

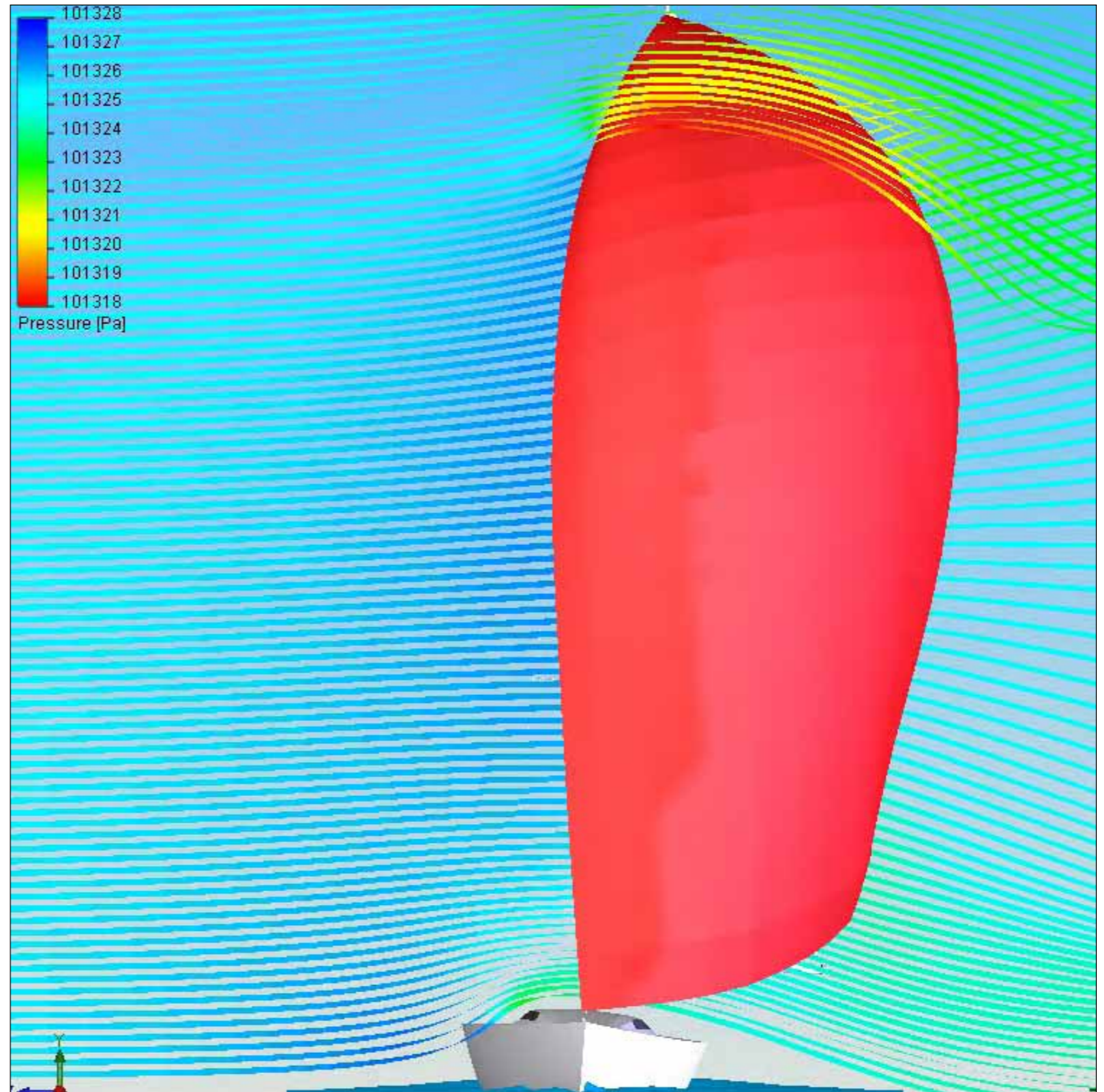
FlowSim

Tietokonepohjainen virtaussimulaatio on kehittynyt tällä vuosikymmenellä jättiharppauksin. WB-Sails sai mahdollisuuden tutkia purjeiden virtauksia uudella tasolla Ruotsalaispurjehtijoiden Olympiaprojektin yhteydessä. Paitsi Starin ja Finn-jollan purjeita, virtausta on analysoitu mm. asymmetrisen spinaakkerin ympärillä. Kehittyneimmät virtaussimulaatiot lasketaan samalla periaatteella kuin sääennustukset. Kun aiemmin pystyttiin simuloimaan purjeiden virtausta vain luovittelanteessa, uusimmat N-S-ratkaisijat laskevat hämmästyttävällä tarkkuudella myös spinaakkereiden ja muiden myötätuulipurjeiden voimia. (CD-levyllä myös videoaineistoa aiheesta.)

Laskennan vallankumous

Vielä kymmenen vuotta sitten purjeiden virtausten laskenta, joka ottaa huomioon pintakitkan ja sen vaikutukset, vaati lähes supertietokoneen tehoa ja viikkojen valmistelun yhden ajon suorittamista varten.

Pöytäkoneiden laskentatehon ja muistikapasiteetin lisääntyessä myös ns. Navier-Stokes RANS-ohjelmistot ovat tulleet käyttäjäystävällisemmiksi, eivätkä enää välttämättä edellytä asiaan vihkiytyneen CFD-insinöörin koulutusta (CFD: "Computer Fluid



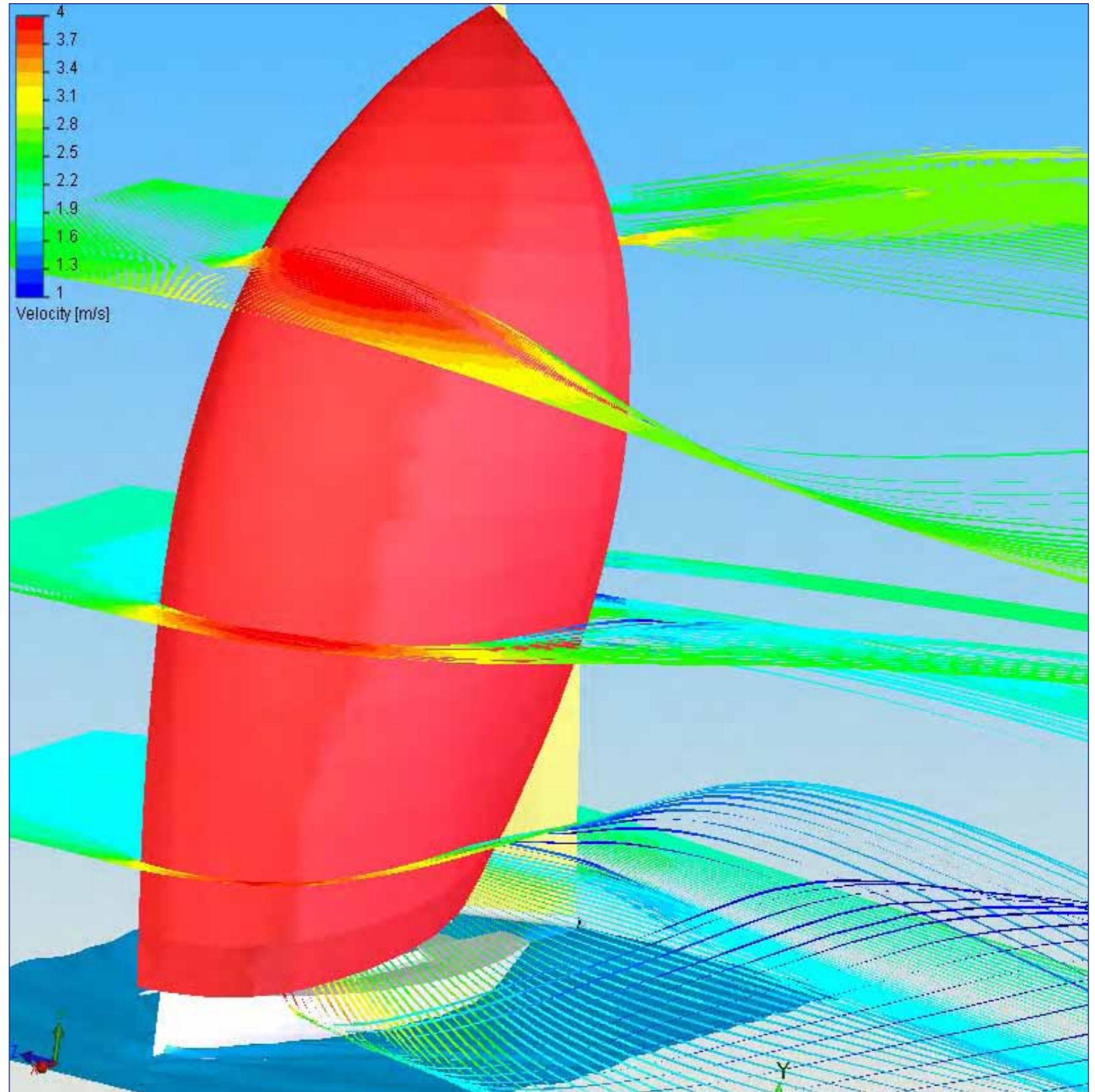
Dynamics”). Aivan arkipäiväistä kehittyneimpienkään ohjelmistojen käyttö ei ole - keskiluokan auton hintaa vastaavat vuosilisenssit asettavat jo omat rajoituksensa. Onneksi tälläkin alalla avoin koodi on mennyt eteenpäin, CFDhen voi tutustua ilmaiseksi esim. osoitteessa <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>. Hyvän yleiskuvan virtauslaskennan nykytilasta saa Wikipedian sivulta http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics.

Ainutlaatuisia tuloksia

Tällä CD-ROMilla esitetyt kuvat ja animaatiot ovat monessa suhteessa ainutlaatuisia. Tietääksemme vastaavan tason virtaussimulaatioita purjeiden ympärillä ei ole julkaistu aiemmin edes tieteellisten tutkimushankkeiden yhteydessä. Mallinnus on tuottanut runsain mitoin uutta tietoa, mm. irtoamispyörteiden käyttäytymisestä, maston, veneen rungon, kallistuksen, tuulen nopeusgradientin ym. vaikutuksesta purjevoimiin ja purjeiden toimintaan.

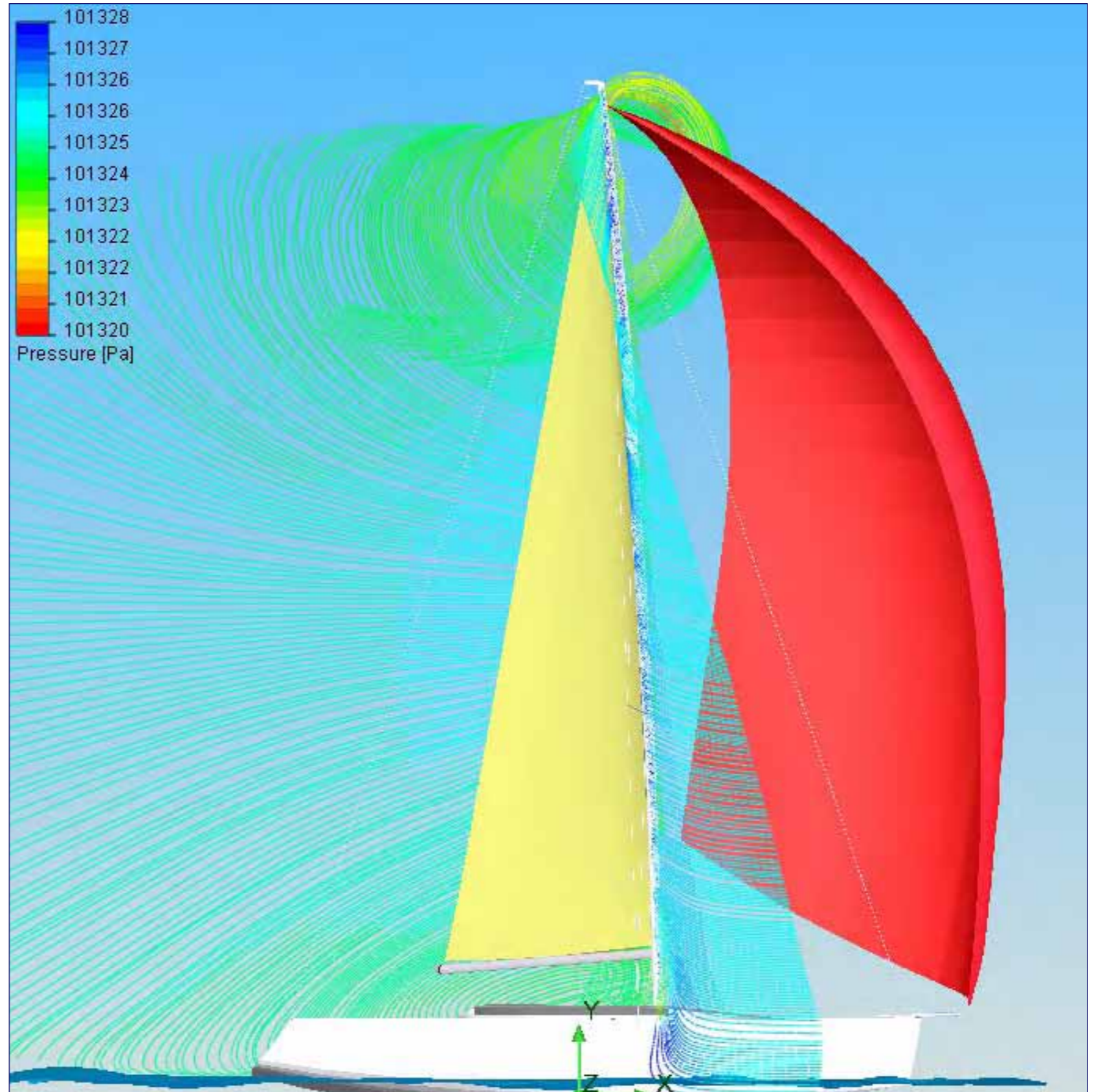
Virtaus asymmetrisen ympärillä sivutuulussa. Suhteellisen tuulen kulma AWA on 10 m korkeudella vedenpinnasta 90°. Tuuli kiertyy gradientin vaikutuksesta siten, että kannen tasolla AWA on 70° ja maston huipussa 95°. Värit kuvastavat paikallista virtausnopeutta, sininen on 1 m/s ja punainen 4 m/s.

[FG43 MH asym AWA 90 deg, windshear 70-95deg]



Suoraan sivulta katsottuna tuulen taipuminen ilmenee selvästi noustessa merenpinnasta ylöspäin. Alhaalla apparentituuli tulee sivulinjan etupuolelta (AWA 70°), maston huipussa sen takapuolelta (AWA 95°). Huipusta pyörivä kärkipyörre erottuu keltaisen ja vihreän sävyissä..

[FG43 MH asym AWA 90 deg, windshear 70-95deg]



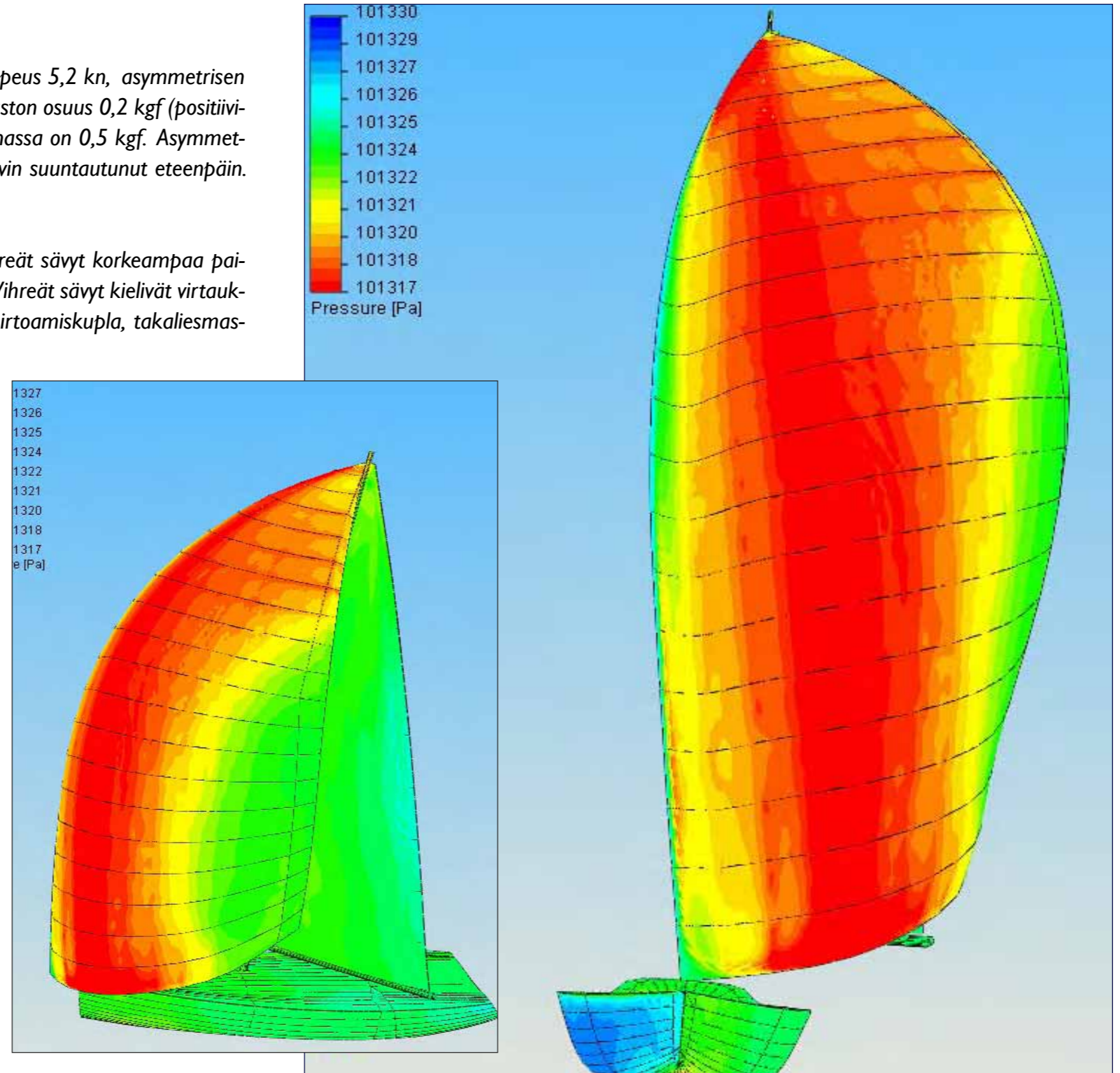
Paineita purjeen pinnalla sivumyötäisessä

Tosituuli TWS 3,7 m/s, TWA 137°, AWA 90°. Veneen nopeus 5,2 kn, asymmetrisen eteenpäin vievä voima on 75 kgf, isopurjeen 12,7 kgf, maston osuus 0,2 kgf (positiiviseen suuntaan). Rungon ilman vastus veneen kulkusuunnassa on 0,5 kgf. Asymmetrisen kokonaisvoima on 86 kgf, joten se on kokolailla hyvin suuntautunut eteenpäin. Asymmetrinen ”keventää” venettä 20 kg:lla.

Punaiset sävyt merkitsevät alhaisempaa painetta, sinivihreät sävyt korkeampaa painetta. Normaali ilman paine on 101324 Pa (vihreä väri). Vihreät sävyt kielivät virtauksen irtoamisesta: etuliesmassa erottuu ala- ja keskiosassa irtoamiskupla, takaliesmastasta virtaus on isronnut jaluskulman ympäristössä ja siitä ylöspäin. Kaiken kaikkiaan purje toimii kuitenkin selvästi enemmän siipenä kuin laskuvarjona.

Isopurje on täysin sakannut - suorassa sivutuulella maston häiriö on niin suuri, ettei virtaus suojan puolella jaksa kiinnittyä. Takaliesman liehut voivat kuitenkin virrata taaksepäin, vaikka purje onkin sakannut. Asymmetrisen takaliesmastasta virtaus suuntautuu isopurjeen takaliesmaan, puhaltuen liehuihin henkeä.

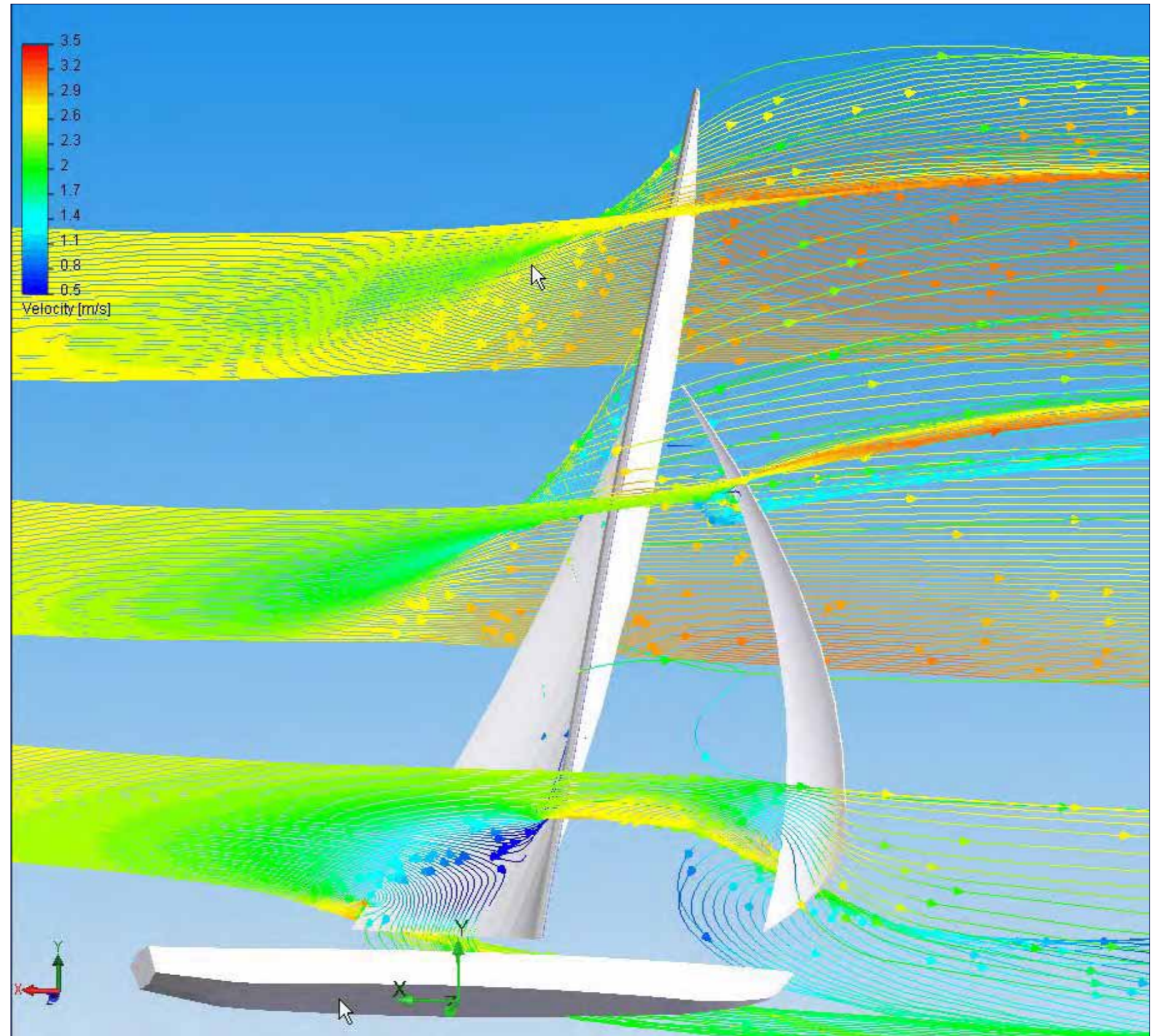
[FG43 MH asym AWA 90 deg, windshear 70-95deg]



Starin purjeiden mallinnusta myötäisellä

Suurin osa virtauksesta isopurjeen päällä suuntautuu ylöspäin, kohti takaliesmaa. Takaliesman liehut voivat liehua tuulen puolen virtauksen mukana, vaikka purjeen takana virtaus on täysin sakannut.

Fokka taiputtaa pääosan virtauksesta etuliesman kautta isopurjeen taakse. Osa virtauksesta taipuu takaliesmaan ja osa karkaa alahelmasta.

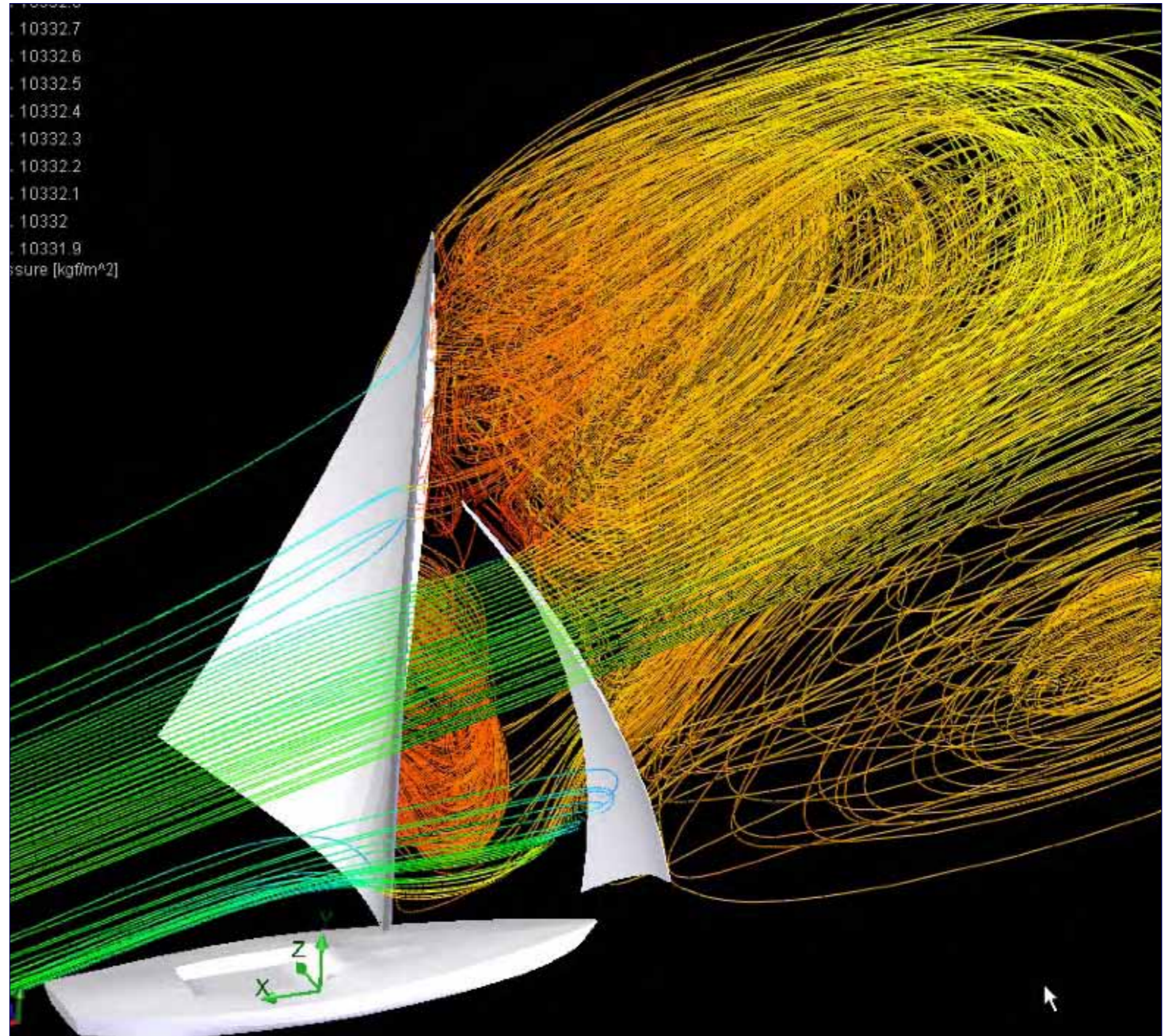


Starin purjeiden mallinnusta myötäisellä

Virtaviivat kertovat, että näillä kulmilla purjeet toimivat täysin laskuvarjona. Still-kuvassa masto on pystyssä, animaatiossa (alla) masto on kallistettu eteenpäin.

[Star MastBack AWS 2,7 ms AWA 161 deg]

Animaatiossa näkyy, miten virtaus taipuu ylöspäin isopurjeen alaosaan ja lähes kaikki ilma poistuu takaliesmasta ylhäältä. Virsikirjalle spiiirattu fokka taivuttaa virtauksen isopurjeen taakse.

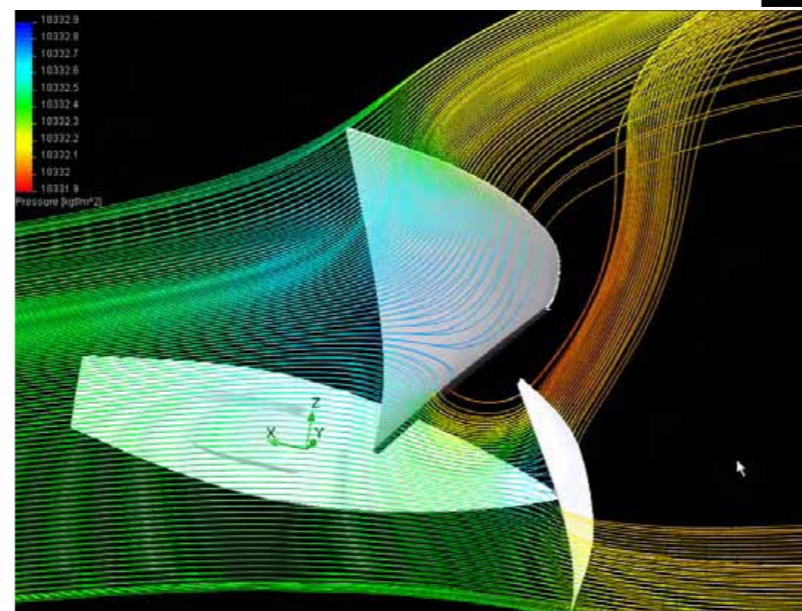
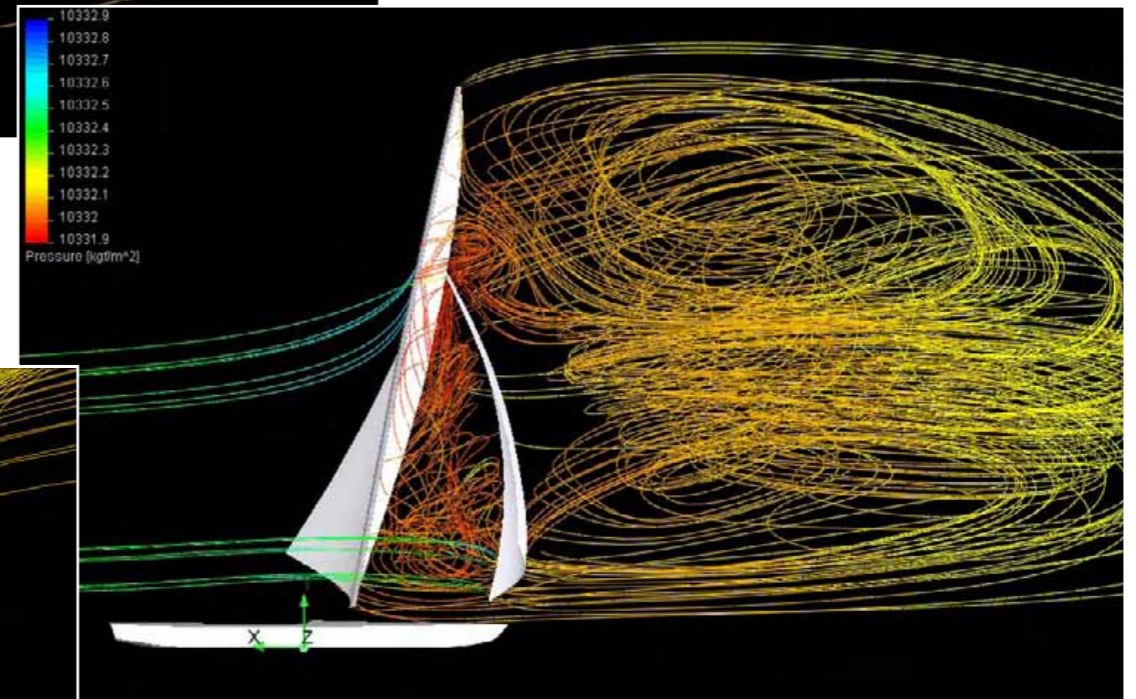
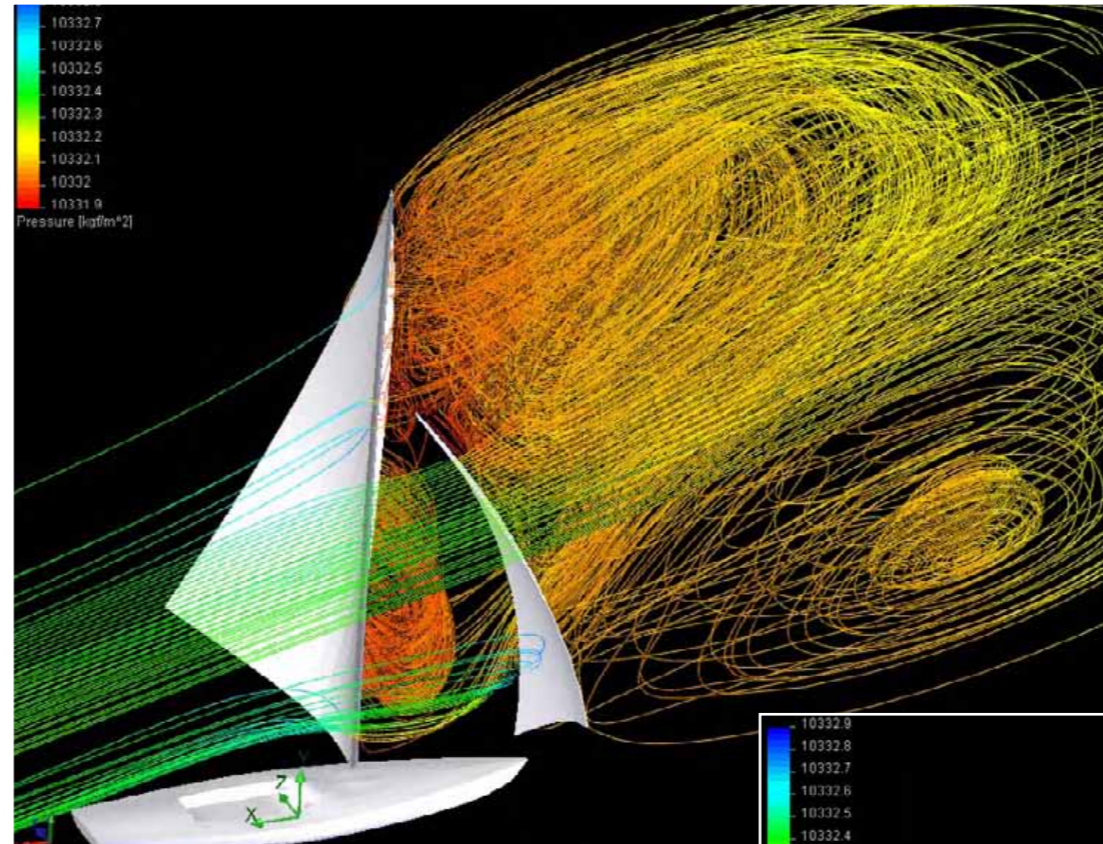


Starin purjeiden mallinnusta myötäisellä.

Purjeiden taakse muodostuu kolme erillistä pyörrettä, yksi pienempi poikittaiseen tasoon heti isopurjeen taakse, ja toiset kaksi suurempaa pystytasoihin jokseenkiin tuuleen suuntaan.

Virsikirjalle spiiirattu fokka taivuttaa virtauksen isopurjeen taakse. Kiihtynyt virtaus parantaa imua ison takana, mutta pienentää aavistuksen ylipainetta tuulen puolella.

[Star MastFrwrd AWS 2,7 ms AWA 161 deg]



Finn-jollan purjeen mallinnusta

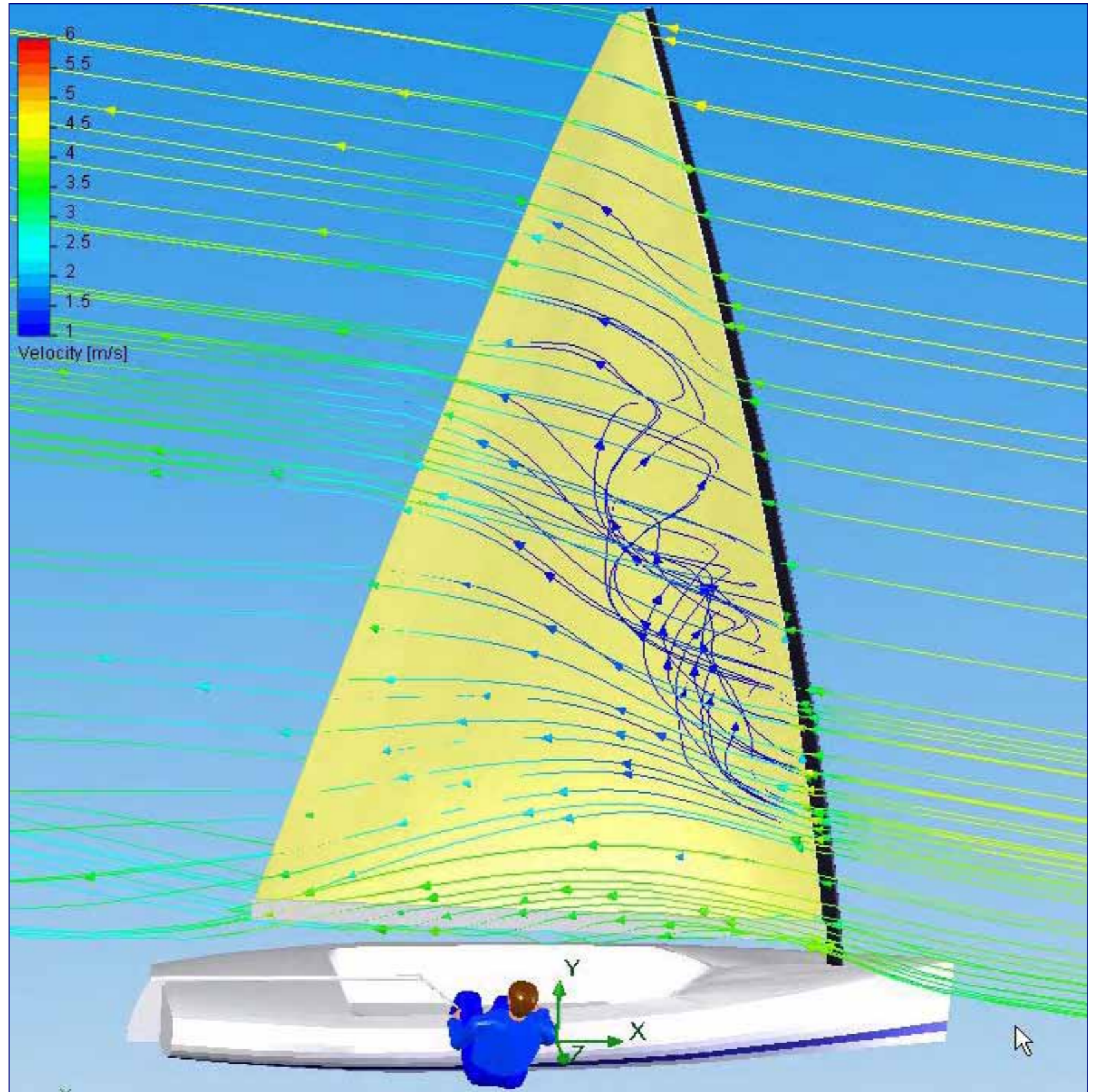
WB-sails on kehittänyt MAXX-konseptin Finn-jollaan Tapio Nirkon, Norjan Per Mobergin ja ruotsalaispurjehtijoiden myötävaikutuksella. MAXX-purjeet säilyttävät kilpailukykyä vähintään kaksi kertaa niin kauan kuin perinteiset, radiaalileikatut laminaatit.

Virtaussimulaatiossa kehitystyö on suuntautunut kevyeen tuuleen Quingdaon olosuhteita silmällä pitäen.

[Finn AWS 5ms AWA 27deg]



Irtoamispyörre tuulen puolella. Purje on liian pallea keskeltä tähän tuuleen. Irtoamispyörteessä virtaus suuntautuu spiraalimaisesti ylöspäin.

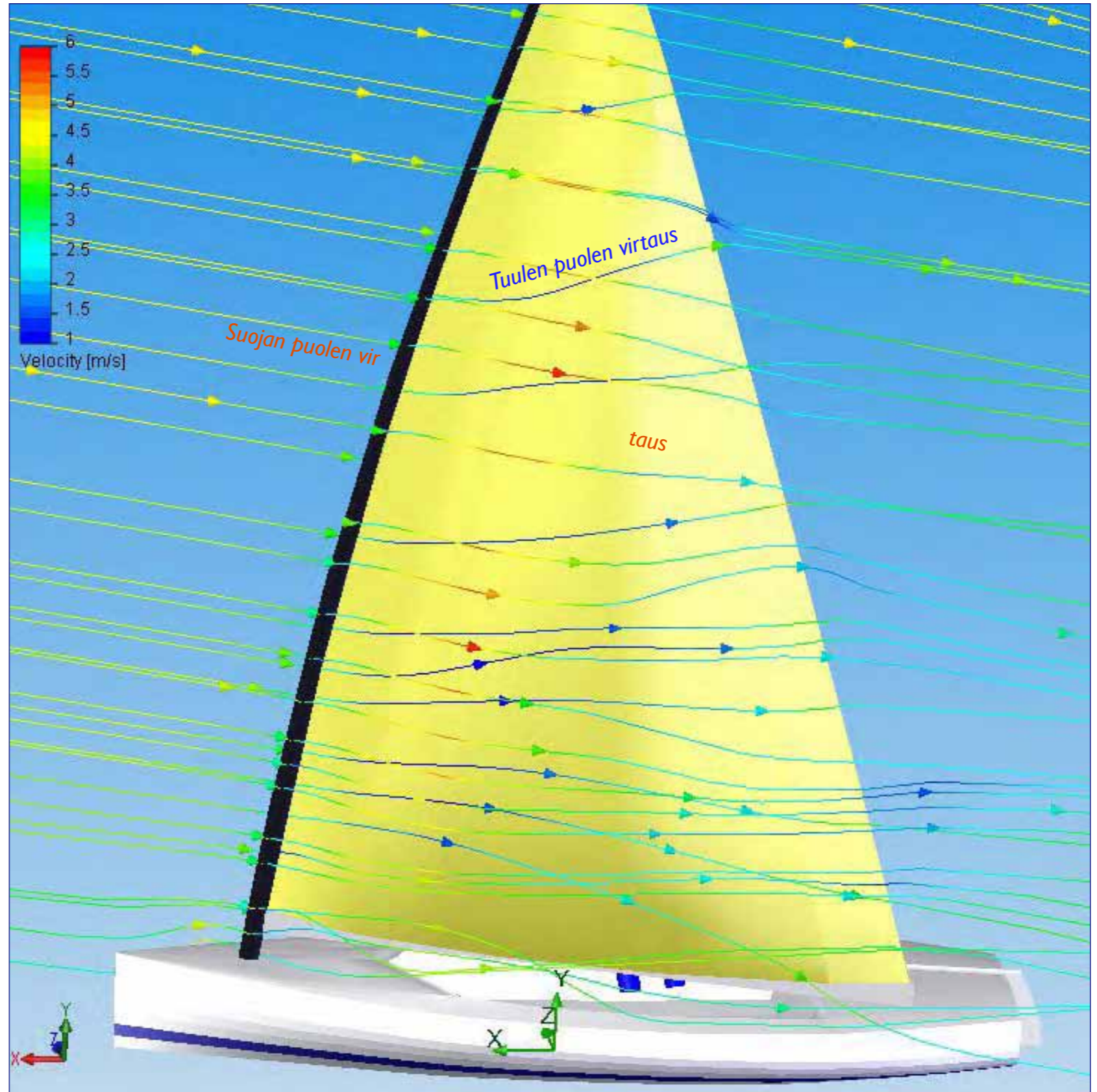


Finn-jollan purjeen mallinnusta

Virtaus hidastuu ja taipuu ylöspäin purjeen tuulen puolella lukuunottamatta aivan alaosaa, missä se karkaa puomin alta. Suojan puolella virtaus kiihtyy ja taipuu alaspäin. Tästä muodostuu purjeen taakse pyörre niin ylä- kuin alaosaankin. Suurin osa ilman vastuksesta aiheutuu näistä pyörteistä, jotka pyritään minimoimaan muotoilemalla purje oikein.

Animaatiosta käy ilmi, miten virtaukselta kestää paljon kauemmin kulkea purjeen tuulen puolitse kuin suojan puolitse (siniset värisävyt kuvaavat hidastunutta virtausta, keltaiset ja punaiset kiihtynyttä). Kiihtynyt virtaus merkitsee alipainetta, hidastunut ylipainetta. Paine-erosta syntyy purjeeseen vaikuttava voima.

[Finn AWS 5ms AWA 31deg]



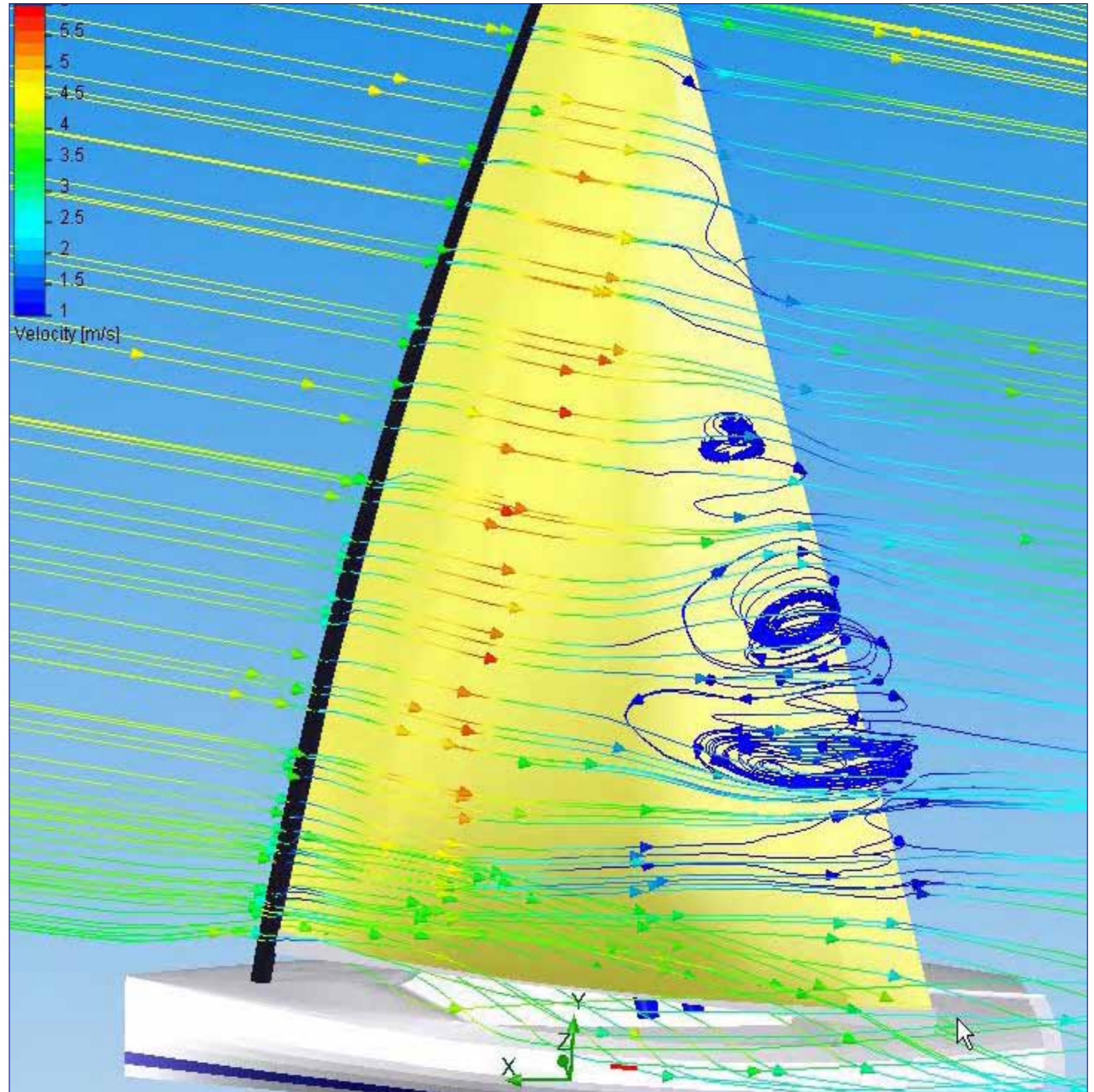
Finn-jollan purjeen mallinnusta

Virtauksen irtoamista suojan puolella. Heikossa tuulessa ja suurella kulmalla virtaus irtoaa takaliesmasta muodostaen pyörteen, joka imee latan päähän kiinnitety liehun purjeen taakse. Tässä tapauksessa purje on liian pullea ja pyöreä takaliesmasta 2. latan vaiheilla. Ilmiö on todennettu ko. purjeella tositilanteessa purjehdittaessa ja tarpeelliset muutokset tehty irtoamisen vähentämiseksi.



[Finn AWS 5ms AWA 29deg]

[Finn AWS 5ms AWA 31deg]

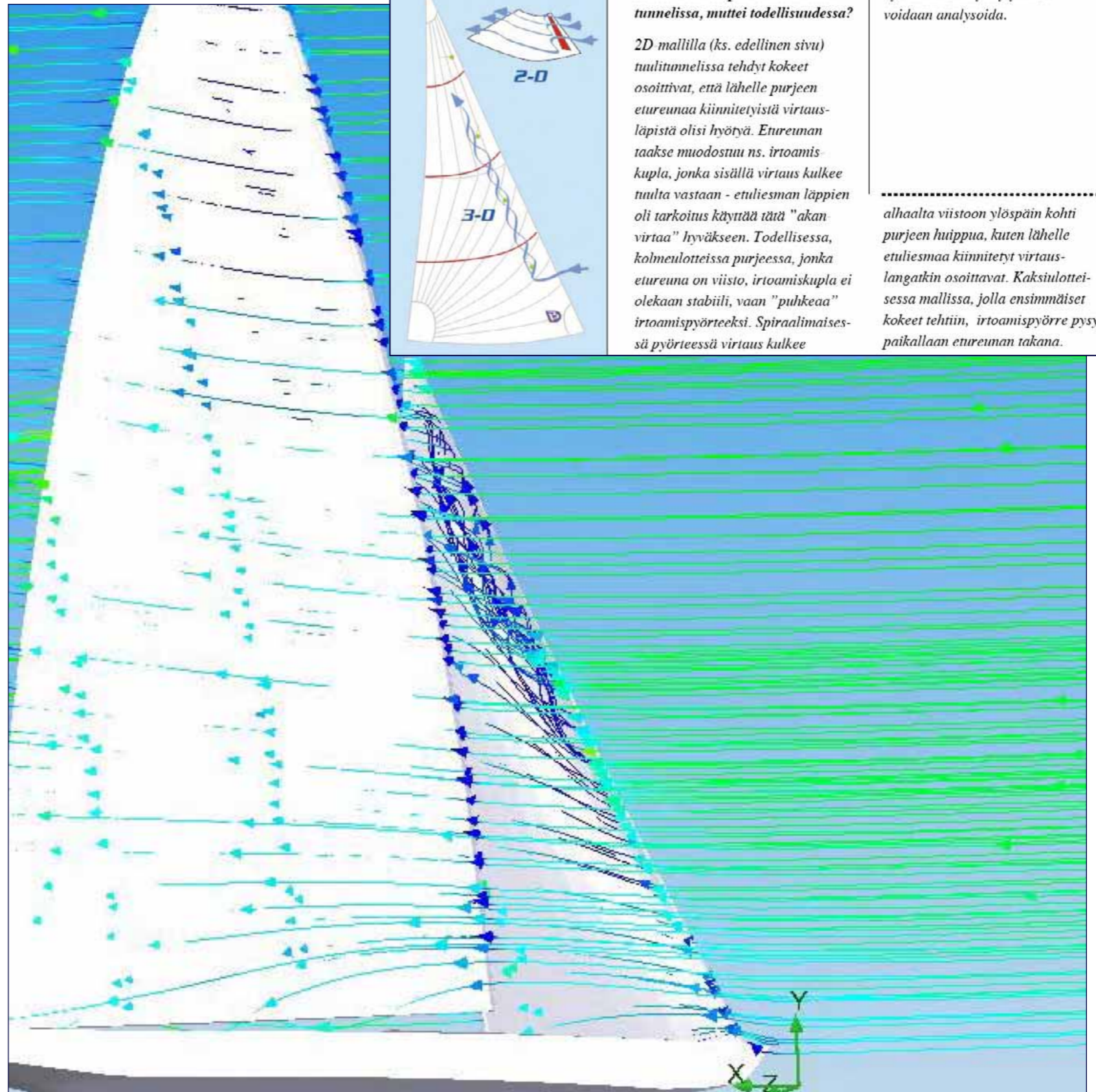


Star-purjeiden mallinnusta luovissa - irtoamispöörre fokan etuliesmassa

Mikko Brummer piirsi v. 1995 insertissä näkyvän skissin virtauksesta fokan sisäpinnalla (enemmän WB-News 1/99 <http://www.wb-sails.fi/suomi/newsArkisto/wb-news/WB-News99.pdf>). Kesti toistakymmentä vuotta ennen kuin skissin kaltainen virtausmalli todennettiin mallintamalla tietokoneella... Osoittautuu, ettei irtoamiskupla leviäkään etuliesmasta taaksepäin, kun kurssia nostetaan tai jalusta löysätään, kuten kirjallisuudessa on ollut tapana esittää. Virtauksen irtoaminen leviää fokan huipusta alaspäin halssikulmaa kohti kulkevana kartiomaisena irtoamispöörteenä.

Pyörteen käyttäytyminen herättää ajatuksia virtauslankojen sijoittelusta - ehkei niitä kannatakaan laittaa vaakasuuntaisena rivinä etuliesmasta taaksepäin, vaan mieluummin koko etuliesman matkalle ylhäältä alas tasaisin välein. Näin virtauslankojen informaatio on herkempi kurssin muutoksille ja purjetrimmille.

[Star AWS 5ms AWA 22deg]



Miksi virtausläpät toimivat tuulitunnelissa, muttei todellisuudessa?

2D mallilla (ks. edellinen sivu) tuulitunnelissa tehdyt kokeet osoittivat, että lähelle purjeen etureunaa kiinnitetyistä virtausläpistä olisi hyöryä. Etureunan taakse muodostuu ns. irtoamiskupla, jonka sisällä virtaus kulkee tuulta vastaan - etuliesman läppien oli tarkoitus käyttää tätä "akan virtaa" hyväkseen. Todellisessa, kolmeulotteisessa purjeessa, jonka etureuna on viisto, irtoamiskupla ei olekaan stabiili, vaan "puhkeaa" irtoamispöörteeksi. Spiraalimaisessa pyörteessä virtaus kulkee

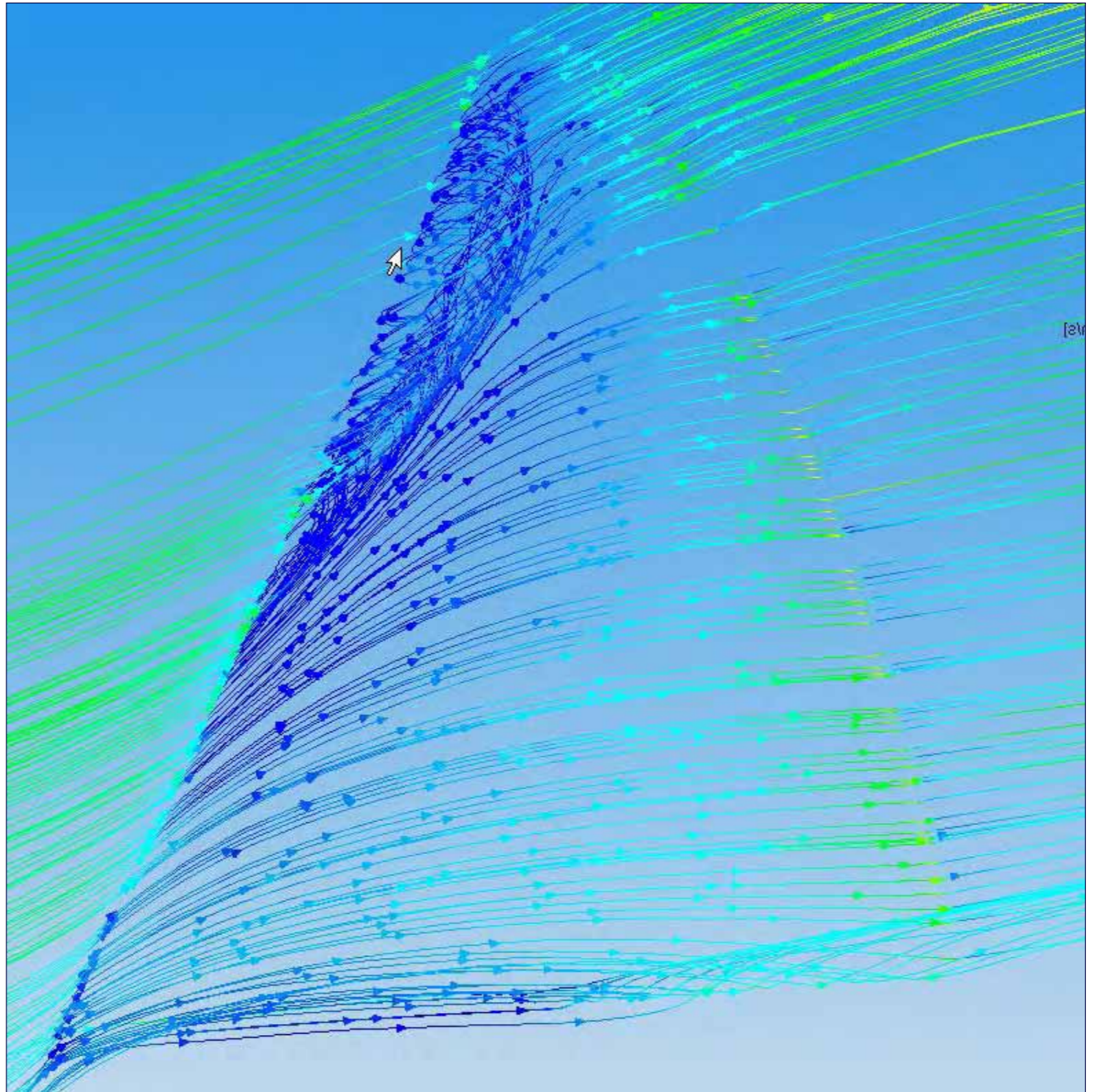
dynaaminen käyttäytyminen voidaan analysoida.

alhaalta viistoon ylöspäin kohti purjeen huippua, kuten lähelle etuliesmaa kiinnitetyt virtauslangatkin osoittavat. Kaksiulotteisessa mallissa, jolla ensimmäiset kokeet tehtiin, irtoamispöörre pysyi paikallaan etureunan takana.

**Star-purjeiden mallinnusta luovissa -
irtoamispyörre fokan etuliesmassa**

*Fokka on piilotettu irtoamispyörteen havainnollistamiseksi
(kuvakulma on ylhäältä suojan puolelta purjeen ”läpi”).*

[Star AWS 5ms AWA 24deg]

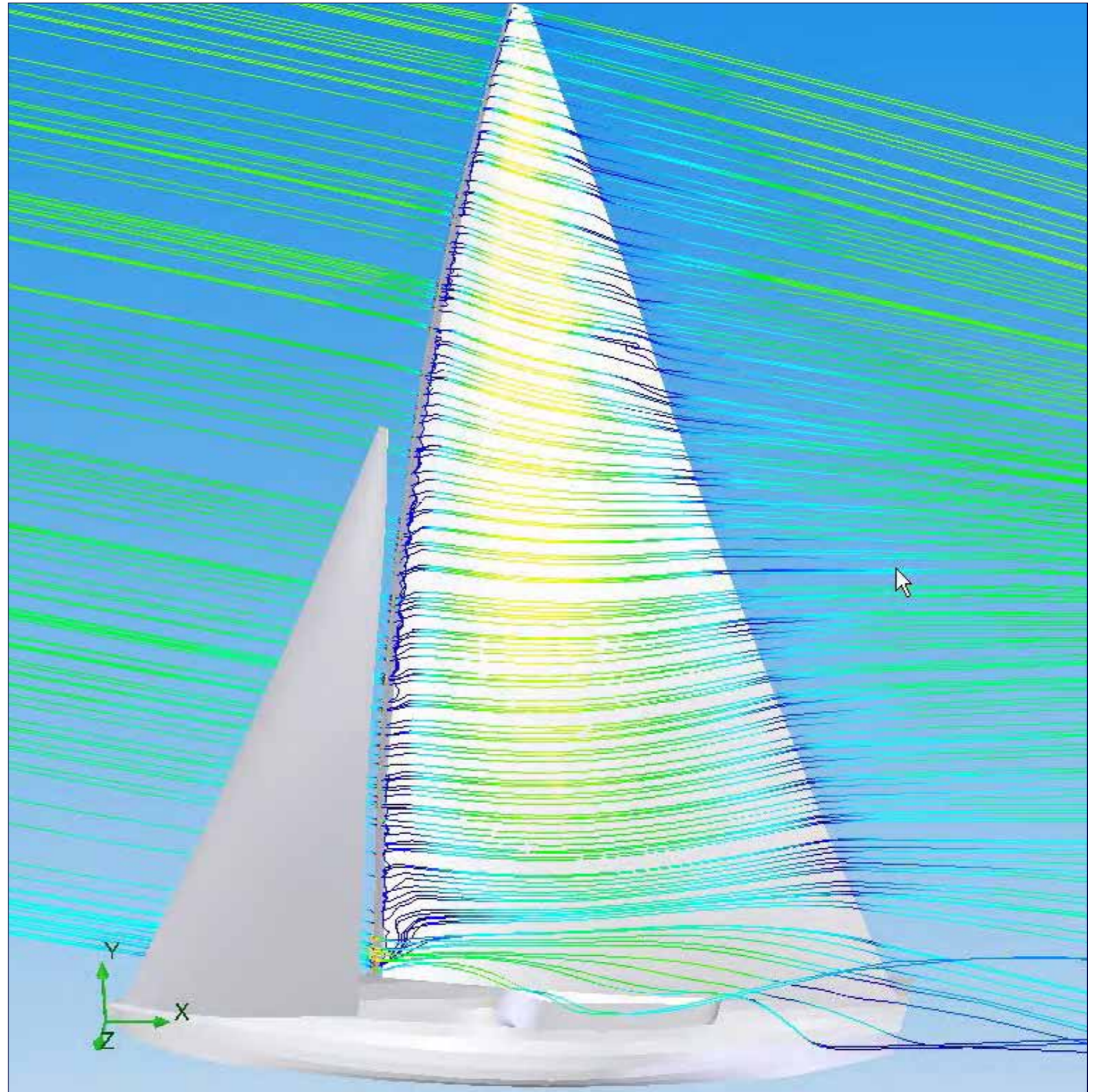


Star-purjeiden mallinnusta luovissa - irtoamispyörre maston takana

Maston häiriö aiheuttaa samankaltaisen irtomispyörteen isopurjeen suojan puolella kuin fokan etuliesmassa, mutta kuitenkin erilaisen. Maston takana kupla käyttäytyy enemmän samantyyppisesti kuin 2D-tapauksessa, vaikka kupla hajoaakin pyörteeksi joka nousee kohti isopurjeen huippua.

Häiriö alkaa jaluskulmasta ja on suurimmillaan hiukan sen yläpuolella. Toinen ”häiriökeskus” on fokan huipun yläpuolella, missä fokan huippupyörre taiputtaa virtausta irti isopurjeen pinnalta.

[Star AWS 5ms AWA 24deg]

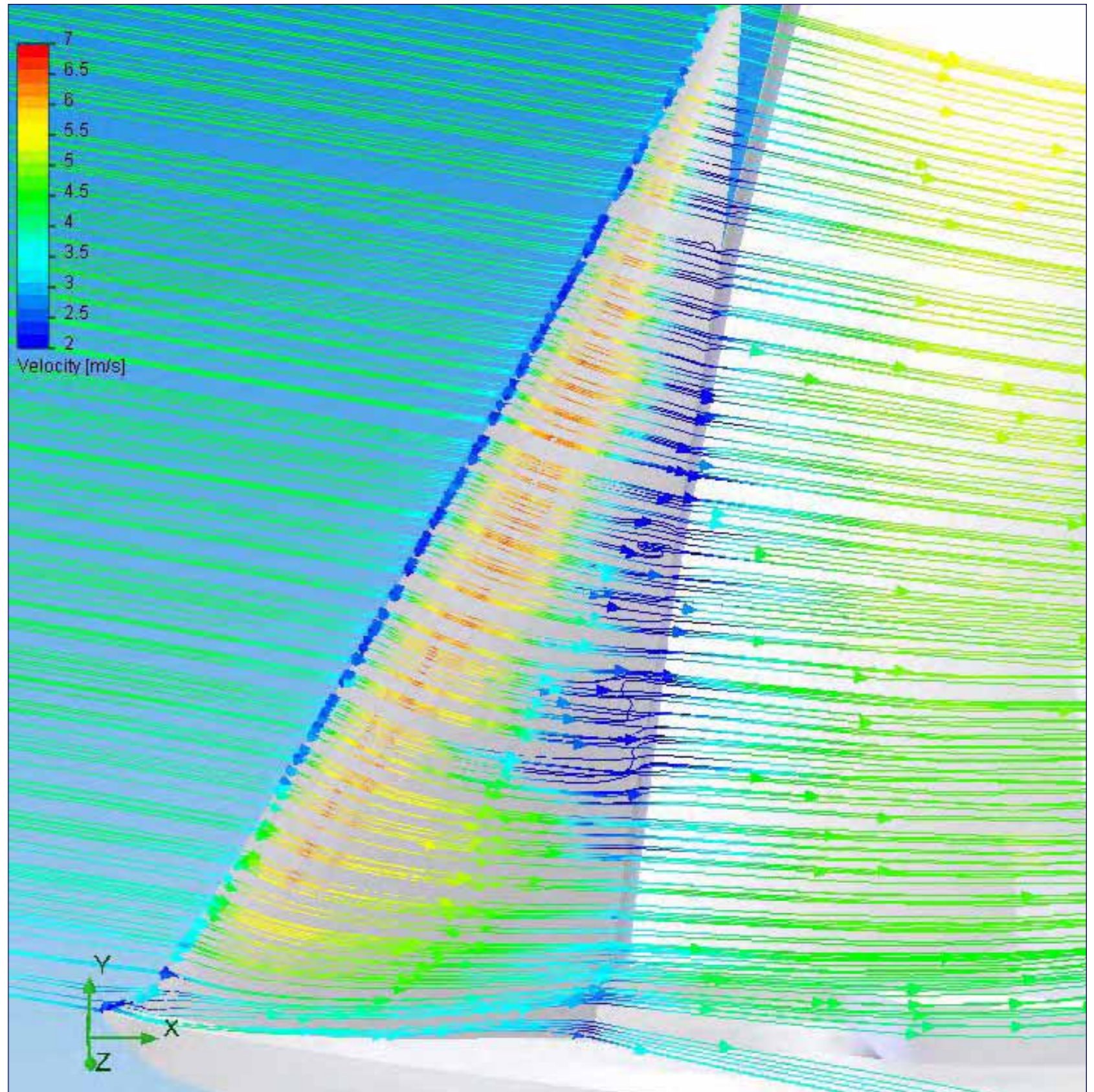


Star-purjeiden mallinnusta luovissa - virtaus fokan suojan puolella

Simulaatio paljastaa virtauksen irtoamista fokan suojan puolella n. 1,5 kannesta ylöspäin. Siniset sävyt kuvaavat hidasta virtausta, punaiset kiihtynyttä.

Pienellä kulmalla (AWA 20°) virtaus kohtaa purjeen suojan puolella (patopiste on purjeen suojan puolella), mikä ilmenee sinisenä kaistaleena etuliesmassa.

[Star AWS 5ms AWA 20deg]



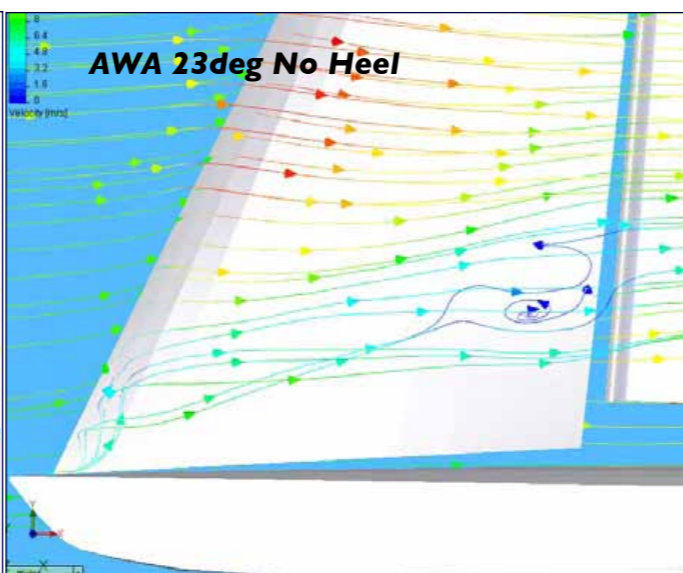
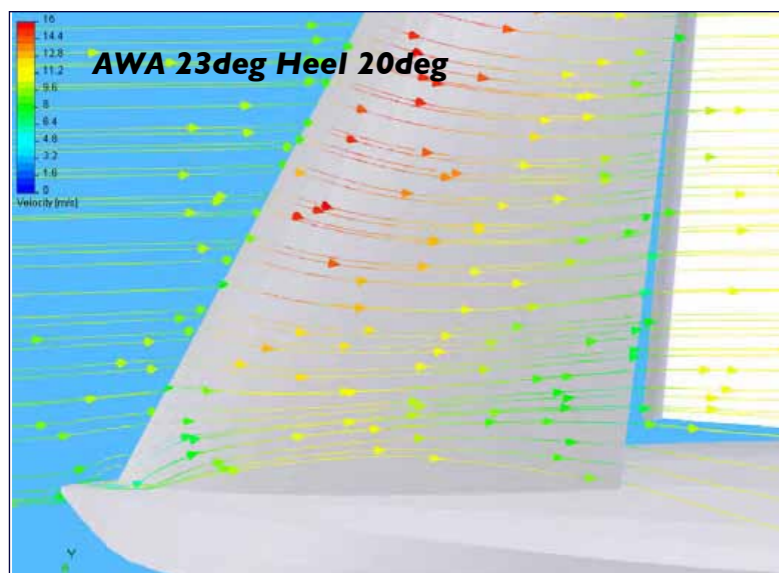
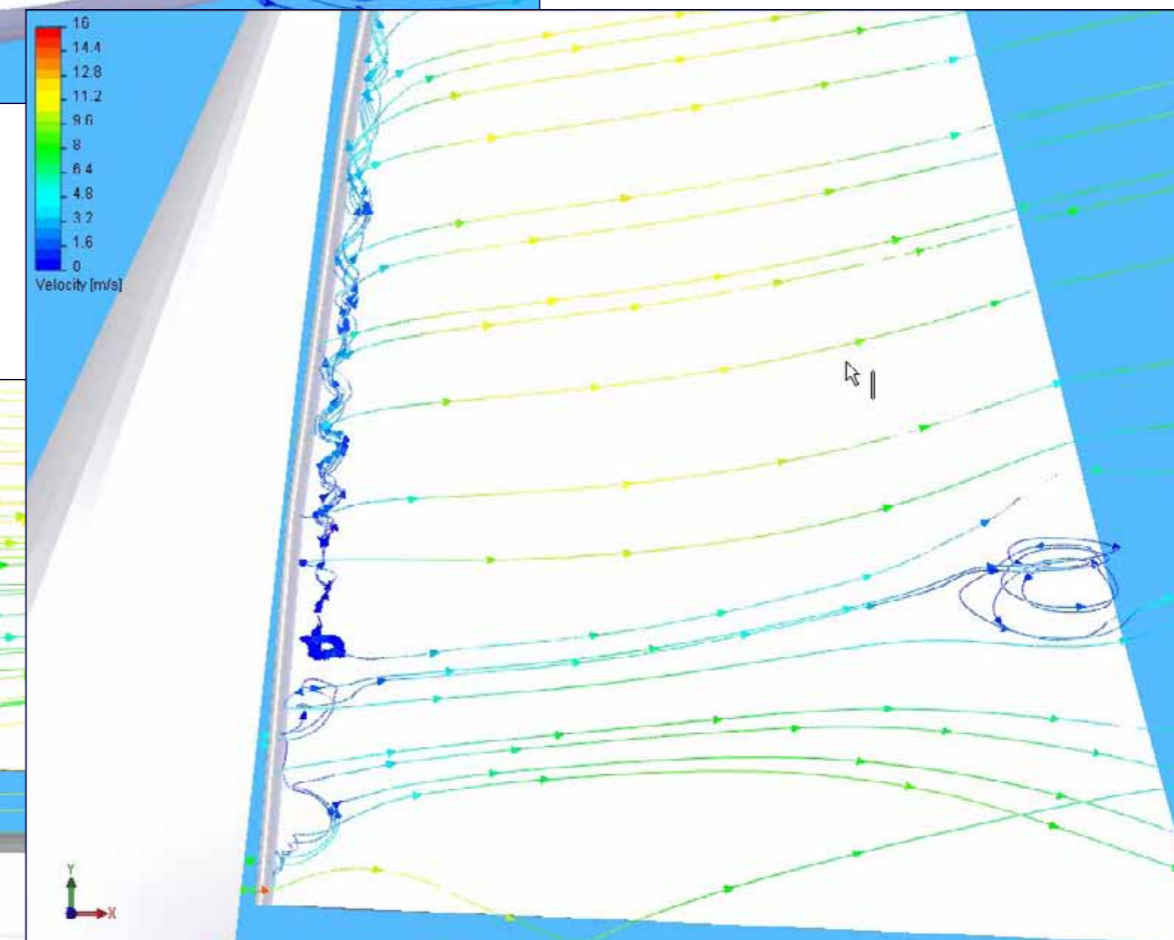
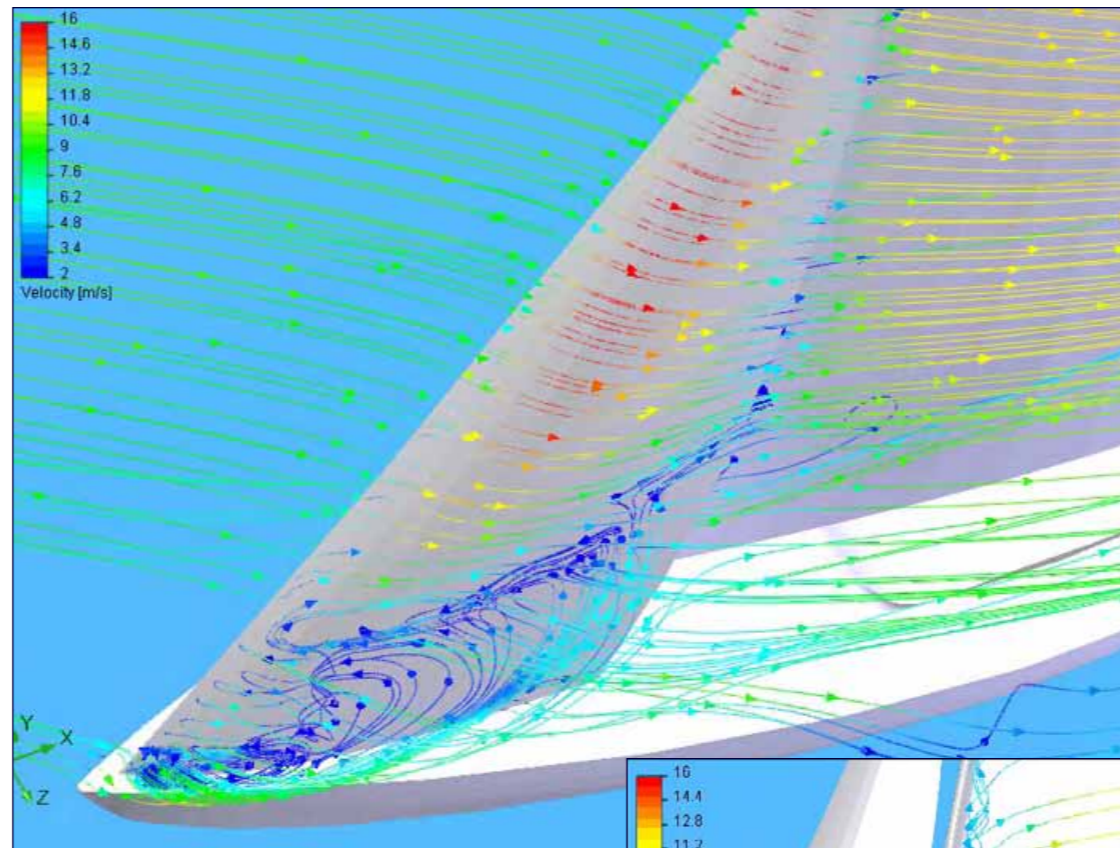
Starin purjeiden mallinnusta luovissa - virtaus fokan suojan puolella

Suuremmilla kulmilla ($AWA > 25^\circ$) virtaus alkaa irrota foka suojan puolella alhaalta halssikulmasta. Tämä tilanne on tuttu monelle ruorimiehelle kevyessä tuulessa: vauhdin säilyttämiseksi joudutaan ajamaan niin alas, että suojan puolen virtauslangat kuolevat. Usein hyvä ratkaisu on kiinnittää virtauslangat vähän korkeammalle kulmasta.

Virtauksen irtoaminen halssikulmasta tapahtuu riippumatta siitä, onko foka alahelma kiinni kannessa vai ei. Kuvan mallinnuksessa alahelma on suljettu kanteen puoliväliin saakka, mutta virtausmalli on varsin samanlainen silloin, kun helma nostetaan irti kannesta koko matkaltaan.

Kallistuksella on suuri vaikutus: 20° kallistuskulmalla virtaus ei enää irtoa halssikulmasta suojan puolella.

[Star AWS 5ms AWA 29deg Heel 0]



Asymmetrisen mallinnusta sivumyötäisessä

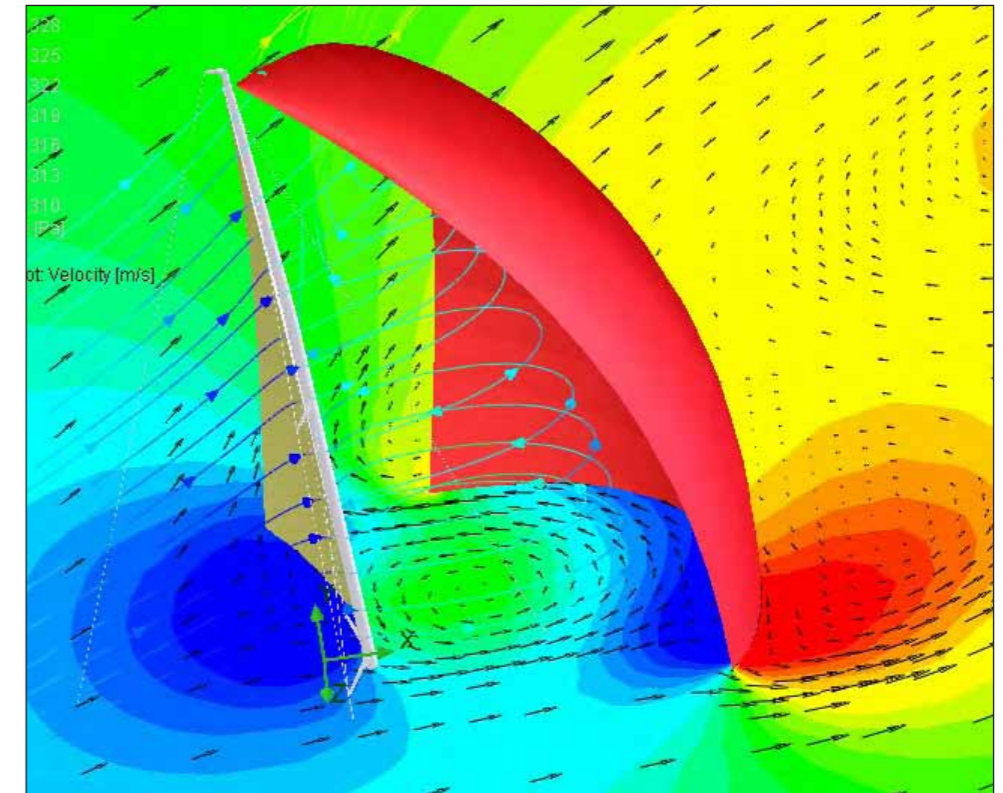
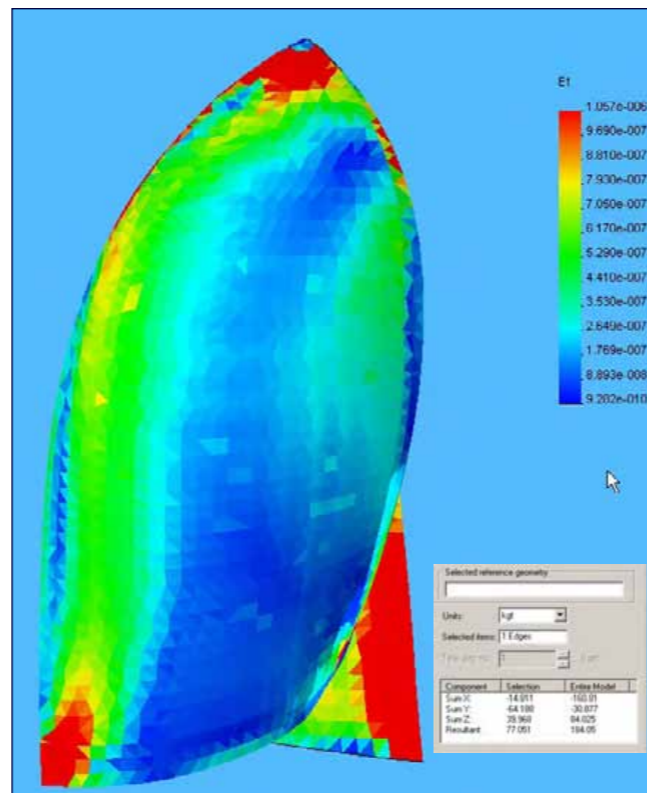
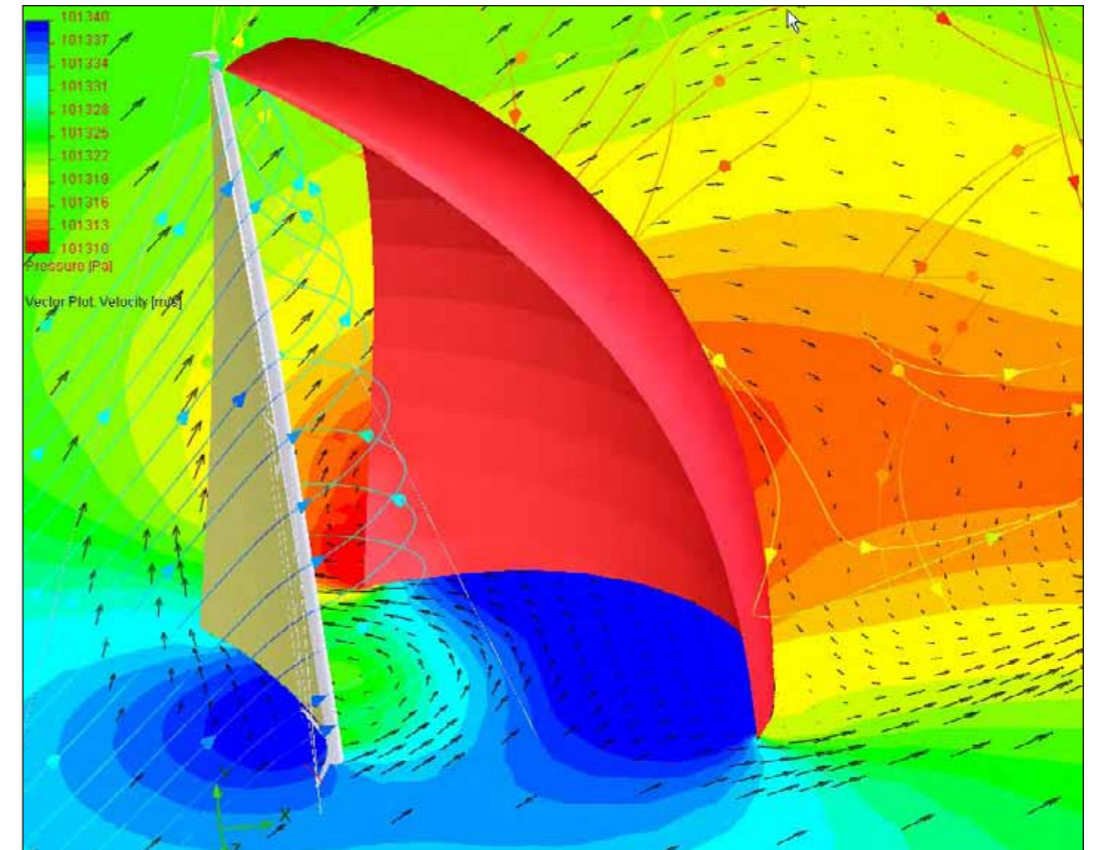
Mallintamalla virtausnopeuksia saadaan enemmän detalleja näkyviin kuin paineilla. Irtoamiskupla asymmetrisen etuliesmassa erottuu sinivihreänä kaistaleena (vieressä).

Poikkileikkaus näyttää, miten virtaus 130° kulmalla kulkee läpi isopurjeen ja asymmetrisen välisestä solasta. (oikealla yllä). Kun AWA kasvaa 150°:een (oikealla alla), purjeiden väliin muodostuu seisova pyörre, jossa ilma kiertää hiljalleen ylöspäin.

Siirtämällä virtaussimulaation laskemat paineet FEA-ohjelmaan (FEA= Finite Element Analysis), saadaan näkyville jännitykset ja venymät purjekankaassa, sekä myös voimat purjeen kulmissa x-, y- ja z-suunnissa. (vasemmalla alhaalla). Rasitukset ovat suurimmat kulmissa (punainen) ja etuliesmassa (vihreät sävyt). Alaliesmassa keskellä kuormat ovat pienet.

[FG43 MH asym AWA 130 deg]

[FG43 MH asym AWA 150 deg]



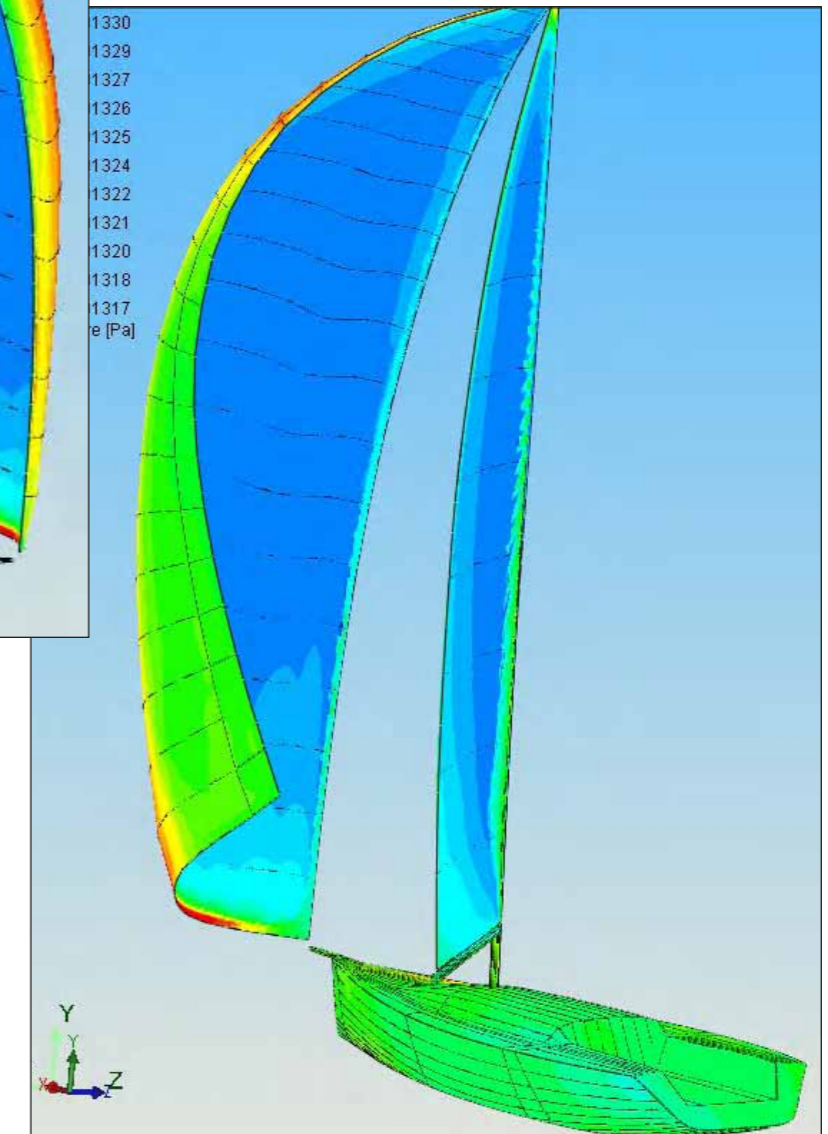
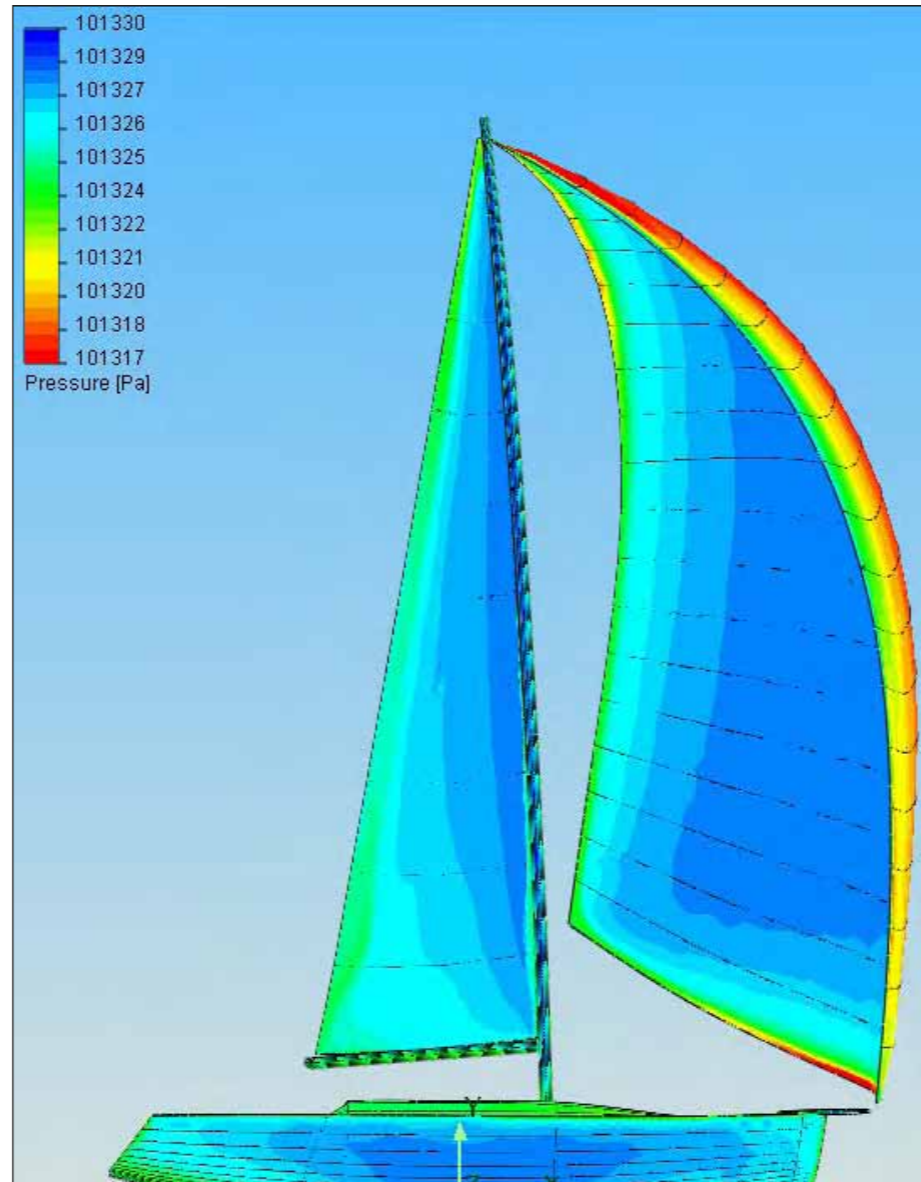
Asymmetrisen mallinnusta sivumyötäisessä

Painekartta purjeiden tuulen puolella. Vihreät sävyt (101324 Pa) vastaavat normaalia ilman painetta, sinisemmät sävyt kohonnutta.

[FG43 MH asym AWA 90 deg]

Animaatiossa näkyy, miten ajettaessa enemmän myötäiseen (AWA 150°) asymmetrisen taakse syntyvä pyörre pyyhkäisee takaisin purjeen pintaan, pienentäen imua ja eteenpäin vievää voimaa. Tämä paluuvirtaus ilmiö on tuttu auton takalasisista, joka tuppaa likaantumaan samasta syystä.

Animaatiot panevat ajattelemaan, että spinnaker stay-sail, joka sulkisi raon kannen ja asymmetrisen alahelman välillä voisi olla tehokas - tätä emme ole vielä ehtinyt mallintaa.



Voimatasapaino sivumyötäisessä

Kun purjevoimat syötetään VPPhen voidaan selvittää, mikä venettä oikein keinuttaa. Tässä on käytetty ILC 40 Aquavitin runkoa, ja varustettu se 136 m² mastonhuippuun menevällä asymmetrisellä. Tosituulen kulma on n. 140°, apparentituulen kulma on 90°, ja veneen nopeudeksi saadaan 6,1 kn.

Asymmetrisen osuus on 85% eteenpäin vievästä voimasta. Vastuspuolella rungon kitkavastus on suurin tekijä, 47% kokonaisvastuksesta.

