ja toinen tavallisella LED-valolla. (Kuva 12 ja Kuva 13.)



Kuva 12. Näkymä puhelimella valaistuna.



Kuva 13. Näkymä UV-valolla valaistuna, jolloin UV-väri hehkuu oranssina.

UV-väri erottui siis sitä paremmin, mitä vähemmän muuta, kuin UV-valoa kuvassa oli. Ongelmana kuvaamisessa oli, että UV-lamppu piti saada mahdollisimman lähelle kuvauskohdetta, jolloin UV-väri roiskeet näkyvät parhaiten. Samalla piti kuitenkin välttää itse UV-lampun näkymistä valokuvassa, sekä etsiä paras valaisukulma, jossa väri loisti parhaiten, mutta lukuisat putket ja letkut eivät varjostaneet kohdetta. (Kuva 14.)

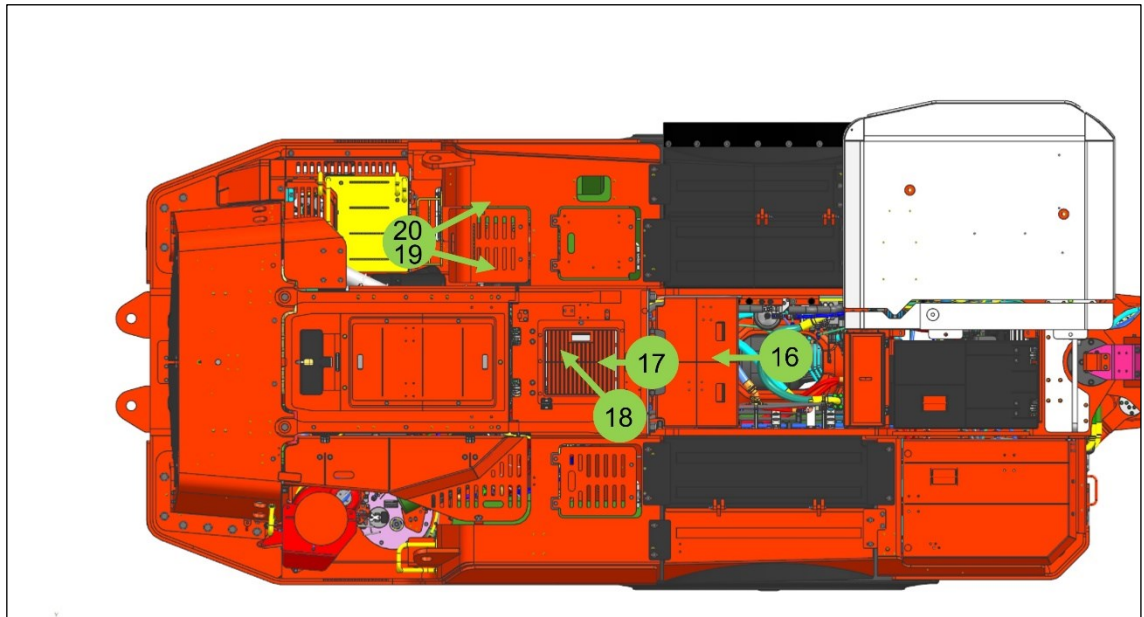


Kuva 14. Kompleksinen kuvausympäristö haasteineen.

Kuvaamiseen kului noin kaksi tuntia aikaa. Suurin osa tästä meni kameran ja lampun asettelemiseen sopivaan kulmaan ja tukevasti paikoilleen. Jonkinlainen helppo ja kätevä kiinnitys kameralle ja lampulle olisi nopeuttanut kuvaamista huomattavasti, ja samalla mahdollistanut moninaisemmat kuvauskulmat.

5 Kokeen tulokset

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli siis selvittää, minne LH517i mallin kauhakuormaajassa esimerkiksi mahdollisen hydraulijyletkurikon sattuessa vapautuva hydraulijylysumu koneen rungon sisällä kulkeutuisi. Ideoinnin ja kokeiden pohjalta päädyttiin siihen lopputulokseen, että käytännöllisin ja yksinkertaisin tulos saadaan käyttämällä veteen sekoitettua UV-väriä simuloimaan hydraulijylysumua. UV-väriliuosta sumutetaan koneen sisälle jäähdytysilman viettäväksi, ja tämän jälkeen toteutunut kulkeuma valokuvataan kaikilta olennaisilta pinnoilta. Olennaisilla pinnoilla tarkoitetaan tässä erityisesti moottorin kuumen puolen lähellä olevia pintoja, koska kuumalle puolelle kulkeuma ei saisi päästä. Seuraavassa kokeen tulokset.



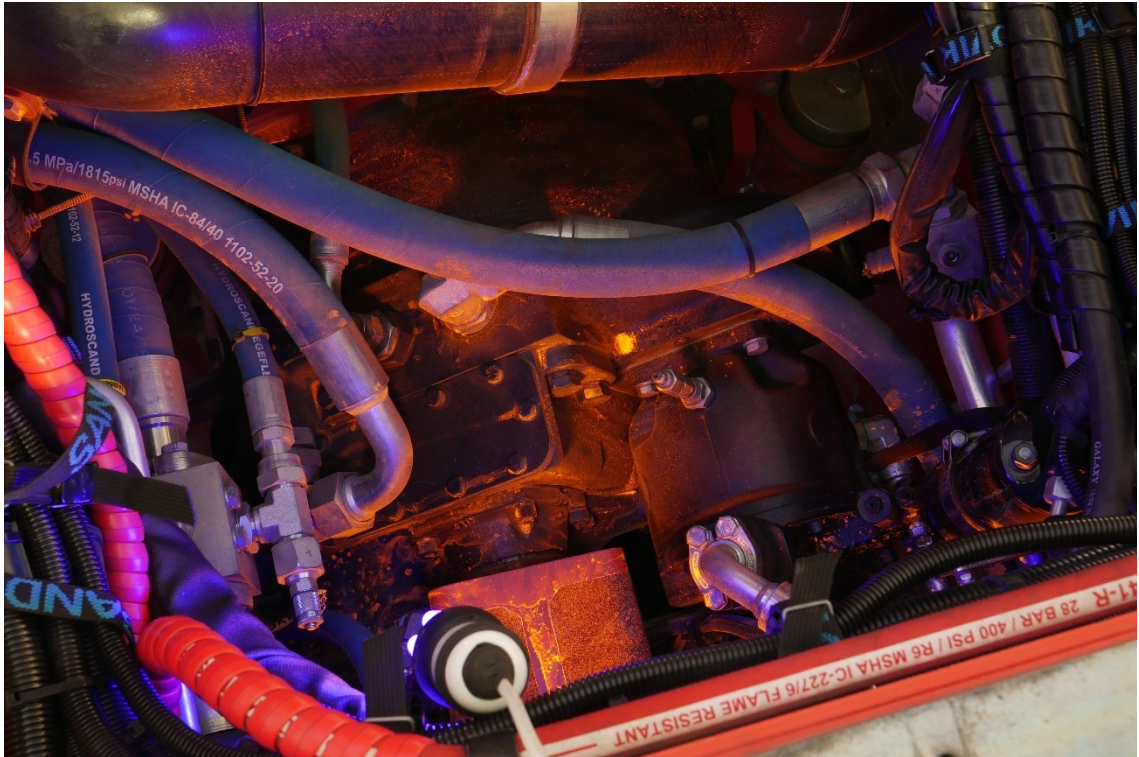
Kuva 15. Valokuvien kuvauspaikat ja -suunnat.

Kuvassa Kuva 15 on piirrettynä UV-värin ruiskuttamisen jälkeen otettujen valokuvien kuvauspaikat sekä -suunnat. Lisää valokuvia löytyy liitteestä 2.



Kuva 16. Näkymä ruiskun kiinnityskohdasta ruikutussuuntaan päin.

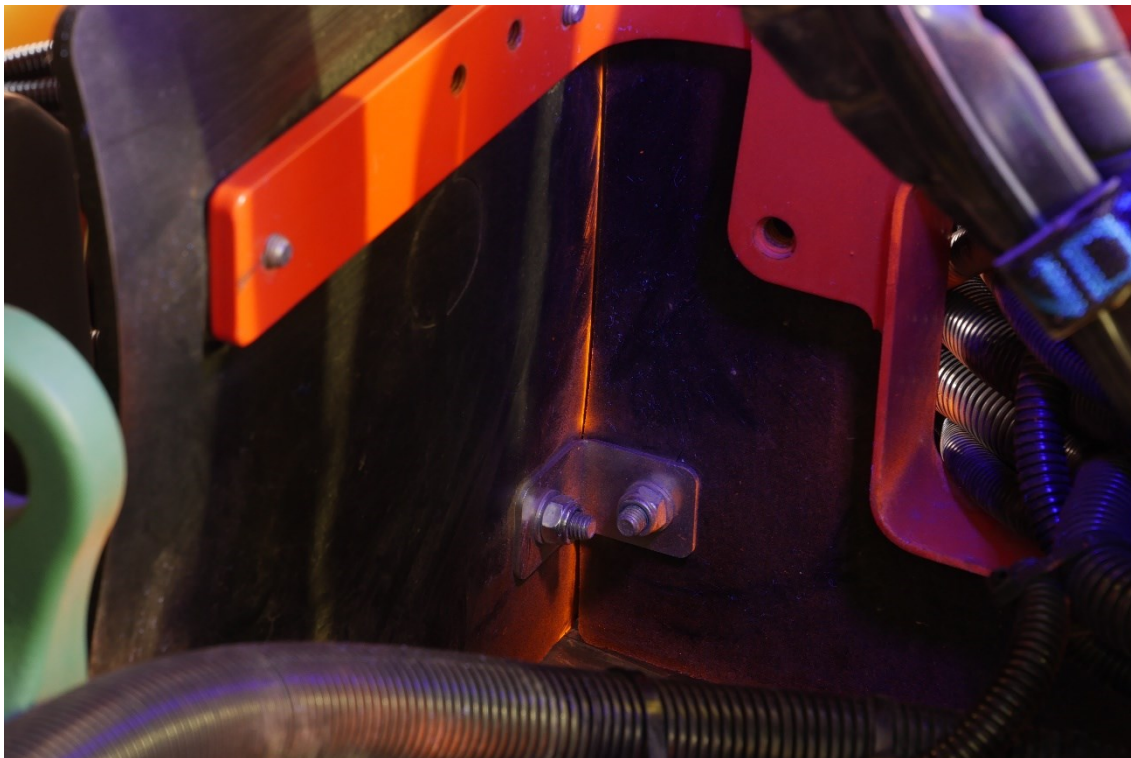
Kuva 16 on näkymä maaliruiskun kiinnityskohdasta ruiskutussuuntaan, eli koneen perään päin. Myös koneen sisäinen ilmavirta kulkee tässä kohtaa voimakkaasti perään päin. Maalijälkiä on vähän joka puolella, mutta ne ovat kuitenkin keskittyneet kuvan keskialueella.



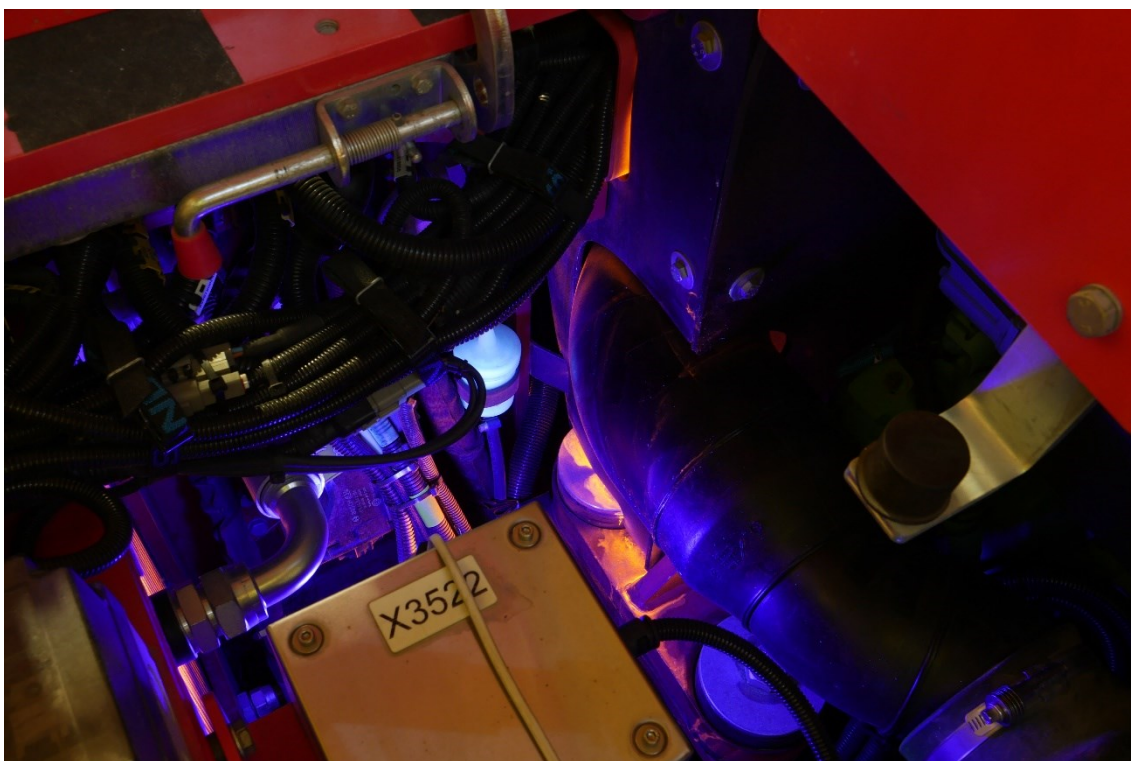
Kuva 17. Näkymä moottorin etupuolen luukusta taaksepäin.

Kuvassa Kuva 17 on näkymä moottorin etupuoleisesta luukusta taaksepäin. Siellä näkyy vielä aika paljon väriä, erityisesti keskialueella alhaalla. Laskeutuessaan ylempien putkien pinnalle, sumu on kerääntynyt pisaroiksi, ja valunut alas, paikoin aina konehallin lattialle asti. Kuvassa näkyy myös pieni lammikko kirkkaana keltaisena melkein kuvan keskikohdassa. Moottorin vastaisessa seinässä kuvan yläreunassa on aika paljon sumua, vaikka täällä takaosassa koneen kyljissä sijaitsevat hydraulioiljyjäähdyttimet vetävät ilmavirtaa voimakkaasti sivuille. (Kuva 17.)

Aivan kuvan Kuva 17 ulkopuolella oikealla ylhäällä on palosuojarakenne, joka katkaisee ilman pääsyn suoraan moottorin kuumalle puolelle. Kuten kuvasta Kuva 18 nähdään, on tämä kumiseinä säilynyt melkein täysin puhtaana. Vain aivan nurkkaan, jossa kahden levyn välissä on pieni rako, maalia on kerääntynyt jonkin verran.

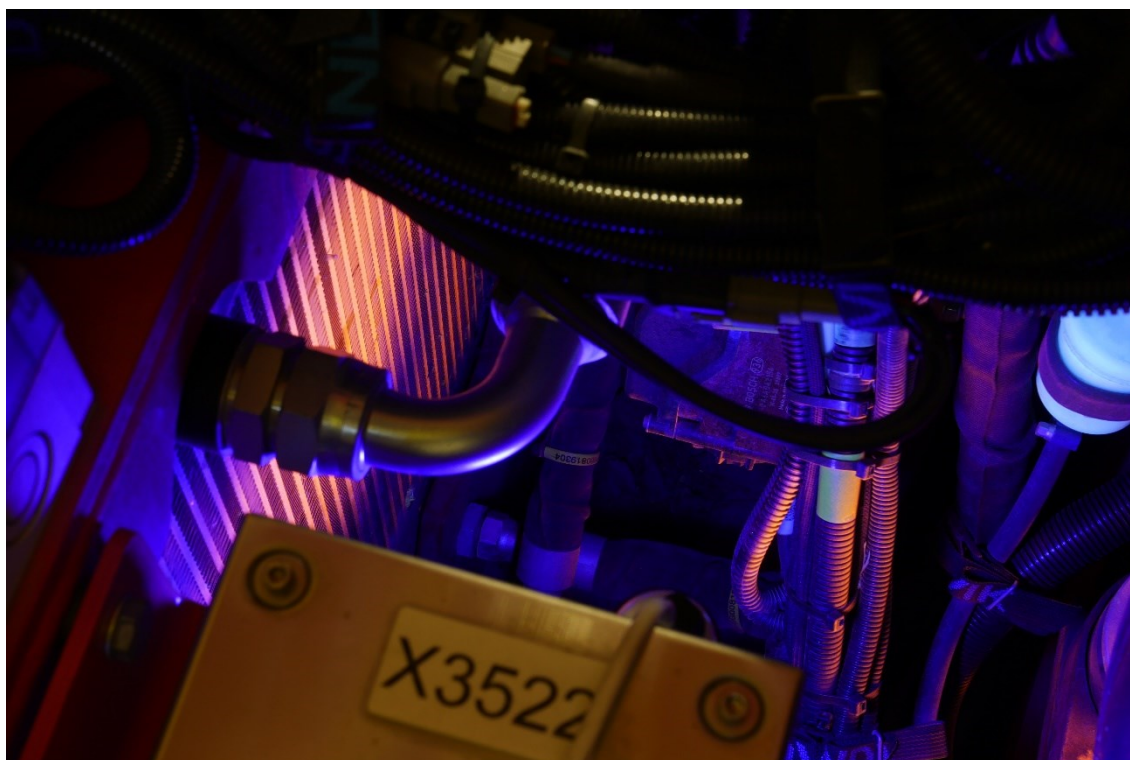


Kuva 18. Palosuojaseinän nurkka, jonka takana on moottorin kuuma puoli.



Kuva 19. Kuminen palosuojarakenne ulkopuolelta kuvattuna.

Kuva 19 on näkymä moottorin kuumalta puolelta kohti paloseinää. Tästä nähdään, että maalia on kerääntynyt jonkin verran palosuojalevyn alapuolelle, ja siitä vasemmalle kohti hydraulioiljyjäähdytintä, jonne suuri osa ilmasta oletetusti imeytyy. Turboahtimen suuntaan, kohti kuvan oikeaa alakulmaa, ei maalia kuitenkaan näytä kulkeutuneen juuri ollenkaan. (Kuva 19.)



Kuva 20. Vasemman puolen hydraulioiljyjäähdytin.

Kuva 20 on näkymä koneen perästä päin kohti vasemman puolen hydraulioiljyjäähdyntä. Kuvasta nähdään, että maalia on jäänyt ilmavirran tuomana muovisiin suojaputkiin kuvassa keskellä oikealla, sekä jäähdyttimen ritilään kuvassa keskellä vasemmalla. Muuten ei näy isompia roiskeita, vaan maali näyttää kerääntyneen pienenä sumuna. Lisää UV-kokeen tuloksia näkyy liitteen 2 valokuvissa. Erityisesti kuvaparit helpottavat UV värin havaitsemista kuvista.

6 Yhteenveto ja yleinen pohdinta

Kaiken kaikkiaan kokeiden tulokset olivat hyviä. Hydrauliöljysumun kulkeumaa pystyttiin simuloimaan jossakin määrin uskottavalla tavalla. Keinot tarkempien tuloksien saavuttamiseksi ovat kuitenkin moninaiset, ja seuraavaksi tuloksien yhteenveto, parannusehdotuksia ja pohdintaa.

6.1 Johtopäätökset kokeesta

UV-värikokeen tulokset olivat hyviä. Vaikka maalia kulkeutui lähelle moottorin kuumia osia, jäi se kuitenkin riittävän kauas kriittisistä pinnoista. Tämä johtui varmastikin suurelta osin kumisesta paloseinästä. Ilman sitä osa väristä olisi helpommin ajautunut ison takatuulettimen virtauksen imuun, ja mahdollisesti turboahtimen suojuksen pinnalle. Nyt väri meni suoraan kohti sivutuuletinta, eikä moottorin kuumalle puolelle kulkeutunut mitään.

Vaikuttaa hyvältä ratkaisulta, ettei laitteen moottori ole koteloitu sivuilta, koska nyt iso takatuuletin imee ilmansa lähinnä koneen ulkopuolelta, sen sijaan, että ilmaa tulisi enemmän moottorin etupuolelta rungon sisäosia pitkin. Tämä ehkäisee mahdollisen hydrauliöljysumun kulkeutumista moottorille asti.

6.2 Pohdinta ja kehityskohteet

Vaikka koe oli onnistunut, jäi siihen paljon kehittämisen varaa. Tehdyn UV-värikokeen edelleen kehittäminen oli yksi asia, mutta lisäksi oli myös muita toistaiseksi kokeilemattomia visualisointitekniikoita, joista voisi olla hyötyä. Seuraavassa on pohdintaa ja ideoita eri yksityiskohtien edelleen kehittämisestä.

6.2.1 Koeympäristö

Alun perin tarkoitus oli tehdä koe koneen täydessä vauhdissa. Tämä jäi kuitenkin vielä tekemättä. Varmastikin koneen normaali työympäristö vaikuttaisi

kokeeseen jotenkin, kun kaivostunneli on ahdas ja koneella ajetaan puolet ajasta taaksepäin. On kuitenkin vaikea ennustaa, näkyykö tämä merkittävästi koneen rungon sisäisessä virtauksessa. Kokeen tekeminen liikkuvalla koneella ainakin vaatii monimutkaisempia järjestelyjä, sillä paineilma tarvitsee hoitaa johdottomasti. Paineilmaa saa riittävästi pienestä kompressorista, mutta kompressorin taas tarvitsee sähköä, eli aggregaatin. Onneksi koneen päällä on runsaasti tilaa näiden laitteiden kiinnittämiseksi, eli tämän ei pitäisi olla ongelma.

6.2.2 Ruisku

Maaliruisku oli hyvä lähtökohta sumun kehittämiseksi, mutta sen käyttöön liittyi paljon epätietoa. Ensin tulisi selvittää, minkälaista oikea hydraulioöljysumu kokeen tilanteessa olisi, ja tämän jälkeen pyrkiä tekemään ruiskun sumukeilasta vastaava. Siinä kohtaa voisi myös olla parempi ottaa käyttöön jonkinlainen korkeapaineruisku. Ja tähän varta vasten itse tehty jatkoletkun päässä oleva suutin, joka olisi helpompi kiinnittää koneen rungon sisään.

6.2.3 UV-maali

UV-maalissa oli hyvää helppo käyttäminen ja pois puhdistaminen, sekä värin hyvä näkyvyys UV-valon avulla. Sen käyttäytymistä pitäisi kuitenkin yrittää säätää vastaamaan paremmin sitä, miten hydraulioöljysumu tutkitussa tilanteessa käyttäytyisi. Tulisi selvittää hydraulioöljyn viskositeetti ja mahdollisesti muita ominaisuuksia, jotka sumun leviämiseen vaikuttaisivat. Tämän jälkeen UV-maalia voisi muokata tähän suuntaan joillakin lisäaineilla.

6.2.4 UV-lamppu

UV-lamppu on halpa, mutta erittäin hyödyllinen UV-maalia käytettäessä. Ongelmaksi koneen sisäosissa tuli se, että lukuisat putket ja letkut helposti varjostivat kuvattavia maaliroiskeita. Ratkaisuna olisi käyttää useampaa

lamppua, jotka voisi sijoittaa siten, että katvealueet pystytään minimoimaan. Lamppuihin pitäisi myös kehittää parempi kiinnitys mekanismi. Esimerkiksi magneetin ja pienen jousipuristimen yhdistelmä voisi olla kätevä lamppuja koneen metallisen rungon sisälle kiinnitettäessä.

6.2.5 Valokuvauskamera

Myös valokuvauskameran käyttäminen oli valokuvien pitkien valotusaikojen tähden hankalaa. Jokin parempi ripustusmekanismi kameralle tekisi kuvaamisesta helpompaa. Ylipäättään koko kamera voisi olla pienemmän kokoinen. Yleensä kooltaan pienemmissä kameroissa on huonommat hämäräkuvausominaisuudet, jolloin valotusaika pitenee. Tämä ei välttämättä ole niin kriittistä, kunhan kamera pysyy hyvin paikoillaan kuvauksen ajan.

Kokeissa voisi myös koittaa ottaa videokuvaa, niin UV-ruiskutuskokeesta, kuin muistakin mahdollisista kokeista. Tällöin koe pitää tietysti kuvata ruiskutuksen aikana, jos ilman tai ruikutettavan aineen liike halutaan kuvata videolle. Tämä tuo lisää haasteita kamerasijoittamiselle ahtaaseen tilaan rungon sisälle. Ensimmäinen ongelma on hyvän kuvauskulman löytäminen. Toiseksi linssi pitää pystyä suojaamaan niin, ettei ilman mukana lentävä maali, pöly tai muu aines tahri kuvaa käyttökelttomaksi. Kolmanneksi jo käyvän koneen tärinä voi heikentää kuvanlaatua merkittävästi, ja etenkin jos koetta ollaan tekemässä liikkuvalla koneella, voi tärinä tehdä videokuvasta käyttökeltvotonta.

Videon kuvaamiseen voisi toimia pieni action-kamera, jos valoa saadaan koneen sisälle riittävästi. Kameroiden omat tärinänvaimennusominaisuudet varmasti auttavat kuvanlaadun pitämisessä hyväksyttävällä tasolla. Lisäksi jonkinlaisen erillisen kuvanvakaajan käyttö voi olla ratkaisu, ja joissain kameramalleissa tällainen löytyy jo sisäänrakennettuna kamerasuojasta.

6.2.6 Lämpökamera

Lämpökamerakokeessa yhdeksi ongelmakohtaksi tuli itse kamera.

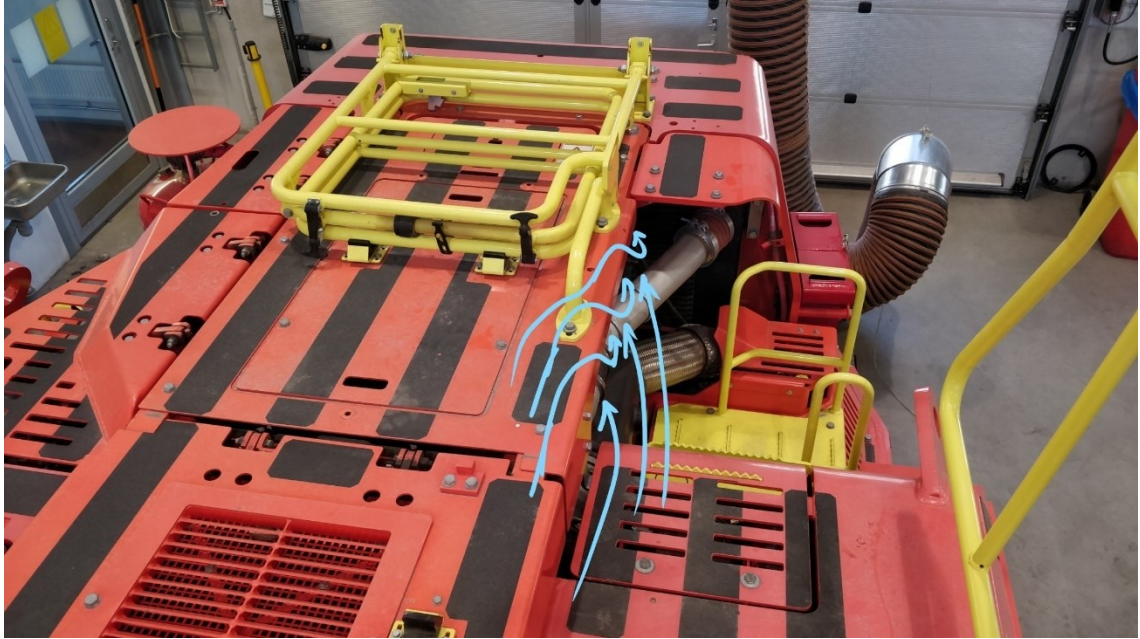
Lämpökamerat ovat suhteellisen kalliita, ja tässä kokeessa tarvittavalla kameralla olisi pitänyt pystyä kuvaamaan myös videota. Soveltuvat kamerat voivat olla kooltaan aika isoja, ja niiden kiinnittäminen koneen rungon sisään asiaan kuuluvasti suojattuna pölyltä ja vedeltä olisi aiheuttanut ongelmia. Lopulta lämpökamera idea hylättiin, koska sopivaa kameraa ei löytynyt lainaan.

Lämpökameran käytölle löytyi kuitenkin yksi käytännöllinen tapa. Jos keskitytään vain koneen alueisiin, jotka näkyvät ulkoapäin, voidaan lämpökameraa käyttää helpommin. Esimerkiksi moottorin kuumapuoli näkyy kokonaisuudessaan ulkopuolelta, ja lämpökameran asentaminen tälle alueelle onnistuisi varmasti melko yksinkertaisella telineellä. Siltikään ei tosin ole varmaa, miten hyvin kylmä vesi, tai jokin muu käytettävä ”kylmäaine” erottuu lämpökameran kuvasta.

Lämpökameran ongelmaksi voivat myös muodostua kaikki kiiltävät pinnat, jotka sotkevat lämpökameran lukemaa. Kiillon voisi ehkä poistaa pinnoilta väliaikaisesti jonkinlaisella spraytuotteella, jota suihkutettaisiin häiritsevän kiiltäviin kohtiin, ja joka olisi kuvauksen jälkeen helposti pois pestävissä.

6.2.7 Savukone

Käytössämme olleen kaltaisia savukoneita käytetään usein hyvin yksinkertaistetussa ja kontrolloidussa ympäristössä, jossa virtaus on enimmäkseen laminaarinen. Näin savu saadaan pysymään ehyenä vanana, josta nähdään paremmin rajakerroksen, erilaisten esteiden ja kaarevien pintojen vaikutus ilmavirtaan.



Kuva 21. Takatuulettimen imuvirtaus.

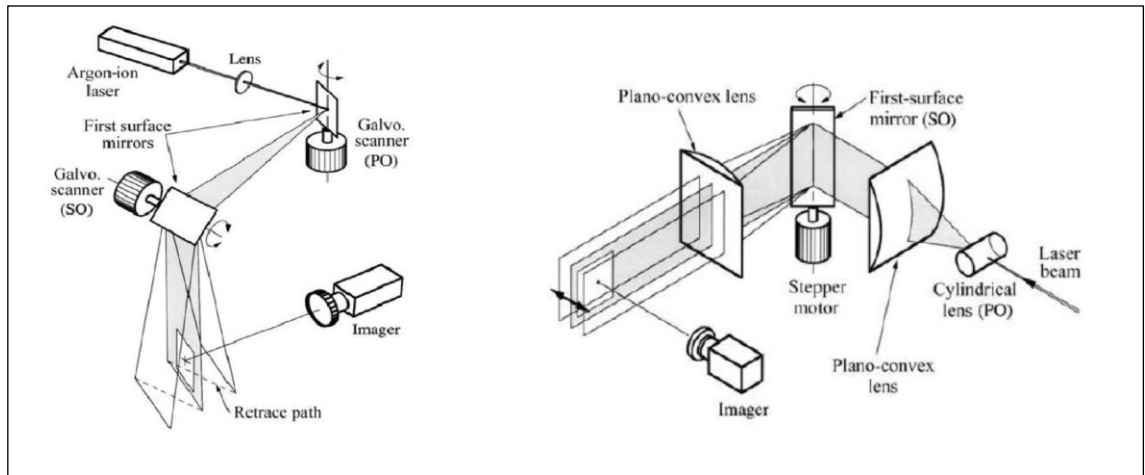
Tämän kokeen osalta savukone osoittautui käyttökelpoiseksi, kun halutaan tietää, minkä verran tuulettimet imevät jäähdytysilmaa mistäkin kohtaa koneen ulkopuolelta. Esimerkiksi moottorin kuumalle puolelle imeytyy paljon ilmaa rungon ulkopuolelta kuvan 21 nuolien mukaisesti, josta se jatkaa matkaansa moottorin yli, ja edelleen takatuulettimen läpi takaisin ulos. Näitä koetuloksia on havainnollistettu hieman enemmän valokuvien liitteessä 3.

6.3 Muita soveltuvia tekniikoita

Opinnäytetyön ensimmäinen idea oli kehittää testi, jolla kauhakuormaajan rungon sisäisistä ilmavirroista saataisiin kuvattua videokuvaa koneen liikkuesssa. Rungon sisäosat osoittautuivat kuitenkin niin ahtaiksi ja sokkeloisiksi, ettei käytössä ollut savukone tähän riittänyt. Lisäksi kohteen valaiseminen videokuvaamista varten oli toinen suuri haaste. Näihin ongelmiin voisi tuoda ratkaisun Laser-Sheet-tekniikka.

Laser-Sheet-tekniikoissa käytetään yhtä tai useampaa lasersädettä, joita muokataan peilien ja linssien avulla yhdeksi tai useammaksi toisiinsa nähden

saman suuntaiseksi tasoksi. Tämän jälkeen tasot suunnataan tutkittavaan virtaukseen tuoden esille virtauksen ominaisuuksia. Apuna käytetään jotakin merkkiainetta, kuten jotakin fluoresoivaa ainetta. Tällöin käytetään lyhennettä LIF, eli Laser Induced Fluorescence, tai kun kyseessä on ohut taso laser, käytetään lyhennettä PLIF, eli Planar Laser Induced Fluorescence.



Piirros 2. Lasersäteen muokkaaminen (Smits & Lim 2012, 275, 277)

Lasersäteellä voidaan myös ns. ”pyyhkäistä” virtausta eri syvyyksiltä, jolloin saadaan luotua virtauksesta eräänlainen 3-ulotteinen kuva. Tähän voidaan käyttää linssien ja peilien lisäksi näiden liikuttamiseen stepper- eli askelmootoreita. Piirros 2 on kaksi esimerkkiä tällaisista järjestelmistä. Sopivalla kuvausnopeudella ja tarvittaessa kuvamateriaalin jälkikäsittelyllä saadaan virtauksesta tallennettua informaatio koko syvyydeltä.

Kunhan käytettävä laser on riittävän tehokas, riittää se hyvän videokuvan saamiseksi. Lisäksi laitteisto saadaan mahtumaan suhteellisen pieneen tilaan, joten sen käyttäminen voisi olla mahdollista myös lastauskoneen sisäosissa.

Huonoina puolina voidaan ajatella olevan laitteiston herkkyys. Esimerkiksi pelkkä lastauskoneen moottorin värinä voi aiheuttaa ongelmia kuvassa. Laitteiston peilit ja linssit ovat kokoluokaltaan niin pieniä, että pienikin värinä saattaa tehdä kuvasta epäselvää tai käyttökelvotonta.

Lähteet

Antari Lighting & Effects Ltd. <https://antari.com/>. 2021. Viitattu 10.5.2022
<https://antari.com/products2/uvl-01-uv-fluorescent-agent/>.

Bertin, John J. & Michael L. Smith. Aerodynamics for Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1998.

Cohen, Ira M., Kundu K. Pijush & P. S. Ayyaswamy. Fluid Mechanics. Neljäs painos. Elsevier Science & Technology, 2007.

G.U.N.T. Gerätebau GmbH. <http://www.gunt.de>. 2022. Viitattu 10. 4. 2022
<https://www.gunt.de/en/products/fluid-mechanics/flow-around-bodies/pressure-and-velocity-profiles/fog-generator/070.17052/hm170-52/glct-1:pa-148:ca-786:pr-797>

Kambe, Tsutomu. Elementary Fluid Mechanics. World Scientific Publishing Company, 2007.

Kryolan Corp. kryolan.com. 2022. Viitattu 10.7.2022
<https://global.kryolan.com/product/aquacolor-liquid#30ml-288>

Laine, Seppo, Jaakko Hoffren & Kari Renko. Aeromekaniikka ja lentomekaniikka. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy, 2006.

Nakayama, Yasuki, Robert Boucher & Kazuyasu Izawa. Introduction to Fluid Mechanics. Elsevier Science & Technology, 1998.

Sanastokeskus ry. TEPA - termipankki. 2. 2 2022. Viitattu 27.10.2022
<https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/analyysi>

Sandvik AB. Sandvik.com. 2022. Viitattu 20.9.2022
<https://www.home.sandvik/fi/tietoja-meistä/>.

Sandvik and Narva. Annual Report 2021. Vuosikertomus, Sandvik AB, 2022.

Smits, Alexander J. & Tee Tai Lim. Flow Visualization. World Scientific Publishing Company, 2012.

Tu, Jiyuan, Guan Heng Yeoh, Chaogun Liu & Jiyuan Tu. Computational Fluid Dynamics. Elsevier Science & Technology, 2012.

Wuori, Paul A. Virtausmekaniikan perusteet. Helsinki: Otatieto, 1994.

Muistiinpano 12.4.2022 käydyn Teams-keskustelun pohjalta

Keskustelin Teamsissa Jarno Mastomäen kanssa, joka on Comatec Oy:n työntekijä, ja erikoistunut virtauslaskentaan. Lopputulemani oli se, että virtauslaskenta on monimutkainen prosessi, josta saa melko varmasti tuloksia, mutta se, vastaako tulokset todellisuutta, on sitten toinen asia. Olisi tärkeää saada ensin jotakin todellista mittausdataa, johon simuloituja malleja voidaan verrata. Etenkin, kun kyseessä on näin monimutkainen ympäristö kuin kaivoskoneen keskirunko, on hätäisen mallin antama data vähintäänkin arveluttavaa. Vielä kun olen aivan aloittelija virtauslaskennassa, olisi urakka ehkä liian mittava, ainakin vain opinnäytetyön pienenä osana.

Näinpä päätän toistaiseksi keskittyä pelkän käytännön kokeen kehittämiseen, koska se näyttää ajankäytön sekä myös tarpeellisuutensa osalta olevan tärkeämpi.

Jori Koskinen, 12.4.2022

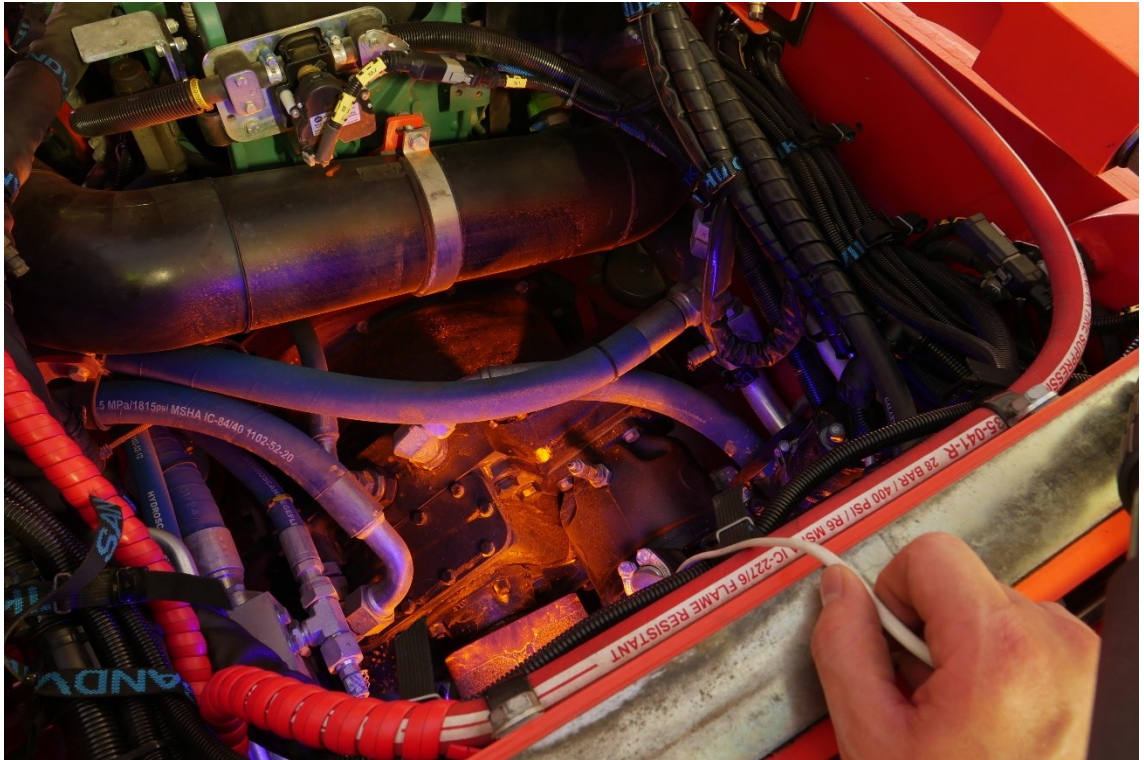
Lisää valokuvia UV-ruiskutuskokeesta



Kuva 22. Kuva ruiskulta yläviistosta taaksepäin.



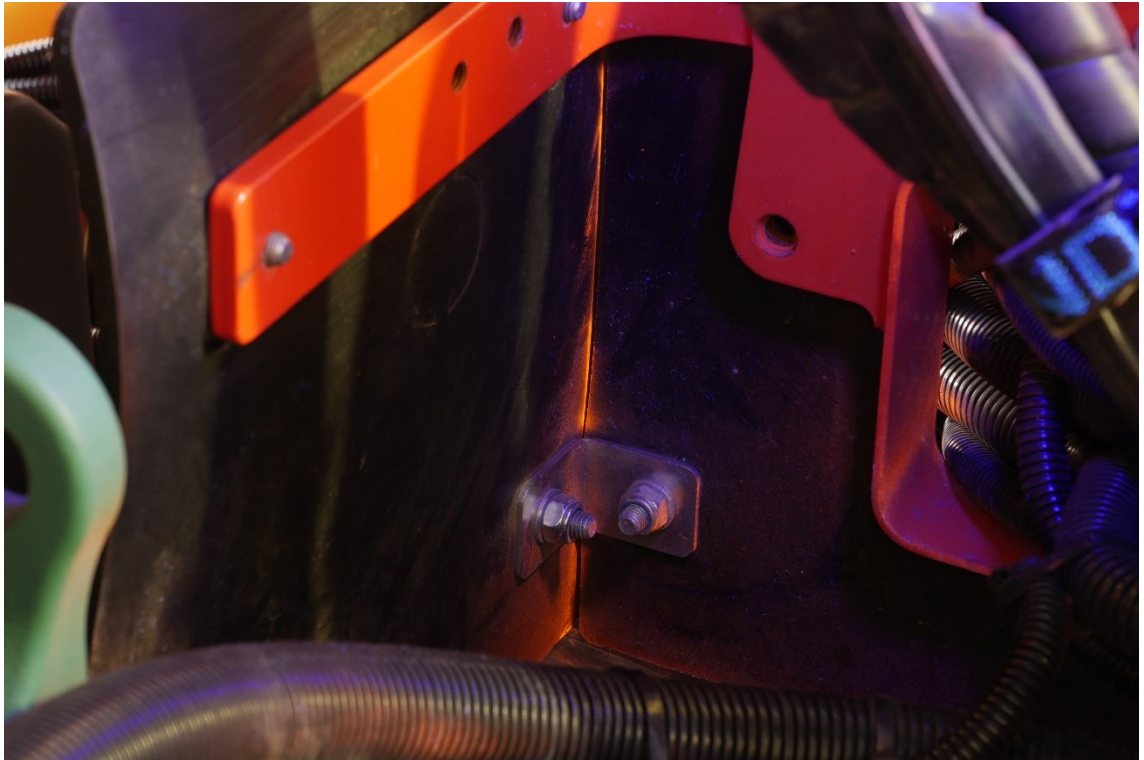
Kuva 23. Kuva takaluukulta etuviistoon vasemmalle.



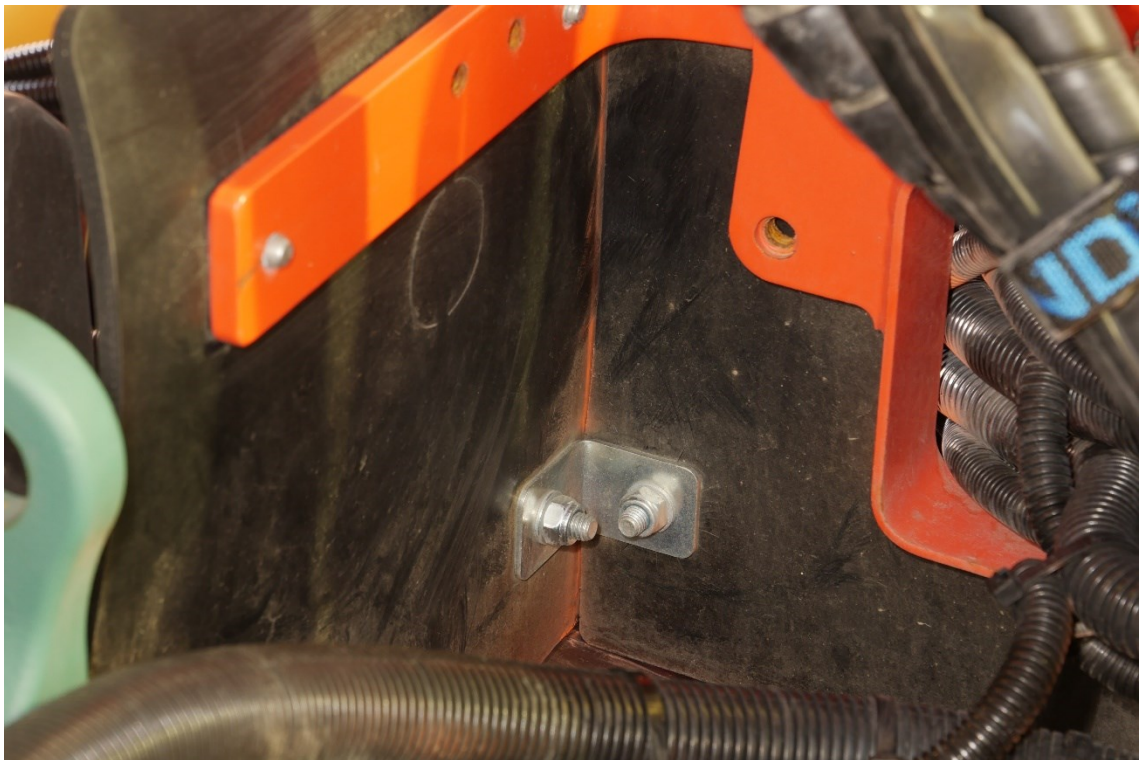
Kuva 24. Kuva takaluukulta taaksepäin.



Kuva 25. Kuva takaluukulta taaksepäin ilman UV valoa.



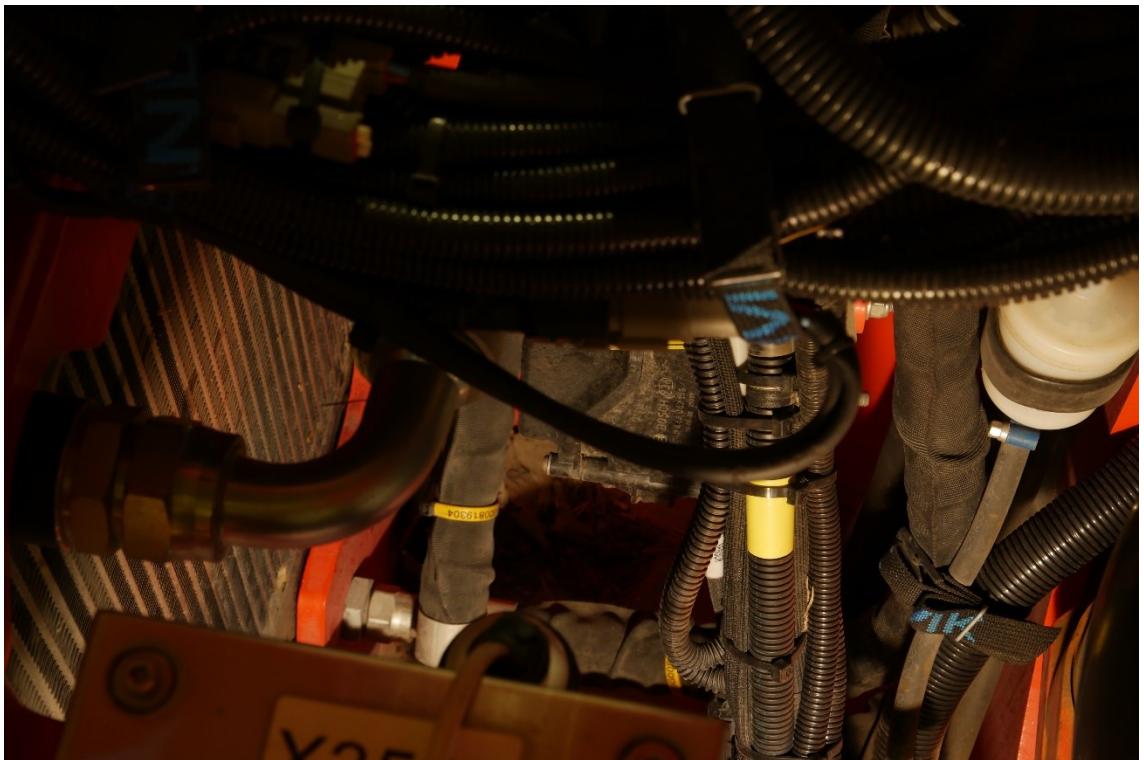
Kuva 26. Paloseinä UV-valaistuna.



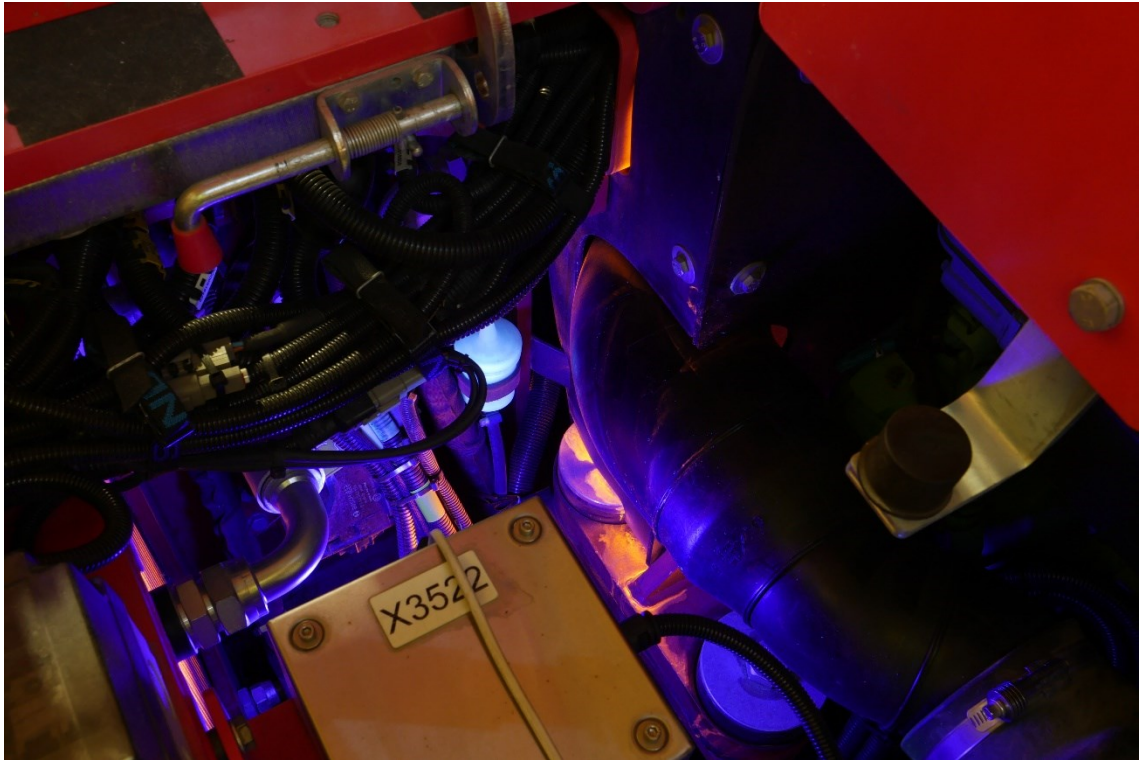
Kuva 27. Paloseinä ilman UV-valoa.



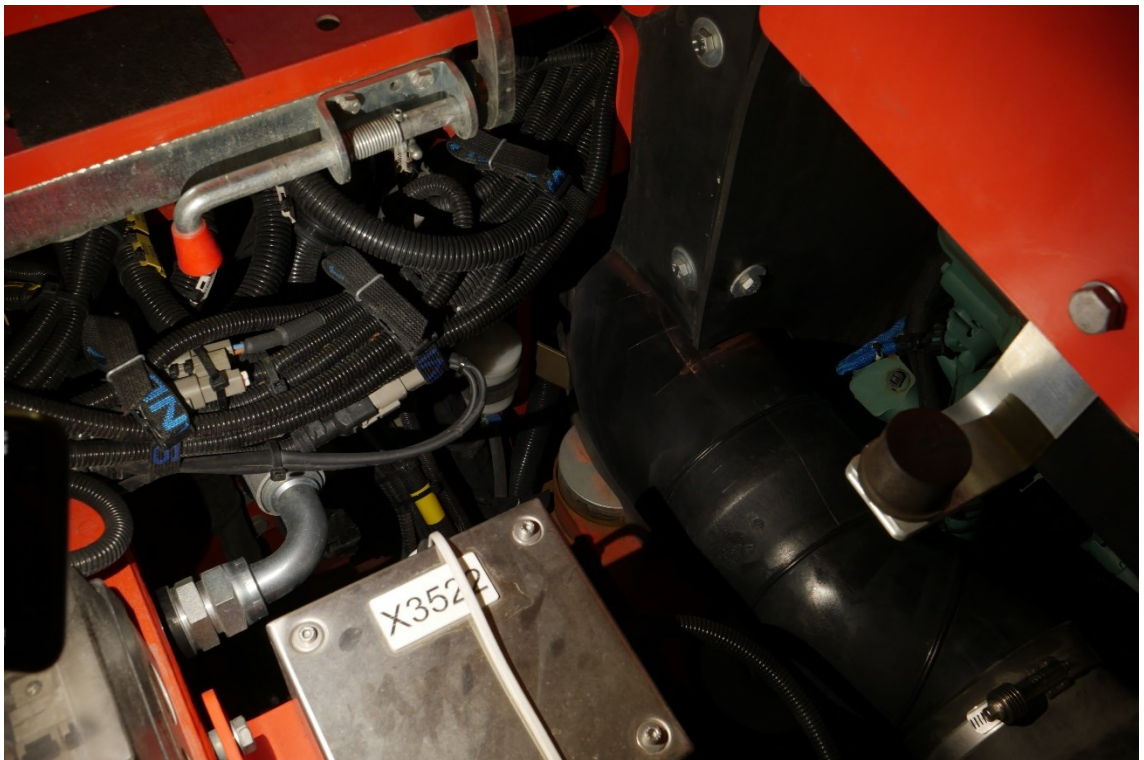
Kuva 28. Vasemman puolen jäähdytin UV-valolla.



Kuva 29. Vasemman puolen jäähdytin ilman LED-valoa.



Kuva 30. Paloseinä ulkopuolelta UV-valolla.



Kuva 31. Paloseinä ulkopuolelta LED-valolla.

Lisää valokuvia ilman imeytymisestä yläkannen läpi



Kuva 32. Oikea hydraulioiljyjäähdytin imee ilmaa ulkopuolelta tästä.



Kuva 33. Vasen hydraulioiljyjäähdytin imee ilmaa ulkopuolelta tästä.