



LOPPURAPORTTI

# Kelausvoiman mittausmenetelmän kehittämisprojekti

Vierola, S., Joutsen, T. & Vänttinen, T.

## Sisältö

PROJEKTIN ALOITUS .....	3
KIRJALLISUUSKATSAUS .....	3
ERILAISIA TOTEUTUSMAHDOLLISUUKSIA.....	4
PILOTOINNIT .....	7
TUTKIMUSMITTAUKSET.....	13
YHTEENVETO PROJEKTISTA .....	20

## PROJEKTIN ALOITUS

Projekti käynnistyi suomalaisen huippukelaajan yhteydenotosta ja tarpeesta optimoida kelauskapulaa. Alustavan pohdinnan jälkeen hankkeen tärkeimmäksi tavoitteeksi muodostui saada kokonaisvaltaista kilpailuetua suomalaiseen kilpapelaukseen.

Suuri osa kilpelaajista käyttää 3D-tulostettua kelauskapulaa, jonka välityksellä urheilijan tuottama voima välitetään kelaustuolin kehään ja sitä kautta liikkeeksi. Mikäli kelauksen aikana tapahtuvasta voimantuotosta tai nopeuden muutoksesta saadaan tarkkaa tietoa, voidaan tämän tiedon perusteella kehittää kelauskapulaa tai -hanskaa, kelaustuolia ja kelaajan tekniikkaa.

Projektissa selvitettiin, millaisia teknisiä ratkaisuja kelauksen mittaamiseen voidaan käyttää ja kokeiltiin teoreettisesti parasta käytännössä. Projektin aikana tehtiin pilottimittauksia, erilaisten kelauskapuloiden vertailumittauksia, kelauksen liikeanalyysi ja kirjallisuuskatsaus. Lisäksi tutustuttiin tarkemmin kilpapelauksen maailmaan ja erityisesti kelauskapulan suunnitteluun ja rakentamiseen.

## KIRJALLISUUSKATSAUS

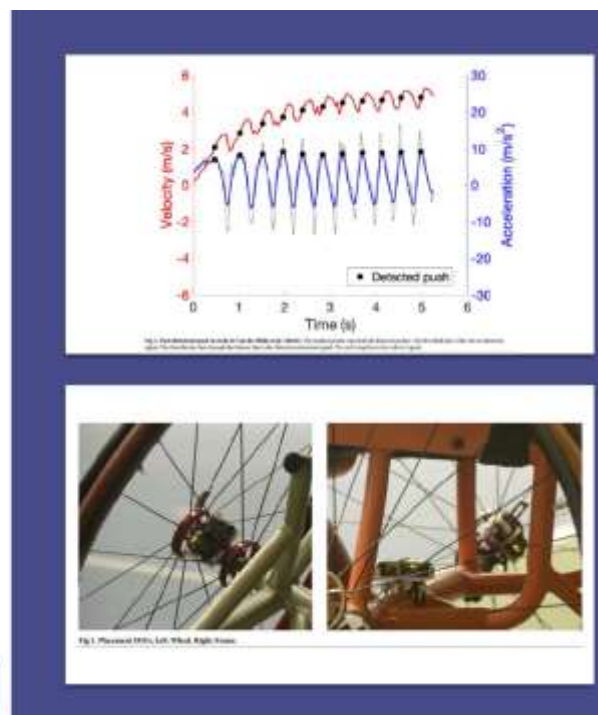
Tutkimuskirjallisuushaku perustui PubMed- ja SPONET-tietokannoista löydettyihin tutkimusartikkeleihin. Hakusanoja olivat *Wheelchair*, *Wheelchair Sports*, *Propulsion*, *Sensor* ja *IMU*. Lisäksi hyödynsimme tietokantahaun perusteella löytyneiden artikkelien lähdeluetteloja syventämään kokonaiskuvaa pyörätuolirheilussa käytetyistä anturointiratkaisuista.

Kirjallisuushaussa löytyi yhteensä 73 tieteellistä tutkimusta, joista koostettiin tutkimuskatalogi (AHOS-KELAUSVOIMAN MITTAUSMENETELMÄN KEHITTÄMISPROJEKTI - TUTKIMUSKATALOGI) ja yhteenveto (AHOS - KELAUSVOIMAN MITTAUSMENETELMÄN KEHITTÄMISPROJEKTI – TUTKIMUSKIRJALLISUUTTA).

**2019 Wheelchair mobility performance of elite wheelchair tennis players during four field tests: Inter-trial reliability and construct validity – Rietveld - PLoS One. 2019 Jun 6;14(6)**

- To assess the reliability and validity of 4 wheelchair tennis field tests using inertial measurement units (IMUs)
- IMUs were attached to both wheels and the frame of the athlete's wheelchair
- All tests showed high ICCs (0.95–0.99) for the inter-trial reliability for the IMU-based end times
- With the use of IMUs it is possible to verify detailed performance characteristics and visualize the execution

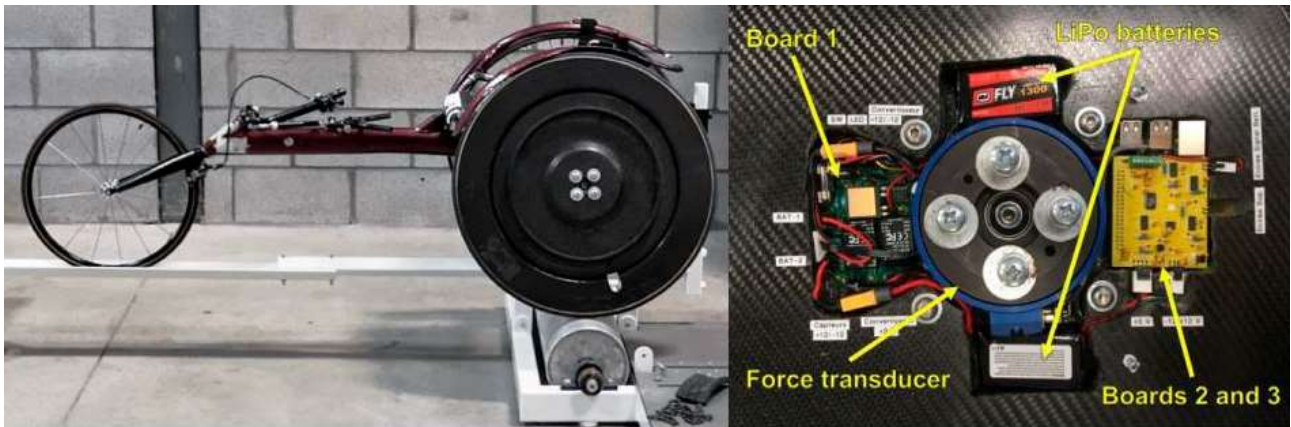
Tutkimus selvittää kiihtyvyy- ja kulmanopeusanturin käyttöä suorituskyvyn mittaamisessa ja palautteenannossa



Alkuperäiset artikkelit ovat ladattavissa KIHUn verkkolevyltä (<https://kihu.kuvat.fi/i/uxfwgcmwgbv5qursaqqyfdt7mxan8k4j>).

## ERILAISIA TOTEUTUSMAHDOLLISUUKSIA

Kirjallisuuskatsauksesta löytyi kelaustuolin akseliin kiinnitettävä voima-anturi. Saman tyyppistä anturointiratkaisua kehitetään LUT-yliopistossa Lappeenrannassa. Ratkaisu on toimiva ja tarkka, mutta koska anturointi asennetaan kelauskiekon sisään, se on myös hankalasti siirrettävissä tuolista toiseen ja kustannuksiltaan kallis.



**Kelaustuolin voima-anturi: 2021 A high sample rate, wireless instrumented wheel for measuring 3D pushrimkinetics of a racing wheelchair -Chénierf -Med engphys. 2021 Jan;87:30-37.**

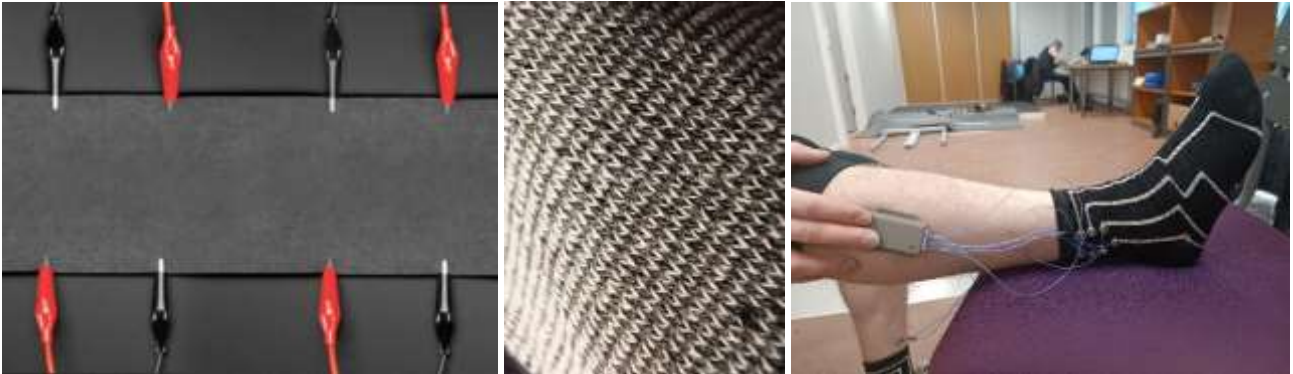
FSR-anturointi (force sensing resistor), mahdollistaa kapulan pinnan optimoinnin paljastamalla mikä kohta kapulasta koskee milläkin voimalla kelauskehän pintaan. Ongelmia kuitenkin aiheuttaa esimerkiksi se, että kapulaan joudutaan kiinnittämään paljon laitteistoa, mikäli halutaan kerralla tarkkailla useampaa kohtaa kelauskapulasta. Laitteiston ja kaapeleiden määrä muuttaa lisäksi kelausta tekniikaltaan epäaidoksi. Ratkaisu saattaa toimia, mikäli tutkitaan ainoastaan yhtä kohtaa kerralla, mutta tämäkin on käytännössä työlästä ja hidasta. Testaus on myös kallista, sillä anturin siirto toiseen paikkaan tai toiseen kapulaan on hidasta tai jopa mahdotonta ja kapulan ja kehän pintojen väliset voimat olettavasti rikkovat anturit nopeasti. Anturointi voidaan toteuttaa myös kelauskehään, mutta ongelmat eivät silti vähene.



**Yksi mahdollisuus FSR-anturointiin.**

Huomattavasti kestävämpi ja muutenkin suositeltavampi vaihtoehto olisi toteuttaa FSR-anturointia vastaava anturointi joko kudotuilla antureilla tai resistiivisillä- tai piezoresistiivisillä kankailla. Kangastyypisten antureiden ehdottomana etuna on mahdollisuus anturin vapaaseen muotoiluun ja se, että anturi voidaan sijoittaa kapulan pehmusteen päälle. Myös mittaustapoja on monia; mittaus voidaan tehdä yhtenäisestä kankaasta, useasta pisteestä tai erillisistä suikaleista. Sekä kudotut-, että kangasanturit ovat kuitenkin melko epäherkkiä, eikä niidenkään kestävydestä ole julkaistua tutkimustietoa tai käytännön kokemusta.

Piezoresistiivisistä kankaista osaamista löytynee ainakin Oulun yliopiston tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnasta. Kudottuja antureita ovat käyneet Suomessa pilotoimassa muissa urheilulajeissa mm. latvialaiset tutkijat (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33476830/>).

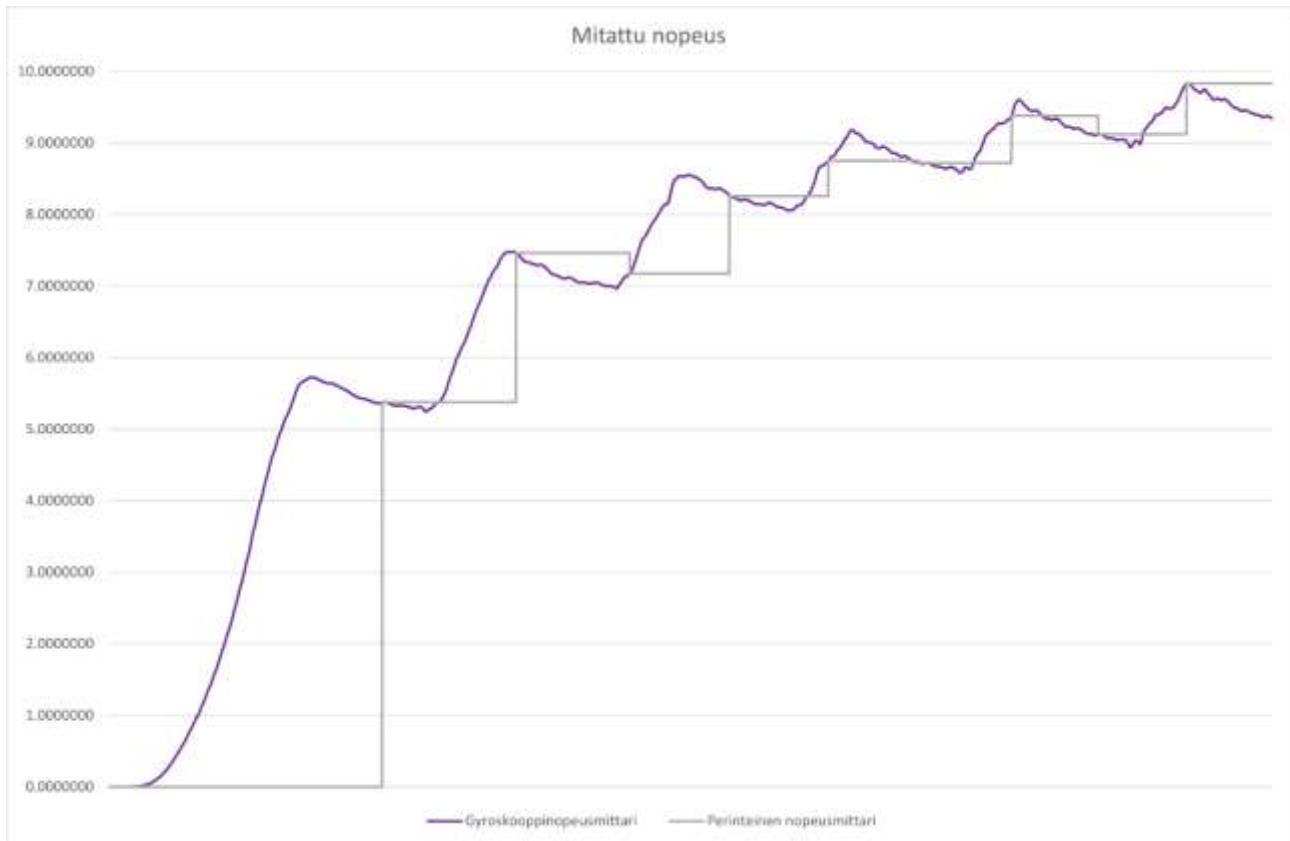


**Piezoresistiivistä kangasta ja sukkaan kudottu paineanturi.**

IMU-anturit (Inertial Movement Unit) sisältävät gyroskoopin, kiihtyvyyssanturin ja magnetometrin. Imu-anturilla kelaustuolin nopeus voidaan laskea kiihtyvyyssarvoista tai jos anturi kiinnitetään pyörimään renkaan mukana, voidaan kelaustuolin nopeus mitata gyroskoopin kulmanopeusarvoista. Normaali nopeusmittari mittaa nopeuden yhden kerran per renkaan kierros, kun taas gyroskoopista saadaan keräystaajuudesta riippuen jopa satoja mittauspisteitä jokaisella kierroksella. Saatavien näytepisteiden määrä on luonnollisesti riippuvainen myös kelaustuolin nopeudesta; alla olevassa taulukossa on mittauspisteiden teoreettiset määrät eri kelausnopeuksilla 208 Hz taajuudella mitattaessa.

Kelaustuolin nopeus m/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kelaustuolin nopeus km/h	3.6	7.2	10.8	14.4	18	21.6	25.2	28.8	32.4	36	39.6	43.2
Mittauspistettä per kierros	435	218	145	109	87	73	62	54	48	44	40	36





**Gyrokoopilla mitatessa, pienet muutokset nopeudessa havaitaan perinteistä nopeusmittaria huomattavasti tarkemmin.**

IMU-antureissa on myös omat ongelmansa, esimerkiksi anturin tarkkuus vaihtuu kelausnopeuden mukaan, kuten edellä osoitettiin. Lisäksi ulkoisesti identtisten antureiden tarkkuudessa ja laadussa on eroja. Suurin ongelma kelaustuolin nopeuden määrittämisen kannalta on renkaan halkaisijan muuttuminen kelauksen aikana. Renkaan yhden kierroksen aikana kulkema matka on riippuvainen renkaan ilmanpaineen muutoksista sekä alustan joustavuudesta. Virheitä voidaan kuitenkin kompensoida kalibroimalla laskuissa käytettävät arvot tutkadatan avulla. Kelaustuolin nopeus voidaan määrittää kaavasta:  $NOPEUS = KULMANOPEUS \times RENKAAN \ SÄDE$ . Yleisesti kelauksen aikana renkaan säde on muutaman millin paikallaan mitattua sädettä pienempi, koska rengas painuu kasaan ja alusta saattaa joustaa eri tavalla kelauksen eri vaiheissa.

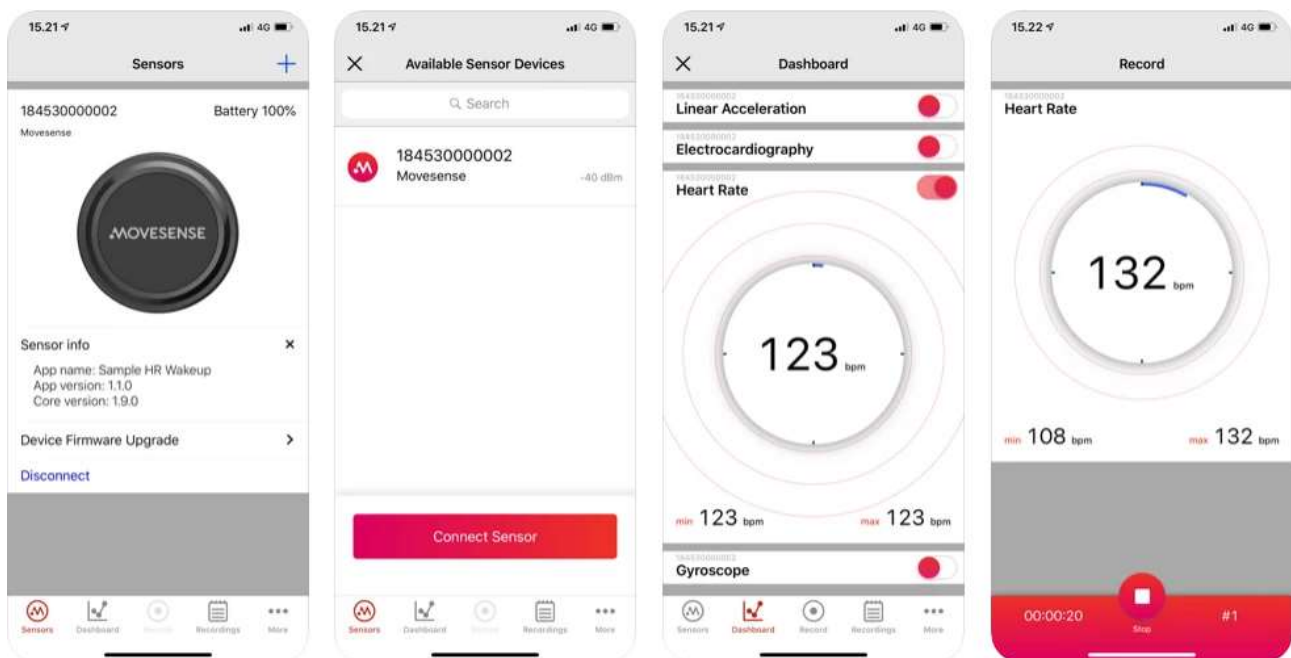
Tässä projektissa päädyttiin käyttämään IMU-anturia, koska se on muita vaihtoehtoja helpompi viedä käyttöön myös laboratorio-olosuhteiden ulkopuolelle.

## PILOTOINNIT

Anturiksi valittiin Movesense-anturi. Movesense voi mitata dataa omaan sisäiseen muistiinsa tai data voidaan lähettää reaaliaikaisesti Bluetoothilla mobiililaitteeseen tai tietokoneeseen. Anturissa voidaan sisäisesti laskea datasta muuttujia ja lähettää valmiit tulokset päätelaitteeseen raakadatan sijaan.

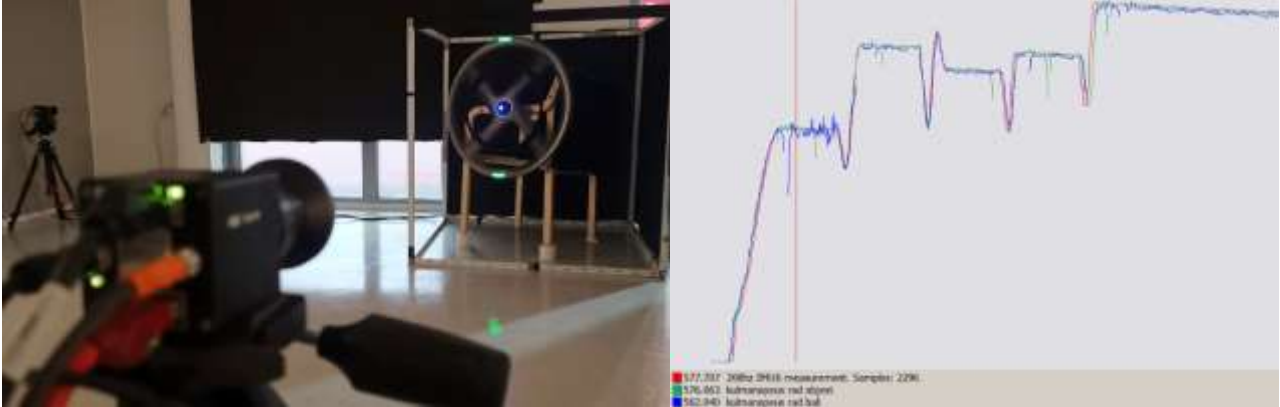


Movesense-anturi on pienikokoinen ohjelmoitava liike-, ekg- ja sykeanturi, jota voidaan käyttää erilaisiin terveyden, hyvinvoinnin, urheilun ja kuntoilun sovelluksiin ja tutkimusratkaisuihin.



Ilmainen Movesense Showcaseapp (<https://www.movesense.com/get-started/>) mahdollistaa yksinkertaisen mittauksen helposti. Mittausohjelman voi tehdä myös itse tai tukeutua kaupallisiin sovelluksiin kuten esimerkiksi Kaasa Collectoriin (<https://www.kaasa.com/#services>).

Tässä projektissa ensimmäisissä pilottimittauksissa varmistettiin Movesense -anturin gyroskoopin arvojen vastaavan liikeanalyysissä määritettyjä arvoja. Liikeanalyysi toteutettiin Baumer HXG20c -kamaroilla ja Simi Motion -liikeanalyysiohjelmistolla. Movesense -antureiden kulmanopeudet vastasivat hyvin standardimenetelmänä yleisesti käytettävää liikeanalyysiä, joten tätä kehityssuuntaa nähtiin järkeväksi jatkaa.



Kuvassa ensimmäinen mittausasetelma ja antureiden datan vastaavuus liikeanalyysiin.



Movesense -antureille mallinnettiin ja tulostettiin kiinnikkeet, jotka mahdollistavat antureiden kiinnittämisen kelaustuolin renkaan napojen päälle. Antureiden tulee pyöriä renkaan mukana.



Kun antureiden teoreettinen toiminta oli varmistettu, tehtiin seuraavat pilottimittaukset juoksumatolla. Mattopilotissa tutkittiin, pystytäänkö erilaisten kapuloiden toimintaa havainnoimaan kelaustuolin tarkasta nopeustiedosta ja varmistettiin antureiden kiinnityspaikkojen toiminta.



Movesense -kiinnikkeen kiinnitys 2-puoleisella teipillä osoittautui toimivaksi ratkaisuksi. Näin tehty kiinnitys kestää, mutta on myös helposti poistettavissa.



Mattotesteissä testattiin myös kelauskapulasta mitattujen kiihtyvyyssarvojen luotettavuutta. Kiihtyvyyssanturit leikkasivat hieman kapulan osuessa kelauskehään, joten esimerkiksi täysin tarkkoja lyönnin ajoituksia ei voida määrittää pelkästään 16G -kiihtyvyyssanturilla.



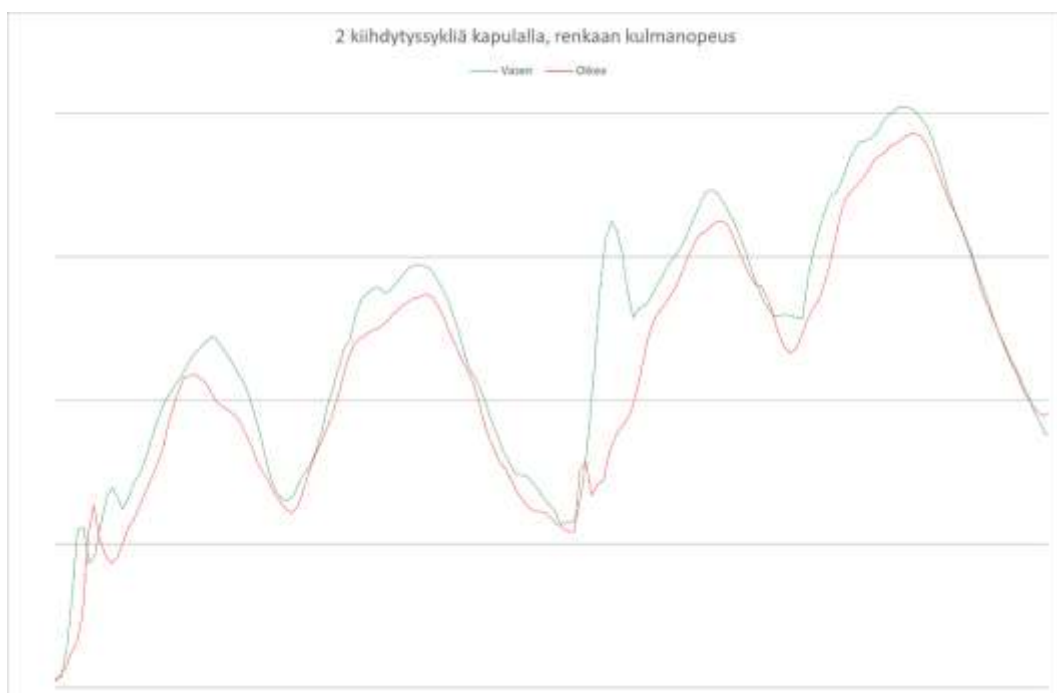
Movesensen mitaaman datan taltiointiin käytettiin Jyväskylän Yliopiston erikoislaboratoriomestari Sakari Vekin kehittämää keräysohjelmaa. Kyseinen ohjelma olisi suositeltava lähtökohta myös jatkossa kelaukseen paremmin sopivan version kehittämiseen.

Kolmas pilottimittaus tehtiin radalla Espoossa. Mittausta varten hankittiin Kaasa Collector -datan keräysohjelma saksalaiselta Kaasa Solutionilta ([www.kaasa.com](http://www.kaasa.com)). Tämä ohjelma mahdollistaa useamman Movesense -anturin synkronoidun keräyksen IOS (Apple) -laitteilla. Lisäksi puhelimen tai tabletin kameraa voidaan käyttää suorituksen kuvaamiseen samaan aikaan, kun IMU -anturin dataa kerätään, mikä helpottaa datan tulkittamista analyysivaiheessa. Kaasa Solution tekee kustomoituja Movesense -sovelluksia ja projektin aikana selvisi heidän työskennelleen saksalaisten kilpakelaajien kanssa. Kaasan kustomoitujen sovellusten hinnat ovat noin kymmenestä tuhannesta eurosta ylöspäin.

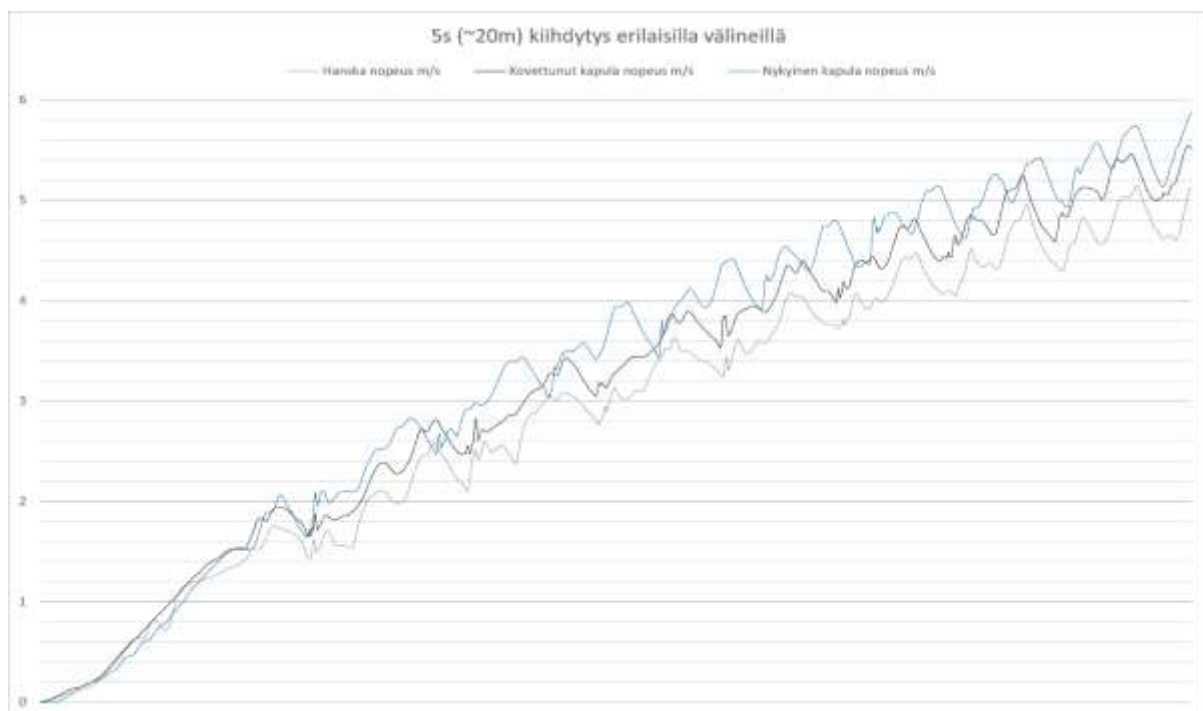
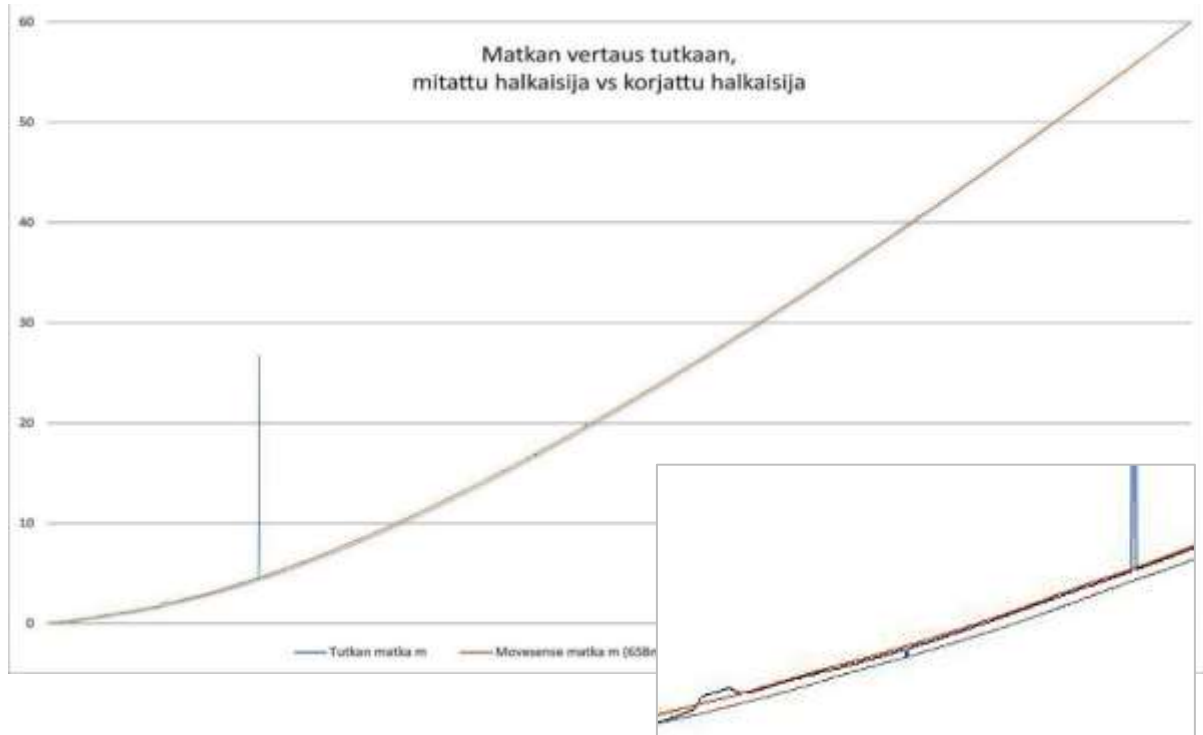


**Kiinnitys kestää, mutta irrotus helpottuu, jos kiekkoon teipataan maalarinteippiä ja kiinnikkeen 2-puoleinen teippi kiinnitetään siihen.**

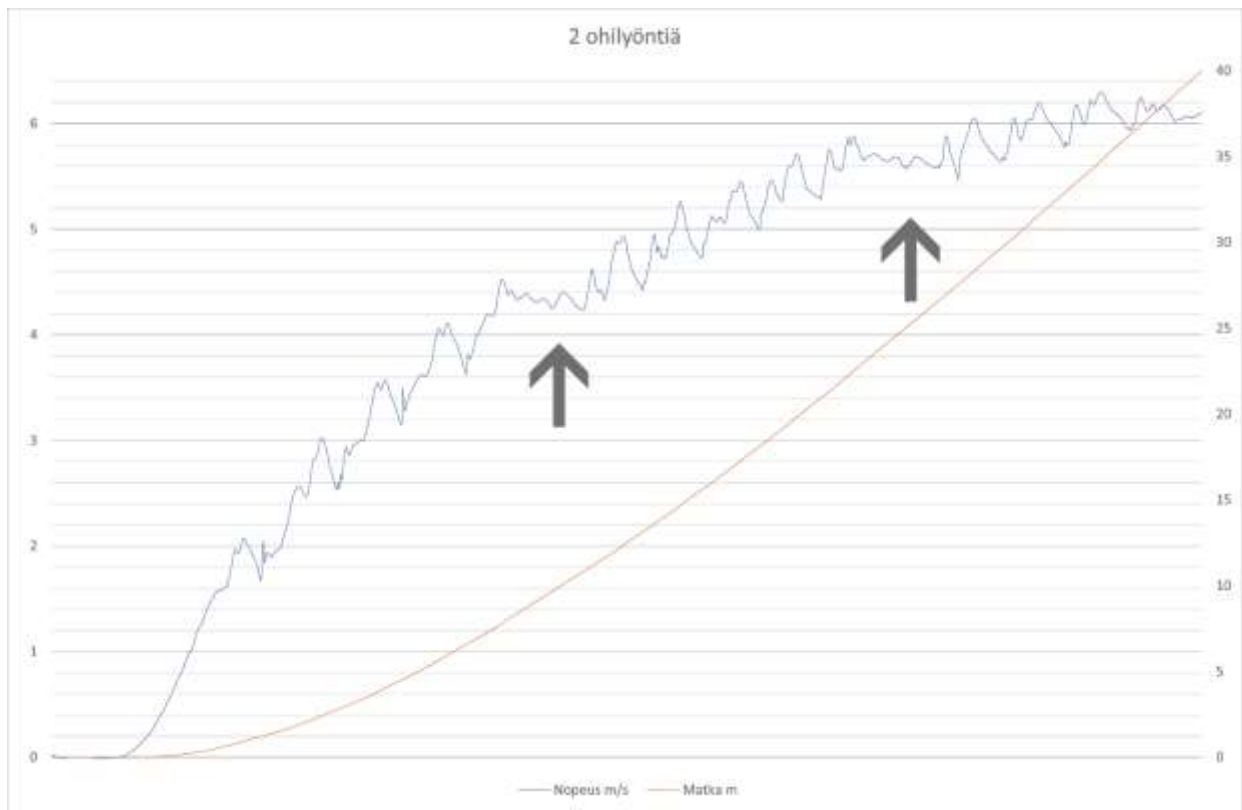
Tässä projektissa päädyttiin käyttämään kahta Movesense -anturia, yhtä kummassakin renkaassa. Samanlaisten antureiden mittaamissa nopeuksissa voi olla pieniä eroja, mutta suuremmista nopeuseroista voidaan päätellä, kulkeeko kelaustuoli suoraan. Lisäksi erillisistä antureista voidaan tutkia iskujen puolieroja, niin ajoituksessa kuin myös voimantuotossa. Nopeuden laskemisessa käytettiin molempien antureiden keskiarvoa, mutta mittauksia voidaan tehdä yhdelläkin anturilla.



Movesense -mittauksia tehtiin tutkauksen kanssa samoista suorituksista ja dataa verrattaessa huomattiin, ettei paikallaan mitattua renkaan sädettä voida käyttää suoraan nopeuden laskemiseen. Mitattu säde oli 333 mm, mutta etäisyysdata oli tutkan kanssa, yhteneväistä 3 mm pienemmällä 329 mm säteellä. Erot olivat sinällään pieniä, mutta ne ovat kertautuessaan vaikuttavia pidemmillä matkoilla. Tämä johtunee siitä, että ilmarengas painuu kasaan kelauksen eri vaiheissa.

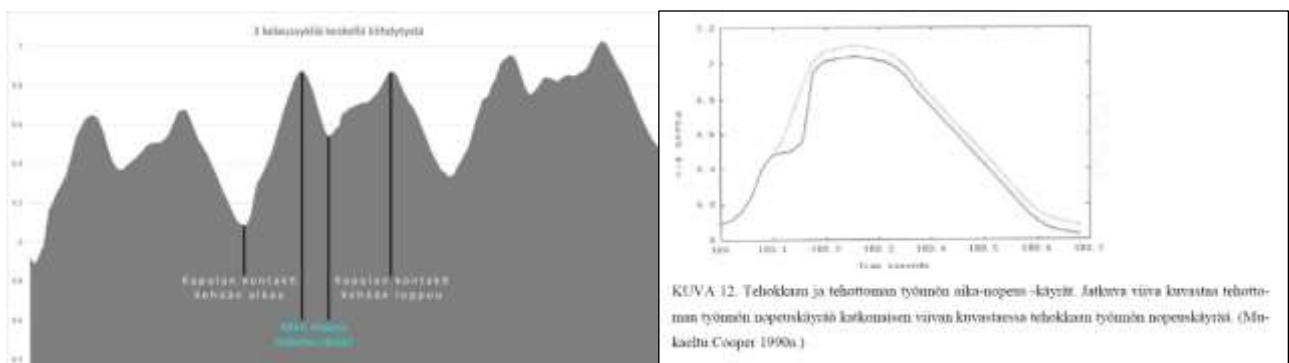


**Espossa testattiin kelausta erilaisilla kelausvälineillä. Nopeusprofiilit ovat lähes identtiset, mutta nopeustasoissa ero on selkeästi havaittavissa kelauskapulan tuottaessa suuremman nopeuden kuin kelaushanskan.**



**Ohilyönnit ovat ihmissilmin helposti havaittavissa nopeuskäyrässä, joten automaattisesti toimivan tunnistusalgoritmin luominen on myös mahdollista.**

Espeen mittauksissa havaittiin mielenkiintoinen ilmiö kelaussykeiden nopeusprofiilissa. Kelaussykleistä erottui selkeästi kaksi erillistä piikkiä, joiden välissä tuulin nopeus hieman laski. Valmentajien ja urheilijoiden kanssa pohdittiin, että syytä voi olla monia, mutta teoreettisesti optimaalinen nopeus saavutettaisiin todennäköisesti ilman nopeuden väliaikaista hidastumista.



KUVA 12. Tehokkaan ja tehotonnan työnnön aika-nopeus-käyrät. Jatkuva viiva kuvasta tehotonnan työnnön nopeuskäyrä katkonaisen viivan kuvasta tehokkaan työnnön nopeuskäyrä. (Mittauksia Cooper 1990a.)

**Lisää luettavaa mm. Nopeuskäyristä; Cooper, R. A. An exploratory study of racing wheelchair propulsion dynamics, Adapted physical activity quarterly 7, 74–85 sekä Piritta Poutiainen 2010 kandidaatin tutkielma, pyörätuolikeliaajille kehitetyn kiihtyvyyksianturiperusteisen nopeuden mittaustaitteiston validointi, Liikuntabiologian laitos, Jyväskylän Yliopisto.**



## TUTKIMUSMITTAUKSET

Lopullisia Jyväskylässä tehtyjä mittauksia varten teetettiin muutamia erilaisia kelauskapuloita. Vaikkakin tärkein tarkoitus uusilla kapuloilla oli tutkia, pystytäänkö renkaan kulmanopeudesta päättelemään mikä kapuloista on paras, yritettiin samalla saada kokemuksia kapuloista, jotka on valmistettu hieman tavallisuudesta poikkeavista materiaaleista. Ominaisuuksiltaan erilaisia, toisiaan vastaan vertailtavia, kapulapareja oli lopulta neljä. Testikelaaja toi mukanaan kaksi paria omia kapuloitaan, yksi pari 3D -tulostettiin yhteistyössä Jyväskylän Yliopiston liikuntatieteellisen tiedekunnan kanssa ja yksi tilattiin erityismateriaalista kaupalliselta toimijalta (3D Formtech Oy).

Mittauksia varten testikelaaja toi Jyväskylään mukanaan kelausrullat, jotka mahdollistivat kelaamisen liikkumatta eteenpäin ja siten vakioidumman mittaustapahtuman. Tulevaisuuden tarpeita silmällä pitäen pyrimme keräämään mahdollisimman paljon erilaista dataa.

Tutkimusmittauksissa käytettiin kahta Movesense -anturia kelauskapuloissa ja kahta renkaissa. Rullien päällä tehdyistä mittauksista tuotettu tieto sisälsi kulmanopeudet renkaista, kiihtyvyydet kapuloista ja highspeed-videot. Koska useamman anturin mittaushetket eivät ole millisekunnilleen täsmälleen samanaikaiset, päädyttiin jokaisen anturin mittaama data interpoloimaan matemaattisesti 208 Hz:stä 1000 Hz:iin. Tätä varten luotiin Python-ohjelma, joka lukee Kaasa Collectorin tallentamaa tiedostomuotoa ja muuntaa alkuperäisen datan haluttuun näytetaajuuteen.






Jyväskylän mittauksissa kapuloihin ja renkaisiin kiinnitettiin Movesense -anturit. Siniset kapulat olivat testihenkilön aktiivisessa kelauskäytössä ja vihreät tulossa käyttöön. Lisäksi kokeiltiin kahta muuta vaihtoehtoisilla materiaaleilla valmistettua kapulaparia, jotka kuvataan seuraavan kuvan yhteydessä.

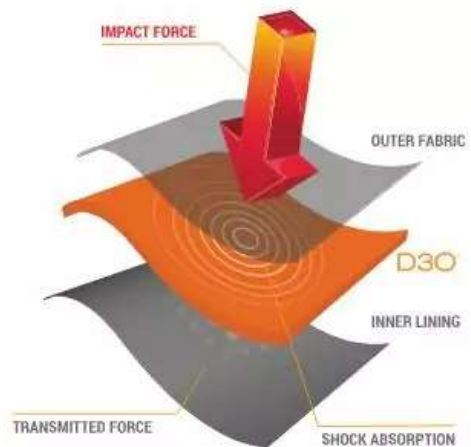




How D30® molecules work:

1.  SOFT & FLEXIBLE
2.  LOCKS ON SHOCK
3.  RETURNS TO FLEXIBLE STATE

How D30® technology works:



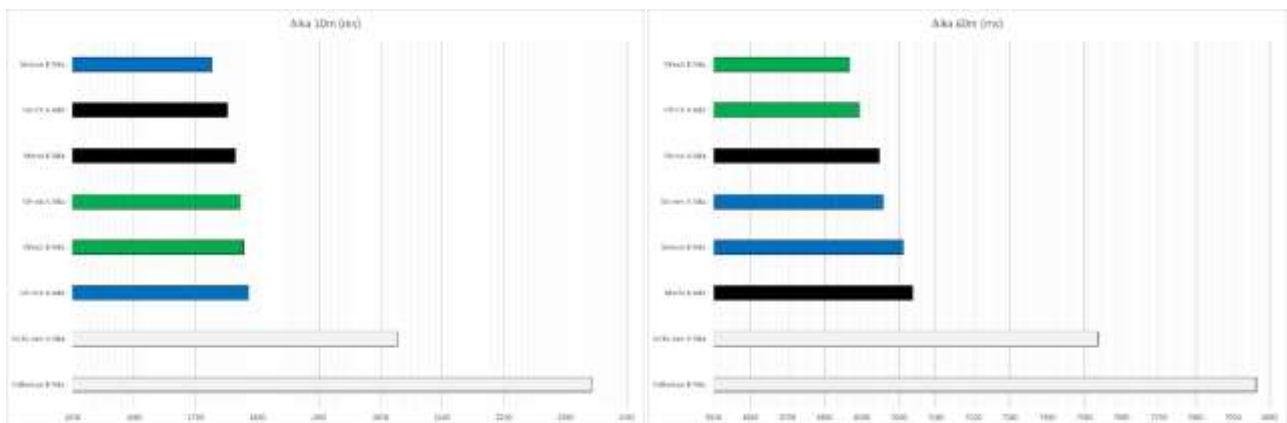
Valkoiset elastisesta TPU-materiaalista tulostetut kapulat päällystettiin korkeakitkaisella nanokumi-materiaalilla. Päällyste tuhoutui ensimmäisillä työnöillä, mutta kulumajäljistä oli mahdollista päätellä, mitkä kohdat koskivat kehään eniten. Jyväskylän Yliopiston 3D-tulostamat mustat kapulat pehmustettiin KIHUlla iskusta kovettuvalla D30-materiaalilla, jotta iskuvoima jakautuisi tasaisesti kehälle, vaikka kapulan ja kehän välinen kosketus ei olisi täydellinen.



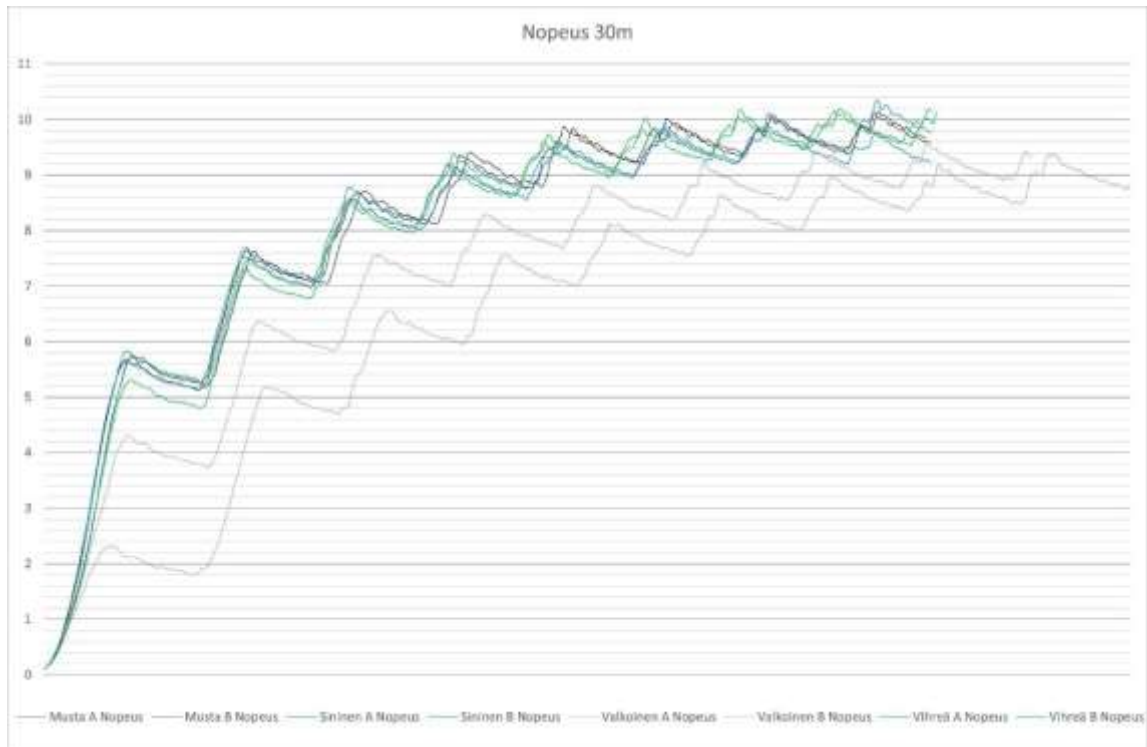
Kelauskapuloissa merkitseviä asioita ovat mm. kapulan muoto, pinnan kitka, materiaalin joustavuus ja paino. Projektin aikana tietämys kapuloista kasvoi, mutta testaustuolia, missä kapuloita olisi mahdollista systemaattisesti testata, ei valitettavasti tämän projektin puitteissa pystytty hankkimaan.



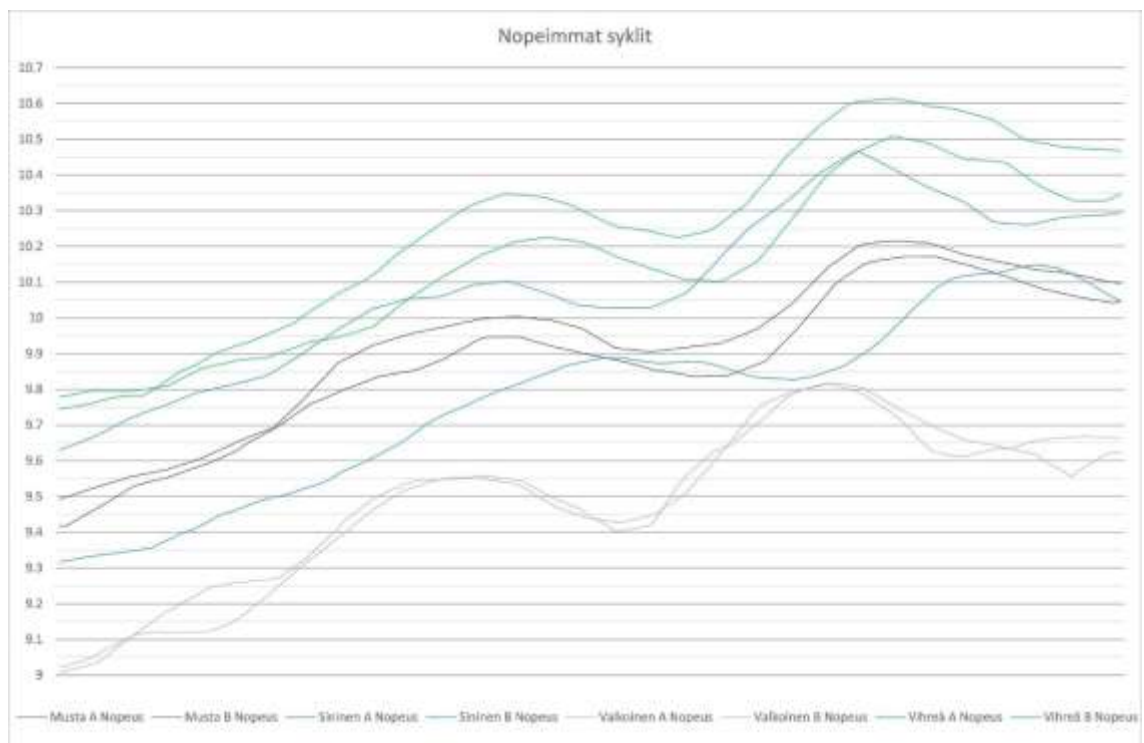
Rullilla kelatessa kuvattiin highspeed-videoita (1000 kuvaa/s) kelauksen ja erilaisten kapuloiden käyttäytymisen selvittämiseksi. Movesense -anturit lähettivät dataa ja kuvasivat suoritukset reaaliaikaisesti suoraan iPhoneen. Radalla mitatessa iPhone voi tulevaisuudessa olla kelaajan mukana.



Aikoja verratessa erikoisin huomio oli mustien kapuloiden sijoitus. Kapulat olivat käytössä testikelajaajalla ensimmäistä kertaa, ja tuntuma oli varmasti erikoinen johtuen iskusta kovettuvasta pehmustemateriaalista, mutta voimantuotto oli tästä huolimatta hyvä.

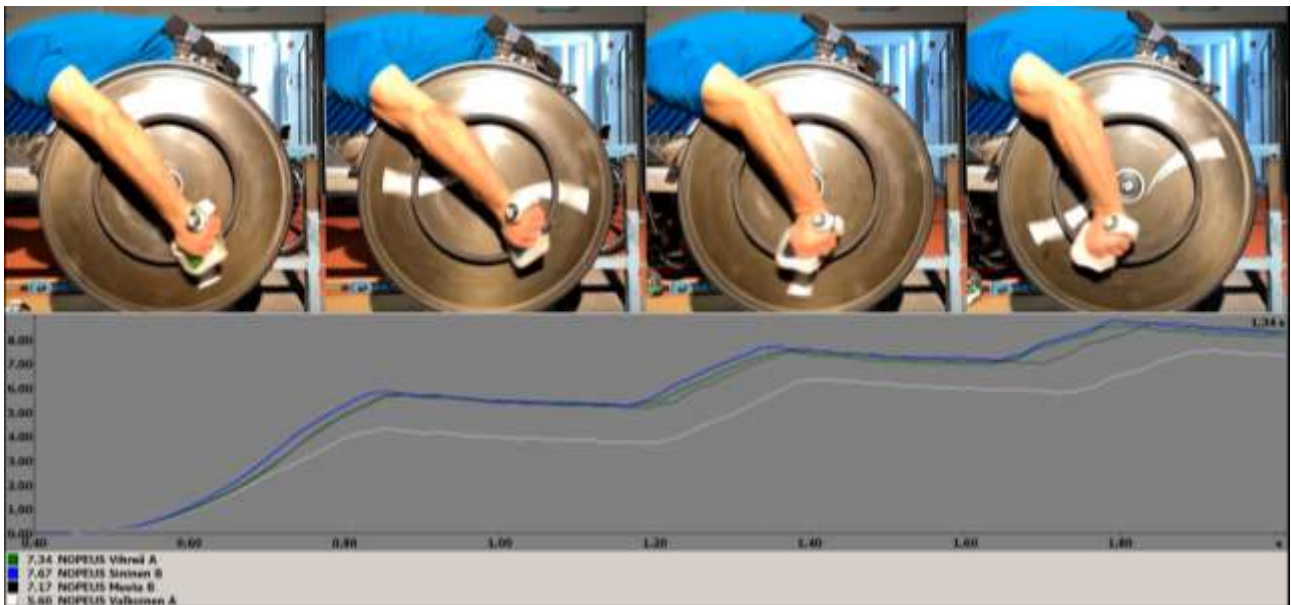


Kuvassa on renkaan kulmanopeusanturin datasta laskettu eteenpäin suuntautuva kelaustuolin nopeus. Vihreiden kapuloiden kelausfrekvenssi vaikutti olevan muita kapuloita suurempi, mikä vaikuttaa tuolin nopeuteen positiivisesti.

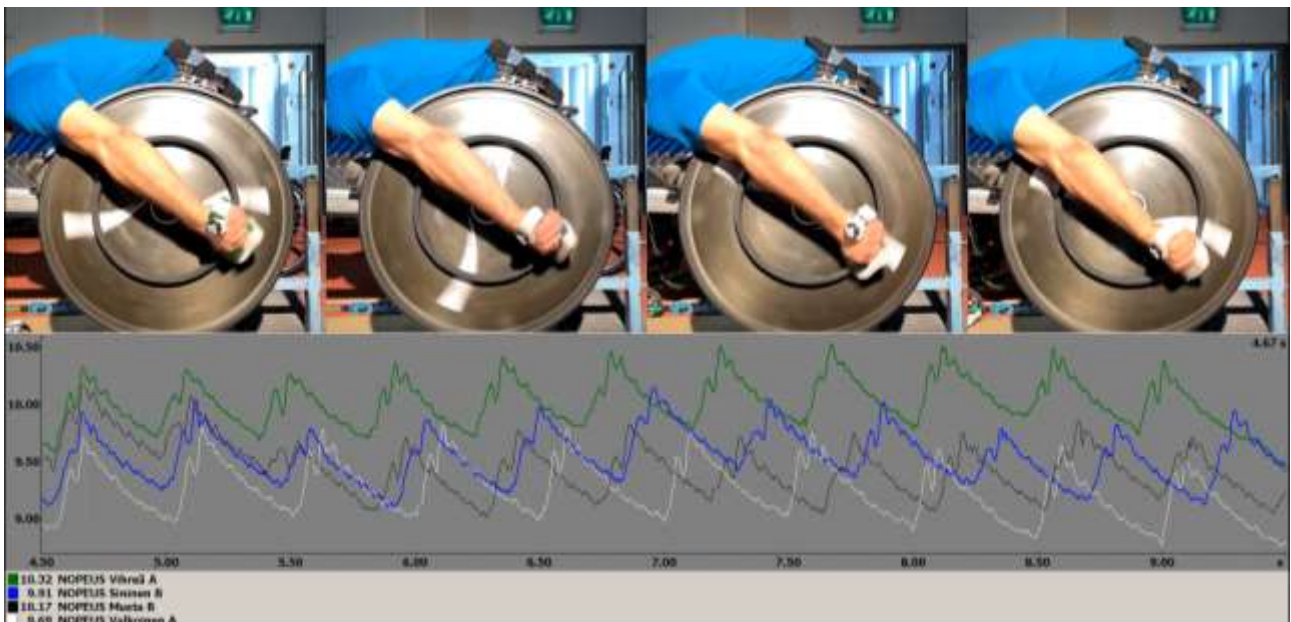


Kuvassa ei kelauskapuloiden huippunopeudet, kun rullilla kelattiin 60 metriä. Valkoisten kapuloiden pinnan hajoaminen selittää muita selvästi alhaisemmat nopeudet. Päälystämällä kyseiset kumimaiset kapulat ns. normaaleilla materiaaleilla, kapulan elastisuuden vaikutuksesta kelaustuolin nopeuteen saataisiin totuudenmukaisempi kuva.

Eri laisten kapuloiden käyttäytymistä kelauksen voimantuoton aikana kuvattiin Applen iPhoneella (240 Hz) ja NAC:n suurnopeuskameroilla (1000Hz). Suurnopeusvideot ja iPhoneen videomateriaalista tehdyt videokoosteet löytyvät osoitteesta: <https://kihu.kuvat.fi/i/uXfwgCmWGBV5qUrsAQYyFdt7MxaN8K4j>. Videokoosteiden avulla havainnollistettiin eri kapuloiden välisiä nopeuseroja ja helpotettiin IMU-antureiden antamien mittasignaalien tulkintaa.

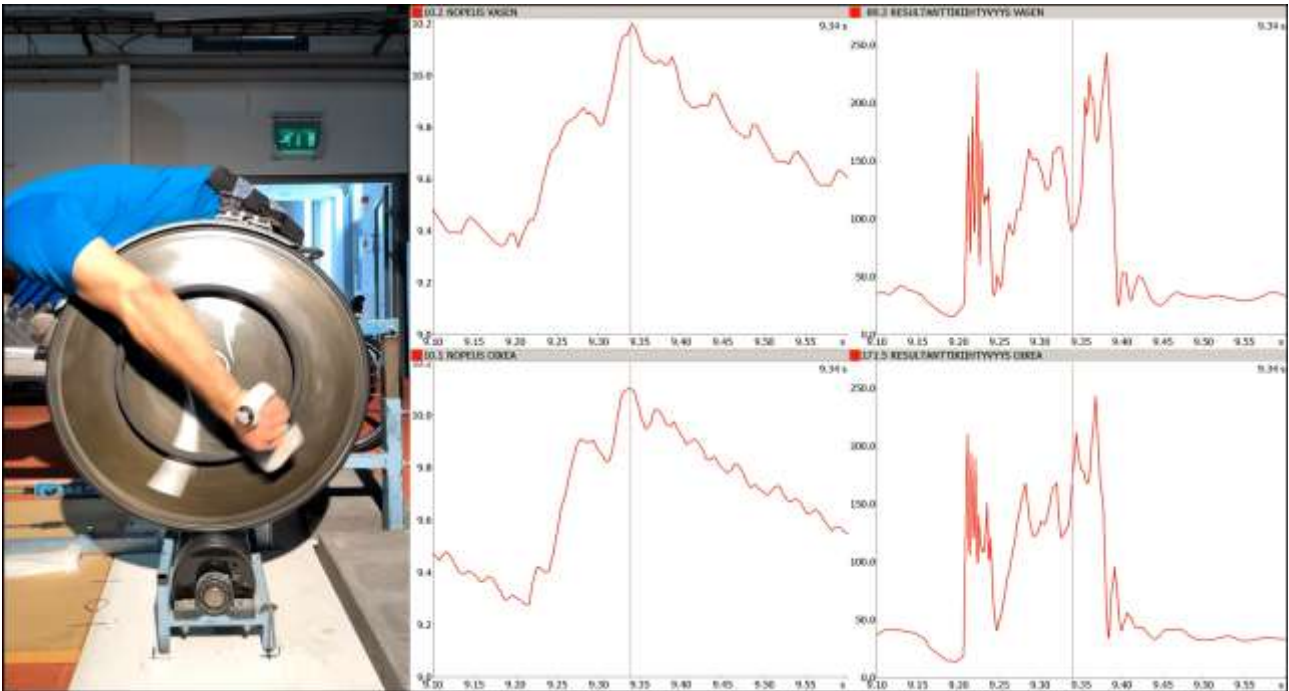


Kuvakaappaus videosta, joka havainnollistaa eri kapuloiden väliset nopeuserot alkukiihdytyksessä.



Eri kapuloiden väliset nopeuserot maksiminopeusvaiheessa. Vihreän kapulan tuottama maksiminopeus oli muita kapuloita suurempaa ja heikoimmat huippunopeudet tuottivat musta ja valkoinen kapula.





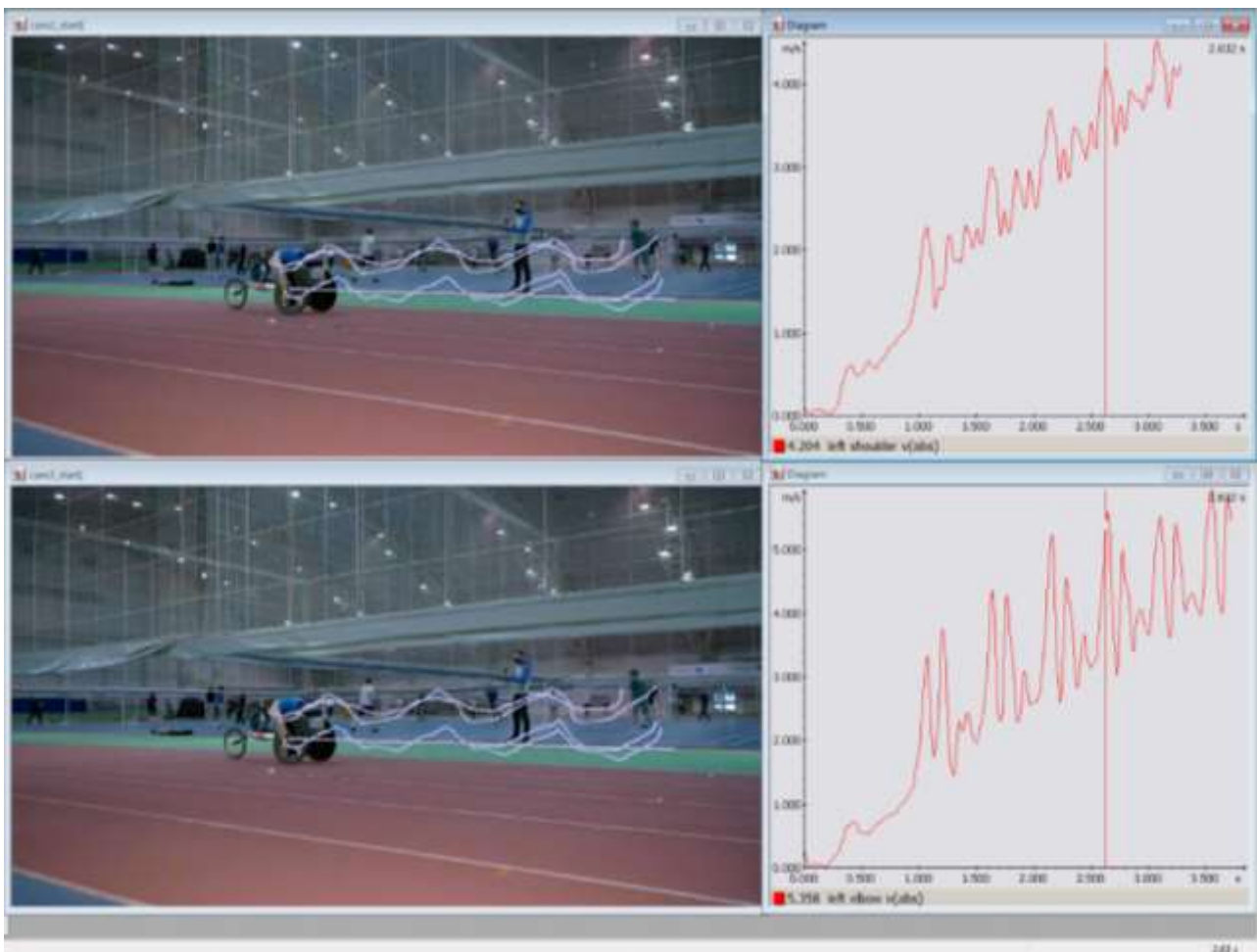
Kuvassa oikean ja vasemman puolen renkaiden nopeudet ja kapuloiden kiihtyvyydet yhden kelaussyklin aikana. Työnnön voimantuotto oli yhden syklin sisällä kaksihuippuinen, mutta nopeus- ja ajoituserot eri puolten välillä olivat pienet. Ensimmäinen huippu johtui ylävartalon alaspäin ja kyynärnivelen suoristumisen tuottamista voimista ja toinen kapulan avulla tehtävästä "loppuvipistä". Hetkellinen katkos kiihtyvyyden ja nopeuden kehittämisessä piikkien välissä johtui puolestaan todennäköisesti siitä, että voimantuotossa käytettävät lihakset vaihtuvat, jolloin keskushermosto vaatii oman aikansa liikkeen koordinointiin ja/tai liikkeeseen saadaan luonnollinen rytmisyys hyödyntäen lihas-jännekompleksin reflektorisia ominaisuuksia eli venymislyhenemissykliä.



Esimerkki suurnopeuskuvauksesta: kelauskapulan irtoamisasento ja -kohta työnnön lopussa.



Lähtökiihdytyksiä ja maksiminopeusvaiheita kuvattiin neljällä suurnopeuskameralla (Panasonic Lumix-GH5, 100Hz) ja kuvatuista videoista tehtiin 3D-liikeanalyysit. Liikeanalyysien tavoitteena oli testikelaajan oman mielenkiinnon lisäksi kerätä dataa Lappeenrannan teknisen yliopiston mahdollisia simulaatiomallinnuksia varten. Liikeanalyysissä heijastemarkkerit kiinnitettiin molempiin olka- ja kyynärpäihin, ranteeseen ja käteen sekä molempiin kelaustuolin taka-akselin päihin. Liikeanalyysin avulla saatiin selvitettyä kyseisten pisteiden paikkakoordinaatit, joiden avulla voidaan tarvittaessa määrittää mm. yksittäisten markkeripisteiden tai pisteryhmien kiihtyvyyksiä, nopeuksia ja nivelkulmia. Liikeanalyysit eivät sisällyneet varsinaiseen projektisuunnitelmaan ja niiden osalta analyysit ovatkin vielä tätä loppuraporttia koostettaessa kesken. Näitä analyysijä jatketaan KIHUn ja LUT:n yhteistyönä syksyllä 2022.



**Kuvakaappaus liikeanalyysistä: videoikkunoissa vasemmalla ylävartalon nivelpisteiden radat ja viivagraafissa oikealla vasemman olkapään (ylempi graafi) ja kyynärpään (alempi graafi) nopeusvaihtelut lähtökiihdytyksessä.**

Movesense -mittausten kaikki nopeusarvot laskettiin tutkakompensoidusta datasta. Tutkamittausten aikana suoritukset kuvattiin myös 360-kameralla, joka oli kiinnitettynä kelaajan kypärään. 360-video, jossa kuvakulmaa voi itse kääntää, löytyy täältä: <https://www.youtube.com/watch?v=q1j9dvJ-Ee0>

## YHTEENVETO PROJEKTISTA

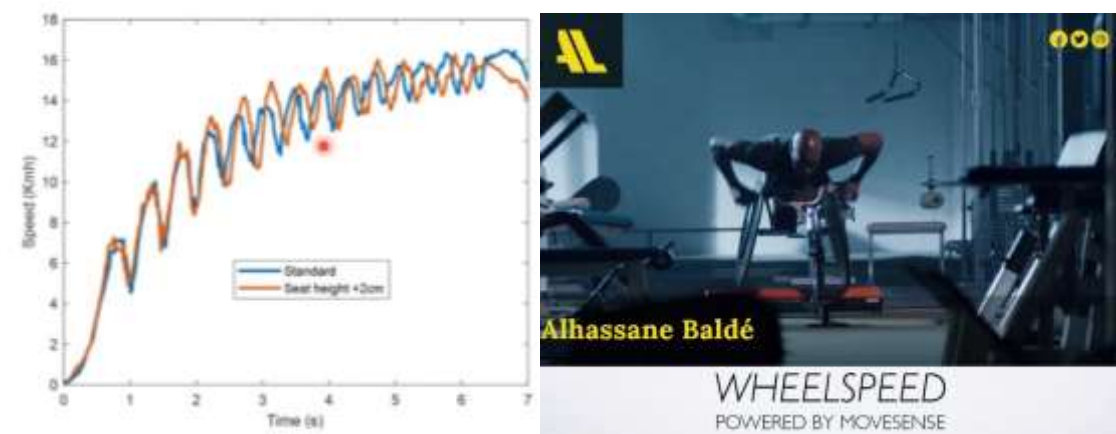
Muuttujien mittaaminen Movesensellä osoittautui toimivaksi konseptiksi. Manuaalinen datan analysointi ja mittaus onnistui jo siten, että antureiden avulla tehtävät analyysit voidaan tehdä vähintään erikseen sovittavina testauspäivinä. Aktiivinen päivittäisharjoittelukäyttö on myös lähtökohtaisesti mahdollista, mutta siihen pääseminen vaatii ensin kiinnostavien ja suorituskyvyn edistämistä hyödyttävien tietojen tarkkaa määrittämistä ja automaattisesti toimivan mittausohjelman kehittämistä.

Movesensellä mitatusta datasta voidaan yksinkertaisilla toimenpiteillä tunnistaa kelausfrekvenssi, ohilyöntien määrä, syklikohtainen nopeuden muutos, iskujen ajoituksen- ja nopeuden puolierot, eli kuinka suoraan kelaustuoli kulkee. Kelausasennon muutosten vaikutus on mahdollista todeta lasketuista nopeuskäyristä. Myös kelauskapuloiden välisiä eroja on mahdollista selvittää, mikäli mittauksia tehdään riittäviä määriä. Tarkkojen väliaikojen mittaamiseen Movesense ei ole optimaalinen, koska kelaustuolin mutkittelu ja haasteet renkaan säteen määrittelyssä estävät tarkat etäisyysmittaukset. Eri tavoilla tehtyjen suoritusten vertailu keskenään on kuitenkin jokseenkin mahdollista, myös ilman nopeuksien tutkakompensointia. Mikäli kuitenkin tahdotaan maksimaalista tarkkuutta, on tutkamittaukset tehtävä yhdessä Movesense -mittauksien kanssa.

Projektin aikana selvisi myös muiden maiden käyttävän Movesenseä lähes samanlaisilla lähestymistavoilla kuin mitä tässä projektissa kokeiltiin. Tekninen korkeakoulu Delftissä Hollannissa käyttää samoja antureita useiden pyörätuolilajien tutkimiseen ja mittaamiseen. Tietoa heidän työstään ja projekteista löytyy osoitteesta <http://www.wheelpower.online/>. Yhteistyön aloittaminen heidän kanssaan olisi suomalaisen Paraurheilun kehittämisen näkökulmasta katsottuna erittäin suositeltavaa.



Kuvakaappauksia TU Delftin esityksestä ISBS MYS 2022-videosta ([youtu.be/7IVke8hSHuQ](https://youtu.be/7IVke8hSHuQ))



Movesensellä mitattu nopeusdata voi selkeydellään auttaa optimoimaan kelausasentoa ja -välineitä (kuvassa pyörätuolirugby). Muutokset nopeudessa ovat selkeästi tulkittavia. TU Delftin WMPM app:in lisäksi on olemassa ainakin Kaasa Solutionsin kehittämä Wheelspeed.