



Pro gradu -tutkielma  
Fysiikan opettajan suuntautumisvaihtoehto

KIIHTYVYYSSANTURIN KÄYTTÄMINEN KIIHTYVYYTTÄ KOSKEVIEN  
ENNAKKOKÄSITYKSIEN MUOKKAAMISEEN LUKION FYSIIKAN OPETUKSESSA

Suvi-Maria Hautala

1.12.2017

Ohjaaja: Ari Hämäläinen

Tarkastajat: Ari Hämäläinen ja  
Ismo Koponen

HELSINGIN YLIOPISTO  
FYSIIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)  
00014 Helsingin yliopisto



HELSINGIN YLIOPISTO  
HELSINGFORS UNIVERSITET  
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA  
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN  
FACULTY OF SCIENCE

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| Tiedekunta – Fakultet – Faculty<br>Matemaattis-Luonnontieteellinen  |  | Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme<br>Fysiikan opettaja |  |
| Tekijä – Författare – Author<br>Suvi-Maria Hautala  |  |  |  |
| Työn nimi – Arbetets titel – Title<br>Kiihtyvyyssanturin käyttäminen kiihtyvyyttä koskevien ennakkokäsityksien muokkaamiseen lukion fysiikan opetuksessa  |  |  |  |
| Työn laji – Arbetets art – Level<br>Pro gradu   | Aika – Datum – Month and year<br>1.12.2017 | Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages<br>54                                |  |
| <p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Kiihtyvyys on keskeinen suure fysiikan opiskelussa, mutta oppilailla on siihen liittyviä monia ennakkokäsityksiä. Ennakkokäsityksiä ei voi korjata ulkoapäin annetulla tiedolla, vaan oppilaiden on ensin ymmärrettävä, että heidän käsityksensä ovat virheellisiä. Ennakkokäsitykset onkin huomioitava opetusta suunniteltaessa.</p> <p>Tämän työn yhtenä tavoitteena on esitellä kokeita, joissa kiihtyvyyttä havainnollistetaan kiihtyvyyssanturilla ja joita voi mahdollisesti käyttää kiihtyvyyteen liittyvien ennakkokäsitysten korjaamiseen. Kokeiden todellista vaikutusta ei tässä työssä testata. Kaikissa töissä käytetään kiihtyvyyden mittaamiseen Vernierin valmistamaa WDSS-anturia, jolla voi mitata voimaa, korkeutta ja kiihtyvyyttä kolmeen suuntaan. Kokeet tehdään myös ultraääni- tai voima-anturilla, jonka jälkeen pohditaan, toiko kiihtyvyyssanturi näihin kokeisiin jotain uutta aiemmin käytettyihin antureihin verrattuna.</p> <p>Kokeissa, joissa ennakkokäsityksen perusteella ei ole kiihtyvyyttä, kiihtyvyyssanturi mahdollistaa kiihtyvyyden mittaamisen ja tuo niihin kokeisiin siten konkretiaa. Normaalikiihtyvyys on esimerkiksi aiemmin mitattu voiman kautta, mutta kiihtyvyyssanturilla sitä pystytään mittaamaan suoraan. Kokeita tehtäessä havaitaan myös, ettei kiihtyvyyssanturilla voi tehdä kokeita, joissa anturin kallistuskulma suhteessa pystysuoraan muuttuu. Käytetyn kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate on sellainen, ettei se tee eroa kiihtyvyyden ja gravitaation kiihtyvyyden suuntaisen komponentin välille.</p> |  |  |  |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords<br>Ennakkokäsitykset, kiihtyvyys, lukio, WDSS, kiihtyvyyssanturi  |  |  |  |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited<br>Kumpulan tiedekirjasto  |  |  |  |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information   |  |  |  |

# Sisällys

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Johdanto .....                                  | 1  |
| 2.    | Tausta .....                                    | 2  |
| 2.1   | Ennakkokäsitykset .....                         | 2  |
| 2.1.1 | Mistä ennakkokäsitykset syntyvät? .....         | 2  |
| 2.1.2 | Ennakkokäsityksien seuraukset .....             | 4  |
| 2.2   | Kiihtyvyyteen liittyvät ennakkokäsitykset ..... | 5  |
| 2.2.1 | Kiihtyvyys ja voima .....                       | 5  |
| 2.2.2 | Kiihtyvyys ja nopeus .....                      | 6  |
| 2.2.3 | Kiihtyvyyden suunta .....                       | 7  |
| 2.2.4 | Kiihtyvyys ympyräradalla .....                  | 9  |
| 2.3   | Kiihtyvyys lukio-opetuksessa .....              | 10 |
| 2.3.1 | Lukion opetussuunnitelman perusteet .....       | 10 |
| 2.3.2 | Ylioppilaskokeet .....                          | 11 |
| 3.    | Tutkimuskysymykset .....                        | 11 |
| 4.    | WDSS-anturi .....                               | 12 |
| 4.1   | Anturin käyttäminen .....                       | 12 |
| 4.2   | Anturien toimintaperiaate .....                 | 13 |
| 5.    | Kokeet .....                                    | 13 |
| 5.1   | Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä .....     | 14 |
| 5.2   | Kahdella anturilla tehdyt kokeet .....          | 17 |
| 5.2.1 | Vaunun kiihdytys punnuksella .....              | 17 |
| 5.2.2 | Vaunu rampilla .....                            | 21 |
| 5.3   | Kiihtyvyyssanturilla tehtävät kokeet .....      | 22 |
| 5.3.1 | Laudan tönäisy .....                            | 23 |
| 5.3.2 | Punnuksen nosto .....                           | 24 |
| 5.3.3 | Hissin kiihtyvyys .....                         | 26 |
| 5.3.4 | Normaalikiihtyvyys .....                        | 28 |
| 5.3.5 | Benjihyppääjä .....                             | 35 |
| 5.3.6 | Heiluri .....                                   | 37 |
| 6.    | Ennakkokäsitykset ja kokeet .....               | 40 |
| 6.1   | Kiihtyvyys ja voima .....                       | 40 |
| 6.2   | Kiihtyvyys ja nopeus .....                      | 40 |
| 6.3   | Kiihtyvyyden suunta .....                       | 41 |
| 6.4   | Kiihtyvyys ympyräradalla .....                  | 41 |
| 7.    | Pohdinta .....                                  | 42 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 7.1  | Yleiset huomiot kokeiden tekemisestä.....  | 42 |
| 7.2  | Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä..... | 43 |
| 7.3  | Vaunun kiihdytys punnuksella.....          | 43 |
| 7.4  | Vaunu rampilla .....                       | 44 |
| 7.5  | Laudan tönäisy.....                        | 45 |
| 7.6  | Punnuksen nosto .....                      | 46 |
| 7.7  | Hissin kiihtyvyys.....                     | 46 |
| 7.8  | Normaalikiihtyvyys .....                   | 47 |
| 7.9  | Benjihyppääjä .....                        | 47 |
| 7.10 | Heiluri.....                               | 48 |
| 8.   | Johtopäätökset.....                        | 48 |
|      | Lähteet.....                               | 51 |

# 1. Johdanto

Kiihtyvyys on keskeinen suure fysiikassa, mutta oppilailla on siihen liittyviä monia ennakkokäsityksiä ja vaikeuksia. Jo kiihtyvyyden syy on yleisen ennakkokäsityksen mukaan muuttuva voima eikä vakiovoima. Myös kiihtyvyyden määritelmä tuottaa oppilaille vaikeuksia, sillä usein he laskevat kiihtyvyyden kappaleen hetkellisestä tai loppunopeudesta eivätkä nopeuden muutoksesta. Näiden lisäksi kiihtyvyyteen liittyy paljon muitakin ennakkokäsityksiä, jotka ovat ainakin osittain virheellisiä. (Halloun & Hestenes 1985a; Thornton & Sokoloff 1997; Trowbridge & McDermott 1981) Taustassa käsitelläänkin ensiksi ennakkokäsityksiä yleisesti ja sen jälkeen tarkemmin kiihtyvyyteen liittyviä ennakkokäsityksiä.

Kiihtyvyys on keskeinen osa myös lukion fysiikan oppimäärää, sillä lukion opetussuunnitelman perusteiden mukaan sitä pitää käsitellä kolmella kurssilla seitsemästä. Lukion opetussuunnitelman perusteiden lisäksi lukion opetusta ohjaavat ylioppilaskokeet, jotka muuttuvat fysiikan osalta sähköisiksi syksyllä 2018. Opiskelijat ovat tällöin saamassa käyttöönsä LoggerPron kuvaajien tulkintaa varten (Digabi 2017). Sen takia LoggerPron käyttöä on syytä harjoitella kaikilla fysiikan kursseilla, jotta se olisi koetilanteessa luontevaa. Tämän työn kaikissa kokeissa on käytetty Vernierin mittausantureita ja LoggerProta tulosten käsittelyyn monipuolisesti.

Välineiden käytön opettelu ei kuitenkaan saa olla pääasia kokeissa, vaan pääpainon on oltava opiskeltavassa asiassa. Siksi kiihtyvyyssanturin käyttömahdollisuuksia kokeissa tarkastellaankin siitä näkökulmasta, pystyttäisiinkö kiihtyvyyssanturin avulla muokkaamaan kiihtyvyyteen liittyviä ennakkokäsityksiä kohti tieteellistä tietoa. Aivan kaikkiin ennakkokäsityksiin ei voida näillä kokeilla vaikuttaa, mutta toisaalta joihinkin ennakkokäsityksiin pystytään vaikuttamaan usealla kokeella ja toisaalta yksi koe voi mahdollisesti korjata monia ennakkokäsityksiä. Kokeiden todellista vaikutusta ennakkokäsityksiin ei testata, vaan tätä pohditaan vain teoreettisella tasolla ja kokeiden testaaminen jätetään mahdollisen jatkotutkimuksen aiheeksi.

Monesti lukion fysiikan tunneilla demonstraatioissa ja oppilastöissä käytetään kiihtyvyyden mallintamiseen ultraäänianturia, joka ei suoraan mittaa kappaleen kiihtyvyyttä vaan kappaleen paikkaa. Paikan muutoksesta LoggerPro laskee kappaleen hetkellisen nopeuden. Kappaleen kiihtyvyys nopeuden muutosnopeutena saadaan näkyviin graafisella derivoinnilla, mutta jos oppilailla on vaikeuksia erottaa nopeutta ja kiihtyvyyttä toisistaan, he eivät välttämättä ymmärrä, miksi näin tehtiin. Heidän voisikin olla helpompaa erottaa nopeus ja kiihtyvyys toisistaan, jos he näkisivät kiihtyvyyden vähän konkreettisemmin. Tämän työn yhtenä tavoitteena on tarjota opettajille kokeita, joissa kiihtyvyyttä havainnollistetaan kiihtyvyyssanturilla.

Kiihtyvyyssanturin hyötyjä pohditaan sekä kokeiden suorittamisen että ennakkokäsityksiin vaikuttamisen kannalta. Vertailu ultraääni- ja voima-anturin käyttöön vastaavissa kokeissa perustuu täysin kirjoittajan omiin pohdintoihin, eikä sen tarkoituksena ole laittaa antureita paremmuusjärjestykseen, vaan pohtia, tuoko

kiihtyvyyssanturi jotain uutta näihin kokeisiin. Kiihtyvyyssanturi tuo kokeisiin uusia haasteita, mutta myös uusia mahdollisuuksia, sillä esimerkiksi normaalikiihtyvyys pystytään mittaamaan suoraan eikä voiman kautta. Anturin langattomuus ja tiedon tallentamismahdollisuus eivät sido mittauksia vain oppilaitoksen tiloihin, vaan mittaukset voidaan laajentaa luokkahuoneen ulkopuolelle opiskelijoita kiinnostaviin ilmiöihin. Anturi voidaan kiinnittää esimerkiksi polkupyörän pinoihin. Moniin puhelimiin voi nykyään ladata melko hyvän kiihtyvyyssanturin sovelluksen, joten välttämättä tässä työssä käytettyä anturiakaan ei tarvita opiskelijoiden kiinnostuksen kohteiden mittauksiin.

## 2. Tausta

Lukiossa opetusta ohjaavat valtakunnalliselta tasolta lukion opetussuunnitelman perusteet (LOPS), joiden pohjalta kukin oppilaitos tekee omat opetussuunnitelmansa. Lukion opetussuunnitelman perusteissa fysiikan opetuksen lähtökohtina mainitaan muun muassa oppilaiden aikaisemmat tiedot, joita opetuksella pyritään ohjaamaan kohti luonnontieteellistä näkemystä (LOPS 2015). Monesti nämä aikaisemmat kokemukset ovat kuitenkin virheellisiä niin kutsuttuja ennakkokäsityksiä (esim. Ahtee 1998; Halloun & Hestenes 1985a).

### 2.1 Ennakkokäsitykset

Oppilaan aiempia tietoja saatetaan kutsua lähteestä riippuen ennakkokäsityksiksi, uskomuksiksi, vääriksi, vaihtoehtoiksi tai virheellisiksi käsityksiksi, mutta tässä työssä puhutaan selvyuden vuoksi vain ennakkokäsityksistä. Niillä tarkoitetaan oppilaiden aikaisempia tietoja ja taitoja kulloisestakin asiasta. Nämä tiedot ovat syntyneet aikaisempien kokemusten perusteella, ja ne ovat osittain tai täysin virheellisiä verrattuna tieteelliseen tietoon. (Ahtee 1998; Driver 1983; Leino 1994; Pehkonen 1994) Oppilaiden ennakkokäsitykset ovat usein pysyviä, ja ne toistuvat samoina vuodesta, tilanteesta ja oppilaasta toiseen (Chi, Slotta & de Leeuw 1994).

#### 2.1.1 Mistä ennakkokäsitykset syntyvät?

Oppilaiden ennakkokäsitykset ovat pysyvää ja omakohtaista, aikaisempiin kokemuksiin perustuvaa ja tiedostamatta muodostettua tietoa, joka ei muodostu objektiivisista havainnoista (Pehkonen 1994). Ennakkokäsitykset eivät synny virheellisistä havainnoista tai vääristä päätelmistä (Amin, Smith & Wiser 2014). Ne eivät myöskään ole väärin ymmärrettyä faktaa (Driver 1983), mutta niiden taustalla saattaa kuitenkin olla yleisesti tunnettuja faktoja, joista oppilas on tehnyt omasta mielestään loogisia päätelmiä (Pehkonen 1994). Monesti ennakkokäsitysten taustalla on oppilailla oleva malli tai viitekehys, joka eroaa vastaavasta tieteellisestä (Driver 1983). Usein oppilaiden aikaisemmat tiedot ovat kuitenkin kapea-alaisia ja ristiriidassa nykyisin hyväksytyyn tieteellisen tiedon kanssa (Ahtee 1998).

Oppilaat tulkitsevat havaintonsa ja arvioivat uudet ideat heillä ennestään olevien käsitysten ja tietojen pohjalta (Amin, Smith & Wiser 2014). Saadessaan uutta tietoa oppilaat pyrkivät löytämään siitä tuttuja piirteitä ja yhdistämään uuden tiedon aiempaan tietoonsa. Tällöin syntyvä tieto on monesti yhdistelmä oppilaan omien kokemusten tulkintaa ja tieteen antamaa selitystä. Osan vanhan ja uuden tiedon yhdistelmästä oppilaat hylkäävät pian saatuaan jälleen uutta tietoa, mutta osa tästä virheellisestä yhdistelmästä on paljon pysyvämpää (Ahtee 1992; Driver 1983; Rosenblatt, Sayre & Heckler 2009). On myös huomattava, ettei oppilailla ole syytä pohtia tietojensa oikeellisuutta, sillä niillä pärjää arjessa (Tynjälä 1999).

Oppitunneilla fysiikan ilmiöitä käsitellään monesti vain yhdestä näkökulmasta ja yhden kokeen avulla. Silloin mahdollisia selityksiä on useita ja luonnontieteellisen selityksen uskottavuus jää perustelematta. Oppilailla ei siis ole pätevää syytä muuttaa omaa käsitystään, vaan he pitävät kiinni omista uskomuksistaan. Toisin kuin tutkijoille, oppilaille riittää ensimmäinen tyydyttävä selitys, eivätkä he ole kiinnostuneita monipuolisista ja kaiken kattavista selityksistä. Oppilaat siis muodostavat käsityksensä ja muokkaavat ennakkokäsityksiään yhden kokeen perusteella, jolloin tieto sopii edelleen vain yhteen tilanteeseen. (Ahtee 1992; Driver 1983)

Joskus oppilaille saattaa syntyä ennakkokäsityksiä opettajan tai oppikirjan selityksistä varsinkin, jos nämä keskittyvät vain syyhyn ja sen seuraukseen. Tällöin oppilaille jää epäselväksi, miksi ja miten seuraukseen päädytään, ja he muodostavat omat tulkintansa. Jos oppilaita pyydetään vastaamaan tarkemmin, miten ilmiö tapahtui, heidän selityksensä on monilta osin virheellinen. He ovat esimerkiksi saattaneet ymmärtää perimmäisen syyn väärin tai he saattavat mieltää yhtä aikaa tapahtuvat asiat peräkkäin tapahtuviksi. (Chi 2005) Oppilaat saattavat myös selittää ilmiöitä ennakkokäsityksensä pohjalta, mutta käyttää selityksessään tieteellistä jargonia ja antaa siten virheellisen kuvan osaamisestaan (Halloun & Hestenes 1985b; Trowbridge & McDermott 1980).

Fysiikan opetuksessa havaintojen ja ilmiöiden kuvailuun käytetään yleiskieltä, joka pohjautuu arkiseen ja suoraan havaittavaan ympäristöön ja ohjaa oppilaan ajattelua ilmiöistä syntyviin suoriin mielikuviin ja edelleen ennakkokäsityksiin. Yleiskieli myös joissain tapauksissa entisestään vahvistaa ja tukee ennakkokäsityksiä. (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1998) Lisäksi yleiskieli on rajoittunutta tieteen kuvailun osalta ja sen takia oppilaiden voi olla vaikea ilmaista ajatuksiaan selkeästi ja tieteellisesti oikealla tavalla (Chi 2005).

Samoin kuin opettajan käyttämä kieli myös oppikirjojen teksti saattaa vahvistaa ennakkokäsityksiä. Yleensä luonnontieteiden oppikirjoissa ensimmäisenä on opetettavan asian määritelmä ja teksti jatkuu määritelmän erilaisilla täsmennyksillä. Oppikirjat ovat siis perinteisesti sitoutuneet teoreettiseen lähestymistapaan. (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio 1998) Joissain tapauksissa oppikirjat voivat esittää asioita ja ilmiöitä harhaanjohtavasti

tai puutteellisesti: ne eivät korjaa riittävän selkeästi oppilailla olevia ennakkokäsityksiä, vaan päinvastoin ne saattavat jopa aiheuttaa näitä (Chi 2005).

### 2.1.2 Ennakkokäsityksien seuraukset

Ennakkokäsitykset muodostavat aina pohjan tieteellisen tiedon oppimiselle, sillä tieteellistä ajattelua voidaan oppia vain muokkaamalla jo olemassa olevia käsityksiä (Halloun & Hestenes 1985a; Rusanen & Lappi 2014b). Ennakkokäsityksien avulla rakennetaan jäsentyneempiä ja yhä enemmän tieteellistä tietoa vastaavia käsityksiä. Kuitenkin ennakkokäsitykset usein haittaavat oppimista, sillä niiden pohjalta oppilaat saattavat tehdä virheellisiä tulkintoja opittavasta asiasta. (Rusanen & Lappi 2014b) Jos ennakkokäsitykset ovat vain pinnallisia ja heikkoja, niihin on melko helppo vaikuttaa opetuksella (Driver 1983).

Jos oppilas ei tiedosta omia ennakkokäsityksiään, hänen on vaikea ymmärtää niiden kanssa ristiriidassa olevaa tietoa. Tällöin oppiminen jää helposti pintapuoliseksi. Jos taas oppilas tiedostaa omien käsitystensä virheellisyyden, hän voi uuden tiedon avulla muuttaa käsityksiään. (Tynjälä 1999) Kuten aiemmin todettiin, oppilaat yhdistelevät aiempia tietojaan saamaansa uuteen tietoon. Niin kauan kuin uusi tieto hiljalleen korvaa virheelliset ennakkokäsitykset, yhdistelmätiedon muodostumisesta ei ole mitään haittaa. Joskus kuitenkin käy niin, että tiedot eivät yhdisty vaan oppilaalle muodostuu kaksi erilaista tietoa: virheellinen arkitieto ja tieteellinen tieto. (Ahtee 1998)

Arkitieto muodostuu arkikokemuksista, yksittäisistä ja konkreettisista havainnoista sekä vuorovaikutuksesta ympäristön kanssa (Rusanen & Lappi 2014a). Se syntyy arkikokemuksiin perustuvista yksityiskohtiin keskittyvistä tulkinnoista, ja siinä hyväksytään suuriakin epäloogisuuksia. Arkitietoon liittyvien sanojen merkitykset vaihtelevat kulttuurista ja sosiaalisista ryhmistä toiseen. (Ahtee 1998) Arkitiedon käsitteet ovat omaperäisiä, tilanteesta riippuvaisia, ja niillä on vaikea kommunikoida (Koponen & Kokkonen 2014).

Tieteellinen tieto on monitahoista, ja käsitteet ja niiden väliset riippuvuudet on määritelty täsmällisesti. Käsitteitä myös usein merkitään symboleilla, joten ne pätevät kaikissa tilanteissa ja noudattavat loogista järjestelmää. (Ahtee 1998) Käsitteet ovat abstrakteja, eikä niillä aina ole selvää vastinetta havaintotasolla, sillä tieteelliset käsitteet ovat oleellinen osa tieteellistä teoriaa ja ne saavat monesti lopullisen merkityksensä vasta teorian avulla (Rusanen & Lappi 2014a).

Koska tieteellinen tieto ja arkitieto ovat hyvin erilaisia, oppilaat joutuvat luonnontieteitä opiskellessaan tasapainoilemaan kahden erilaisen tiedon välillä. Oppilaat käyttävät tieteellistä tietoa vain oppitunneilla, mutta muualla käytetään edelleen arkitietoa, joka tuntuu loogisemmalta ja helpommalta. Opettaja käyttää perusteluissaan täsmällistä ja tieteellistä tietoa sekä odottaa samaa oppilailtaan. Oppilaat puolestaan osaavat ilmaista ajatuksiaan varsin huonosti luonnontieteen kielellä. (Ahtee 1998) Arkitiedon ja tieteellisen tiedon erojen vuoksi fysiikka voi tuntua oppilaasta epäloogiselta, ja siksi siihen liittyy paljon ulkoa opeteltavaa asiaa. Näidenkin seikkojen takia fysiikka voi tuntua vaikealta.



Ennakkokäsitykset ovat myös pysyviä, ja ne vaikuttavat oppilaiden ajatteluun joskus pitkänkin ajan jälkeen. Vaikka oppilaat ymmärtäisivät uuden opetetun asian, he saattavat silti käyttää perusteluissaan ennakkokäsityksiään vain vähän muokattuna. Fysiikan tehtävissä oppilaiden suurin ongelma ei yleensä liitykään laskujen vaikeuteen, vaan oppilaille on vaikeinta osata soveltaa oikeita periaatteita ja teorioita, joita kulloinkin tarvitaan tehtävän ratkaisemiseen. Monesti oppilaat myös palaavat käyttämään ennakkokäsityksiään kohdatessaan vähän erilaisen tilanteen, vaikka he olisivat oppineet ja ymmärtäneet tieteellisen selityksen asiasta. (Driver 1983)

Jos oppilaiden ennakkokäsitykset otetaan huomioon opetuksessa, oppiminen johtaa todennäköisemmin uuden asian kokonaisvaltaiseen ja vahvaan käsitteelliseen hallintaan. Jos taas opetus on vain tiedon siirtämistä, oppilas ei muokkaa ennakkokäsityksiään vaan tyytyy opettelemaan asiat ulkoa. Tiedosta tulee pirstaleista ja hajanaista ulkoa opetteluun perustuvaa oppimista. (Ahtee 1998; Rusanen & Lappi 2014a) On hyvä muistaa, että tieteellisten käsitteiden oppiminen on pitkä ja vaativa prosessi, jonka aikana oppilaan ennakkokäsitykset hiljalleen muokkautuvat hiljalleen tieteellisiksi käsitteiksi (Koponen & Kokkonen 2014).

## 2.2 Kiihtyvyyteen liittyvät ennakkokäsitykset

Monien kiihtyvyyteen liittyvien ennakkokäsitysten taustalla on jokin nopeuteen liittyvä ennakkokäsitys. Monet oppilaat esimerkiksi ajattelevat voimaa tarvittavan liikkeen ylläpitämiseen (Clement 1982; Galili & Bar 1992; Halloun & Hestenes 1985a), joten looginen seuraus tästä on, että liikkeen muuttaminen vaatii muuttuvan voiman (Sadanand & Kess 1990; Thornton & Sokoloff 1997). Lisäksi oppilaiden vaikeudet funktioiden ja niiden derivaattojen kuvaajien tulkinnoissa vaikeuttavat kiihtyvyyden ymmärtämistä ja aiheuttavat ennakkokäsityksiä (Beichner 1994; McDermott, Rosenquist & van Zee 1987; Nemirovsky & Rubin 1992). Kiihtyvyyteen liittyvät vaikeudet ja ennakkokäsitykset heijastuvat muuhunkin mekaniikan opiskeluun voiman kautta.

### 2.2.1 Kiihtyvyys ja voima

Yleisen ennakkokäsityksen mukaan tasainen kiihtyvyys vaatii muuttuvan voiman. Sen taustalla on hyvin pysyvä ja yleisin nopeuteen liittyvä ennakkokäsitys, jonka mukaan tasainen nopeus vaatii vakiovoiman. (Clement 1982; Gunstone 1984; Halloun & Hestenes 1985a; Liu & Fang 2016; Sadanand & Kess 1990; Thornton & Sokoloff 1997; Whitaker 1982) Saman ennakkokäsityksen mukaan kappaleen nopeus hidastuu ja kappale lopulta pysähtyy, jos kappaleeseen vaikuttavien voimien summa on nolla (Halloun & Hestenes 1985a).

Liikettä ylläpitävä voima nimetään joskus impetus-voimaksi. Kappaleen ajatellaan liikkuvan niin kauan kunnes impetus-voima on kulunut loppuun, jonka jälkeen liike hidastuu ja pysähtyy. Esimerkiksi heitetyn pallon ajatellaan lentävän heittökädestä siirtyneen impetuksen avulla jonkin aikaa, ja kun impetus loppuu, pallo putoaa gravitaation takia. (Halloun & Hestenes 1985a)

Liike vaatii voiman -ennakkokäsitys pohjautuu arkipäivän liikkumisesta tehtyihin havaintoihin, joissa kitka vastustaa liikettä, joten voima tarvitaan tasaisen nopeuden ylläpitämiseen. Oppilaat eivät kuitenkaan joko ymmärrä kitkaa olevan olemassa tai eivät miellä kitkaa voimaksi (Clement 1982). Monissa fysiikan tehtävissä kitkaa ei tarvitse huomioida, joten fysiikan tehtävät ovat hyvin erilaisia kuin arkipäivän tilanteet. Jos kitkan vaikutusta arkipäivän liikkumiseen ei käsitellä tarpeeksi hyvin, oppilailla ei ole syytä muuttaa ennakkokäsitystään. (Sadanand & Kess 1990)

Liike vaatii voiman -ennakkokäsitys haittaa kiihtyvyyden ymmärtämistä, sillä sen seurauksena oppilailla on ennakkokäsitys, jonka mukaan kiihtyvyys vaatii kasvavan voiman. Oppilaiden ennakkokäsityksen mukaan voima on siis verrannollinen nopeuteen eikä kiihtyvyyteen (Halloun & Hestenes 1985; Sadanand & Kess 1990; Rosenblatt ym. 2008; Thornton & Sokoloff 1997).

Nopeuden ja voiman virheellisen verrannollisuuden takia Newtonin toisen lain  $F = ma$  ymmärtäminen on vaikeaa, koska laki on vahvasti oppilaiden ennakkokäsitystä vastaan. Lisäksi liike vaatii voiman -ennakkokäsitys sopii moneen erilaiseen tilanteeseen, joten sen muokkaaminen tieteellistä tietoa vastaavaksi vaatii paljon töitä. (Clement 1982) Vaikka oppilaat olisivat ymmärtäneet ennakkokäsityksensä olevan väärässä jossain tilanteessa, he palaavat helposti käyttämään ennakkokäsitystään, jos tilanne on vähänkin erilainen (Driver 1983).

Kiihtyvyyden ja voiman verrannollisuuden ymmärtäminen ei kuitenkaan aina riitä, vaan oppilaille saattaa muodostua kiihtyvyyden ja voiman verrannollisuuteen liittyviä uusia ennakkokäsityksiä. He saattavat ajatella, että voima kiihdyttää kappaletta vain tiettyyn rajaan, niin kutsuttuun kriittiseen nopeuteen, asti, jonka jälkeen kappale jatkaa vakio nopeudella siihen vaikuttavasta voimasta riippumatta (Halloun & Hestenes 1985a). Oppilailla saattaa joskus myös olla ennakkokäsitys, jonka mukaan kiihtyvyys on voiman lisäksi verrannollinen kuljettuun matkaan (Halloun & Hestenes 1985a).

### 2.2.2 Kiihtyvyys ja nopeus

Usein oppilailla on vaikeuksia erottaa paikkaa ja nopeutta toisistaan ja he ajattelevat kappaleilla olevan saman nopeuden, jos ne ovat samassa paikassa (Halloun & Hestenes 1985a; Trowbridge & McDermott 1980; Whitaker 1982). Tämä tietenkin hankaloittaa kiihtyvyyden oppimista, ja oppilaat sekoittavatkin myös nopeuden ja kiihtyvyyden (Trowbridge & McDermott 1981; Whitaker 1982). Näiden seikkojen takia oppilailla on ennakkokäsitys, jonka mukaan kappaleilla on sama kiihtyvyys, jos ne ovat samassa paikassa tai niillä on sama nopeus (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987; Trowbridge & McDermott 1981). Oppilailla on ylipäänsä vaikeuksia erottaa termejä paikka, nopeus ja kiihtyvyys toisistaan ja käyttää niitä täsmällisesti (Trowbridge & McDermott 1980, 1981; Whitaker 1982).

Kiihtyvyys on abstrakti suure, joten sen määritelmä tuottaa vaikeuksia oppilaille. Suurin osa oppilaista osaa opetuksen jälkeen selittää kiihtyvyyden määritelmän, mutta he eivät silti osaa soveltaa sitä laskuihin tai

kahden kappaleen kiihtyvyyksien vertailuun. Oppilaat eivät ymmärrä, että kiihtyvyys on vauhdin muutosnopeus. Hyvin yleinen virhe kiihtyvyyttä laskettaessa on käyttää kappaleen nopeuden muutoksen sijaan sen hetkellistä tai loppunopeutta. (Trowbridge & McDermott 1981)

Oppilaiden vaikeudet soveltaa kiihtyvyyden määritelmää heijastuvat myös kiihtyvyyksien vertailuun. He saattavat sitä varten vertailla kappaleiden hetkellisiä, keskimääräisiä tai loppunopeuksia, mikä viittaa siihen, että näiden käsitteiden erot eivät ole heille selviä (Trowbridge & McDermott 1981). Kahden kappaleen nopeuksia vertailtaessa monet oppilaat ajattelevat, että edellä olevan kappaleen nopeus on suurempi (Trowbridge & McDermott 1980). Koska heillä on vaikeuksia erottaa nopeutta ja kiihtyvyyttä, heidän ennakkokäsityksensä mukaan on edellä olevalla kappaleella suurempi kiihtyvyys, ja siten toisaalta ohittavan kappaleen kiihtyvyyden on oltava suurempi. Jotkut saattavat vertailla kappaleiden kulkemia matkoja ja väittää, että samassa ajassa pisimmän matkan kulkeneella kappaleella on suurin kiihtyvyys. (Trowbridge & McDermott 1981)

Kuvaajien piirtäminen ja tulkinta on oleellinen osa fysiikan opiskelua, mutta varsinkin kuvaajien tulkinta on oppilaille vaikeaa. Eniten ongelmia aiheuttavat kulmakertoimen laskeminen ja kuvaajasta toiseen siirtyminen graafisen derivoinnin ja integroinnin avulla. Nämä ongelmat hankaloittavat myös kiihtyvyyden opiskelua ja voivat aiheuttaa ennakkokäsityksiä (Beichner 1994; Hale 1996). Vaikka oppilaat tietäisivät, mitä kulmakerroin kuvaa, he eivät kuitenkaan käytä sitä suureiden laskemiseen tai vertailuun (Hale 1996). Oppilaille on myös vaikeuksia ylipäänsä erottaa toisistaan paikan, nopeuden ja kiihtyvyyden kuvaajia (Hale 1996; McDermott, Rosenquist & van Zee 1987).

Lisäksi graafinen integrointi, erityisesti nopeuden laskeminen kiihtyvyyden kuvaajasta, saattaa tuottaa osalle oppilaista ongelmia (Beichner 1994; Hale 1996; McDermott, Rosenquist & van Zee 1987). Graafiseen integrointiin liittyvät vaikeudet johtuvat yleensä siitä, että oppilas ei ymmärrä, mitä kuvaajan ja x-akselin välinen pinta-ala kuvaa (Hale 1996). Joskus oppilaat laskevat kuvaajan ja koordinaatiston alareunan välisen pinta-alan ja jättävät x-akselin huomioimatta. Heille ei siis ole selvää, että x-akseli erottaa toisistaan positiiviset ja negatiiviset alueet. Oppilaat eivät ymmärrä, että esimerkiksi  $(t,v)$ -kuvaajalla x-akselin yläpuolelle olevalla alueella kappale liikkuu positiiviseen suuntaan ja x-akselin alapuolella negatiiviseen suuntaan. (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987)

### 2.2.3 Kiihtyvyyden suunta

Kiihtyvyyteen liittyvistä ennakkokäsityksistä yleisimmän mukaan kiihtyvyyden merkki on aina sama kuin nopeuden merkki, jolloin negatiivinen kiihtyvyys tarkoittaa hidastuvaa liikettä (Hale 1996; Liu & Fang 2016; McDermott, Rosenquist & van Zee 1987; Rosenblatt ym. 2008). Ennakkokäsitykset sopivat usein vain yhteen tilanteeseen, joten tässäkin tapauksessa oppilaan vastaus riippuu jonkin verran esitetystä tilanteesta. Joissain tilanteissa nopeus ja kiihtyvyys voivat olla myös vastakkaisuuntaiset (Rosenblatt, Sayre & Heckler 2009;

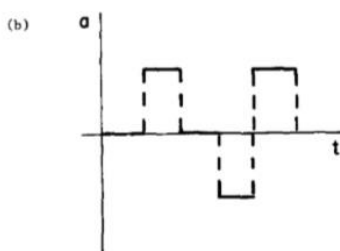
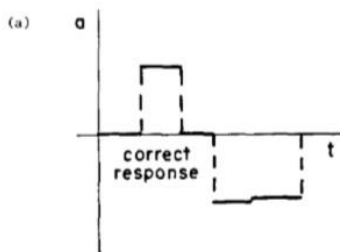
Rosenblatt ym. 2008). Joskus myös kokonaisvoima ja kiihtyvyys voivat olla oppilaiden mielestä vastakkaisiin suuntiin (Searle 1985).

Vaikeimpia liikkeeseen liittyvistä tehtävistä oppilaille ovat sellaiset tilanteet, joissa kiihtyvyys pysyy vakiona, mutta nopeuden merkki muuttuu (Trowbridge & McDermott 1981). Tällöin he tekevät virheitä jo nopeuden merkinkin suhteen (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987). Esimerkiksi tilanteessa, jossa vaunu kulkee ylämäkeen, vaihtaa suuntaa ja palaa takaisin alas, oppilaat yleensä ajattelevat kiihtyvyyden olevan nolla kääntopisteessä ja sekä nopeuden että kiihtyvyyden vaihtavan siellä merkkiä. (Trowbridge & McDermott 1981)

Jos sekä nopeuden että kiihtyvyyden merkki muuttuvat, hyvin harvat osaavat merkitä kummankin merkit oikein. Kuvan 1 tilanteessa pallo lähtee liikkeelle tasaisella nopeudella, vierii alas ramppia, kulkee tasaisella nopeudella hetken aikaa, nousee ylös oikeanpuoleista ramppia, vaihtaa suuntaa ja vierii takaisin alas. Tällöin vaunun kiihtyvyys on vasemmalla rampilla positiivinen ja oikealla rampilla koko matkan negatiivinen. Kuvassa 2 on esitetty oikein hahmoteltu  $(t,a)$ -kuvaaja sekä oppilaiden yleisimmin piirtämä kiihtyvyyden kuvaaja. Oppilaiden yleisin virhe on piirtää kiihtyvyyden muuttuvan merkkiä myös pallon muuttaessa suuntaa oikeanpuoleisen rampin yläpäässä. (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987)



Kuva 1: Pallo vierii alas ramppia, kulkee hetken tasaisella nopeudella, nousee ylös toista ramppia, kääntyy ja vierii takaisin alas (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987).



Kuva 2: Yllä oikein piirretty  $(t,a)$ -kuvaaja kuvan 1 tilanteeseen. Alla tyypillinen oppilaiden piirtämä  $(t,a)$ -kuvaaja samaan tilanteeseen (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987).

#### 2.2.4 Kiihtyvyys ympyräradalla

Ympyräliike on fysiikan aihealueista vaikeimpia oppilaille (Finley 1982; Gardner 1984; Searle 1985), ja siksi siihen liittyy monenlaisia ennakkokäsityksiä. Harvat osaavat esimerkiksi piirtää oikein kappaleeseen vaikuttavia voimia. Yleensä oppilaat piirtävät ylimääräisiksi voimiksi kappaleesta ulospäin osoittavan keskipakoisvoiman (Gardner 1984; Gunstone 1984; Searle 1985) tai liikkeen suuntaan olevan voiman kuten lineaarisessakin liikkeessä (Clement 1982).

Termi kokonaisvoima on monille oppilaille vaikea lineaarisessakin liikkeessä, joten ympyräliikkeessä hyvin harvat osaavat merkitä kokonaisvoiman oikein. Monilla oppilailla on ennakkokäsitys, jonka mukaan tasaisessa ympyräliikkeessä on tasapainotila, jossa kokonaisvoima on nolla. (Searle 1985) Tämän ennakkokäsityksen taustalla on luultavasti Newtonin ensimmäisen lain avulla tehty päätelmä, että vakionopeudella liikkuvaan kappaleeseen vaikuttavan kokonaisvoiman täytyy aina olla nolla (Gardner 1984). Tämän seurauksena oppilaiden ennakkokäsityksen mukaan ympyräradalla tasaisella nopeudella liikkuvalla kappaleella ei ole kiihtyvyyttä (Gardner 1984; López 2003).

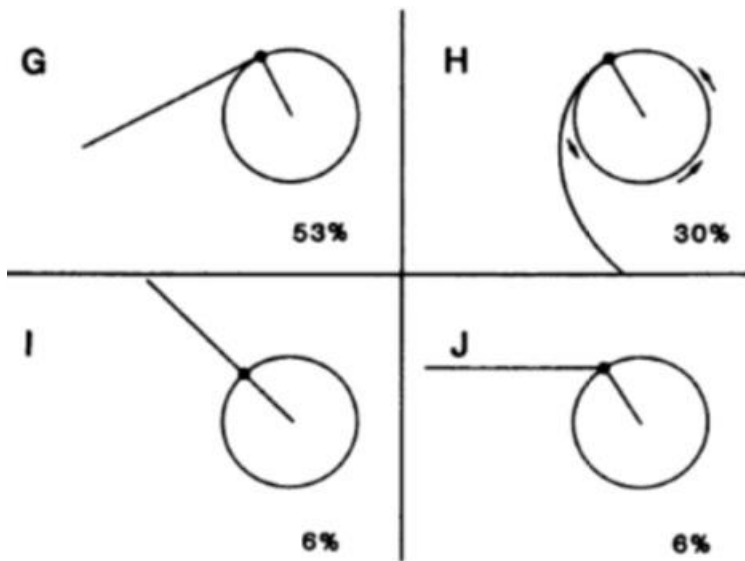
Oppilaille ei liioin ole selvää, mihin suuntaan ympyräradalta poistuva kappale jatkaa kulkuaan, vaan heillä on siitä yleensä kolmenlaista ennakkokäsitystä. Heidän ennakkokäsityksensä mukaan kappale jatkaa jonkin matkaa ympyräradalla, lähtee kohtisuoraan pois päin ympyräradasta tai lähtee johonkin suuntaan näiden kahden väliltä. Oppilaiden ennakkokäsitysten mukaisia suuntia on havainnollistettu kuvassa 3. (McCloskey, Caramazza & Green 1980; Searle 1985)

Ympyrärataa jatkavaa kappaletta oppilaat perustelevat sillä, että jokin voima ohjaa kappaleen ympyräradalle ja sen kuluessa loppuun kappaleen rata suoristuu. Ennakkokäsitys on, että siihen, kuinka pitkään kappale jatkaa ympyrärataa, vaikuttaa radan kaarevuus ja pituus. Jos radan säde on pienempi, kappale jatkaa kulkuaan ympyrärataa pidempään kuin kappale, jonka kulkeman ympyräradan säde on suurempi. Jos kahden kappaleen ympyräratojen säteet ovat yhtä suuret, pidempään ympyrärataa kiertäneen kappaleen rata suoristuu hitaammin. (Gunstone 1984; McCloskey, Caramazza & Green 1980).

Oppilaat, jotka väittävät narun päässä ympyrärataa kiertävän kappaleen lähtevän kohtisuoraan pois päin ympyräradasta, perustelevat ennakkokäsitystään voimilla. Heidän ennakkokäsityksensä mukaan naru pitää kappaleen ympyräradalla, vaikka keskipakoisvoima vetää sitä pois radalta. Kun naru katkeaa, kappaleeseen vaikuttaa vain keskipakoisvoima, joten kappale lähtee sen suuntaan eli kohtisuoraan pois päin ympyräradasta. (McCloskey, Caramazza & Green 1980)

Jotkut oppilaat esittävät kappaleen lähtevän ympyräradalta oikean tangentiaalisen suunnan ja kohtisuoraan pois päin ympyräradalta olevan suunnan väliin (kuva 3 alhaalla oikealla). He piirtävät kappaleen voimakuvioihin ylimääräisiksi voimiksi ainakin keskipakoisvoiman ja joskus liikkeen suuntaisen voiman.

(McCloskey, Caramazza & Green 1980; Searle 1985) Yleensä nämä oppilaat kuitenkin perustelevat kappaleen suunnan olevan keskipakoisvoiman ja nopeusvektorin kompromissi (McCloskey, Caramazza & Green 1980).



Kuva 3: Ylhäällä vasemmalla on esitetty kappaleen oikea lähtösuunta. Ennakkokäsitykset: Ylhäällä oikealla kappale jatkaa jonkin matkaa radan suuntaisesti. Alhaalla vasemmalla kappale lähtee kohtisuoraan ulospäin. Alhaalla oikealla kappale lähtee radan tangentin suuntaan. (McCloskey, Caramazza & Green 1980)

## 2.3 Kiihtyvyys lukio-opetuksessa

Lukion opetusta ohjaavat valtakunnalliset lukion opetussuunnitelman perusteet (LOPS 2015), joiden pohjalta jokainen kunta tekee oman opetussuunnitelmansa. Lisäksi ylioppilaskokeet vaikuttavat lukion opetukseen (Aksela & Juvonen 1999; Löfström, Virta & Van den Berg 2010; Salmenkivi 2013).

### 2.3.1 Lukion opetussuunnitelman perusteet

Lukioissa otettiin käyttöön uudet opetussuunnitelman perusteet syksyllä 2016 (Opetushallitus 2017). Opetuksen lähtökohtana ovat opiskelijoiden aikaisemmat tiedot ja ympäristöstä tehdyt havainnot. Kokeellisuus eri muodoissaan on oleellinen osa opetusta, sillä se tukee käsitteiden muodostumista ja ymmärtämistä sekä luonnontieteellisen tiedon luonteen hahmottamista. Kokeellisuuden tarkoituksena on kehittää opiskelijoiden omaa kokeellista työskentelyä, yhteistyötaitoja ja ajattelun taitoja sekä innostaa opiskelijoita fysiikan opiskeluun. (LOPS 2015)

Kaikille pakollisen fysiikan ensimmäisen kurssin keskeisissä sisällöissä on mainittu voima liikkeen muutoksen aiheuttajana ja liikeilmiöt. Oppilaiden yleistä ennakkokäsitystä, jonka mukaan tasainen nopeus vaatii vakiovoiman (esim. Trowbridge & McDermott 1980, 1981), pitää siis korjata kohti tieteellistä tietoa jo ensimmäisellä kurssilla. Valtakunnallisista kursseista kiihtyvyyttä pitää käsitellä neljännellä ja viidennellä kurssilla. Neljännen kurssin keskeisissä sisällöissä mainitaan tasainen ja tasaisesti kiihtyvä suoraviivainen liike ja Newtonin lait. Viidennen kurssin keskeisissä sisällöissä on puolestaan mainittu tasainen ympyräliike. (LOPS 2015)

### 2.3.2 Ylioppilaskokeet

Lukion opetussuunnitelma ohjaa lukion päättökokeena olevaa ylioppilastutkintoa. Ylioppilaskokeen tehtävät perustuvat opetussuunnitelman perusteiden pakollisten ja valtakunnallisten kurssien sisältöihin. (valtioneuvoston asetus ylioppilastutkinnosta 915/2005) Fysiikassa tehtävät laaditaan yhden pakollisen ja kuuden valtakunnallisen kurssin pohjalta.

Fysiikan ylioppilaskoe muuttuu sähköiseksi syksyllä 2018 (Ylioppilastutkintolautakunta 2017). Sähköiset kokeet perustuvat paperisten tavoin lukion opetussuunnitelmaan ja testaavat lukion opetussuunnitelman tavoitteiden saavuttamista ja jatko-opintokelpoisuutta. Fysiikassa sähköinen koe muun muassa mahdollistaa videoiden, äänen ja simulaatioiden käyttämisen materiaaleina. Tietokone helpottaa mittaustulosten analysointia, joten niitä sisältävät tehtävät voivat olla laajempia kuin paperille tehtävissä kokeissa. (tiedote Fysiikan sähköinen ylioppilaskoe 2017) Ylioppilastutkintolautakunta on hyväksynyt kuvaajia varten ylioppilaskokeen päätelaitteelle Vernierin LoggerPro-ohjelmiston (Digabi 2017).

## 3. Tutkimuskysymykset

Myöhemmin esiteltävillä kokeilla on kaksi erilaista tarkoitusta, joten tutkimuskysymyksiäkin on kaksi, joista toisella on vielä tarkentava lisäkysymys. Tarkoituksena on pohtia, mitä uutta kiihtyvyyssanturi tuo dynamiikan opiskelussa hyödyllisiin kokeisiin ja mitä uusia kokeita tällä anturilla pystytään tekemään. Lisäksi tarkastellaan kiihtyvyyteen liittyviä ennakkokäsityksiä ja pyritään löytämään kiihtyvyyssanturilla tehtäviä kokeita, joilla niihin pystyttäisiin vaikuttamaan. Siksi tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Mitä uutta kiihtyvyyssanturi tuo dynamiikan opiskeluun yleisesti kuuluviin kokeisiin?
  - 1b. Missä dynamiikan oppimisessa hyödyllisissä kokeissa kiihtyvyyssanturi on välttämätön?
2. Mihin kiihtyvyyteen liittyvistä ennakkokäsityksistä voidaan mahdollisesti vaikuttaa tässä työssä esiteltävillä kokeilla?

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen tarkoituksena on selvittää, tuoko kiihtyvyyssanturi mitään uutta kokeisiin, jotka on perinteisesti tehty ultraääni- tai voima-anturilla. monissa lukioissa on jo nämä anturit, joten kiihtyvyyssanturia ei kannata hankkia, ellei sen avulla kokeista saada uusia tai parempia tuloksia. Toisaalta voi olla järkevää hankkia tämä anturi myös silloin, jos sillä pystytään tekemään täysin uusia kokeita, joita ultraääni- tai voima-anturilla ei voida tehdä.

Toisella tutkimuskysymyksellä halutaan pohtia, mitä ensimmäisen tutkimuskysymyksen tuloksissa esitellyistä kokeista voitaisiin käyttää kiihtyvyyteen liittyvien ennakkokäsityksien korjaamiseen. Koska kokeet on jo esitelty aiemmin, tutkimuskysymyksen vastauksessa vain pohditaan, mihin ennakkokäsityksiin tässä työssä esitellyillä kokeilla ylipäätään voidaan vaikuttaa. Tarkastelu tehdään teoreettisella tasolla, eikä kokeiden vaikutusta ennakkokäsityksiin testata.

## 4. WDSS-anturi

Kokeissa käytettävä mittausanturi on Vernierin (Vernier 2017a) valmistama Wireless Dynamics Sensor System (WDSS). Sen käyttämiseen kannalta oleelliset asiat käydään ensin läpi. Myös anturien toimintaperiaatteet kerrotaan, vaikkei niitä välttämättä voidakaan esitellä oppilaille. Kaikki tiedot on koottu anturin mukana tulevasta käyttöoppaasta (Vernier 2017b), ellei toisin mainita.

### 4.1 Anturin käyttäminen

WDSS-anturilla voidaan mitata yhteen suuntaan voimaa ja korkeutta sekä kiihtyvyyttä kolmeen suuntaan. Mittauksissa anturi on täysin langaton ja se siirtää mittausdatan reaaliajassa koneelle Bluetooth-yhteyden kautta. Bluetooth-yhteys kantaa noin kymmenen metrin päähän, kunhan koneen ja anturin välissä ei ole kiinteitä esteitä. Anturi voi muodostaa yhteyden vain yhteen koneeseen kerrallaan, joten koneeseen yhteydessä oleva anturi ei näy muilla koneilla. Anturin käyttämiseen vaaditaan LoggerPron (Vernier 2017c) versio 3.4.5 tai uudempi.

WDSS-anturi on kuvassa 4. Anturin toisessa päässä on voima-anturin koukku ja toisessa ripustuskoukku, jonka saa tarvittaessa irrotettua. Anturissa on litiumakku, joka kestää yhdellä latauksella noin 20 tuntia. 10–

15 minuutin latauksen jälkeen anturia voi käyttää mittauksiin noin tunnin verran. Lataus ei tapahdu langattomasti, joten ennen käyttöä on varmistettava, että akussa on riittävästi varausta.

Anturin mitat ovat 12,1 cm × 5,3 cm × 3,9 cm. Anturin massa on noin 200 g, ja anturin päälle voidaan laittaa korkeintaan kilon lisäpaino. Anturin oikeassa alareunassa olevaa Bluetooth-antennia ei saa peittää, kun anturin päälle laitetaan lisäpainoa tai kun anturi kiinnitetään mittauksia varten.

Anturissa on myös sisäinen muistikortti, joten siihen voi tallentaa kiihtyvyyden ja korkeuden mittausdataa useiden minuuttien ajan. Mittauksia voidaan siis tehdä useita ennen kuin data pitää purkaa koneelle. WDSS voi enimmillään ottaa 1 000 mittausta sekunnissa, ja sen muistikapasiteetti on 240 000 lukemaa (Vernier 2017d).

Anturi mittaa automaattisesti voimaa ja kiihtyvyyttä kolmeen suuntaan. Korkeusanturiin on kytkettävä virta erikseen. Koneen valikosta voi katkaista virran myös muista antureista, sillä aina ei ole tarpeen näyttää esimerkiksi kiihtyvyyttä kaikkiin kolmeen suuntaan. Kiihtyvyydsanturit mittaavat kiihtyvyyttä väliltä  $\pm 59 \text{ m/s}^2$ , ja niiden resoluutiot ovat



Kuva 4: WDSS-anturi a) voima-anturin koukku b) bluetooth-antennin paikka c) ripustuskoukku.



0,04 m/s<sup>2</sup>. Anturit kestävät vahingoittumatta alle 3 000 g:n kiihtyvyydet. Anturissa on kaksi voima-anturia, joista herkempi mittaa voimaa välillä ±10 N ja karkeampi mittaa voimaa aina 50 N:iin asti. Herkemmän voima-anturin resoluutio on 0,006 N ja karkeamman 0,03 N. Mittaajan ei tarvitse huolehtia oikean anturin valinnasta, vaan WDSS tekee sen automaattisesti, eikä käyttäjä huomaa anturin vaihtumista.

#### 4.2 Anturien toimintaperiaate

WDSS:ssä on kolme kiihtyvyydianturia, jotka sijaitsevat suorassa kulmassa toisiinsa nähden ja jotka on kytketty toisiinsa sähköisesti. Kukin anturi on oma yksikkönsä, joissa on piistä muovattuja kiihdytettäessä taipuvia "sormia". Sormet toimivat kondensaattorin levyinä, ja sormien taipuessa niiden muodostaman kondensaattorin kapasitanssi muuttuu. Anturi muuttaa kapasitanssin muutoksen volteiksi ja edelleen kiihtyvyyden arvoiksi.

WDSS:n voima-anturi on venymäliuska-anturi. Sen venymäliuskat on kytketty Wheatstonen siltaan, jonka avulla anturi muuttaa voiman elektroniseksi signaaliksi. Voima-anturin rakenne mahdollistaa tarkat mittaukset, sillä voima-anturi liikkuu vain vähän, kun voima poistuu.

WDSS:n korkeusanturi on oikeastaan paineanturi, ja se on kalibroitu tehtaalla. Se koostuu ilmanpaineen mukaan venyvistä kalvosta, jonka toinen puoli on tyhjiössä. Anturi tuottaa ulostulojännitteen, joka riippuu mitatusta paineesta. WDSS:n elektroniikka muuttaa paineen korkeuden lukemiksi siten, että pienillä korkeuksilla korkeus riippuu lineaarisesti paineesta. Paineanturin rakenteen on tarkoitus minimoida lämpötilan muutoksesta johtuvat virheet, mutta silti mittaukset on suositeltavaa tehdä vakioämpötilassa, sillä paineen muutokset ovat hyvin pieniä.

### 5. Kokeet

Monilla lukioilla on jo ultraääni- ja voima-anturi, joiden avulla on mahdollista tehdä monenlaisia dynamiikan opiskelua edistäviä kokeita. Esiteltäväksi valittuja kokeita on kahdenlaisia: toisissa vertaillaan kokeiden tekemistä ultraääni- ja kiihtyvyydianturilla ja toisissa esitellään, kuinka monipuolisesti kiihtyvyydianturia voidaan käyttää dynamiikan opiskelussa.

Kiihtyvyydianturi on hyvin herkkä, joten kokeet, jotka vaativat herkkäliikkeisen vaunun, kannattaa tehdä ilmatyynyradalla. Kokeet voi tietysti tehdä millä tahansa vastaavalla laitteistolla, mutta silloin kuvaajat eivät välttämättä ole edes niin selkeät kuin ilmatyynyradalla tehdyissä. Kaikissa kokeissa näytteenottotaajuus on 20 mittausta/s, ellei toisin mainita. Kaikissa kokeissa on myös käytetty LoggerPron valmiita mittauspohjia, jotka avautuvat automaattisesti, kun LoggerPro käynnistetään anturien ollessa kytkettynä. LoggerPro piirtää aina  $(t,a)$ -kuvaajaan kaikkien kolmen kiihtyvyydianturin mittausdatan kuvaajat. Harvoin kaikkien kolmen

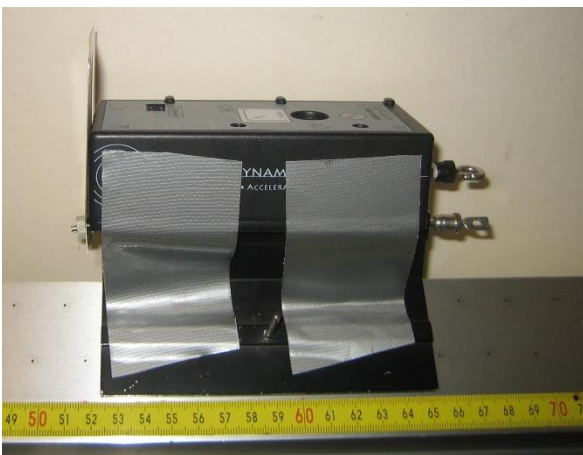
suunnan kiihtyvyyksiä kannattaa tarkastella, joten selvyuden vuoksi ylimääräisten suuntien kuvaajat kannattaa piilottaa.

### 5.1 Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä

Edellisessä luvussa käsiteltiin kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate, mutta sitä ei voida kertoa opiskelijoille, ellei voimaa ole kvantifioitu ennen kiihtyvyyttä. Ennakkokäsityksiä on vaikea muuttaa, joten kokeita tehdessä on tärkeää, että opiskelijat ymmärtävät, että kiihtyvyyssanturilla todella voidaan mitata kiihtyvyyttä. Erityisen tärkeää tämä on sellaisissa kokeissa, joissa oppilaan ennakkokäsitys on ristiriidassa mittaustulosten ja siten tieteellisen tiedon kanssa.

Kokeen tekemiseen tarvitaan herkkäliikkeinen vaunu tai jokin muu kappale, jonka liikettä kitka häiritsee mahdollisimman vähän. Lisäksi tarvitaan ultraääni- ja kiihtyvyyssanturi sekä mittausohjelma tietokoneella, tässä tapauksessa LoggerPro. Radan kallistuskulmaa pitää pystyä muuttamaan useita asteita, koska vaunun kiihtyvyydet ovat joka tapauksessa pieniä, joten eri kallistuskulmilla mitattujen kiihtyvyyksien erot pitää pyrkiä saamaan mahdollisimman suuriksi.

WDSS-anturi on kiinnitettävä vaunuun mahdollisimman tukevasti. Ilmatyynyradan vaunussa on sivuilla tapit, joihin WDSS:n saisi sen keskellä olevasta reiästä helposti kiinni. Toisaalta ilmatyynyradan vaunua pitää kuormittaa tasaisesti molemmilta puolilta, jottei se ota kiinni rataa toiselta puolelta ja vääristä siten mittaustuloksia. Jos kiihtyvyyssanturi kiinnitetään vaunun sivuun, myös vaunun toiselle laidalle pitää laittaa saman verran lisäpainoa. Kiihtyvyyssanturi on kuitenkin itsessään jo melko painava (200 g), joten vaunun kokonaismassa kasvaa isoksi. Kun massa kasvaa, radan puhallus ei välttämättä enää riitä kannattelemaan vaunua irti radasta, jolloin kitka alkaa vaikuttaa vaunun liikkeeseen. Kiihtyvyyssanturi kannattaakin kiinnittää vaunun päälle esimerkiksi teipillä kuten kuvassa 5, mutta teippi ei saa peittää alareunassa olevaa Bluetooth-antennia.



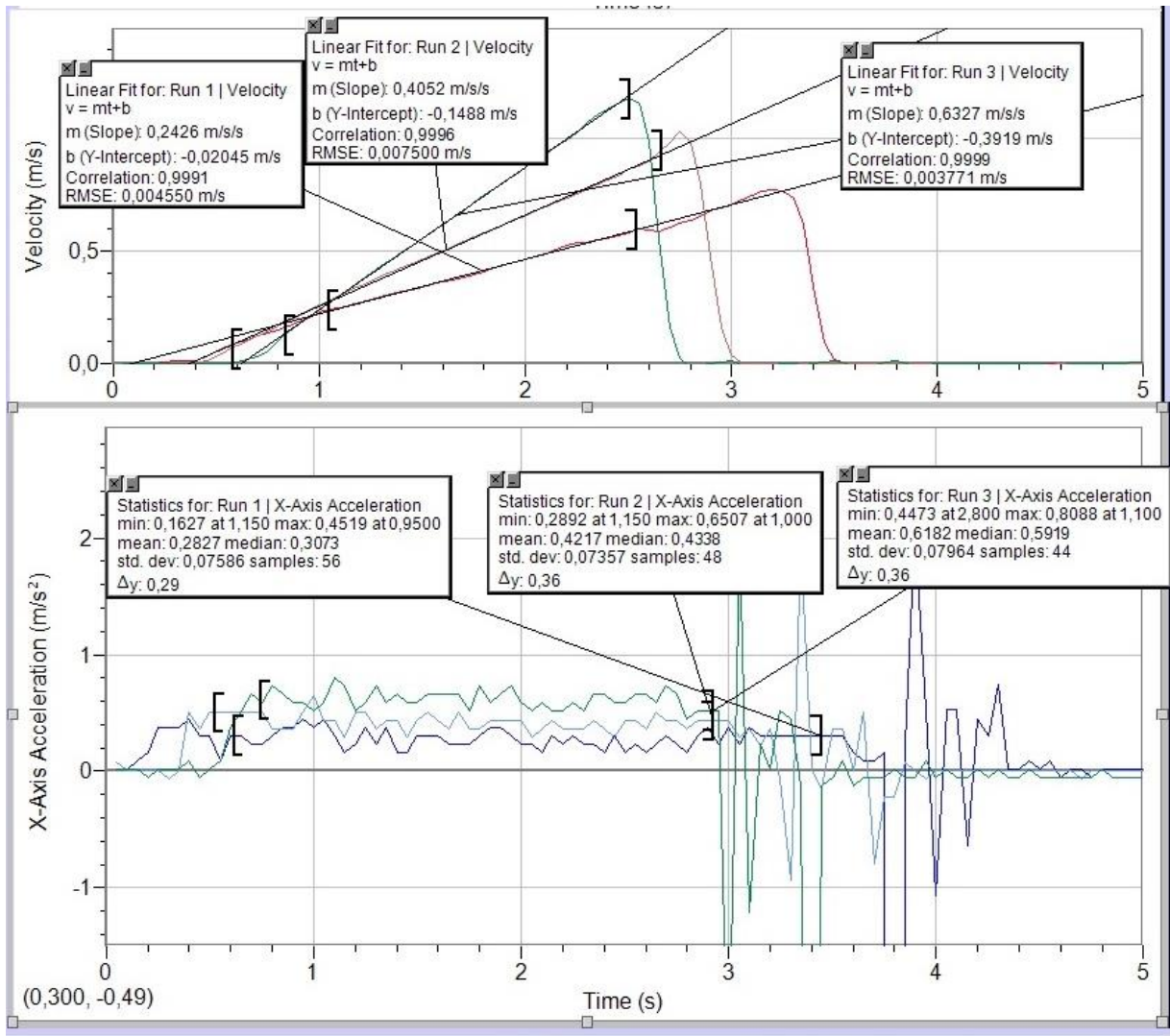
Kuva 5: WDSS:n kiinnitys ilmatyynyradan vaunuun. Anturissa vasemmalla oleva levy on ultraäänianturia varten.

Annetaan herkkäliikkeisen vaunun liukua alas kallistetulla radalla. Mitataan vaunun liikettä yhtä aikaa sekä kiihtyvyyttä ultraäänianturilla. Koska kiihtyvyyssanturi reagoi gravitaatioon kuten pystysuuntaiseen kiihtyvyyteen, se ei tee eroa liikkeen suuntaan olevan kiihtyvyyden ja painovoiman liikkeen suuntaisen komponentin välillä. WDSS-kiihtyvyyssanturin liikkeen suuntainen, tässä tapauksessa x-suuntainen, kiihtyvyyssanturi on siis nollattava jokaisella kallistuskulmalla erikseen vaunun ollessa radalla paikoillaan. Koska kiihtyvyys on vektorisuure, koejärjestelyssä on otettava huomioon, että anturien positiiviset suunnat ovat samaan suuntaan.

Piirretään LoggerProlla ultraäänianturin mittausdatasta  $(t,v)$ -kuvaaja, josta kiihtyvyys saadaan määritettyä LoggerPron Linearfit-työkalulla. Piirretään kiihtyvyyssanturin mittausdatasta  $(t,a)$ -kuvaaja. WDSS on sen verran herkkä, että kiihtyvyyden kuvaaja ei ole vakio, vaan siinä on pientä vaihtelua. Kiihtyvyyden arvo saadaan luettua suoraan kuvaajalta, ja apuna kannattaa käyttää LoggerPron Statistics-työkalua. Sitä varten kuvaajalta pitää maalata alue, jolla kiihtyvyyden arvot vaihtelevat mahdollisimman vähän. Statistics-työkalulla saadaan kyseiseltä alueelta muun muassa mittauspisteiden keskiarvo, joka siis on vaunun keskimääräinen kiihtyvyys.

Kuvassa 6 ylhäällä on LoggerPron piirtämät  $(t,v)$ -kuvaajat ultraäänianturin mittausdatasta ja alla  $(t,a)$ -kuvaajat kiihtyvyyssanturin mittausdatasta.  $(t,v)$ -kuvaajaan on tehty suoransovitukset, ja sen tiedoissa kulmakertoimen arvo ( $m(\text{Slope})$ ) kertoo kiihtyvyyden arvon kullakin kallistuskulmalla.  $(t,a)$ -kuvaajien tiedoissa keskimääräisen kiihtyvyyden arvo on kohdassa mean.

Verrataan ultraäänianturilla mitattua kiihtyvyyden arvoa WDSS:llä saatuun ja huomataan, että  $(t,a)$ -kuvaajasta määritetyt kiihtyvyyden arvot ovat melko lähellä  $(t,v)$ -kuvaajasta saatuja kiihtyvyyden arvoja. Toistetaan koe erilaisilla kallistuskulmilla ja huomataan, että kummallakin anturilla saadut kiihtyvyydet ovat lähellä toisiaan joka kerta.



Kuva 6: Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä -kokeen tulokset.

Taulukkoon 1 on kerätty kuvasta 6 ultraääni- ja kiihtyvyyssanturilla mitatut kiihtyvyyden arvot. Kun näitä verrataan, huomataan, että eri antureilla mitatut kiihtyvyydet ovat lähes samat eri kallistuskulmilla. Kiihtyvyyssanturi siis todella mittaa kiihtyvyyttä, joten sillä voidaan luotettavasti mitata kiihtyvyyksiä muissakin kokeissa.

Taulukko 1: Tulokset kokeesta, jossa todistetaan kiihtyvyyssanturin mittaavan kiihtyvyyttä.

|            | Ultraäänianturi ( $m/s^2$ ) | Kiihtyvyyssanturi ( $m/s^2$ ) |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1. mittaus | 0,24                        | 0,28                          |
| 2. mittaus | 0,41                        | 0,42                          |
| 3. mittaus | 0,63                        | 0,62                          |

Kiihtyvyyssanturin herkkyys ja pienet erot kiihtyvyyksien välillä aiheuttavat koetta tehdessä haasteita. Eri kallistuskulmilla mitattujen kiihtyvyyksien väliset erot ovat melko pieniä, joten  $(t, a)$ -kuvaajaa pitää suurentaa paljon, jotta kiihtyvyyksien erot erottuvat. Tällöin kiihtyvyys ei kuitenkaan ole kuvaajan muodon perusteella

lähelläkään vakiota. Toisaalta jos kokeella osoitetaan vain se, että kiihtyvyyssanturilla voidaan mitata kiihtyvyyttä, kiihtyvyyksien välisten erojen havaitseminen ei ole niin tärkeää, kunhan kiihtyvyyssanturilla mitatut kiihtyvyydet ovat lähellä ultraäänianturilla mitattuja kiihtyvyyksiä. Oppilaiden kannalta voikin olla selkeämpää, jos eri kallistuskulmilla mitattuja kiihtyvyyksiä ei tallenneta, jolloin näkyvässä on vain yksi kuvaaja kerrallaan. Tällöin  $(t,a)$ -kuvaajaa ei tarvitse lähentää yhtä paljon kuin kuvassa 6 on tehty.

## 5.2 Kahdella anturilla tehdyt kokeet

Seuraavat kaksi koetta voidaan tehdä ultraäänianturilla ja niistä saadaan sillä hyvät tulokset. Kokeet voidaan tehdä myös kiihtyvyyssanturilla ja luvuissa 7.3 ja 7.4, pohditaan, toiko se näihin kokeisiin uutta näkökulmaa tai helpottiko se esimerkiksi tulosten käsittelyä.

### 5.2.1 Vaunun kiihdytys punnuksella

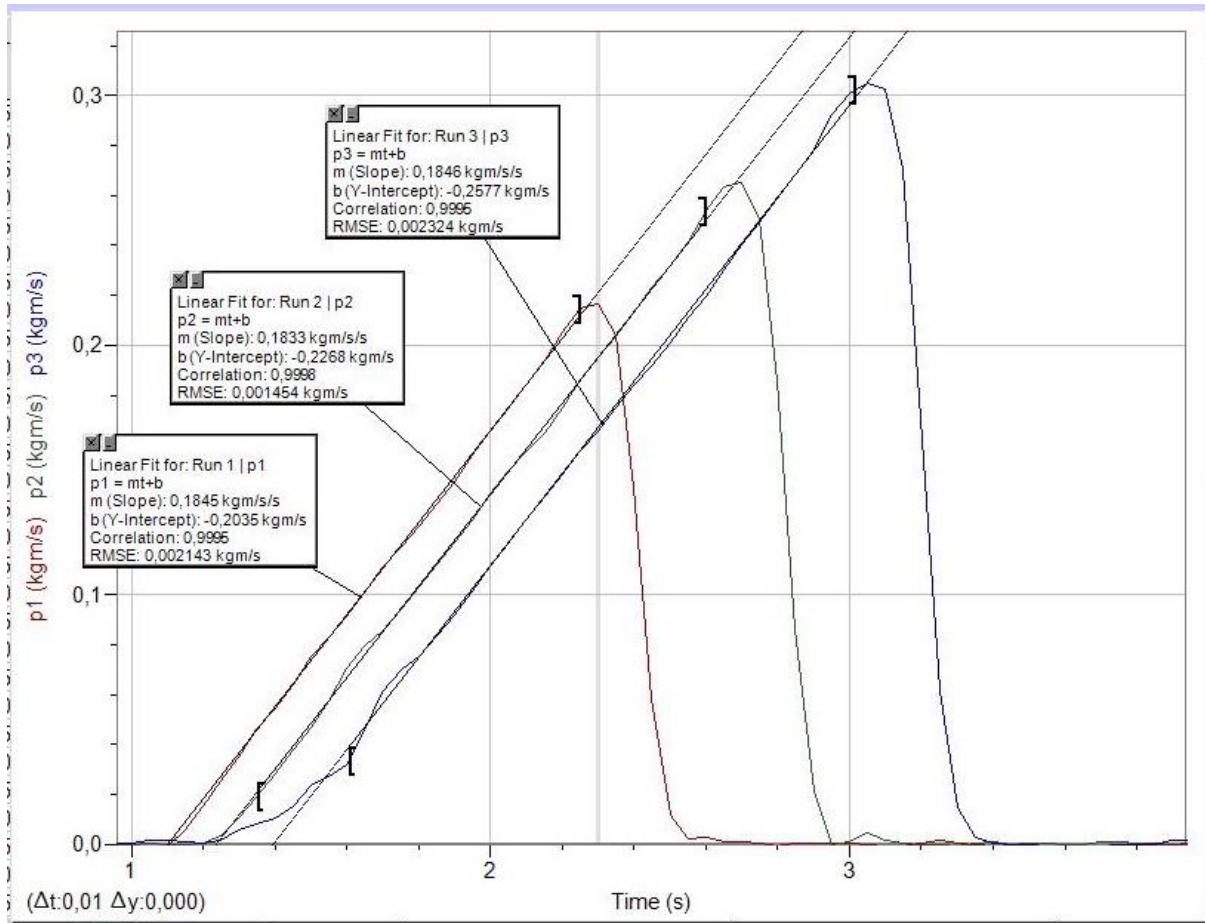
Vaunun kiihdytys punnuksella -kokeella kvantifioidaan suure voima. Sen tekemiseen vaaditaan herkkäliikkeinen vaunu, jota voidaan kiihdyttää punnuksella. Ilmatyynyradan tarvikkeisiin kuuluu kokeeseen sopiva väkipyörä, joten koe on helppo tehdä sillä, mutta muutkin vastaavat systeemit käyvät. Lisäksi tarvitaan kiihtyvyy- ja ultraäänianturi sekä niihin sopiva mittausjärjestelmä. Koe tehdään ja tulokset käsitellään eri lailla ultraääni- ja kiihtyvyyssanturilla, joten ensin esitellään koe kokonaisuudessaan ultraäänianturilla ja sen jälkeen kiihtyvyyssanturilla tehtynä.

Kokeella tehtävä voiman kvantifiointi vaatii sen, että impulssi,  $I$ , on kvantifioitu jo aiemmin. Impulssi määrää, kuinka paljon vuorovaikutus muuttaa kappaleen liikettä. Impulssin on määritelty olevan yhtä suuri kuin liikemäärän muutos,  $\Delta p$ ,  $I = \Delta p = m\Delta v$ , jossa  $\Delta v$  on nopeuden muutos joko koko vuorovaikutustapahtuman aikana tai valitulla aikavälillä pitkäkestoisessa vuorovaikutuksessa. (Hämäläinen 2017a)

Tarkastellaan liikettä tilanteessa, jossa vuorovaikutus on tasainen eli sen hetkellinen voimakkuus on vakio. Tällöin voidaan kvantifoida suure, joka kuvaa vuorovaikutuksen hetkellistä ominaisuutta eli ominaisuutta voima. Esikvantifioivina havaintoina huomataan, että lopullinen liikemäärä ja siten kokonaisimpulssi on sitä suurempi, mitä voimakkaampi vuorovaikutuksen voimaominaisuus on tai mitä pitempään vuorovaikutuksen annetaan vaikuttaa. Tasaisen vuorovaikutuksen voimaominaisuutta voi siis kuvata suureella voima, joka saadaan jakamalla kokonaisimpulssi vaikutusajalla. Impulssia ei pystytä mittaamaan, mutta liikemäärän muuttumista voidaan mitata. (Hämäläinen 2017a)

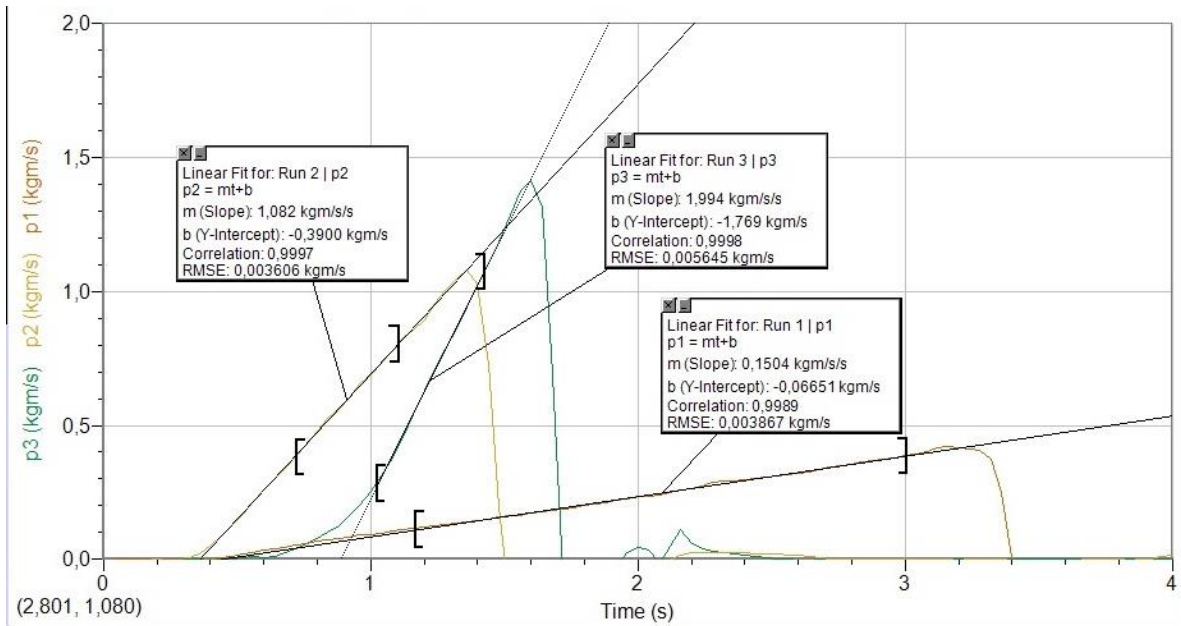
Kokeen ensimmäisessä vaiheessa ilmatyynyradan vaunua kiihdytettiin vetopunnuksella, jonka massa oli 20 g. Vaunun liikettä mitattiin ultraäänianturilla ja mittaustulokset piirrettiin LoggerPron avulla  $(t,v)$ -kuvaajaan. Mittaus toistettiin, kun vaunussa oli ensin 100 g ja sitten 200 g lisäpainoa jaettuna tasaisesti vaunun molemmiin puoliin. Tulokset piirrettiin  $(t,p)$ -kuvaajaan (kuva 7) ja huomattiin, että mittauspisteisiin

sovitettujen suorien kulmakertoimet ovat samat. Kulmakerroin ei siis riipu vuorovaikutuksen kohteena olevasta kappaleesta, vaan vain vuorovaikutuksen suuruudesta.



Kuva 7: Vaunun massaa on kasvatettu ja vetopunnus on pidetty vakiona.

Seuraavaksi koko systeemin (vaunu ja vetopunnus) massa pidettiin vakiona ja kiihdyttävän punnuksen massaa muutettiin siirtämällä vaunussa olevat lisäpunnukset vetopunnukseksi. Havaittiin, että kiihdyttävän punnuksen massan eli vuorovaikutuksen kasvaessa  $(t,p)$ -koordinaatiston suoran kulmakerroin jyrkkenei (kuva 8). Pääteltiin, että  $(t,p)$ -koordinaatiston suoran kulmakerroin sopii kuvaamaan tasaisen vuorovaikutuksen voimakkuutta eli voimaa  $F$ , joka voidaan nyt määrittellä  $F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m\Delta v}{\Delta t} = ma$  (Hämäläinen 2017a).

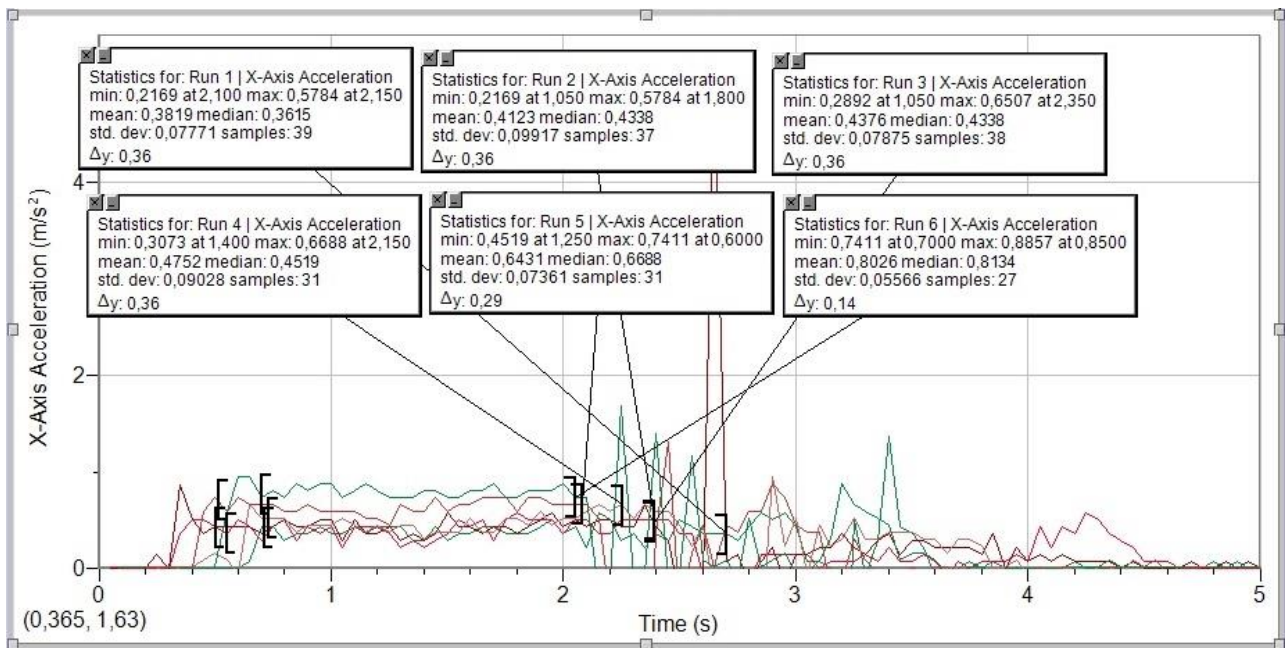


Kuva 8: Vetopunnuksen massaa on kasvatettu siirtämällä lisäpainot vaunun kyydistä vetopunnukseksi.

Kiihtyvyyssanturilla tehtävän kokeen esikvantifioivana havaintoina huomataan, että vaunun, jossa on kiihtyvyyssanturi, kiihtyvyys on pienempi kuin vaunun, jossa ei ole lisäpainoa. Toisaalta huomataan painavamman vetopunnuksen kiihdyttävän vaunua enemmän. Esikvantifioivien havaintojen perusteella, tehdään koe, jossa ensin pidetään vetopunnuksen massa vakiona ja lisätään vaunun massaa. Tämän jälkeen toistetaan koe eri massaisella vetopunnuksella.

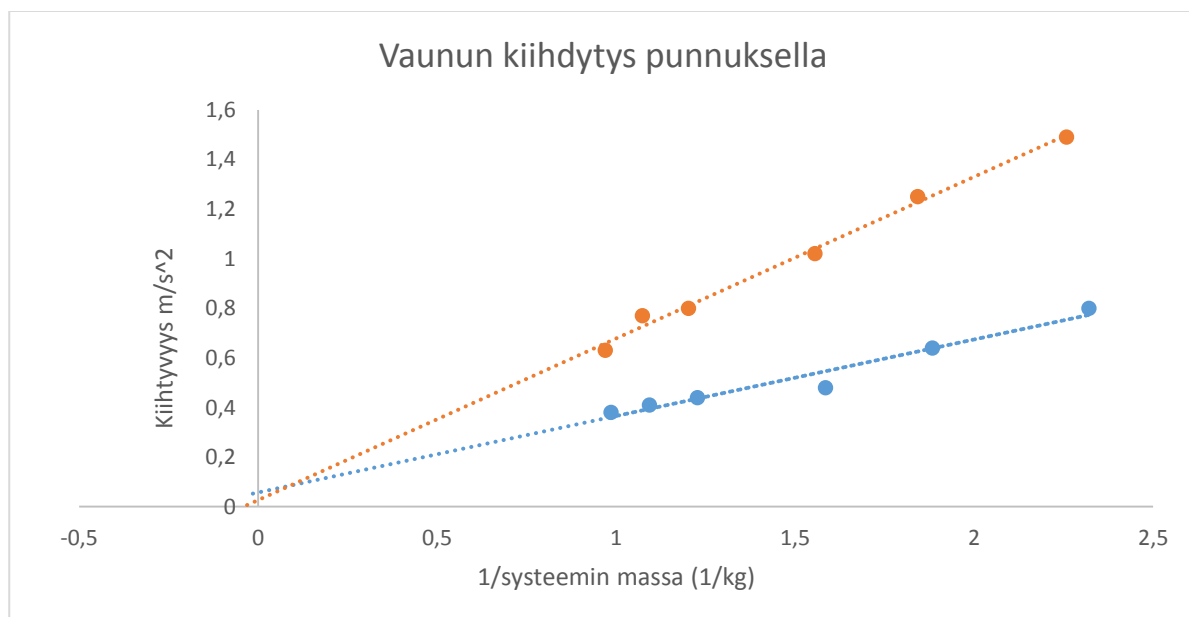
Ensimmäisessä mittauksessa vaunun kyydissä oli vain kiihtyvyyssanturi ja vetopunnuksen massa oli 40 g. Mittauksista saatavat kiihtyvyydet ovat muutenkin pieniä, joten vetopunnuksen massa ei kannata olla kovin paljon pienempi, jotta kiihtyvyyksien välille tulee eroja myös painavimmilla lisäpunnuksilla. Mittaukset toistettiin vetopunnuksella, jonka massa oli 70 g.

Piirretään tulokset LoggerProlla  $(t,a)$ -koordinaatistoon (kuva 9). Lisätään seuraaviin mittauksiin vaunuun ensin 100 g lisäpainoa ja sitten toiset 100 g tasaisesti vaunun molemmin puolin. Tämän enempää vaunua ei voi kuormittaa, sillä radan puhallus ei silloin riittäisi kannattelemaan vaunua irti radasta. Jotta mittauksia saadaan useampia, kiinnitetään alkuperäiseen vaunuun toinen vaunu ja lisätään siihen vielä saman verran lisäpainoja, jolloin mittauksia kertyy yhteensä kuusi. Huomataan, että kun vaunun massa kasvaa, vaunun kiihtyvyys pienenee.



Kuva 9: Vaunun massaa kasvatettiin ja vaunun kiihtyvyydet mitattiin kiihtyvyyssanturilla.

Määritetään kustakin mittauksesta vaunun keskimääräinen kiihtyvyys LoggerPron Statistics-työkalulla. Piirretään mittaustulokset esimerkiksi Excelillä  $(1/m, a)$ -koordinaatistoon (kuva 10), jossa  $m$  on vaunun, lisäpainon ja vetopunnuksen yhteinen massa, ja havaitaan, että pisteet asettuvat lähes origon kautta kulkevalle nousevalle suoralle. Toistetaan koe vetopunnuksella, jonka massa on 70 g. Huomataan, että pisteet asettuvat jyrkemmälle suoralle kuin ensimmäisen mittauksen pisteet. Päätellään suoran kulmakertoimen kuvaavan tasaisen vuorovaikutuksen voimakkuutta eli voimaa  $F$ . Se voidaan nyt määrittellä  $F = ma$ .



Kuva 10: Kiihtyvyyssanturin tulokset (siniset pisteet: vetopunnuksen massa 40 g ja oranssit pisteet: vetopunnuksen massa 70 g).



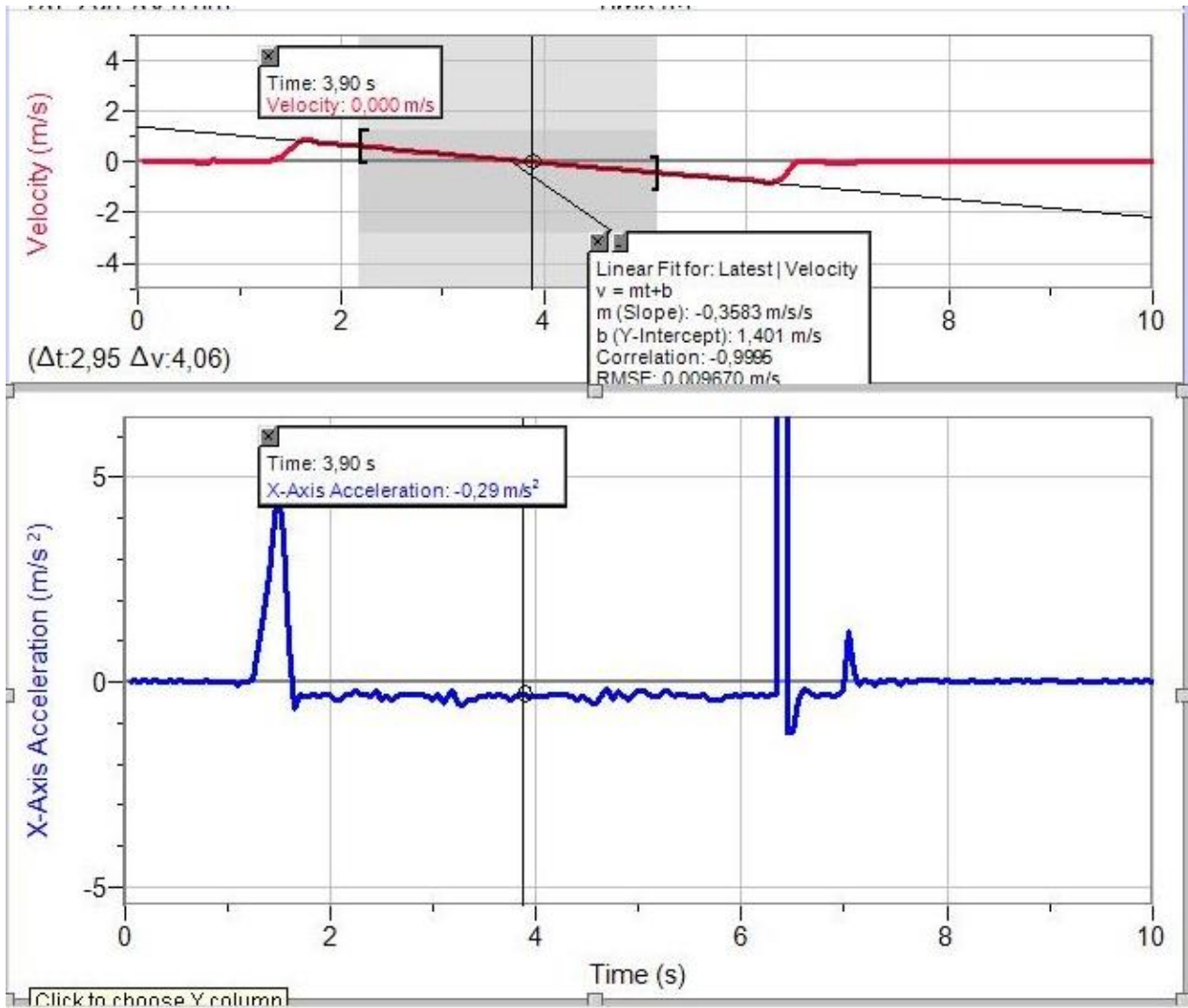
### 5.2.2 Vaunu rampilla

Kuten luvussa 2.2.2 todettiin, oppilaiden on vaikea ymmärtää, että kiihtyvyys ei ole nolla, kun nopeuden merkki muuttuu (Trowbridge & McDermott, 1981). Tätä ilmiötä voidaan havainnollistaa yksinkertaisella kokeella. Kokeen tekemiseen tarvitaan herkkäliikkeinen vaunu ja kallistettu rata. Mittaukset voi tehdä joko WDDS:llä tai ultraäänianturilla.

Jos koe tehdään molemmilla antureilla, on syytä tarkistaa, että anturien positiiviset suunnat ovat samaan suuntaan. Laitetaan ultraäänianturi radan alapäähän ja kiinnitetään kiihtyvyyssanturi vaunuun, joka asetetaan radan alimpaan pisteeseen. Nollataan anturit ennen mittauksien aloittamista. Käynnistetään mittaus ja tönäistään vaunu liikkeelle. Tönäisy ei saa olla niin voimakas, että vaunu törmää radan toiseen päähän. Vaunu nousee ramppia jonkin matkaa ja palaa takaisin alas. Radan lakipisteessä nopeuden merkki siis muuttuu.

Kokeessa kuvaajien tulkinnan haasteena on se, että vaunu ei kulje vain yhteen suuntaan, vaan palaa takaisin, jolloin anturien positiiviset suunnat ovat vastakkaiset vaunun nopeudelle. Sen takia kiihtyvyys ja paluumatkalla nopeus ovat negatiivisia, vaikka vaunun vauhti kasvaa. Siksi tässä kokeessa on syytä käyttää nopeuden apuna termiä vauhti, joka on nopeuden itseisarvo. Vauhtia käytetään, kun puhutaan liikkeen nopeutumisesta ja hidastumisesta. Nopeutta taas käytetään, kun puhutaan liikkeen suunnasta ja pysähtymisestä. Lisäksi käytetään termiä kiihtyvyys siten, että sillä on suunta ja merkki, joka saadaan mittaamalla. Tarvittaessa voidaan vertailla myös kiihtyvyyden itseisarvoja, mutta on ehkä selvempää puhua oppilaille käyttämällä mittaamalla määritettyä kiihtyvyyden etumerkkiä.

LoggerPro piirtää ultraäänianturin mittausdatasta  $(t, v)$ -kuvaajan ja kiihtyvyyssanturin datasta  $(t, a_x)$ -kuvaajan, joiden mallikuvaajat ovat kuvassa 11. Vaunun vauhti kasvaa tönäisyssä nopeasti maksimiinsa, jonka jälkeen vaunu nousee ramppia, mutta sen vauhti hidastuu. Radan lakipisteessä vaunu muuttaa suuntaansa, jolloin sen vauhti menee hetkellisesti noltaan ja nopeuden merkki muuttuu. Vaunu liukuu alas kasvavalla vauhdilla, kunnes se pysähtyy ja nopeus putoaa noltaan.



Kuva 11: Vaunu rampilla -kokeen kuvaajat. Nopeuden kuvaaja on saatu ultraäänianturilla mitatusta datasta ja kiihtyvyyden kuvaaja on saatu kiihtyvyyssanturin datasta.

$(t,v)$ -kuvaajasta voidaan määrittää vaunun kiihtyvyys Linearfit-työkalulla vaunun noustessa ja laskeutuessa rampia. Tällöin kiihtyvyys on vakio, mutta jos oppilaalla on vaikeuksia erottaa kiihtyvyys ja nopeus toisistaan, pelkästä nopeuden kuvaajasta ei luultavasti käy selväksi se, että kiihtyvyys ei ole nolla, vaikka nopeus hetkellisesti onkin. Tarkastellaan siis  $(t,a)$ -kuvaajaa. Huomataan, että kiihtyvyyden kuvaaja on lähes vakio alkukiihdytyksen ja vaunun pysähtymisen välillä. Kiihtyvyys ei siis mene nolleen, vaikka nopeus meneekin. Jos halutaan tietää vaunun kiihtyvyyden tarkka arvo kääntopisteessä, se onnistuu Examine-työkalun avulla.

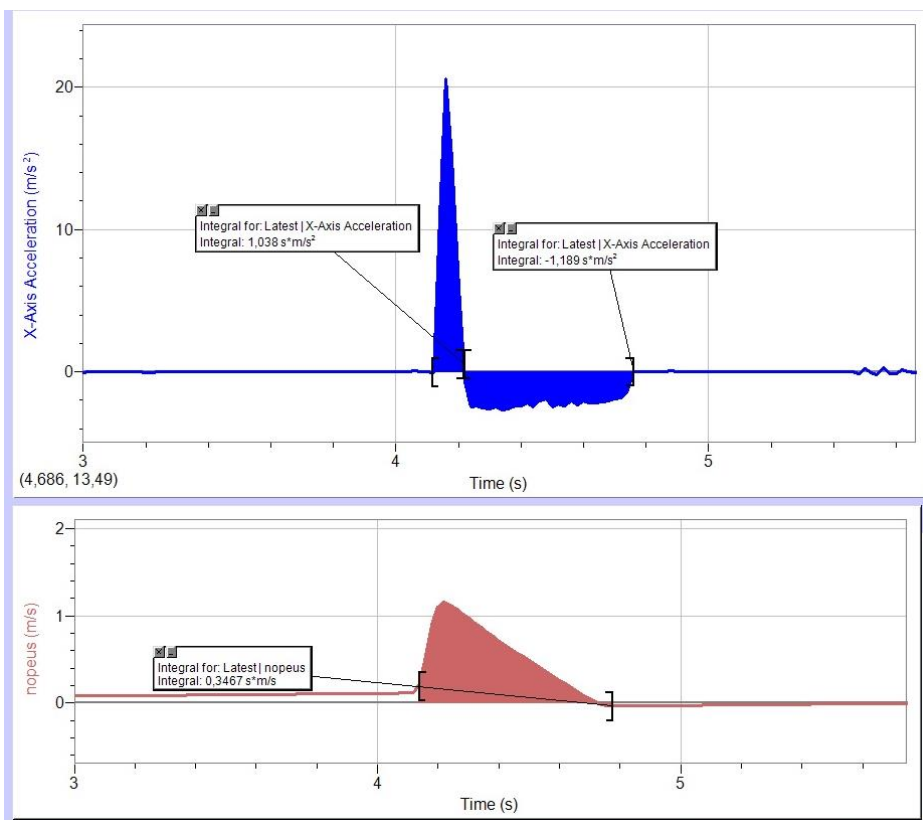
### 5.3 Kiihtyvyyssanturilla tehtävät kokeet

Pelkällä kiihtyvyyssanturilla voi tehdä monenlaisia dynamiikan opiskelussa hyödyllisiä kokeita. Osan näistä on voinut tehdä voima-anturilla, ja nyt tarkastellaankin, tuoko kiihtyvyyssanturi näihin mitään uutta näkökulmaa. Osan kokeista on voinut tehdä myös langallisella kiihtyvyyssanturilla ja voima-anturilla, mutta WDSS:llä näiden kokeiden tekeminen on entistä helpompaa, sillä nyt pärjätään yhdellä langattomalla anturilla.

### 5.3.1 Laudan tönäisy

Laudan tönäisy -kokeella on hyvä harjoitella graafista integrointia, sillä se on joillekin oppilaille vaikeaa (Beichner 1994; Hale 1996; McDermott, Rosenquist & van Zee 1987). Koe on helppo ja nopea tehdä, joten sen voi antaa oppilaille kokeelliseksi työksi tai tehdä demonstraationa. Kokeen tekemiseen tarvitaan höylätty laudanpätkä, kiihtyvyyssanturi ja tietokoneella oleva mittausohjelma. Kokeen voi tehdä myös tönäisemällä rullalautaa ja mittaamalla sen kiihtyvyyttä, kuten kevään 2006 ylioppilaskokeessa.

Kiinnitetään kiihtyvyyssanturi laudanpätkän päälle. Nollataan liikkeen suuntainen kiihtyvyyssanturi ja asetetaan näytteenottotaajuudeksi 50 mittausta/s. Käynnistetään mittaus ja tönäistään lauta liikkeelle. Tönäisy on oltava tasainen, jotta laudanpätkä liukuu suoraan. Jos laudan toista reunaa tönäistään voimakkaammin, lauta lähtee helposti vinoon. Tällöin kiihtyvyyttä ei ole enää vain yhteen suuntaan ja tulokset vääristyvät. Tietokone piirtää mittausdatasta ( $t, a$ )-kuvaajan (kuva 12).



Kuva 12: Laudan tönäisy -kokeen kuvaajat.

Oppilaiden tehtävänä voisi olla esimerkiksi kuvaajan muodon tulkinta, laudan nopeuden määrittäminen työnnön lopussa tai laudan kulkeman matkan määrittäminen. Kuvaajasta nähdään, että välillä 4,1–4,2 s lauta on kiihtyvässä liikkeessä ja välillä 4,2–4,8 s laudan liike on tasaisesti hidastuvaa. Laudan nopeuden työnnön lopussa saa määritettyä graafisella integroinnilla, joka onnistuu helposti LoggerPron Integral-työkalulla. Tällöin alueen rajauksessa on oltava huolellinen, että rajattu alue on vain aika-akselin positiivisella tai negatiivisella puolella. Jos tehtävänä on määrittää nopeus nimenomaan työnnön lopussa, graafinen

integrointi tehdään vain sille välille, jossa lauta on kiihtyvässä liikkeessä. Graafisella integroinnillahan saadaan määritettyä nopeuden muutos kiihdytyksen aikana ja nyt tiedetään, että lauta lähtee liikkeelle levosta, joten laudan nopeus työnnön lopussa on sama kuin graafisella integroinnilla saatava nopeuden muutos. Tässä tapauksessa nopeus työnnön lopussa on 1,0 m/s.

Laudan kulkeman matkan selvittämiseksi kiihtyvyyden kuvaajaan tehdään graafinen integrointi kahdesti. Siihen ei LoggerProssa ei ole valmista työkalua, joten piirretään LoggerProlla laudan nopeuden kuvaaja ja tehdään sille graafinen integrointi. Tällä tavalla tehty integrointi ei ole kovin tarkka, sillä kiihtyvyyssanturi ei näytä aivan nolaa laudan ollessa paikallaan, vaikka se olisi nollattu ennen mittauksien aloittamista. Siksi kiihtyvyyden mittausdatasta piirretty nopeuden kuvaaja ei ole nollassa, vaikka lauta on paikallaan. Taulukossa 2 on vertailtu LoggerProlla määritettyjä matkoja mitattuihin matkoihin. Siitä huomataan, että LoggerProlla määritetyt matkat ovat kuitenkin melko lähellä todellisia Laudan kulkemia matkoja.

*Taulukko 2: Mitattujen ja LoggerProlla määritettyjen matkojen vertailu.*

| Mitattu matka (cm) | LoggerProlla määritetty matka (cm) |
|--------------------|------------------------------------|
| 38                 | 35                                 |
| 50                 | 54                                 |
| 42                 | 39                                 |

### 5.3.2 Punnuksen nosto

Punnuksen nosto -koe löytyy kuvaajineen useista oppikirjoista. Koe on helppo ja nopea tehdä, joten opettajan ei välttämättä tarvitse olla vain oppikirjan kuvaajan varassa. Koe voidaan tehdä käyttäen erillisiä voima- ja kiihtyvyyssanturia, mutta kun koe tehdään WDSS:llä, pärjätään yhdellä anturilla. WDSS:llä koetta tehdessä on syytä olla tarkkana, että voiman ja kiihtyvyyden positiiviset suunnat tulevat samaan suuntaan.

Yleensä koe on tehty siten, että punnus on laitettu voima-anturin koukkuun roikkumaan (kuva 13) ja systeemiä on nostettu pitämällä kiinni voima-anturista. Jos koe tehdään WDSS:llä kuten yleensä, voiman ja kiihtyvyyden itseisarvojen maksimi- ja minimikohdat ovat samassa kohdin. Kiihtyvyyden itseisarvoista puhuminen saattaa kuitenkin sekoittaa oppilaita, joten koe kannattaa suorittaa siten, että käyttää WDSS:ää itsessään punnuksena ja kiinnittää narun sen voima-anturin koukkuun ja nostaa WDSS:ää narusta (ks. kuva 13). Oppilaiden kannalta tämä on itse asiassa selkeämpi koejärjestely, sillä nyt tutkitaan nimenomaan kappaleeseen kohdistuvia voimia.

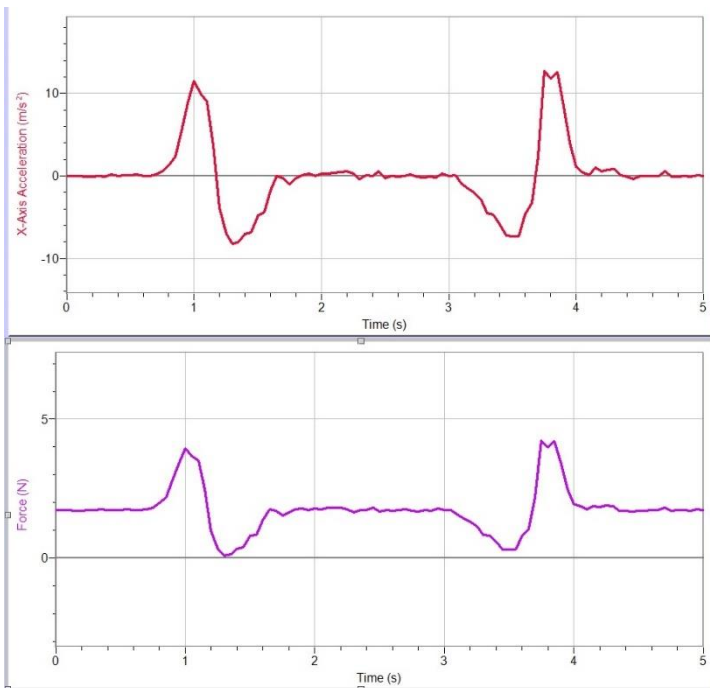


Kuva 13: Vasemmalla koejärjestely erillisellä punnuksella ja oikealla anturia käytetään punnuksena.

Nollataan voima-anturi, kun sen koukkuun ei ole laitettu mitään. Tämän jälkeen ripustetaan WDSS roikkumaan sen voima-anturin koukusta narun varaan. Tällöin x-suuntainen kiihtyvyyssanturi näyttää putoamiskiihtyvyyttä, joten nollataan se ja käynnistetään mittaus tämän jälkeen. Nostetaan punnusta ensin tasaisella nopeudella, jolloin huomataan, että voima-anturi näyttää punnuksen painoa ja kiihtyvyyssanturi edelleen nollassa.

Nostetaan seuraavaksi punnusta muuttuvalla nopeudella. Huomataan, että anturiin kohdistuva langan tukivoima ja anturin kiihtyvyys muuttuvat noston aikana (kuva 14). Kun punnusta nostetaan ylöspäin, voima on noston alussa suurempi kuin punnuksen paino ja noston lopussa pienempi. Voiman ollessa maksimissaan myös kiihtyvyys on suurin, ja voiman ollessa minimissään kiihtyvyys on pienin.

Kun punnusta lasketaan alaspäin muuttuvalla nopeudella, voima on noston alussa pienempi kuin punnuksen paino ja noston lopussa suurempi. Vastaavasti kiihtyvyys on pienin noston alussa ja suurin noston lopussa.



Kuva 14: Punnuksen nosto -kokeen kuvaajat.

Voima-anturi mittaa vain langan jännitysvoimaa eikä anturiin kohdistuvaa kokonaisvoimaa, joka määrää kiihtyvyyden. Siksi voima ei ole nollassa, kun kiihtyvyys on nollassa, kuten dynamiikan peruslaki ennustaa. Kokeesta

kuitenkin havaitaan, että voima ja kiihtyvyys saavuttavat maksimi- ja minimiarvonsa samalla hetkellä, kuten dynamiikan peruslain perusteella voi odottaa käyvän. Jos kokeen tulokset halutaan pakottaa noudattamaan täysin dynamiikan peruslakia, voima-anturin nollaus pitää tehdä, kun WDSS roikkuu narussa.

### 5.3.3 Hissin kiihtyvyys

Hissin kiihtyvyyden mittaaminen onnistuu sitä paremmin, mitä suurempi kiihtyvyys on ja mitä pidemmän ajan hissi kiihdyttää. Voiman, korkeuden ja kiihtyvyyden mittaustulokset voidaan tallentaa suoraan WDSS:ään, joten tietokonetta ei tarvita mukaan mittauksiin. Tämä mahdollistaa mittauksien tekemisen myös oppilaitoksen ulkopuolella, esimerkiksi huvipuistossa.

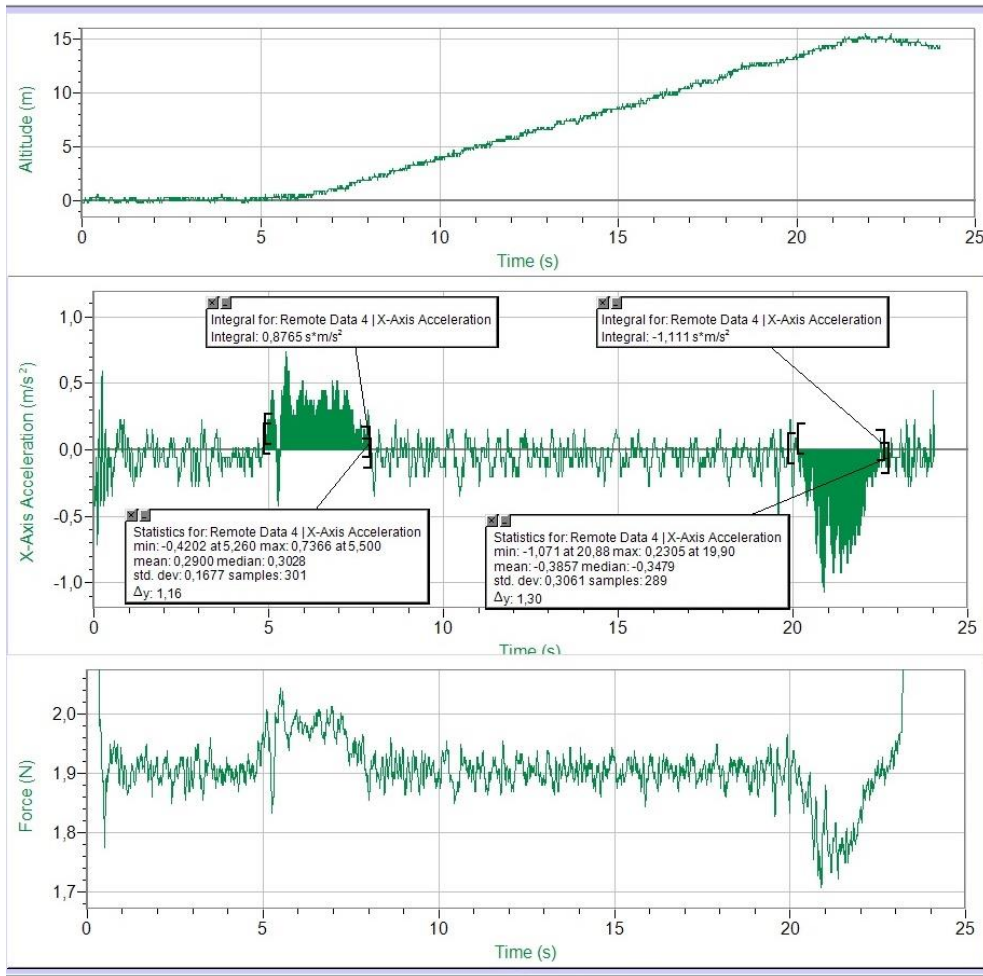
Mittauksen valmistelut on aloitettava tietokoneella, jolloin anturit pitää nollata kuten yleensäkin ennen mittauksien aloittamista. Voima-anturi nollataan, kun sen koukussa ei ole mitään painoa. Tämän jälkeen WDSS ripustetaan roikkumaan naruun voima-anturin koukusta ja nollataan kiihtyvyydanturit ja korkeusanturi. Asetetaan mittaustaajuudeksi 20 mittausta sekunnissa ja koko mittauksen kestoksi riittävän pitkä aika, esimerkiksi minuutti. WDSS:n ja tietokoneen yhteys katkaistaan ja anturi sammutetaan.

Kun mittaus aloitetaan, anturiin kytketään virta ja odotetaan, kunnes ihmisen kuvan viereinen valo palaa vihreänä. Anturi ei saisi heilua mittausten aikana, joten se kannattaa ripustaa roikkumaan statiiviin joko ripustuskoukusta tai voima-anturin koukusta. Voima-anturin koukkuja käytetään ainakin silloin, kun halutaan tutkia hississä matkustavaan olioon kohdistuvia voimia. Käynnistetään mittaus anturissa olevasta start/stop-napista ja laitetaan hissi liikkeelle. Niin kauan kuin ihmisen kuvan vieressä oleva valo vilkkuu vihreänä, mittaus on käynnissä, ja halutessaan tämän voi lopettaa ennen mittaussarjan loppumista start/stop-napista. Anturiin voi tallentaa 20 mittaussarjaa ennen niiden purkamista koneelle. Mittausten lopuksi anturi sammutetaan.

Kun mittaustulokset halutaan purkaa, anturiin kytketään virta ja anturi yhdistetään tietokoneeseen. Anturiin tallennetut mittaussarjat voidaan purkaa joko kaikki kerralla tai yksi kerrallaan. Samasta anturista voidaan purkaa mittaustuloksia useammalle koneelle, jos dataa ei poisteta siirtämisen yhteydessä. Kiihtyvyys, voima ja korkeus tulevat omiin koordinaattistoihinsa, kun mittaustulokset puretaan. Tarkemmat ohjeet datan tallentamiseen ja purkamiseen löytyvät WDSS:n käyttöoppaasta.

Tehtävänä voi olla esimerkiksi kuvaajien muodon tulkinta, suurimman ja pienimmän kiihtyvyyden määrittäminen, hissien nousukorkeuden määrittäminen tai hissien nopeuden määrittäminen. Kuvaajat ovat kuvassa 15, ja niissä positiivinen suunta on ylöspäin.  $(t, a)$ -kuvaajasta nähdään, että aluksi hissi on paikallaan tai liikkuu tasaisella nopeudella. Välillä 5–8 s hissi kiihdyttää, jonka jälkeen se on paikallaan tai liikkuu tasaisella nopeudella. Sen jälkeen se hidastaa välillä 20–22,5 s ja on lopuksi paikallaan tai liikkuu tasaisella nopeudella.

Korkeusanturin kuvaajan avulla voidaan päätellä, että ennen kiihdytystä hissi on paikallaan, sillä kuvaaja pysyy nollassa. Kiihdytyksen ja jarrutuksen välillä kuvaaja on nouseva suora, joten hissi liikkuu tasaisella nopeudella, ja jarrutuksen jälkeen hissi on paikallaan, sillä korkeuden kuvaaja on jälleen vakio. Voiman kuvaaja näyttää kappaleen painoa, kun hissi on paikallaan tai liikkuu tasaisesti. Hissin kiihdyttäessä voima on suurempi kuin kappaleen paino ja hissien hidastaessa puolestaan pienempi.



Kuva 15: Hissin kiihtyvyyks -kokeen kuvaajat.

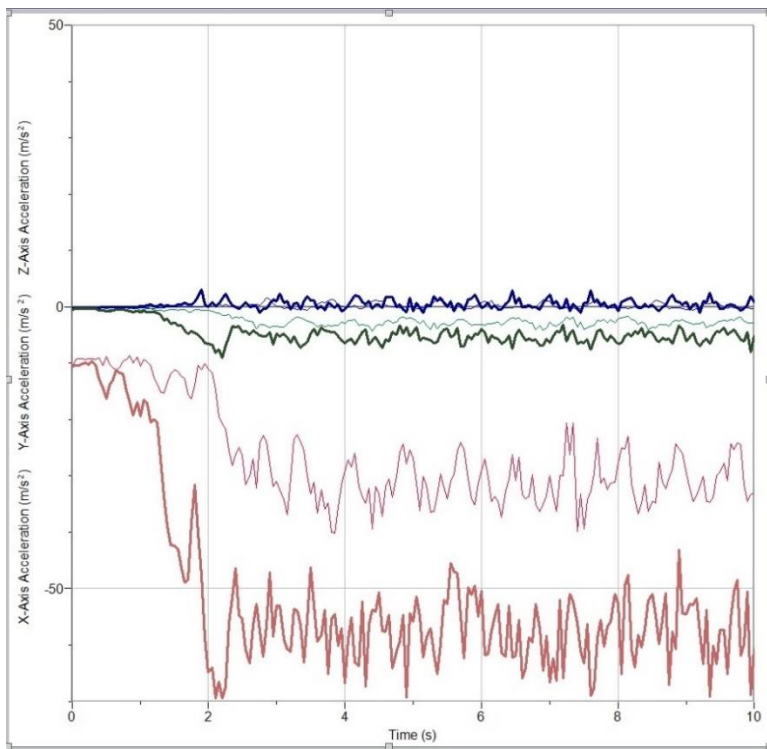
Hissin kiihtyvyyks saadaan luettua kuvaajalta Statistics-työkalulla. Nyt hissien kiihdyttäessä kiihtyvyyks on 0,29 m/s<sup>2</sup> ja hissien jarruttaessa -0,39 m/s<sup>2</sup>. Integral-työkalulla saadaan määritettyä nopeuden muutos ( $t,a$ )-kuvaajasta hissien kiihdyttäessä ja jarruttaessa. Se on sitä helpompaa, mitä tasaisempi hissien kiihdytys on. Nyt nopeuden muutos on kiihdytyksen aikana 0,88 m/s ja jarrutuksen aikana -1,11 m/s. Korkeuden kuvaajasta voidaan määrittää hissien nousukorkeus, joka tässä tapauksessa on 15 m. Nousukorkeuden määrittäessä apuna voi käyttää Examine-työkalua.

### 5.3.4 Normaalikiikhtyvyys

Normaalikiikhtyvyyttä havainnollistavan kokeen voi tehdä siihen tarkoitettulla pyörityslaitteella tai esimerkiksi vanhalla levysoittimella, mutta jos kumpaakaan näistä ei ole käytettävissä, kokeen voi tehdä myös pyörittämällä anturia narun päässä. Tämän voi tehdä myös ennen pyörityslaitteella tehtävää koetta johdantona aiheeseen esikvantifioivana kokeena.

Narussa pyöritys vaatii tarpeeksi tilaa ja riittävän vahvan narun, joka ei katkea pyörittämisen aikana. Nollataan x- ja y-suuntaiset kiihtyvyyssanturit ennen mittauksia WDSS:n ollessa vaakatasossa. Laitetaan kiihtyvyyssanturi ripustuskoukustaan roikkumaan naruun. Käynnistetään mittaus ja ruvetaan pyörittämään narua pitäen kulmanopeus mahdollisimman vakiona. Jos kokeella halutaan kvantifioida normaalikiikhtyvyys, pyöritys kannattaa tahdittaa esimerkiksi metronomin avulla, jolloin kulmanopeus saadaan laskettua.

LoggerPro piirtää mittausdatasta  $(t, a)$ -kuvaajan (kuva 16). Huomataan, että kiihtyvyys on x-suuntaan eli kohti pyörimisakselia. Kutsutaan tätä normaalikiikhtyvyydeksi  $a_n$ . y-suuntainen kiihtyvyys on likimain nolla riippuen siitä, kuinka hyvin kulmanopeus onnistutaan pitämään vakiona. Myös z-suuntaisen kiihtyvyyden pitäisi olla likimain nolla, jos anturi vain on pysynyt lähes vaakatasossa pyörityksen aikana. Toistetaan koe pitämällä anturin etäisyys pyörimisakselista vakiona ja varioidaan kulmanopeutta sekä varioidaan langan pituutta ja pidetään kulmanopeus vakiona. Tällöin huomataan, että kun kulmanopeus kasvaa, myös normaalikiikhtyvyys kasvaa ja kun etäisyys pyörimisakselista lyhenee, myös normaalikiikhtyvyys pienenee.



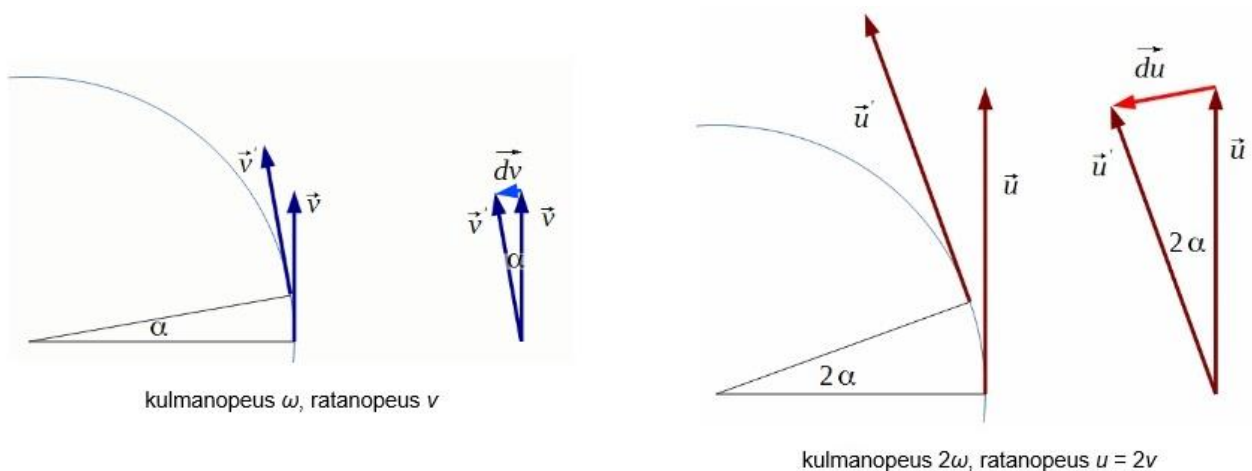
Kuva 16: Kiihtyvyyssanturia pyöritettiin narussa kahdella eri kulmanopeudella (punaiset viivat: x-suuntainen kiihtyvyys, siniset viivat: z-suuntainen kiihtyvyys ja vihreät viivat: y-suuntainen kiihtyvyys).



Jos mahdollista, koe kannattaa tehdä pyörityslaitteella, sillä narulla pyöritettäessä kulmanopeuden pitäminen vakiona on vaikeaa eikä x-suuntainen kiihtyvyys siten ei ole lähelläkään vakiota. Kulmanopeuden on oltava melko suuri, jotta anturi pysyy pyöriessään lähes vaakatasossa. Kvantifioinnissa haastetta aiheuttaa lisäksi pyöriksen tahdittaminen metronomilla, sillä se on vaikeaa ja vaatii harjoitusta.

Esikvantifioivan kokeen perusteella voidaan nyt laatia lakiennuste. Esikvantifioivan kokeen perusteella tiedetään, että normaalikiihtyvyys on verrannollinen radan säteeseen ja kulmanopeuteen. Normaalikiihtyvyyden ja kulmanopeuden relaation löytämiseksi tarkastellaan ympyräradalla liikkuvan kappaleen nopeusvektorin muuttumista. Kuvasta 17 nähdään, että kulmanopeuden kaksinkertaistussa myös ratanopeus ja tämän vektorin pituus kaksinkertaistuvat. Tällöin ratanopeuden vektori kääntyy samassa ajassa kaksinkertaisen kulman verran. (Hämäläinen 2017b)

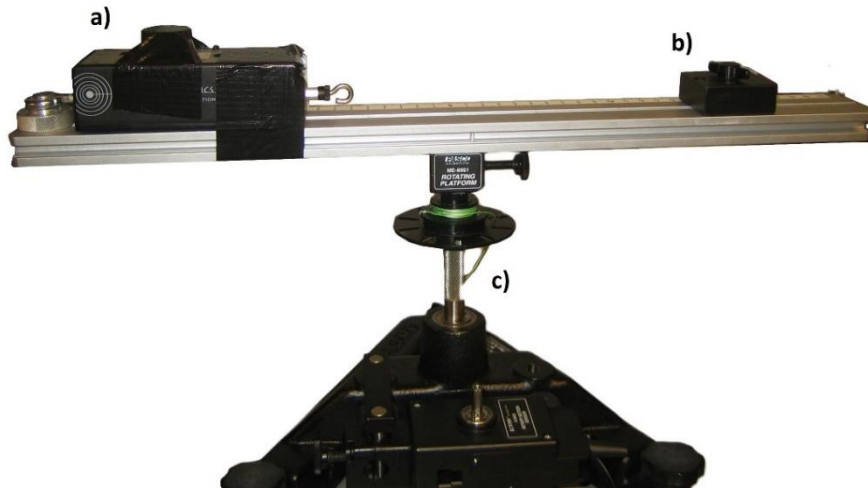
Vektorin pituus ja vektorien välisen kulman suuruus vaikuttavat erotusvektorin (kuvassa  $\vec{d}\vec{v}$  ja  $\vec{d}\vec{u}$ ) pituuteen. Kun sekä vektorin pituus että vektorien välinen kulma kaksinkertaistuvat kulmanopeuden kaksinkertaistussa, erotusvektorin pituus nelinkertaistuu. Tämän perusteella normaalikiihtyvyys on verrannollinen kulmanopeuden neliöön eli  $a_n = A\omega^2$ , missä  $A$  on esikvantifioivan kokeen perusteella radan säde. Normaalikiihtyvyys riippuu nimenomaan säteestä eikä esimerkiksi säteen neliöstä, sillä  $A$ :n dimension täytyy olla  $[A] = \frac{[a_n]}{[\omega^2]} = \frac{\text{m/s}^2}{1/\text{s}^2} = \text{m}$ . Laaditaan siis lakiennuste normaalikiihtyvyydelle  $a_n = r\omega^2$ . (Hämäläinen 2017b) Lakiennuste toteutuu, jos  $(\omega^2, a)$ -kuvaajaan saadaan sovitettua suora, jonka kulmakerroin on kappaleen etäisyys pyörimisakselista.



Kuva 17: Kulmanopeuden kaksinkertaistussa myös ratanopeuden vektorin pituus kaksinkertaistuu ja ratanopeuden vektori kääntyy kaksinkertaisen kulman samassa ajassa (Hämäläinen 2017b).

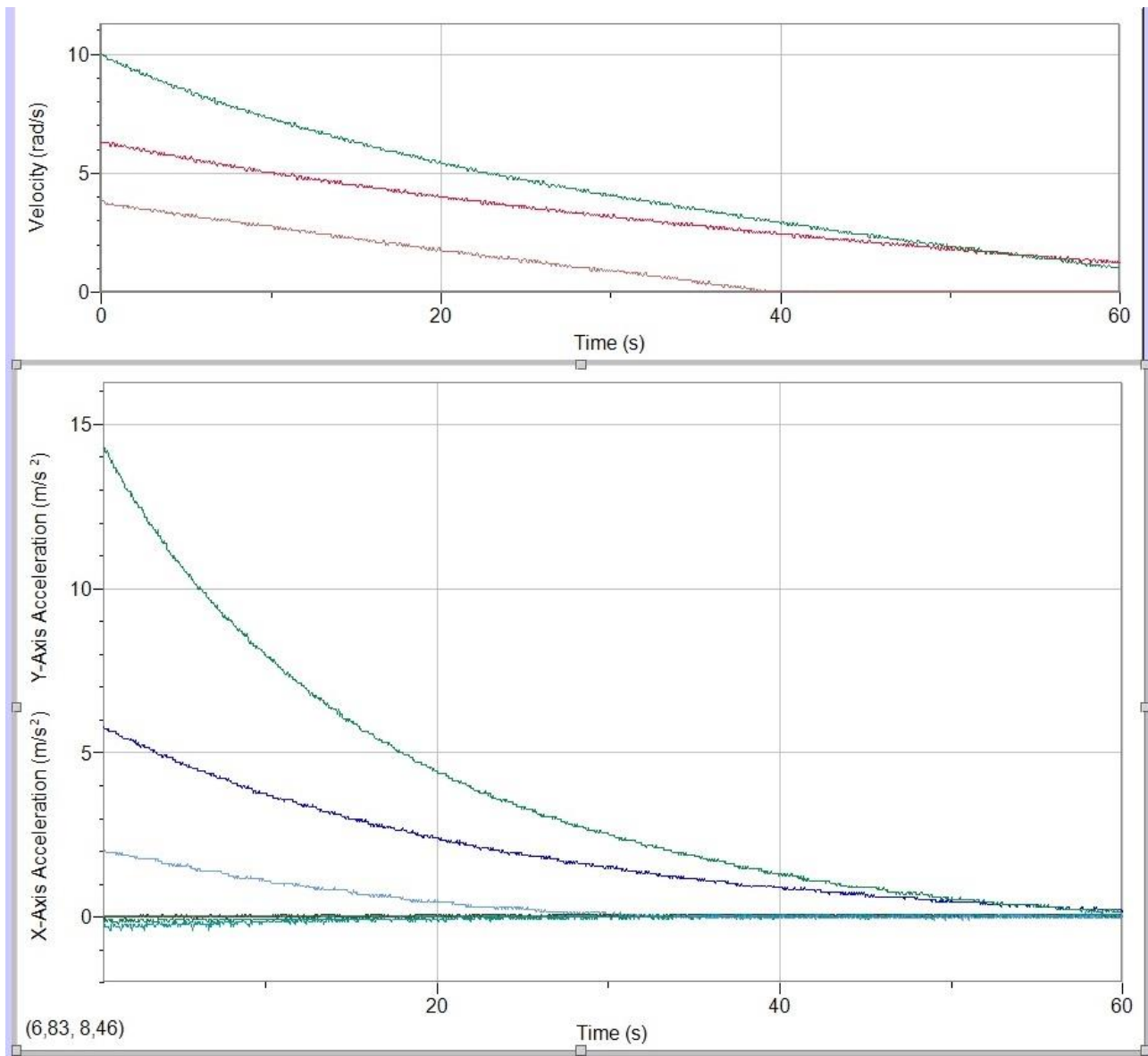
Kokeen tekeminen pyörityslaitteella vaatii laitteen ja kiihtyvyydenturianturin lisäksi kulmanopeuden mittaamiseen tarkoitetun anturin sekä vastapainon, jotta pyöriminen pysyy tasaisena. Koejärjestely on esitetty kuvassa 18. Pyörityslaitteeseen kuuluu valmiit vastapainot, mutta ne eivät välttämättä ole yhtä painavia kuin WDSS-anturi. Jos WDSS on kevyempi, lisäpainot voi teipata sen päälle, kunhan ei peitä

Bluetooth-antennia. Kiinnitetään siis kiihtyvyyssanturi ja vastapaino tukevasti pyörityslaitteeseen ja nollataan x- ja y-suuntaiset kiihtyvyyssanturit. Annetaan pyörityslaitteelle jokin alkunopeus, käynnistetään mittaus ja odotetaan, kunnes pyöriminen hidastuu ja lopulta pysähtyy tai mittaus loppuu.



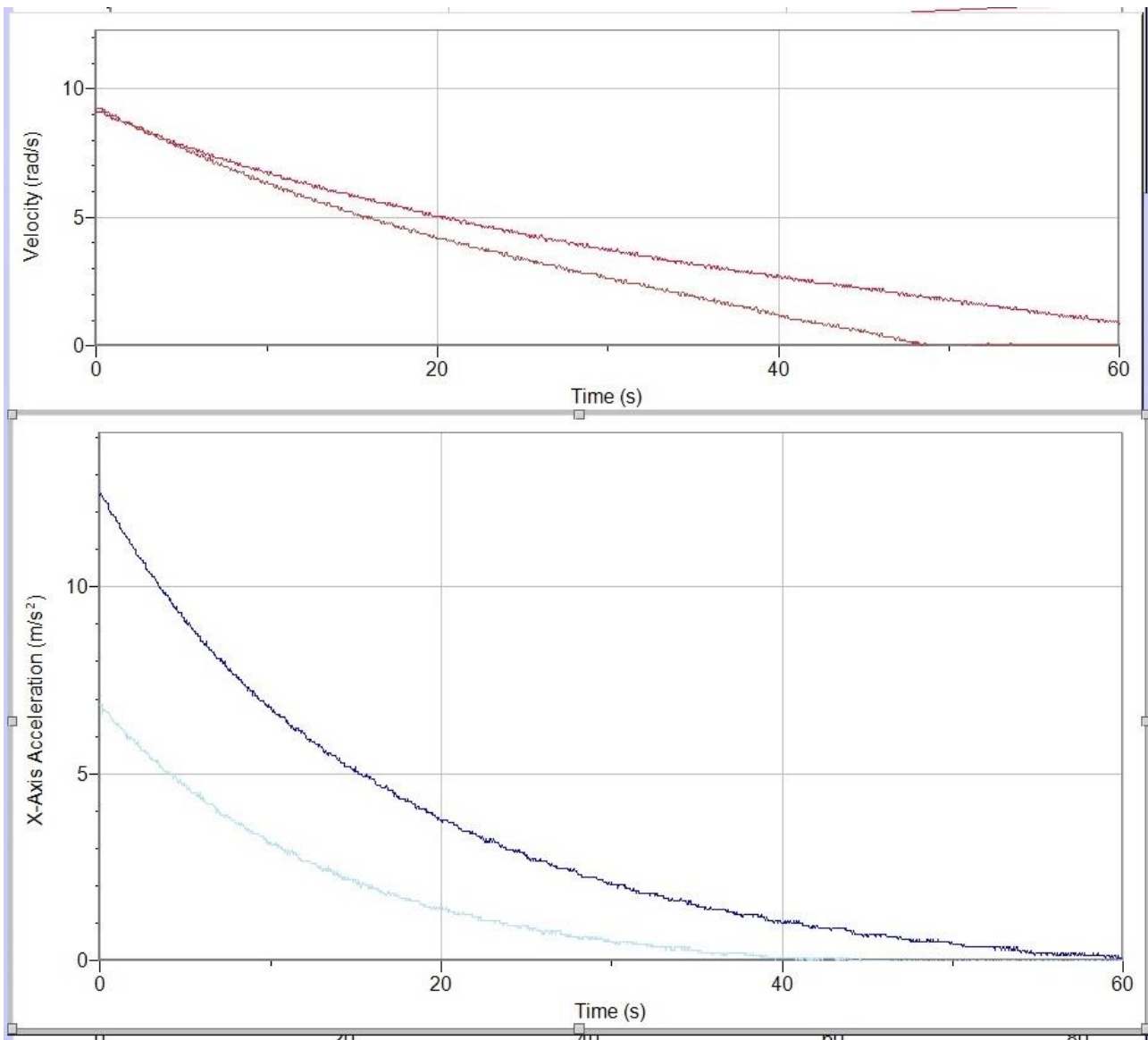
*Kuva 18: Koejärjestely pyörityslaitteella tehtävässä kokeessa: a) kiihtyvyyssanturi ja lisäpaino b) vastapaino c) pyörityslaite.*

LoggerPro piirtää mittausdatasta  $(t,a)$ -kuvaajan, josta huomataan, että vain x-suuntaan eli kohti pyörimisakselia on kiihtyvyyttä. Tätä x-suuntaista kiihtyvyyttä kutsutaan siis normaalikiihtyvyydeksi. Tallennetaan mittaus ja toistetaan koe varioimalla alkukulmanopeutta, jolloin huomataan, että normaalikiihtyvyys kasvaa, kun kulmanopeus kasvaa (kuva 19). Jokaisessa mittauksessa pyörimissuunnan on oltava sama, jotta kulmanopeuden merkki ei muutu.

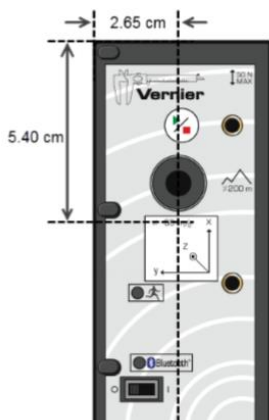


Kuva 19: Anturin etäisyys pyörimisakselista on pidetty vakiona ja alkukulmanopeutta on muutettu.

Pidetään seuraavaksi alkukulmanopeus vakiona ja varioidaan anturin etäisyyttä pyörimisakselista. Tällöin myös vastapainoa pitää muistaa siirtää. Piirretään nämäkin mittaukset samaan kuvaajaan (kuva 20), ja huomataan, että normaalikiihtyvyys pienenee, kun radan sädettä lyhennetään. Kirjataan säteet muistiin, ja sitä varten on tiedettävä kiihtyvyyssanturien tarkka paikka. WDSS:ssä anturit ovat suurin piirtein siinä olevan tekstin  $\pm 50 \text{ m/s}^2$  alla (ks. kuva 21).

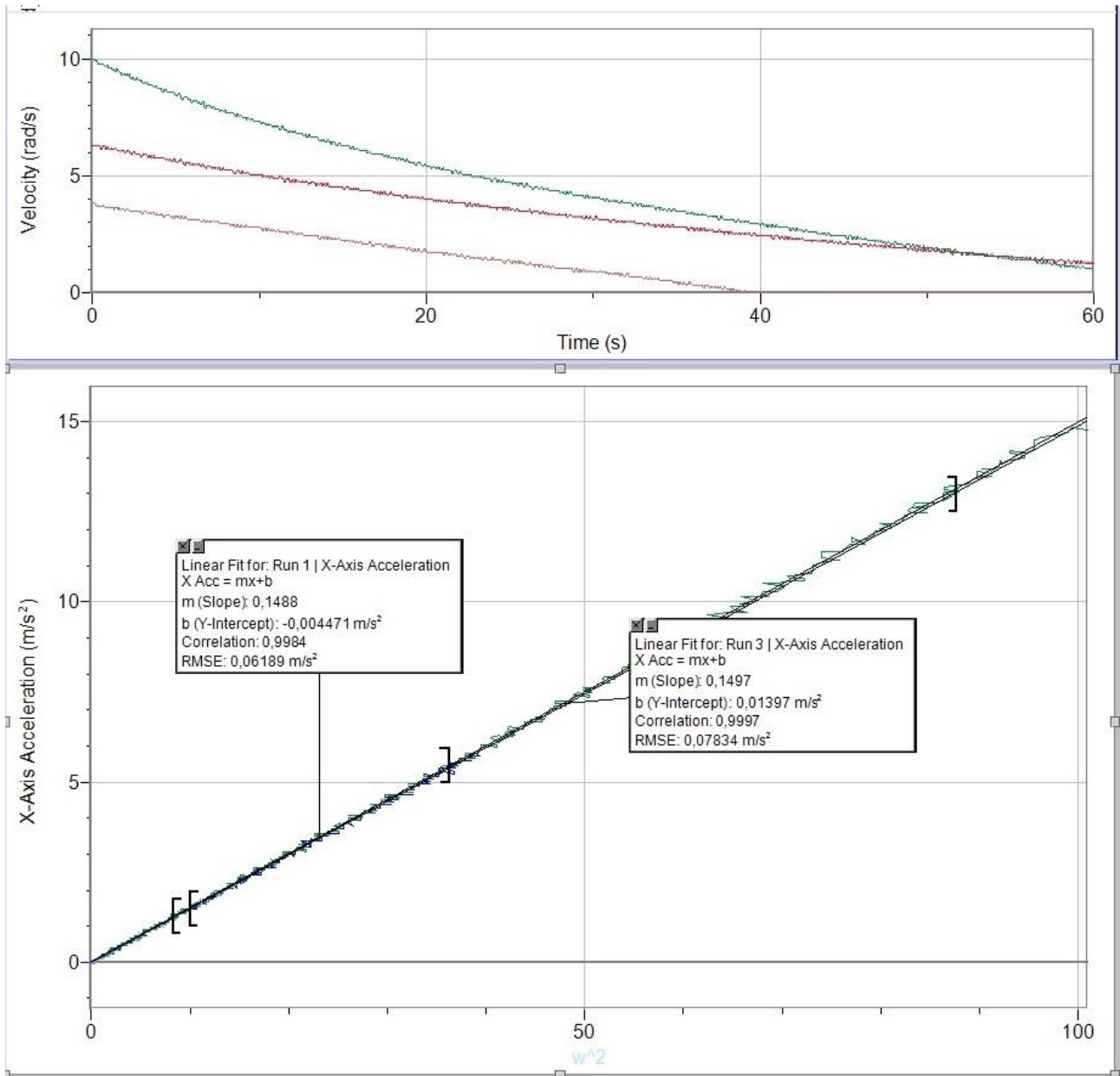


Kuva 20: Alkukulmanopeus on pidetty vakiona ja anturin paikkaa on muutettu.

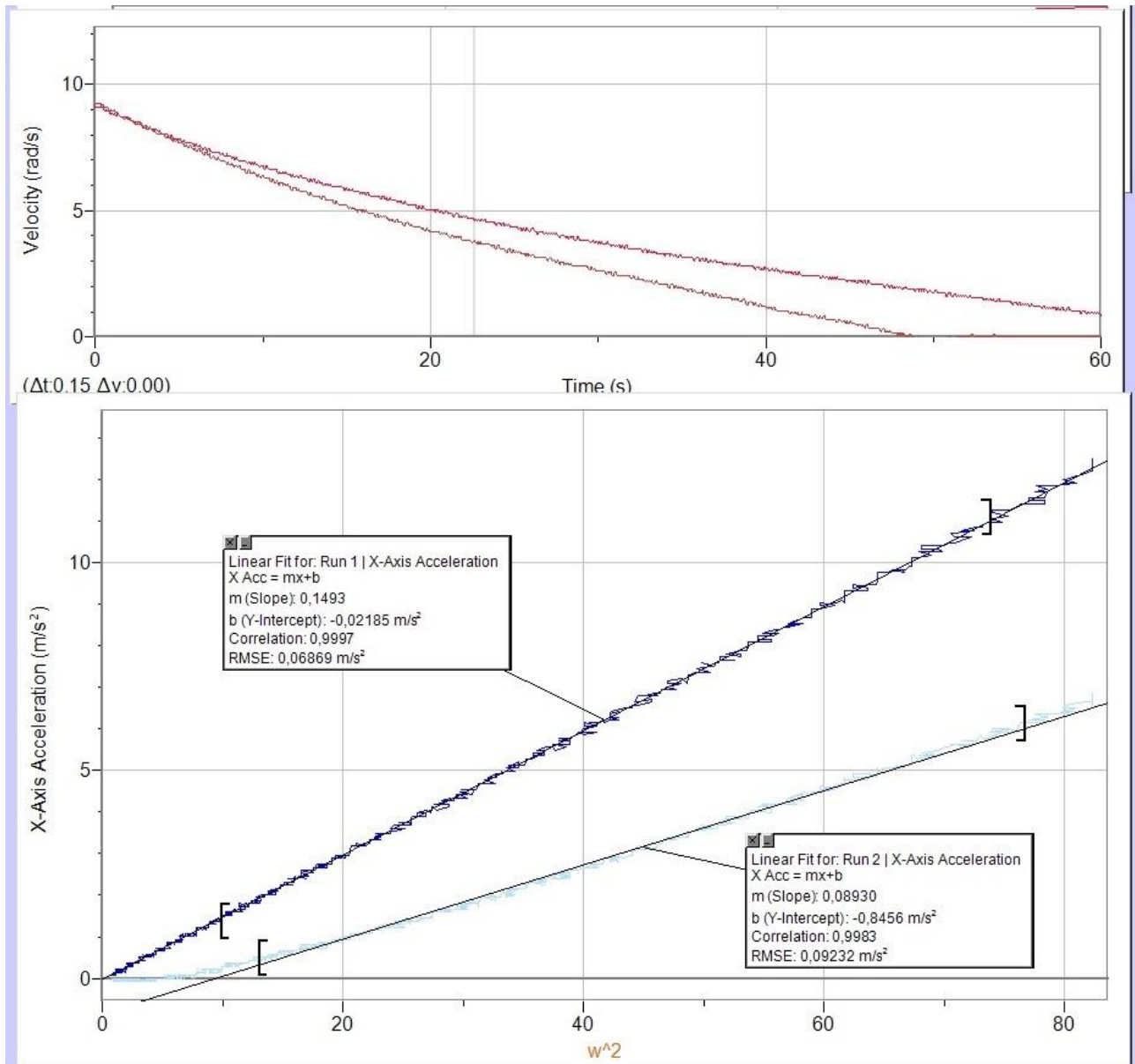


Kuva 21: Kiihtyvyyssanturien tarkka paikka on katkoviivojen leikkauspisteessä.

Piirretään mittaustulokset  $(\omega, a)$ -kuvaajaan vaihtamalla  $(t, a)$ -kuvaajan x-akselille kulmanopeus. Kuvaaja ei ole suora, joten piirretään tulokset lakiennusteen perusteella  $(\omega^2, a)$ -kuvaajaan (kuva 22 ja 23), jolloin saadaan nouseva suora. Kuvasta 22 huomataan, että kun kulmanopeutta muutetaan, kuvaajan kulmakerroin ei muutu. Toisaalta kun anturia siirrettiin lähemmäs pyörimisakselia,  $(\omega^2, a)$ -kuvaajan kulmakerroin pieneni (kuva 23).



Kuva 22: Kulmanopeutta muutettiin jälkimmäiseen mittaukseen, mutta ( $\omega^2, a$ )-kuvaajan kulmakerroin ei muuttunut.



Kuva 23: Kun kiihtyvyyssanturi siirrettiin lähemmäs pyörimisakselia, ( $\omega^2, a$ )-kuvaajan kulmakerroin pieneni.

Lasketaan kuvan 23 kuvaajien kulmakertoimet Linearfit-työkalulla. Taulukossa 3 on vertailtu kulmakertoimia ja kiihtyvyyssanturien etäisyyttä pyörimisakselista, ja nyt huomataan, että ne ovat hyvin lähellä toisiaan. ( $\omega^2, a$ )-kuvaajan kulmakerroin kuvaa siis kappaleen etäisyyttä pyörimisakselista. Normaalikiihtyvyydelle aiemmin laadittu lakiennuste  $a_n = r\omega^2$  sopii siis kuvaamaan normaalikiihtyvyyden riippuvuutta säteestä ja kulmanopeudesta.

Taulukko 3: Anturin etäisyys pyörimisakselista.

| Anturin etäisyys (cm) | Kulmakerroin (cm) |
|-----------------------|-------------------|
| 7                     | 9                 |
| 14                    | 15                |

### 5.3.5 Benjihyppääjä

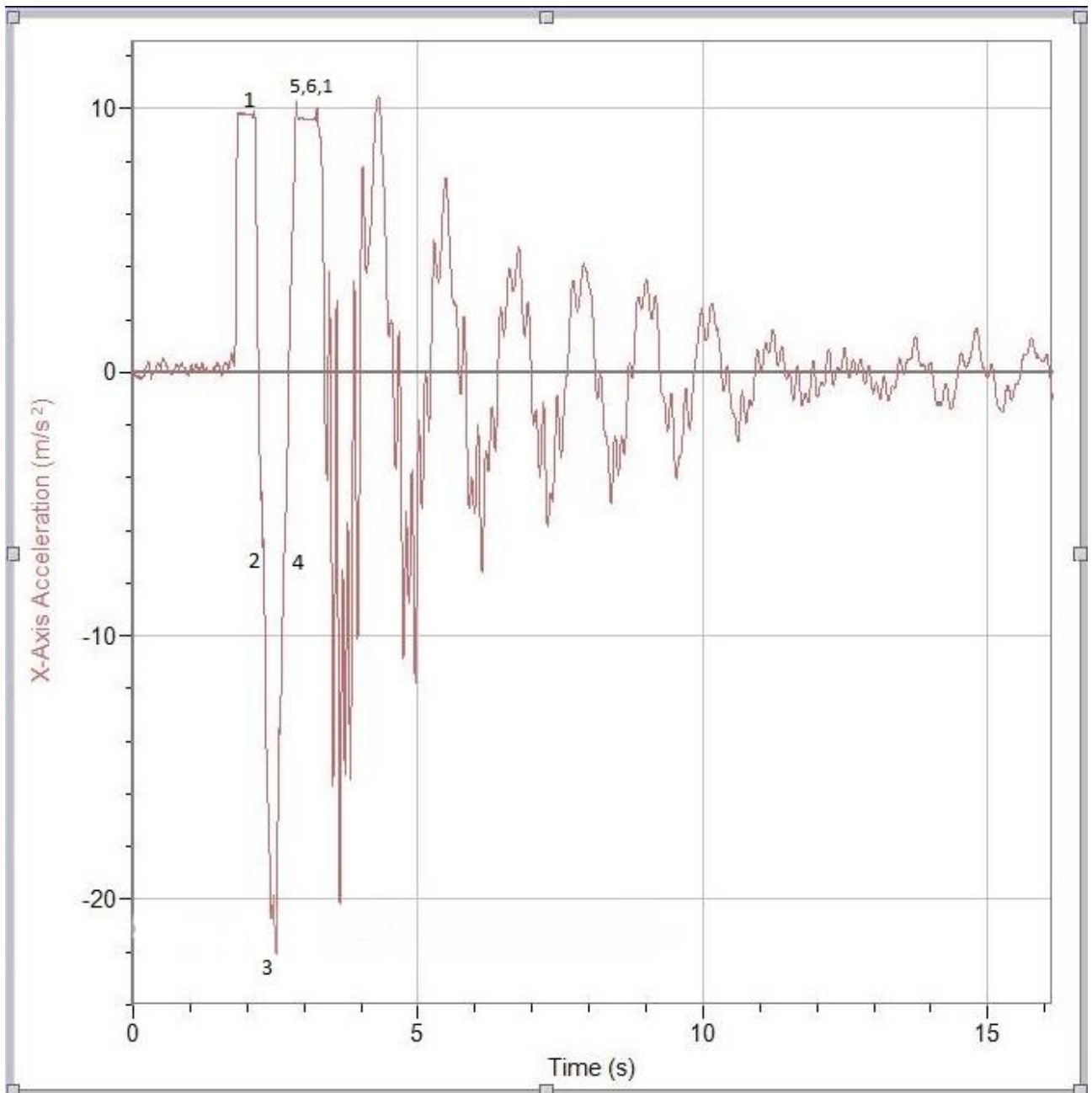
Kuminauhan sopiva pituus kannattaa etsiä ensin punnuksella, joka on yhtä painava kuin WDSS. Tavoitteena on mahdollisimman pitkä pudotus, jotta mittauspisteitä saadaan paljon, mutta anturi ei saa osua lattiaan kuminauhan venyessä äärimmilleen. Koska anturi on varsin kallis, sitä ei kannata käyttää testaamiseen. Benjihyppääjää varten tarvitaan riittävästi tilaa, sillä anturi ei välttämättä palaa ylöspäin suorassa linjassa eikä se silloin saa osua mihinkään.

Kiinnitetään kuminauhan toinen pää WDSS:n ripustuskoukkuun ja toinen pää mahdollisimman korkealle esimerkiksi pöydällä olevaan statiiviin. Kuminauha voidaan tehdä solmimalla kumilenkkejä yhteen tai käyttämällä pyörän venttiilikumia. Kun WDSS on lähtöpisteessään, x-suuntainen kiihtyvyyssanturi näyttää putoamiskiihtyvyyttä, vaikka WDSS on paikallaan. Nollataan siis kiihtyvyyssanturit ennen mittauksen käynnistämistä. Näytteenottotaajuuden on hyvä olla tässä kokeessa suuri, ainakin 100 mittausta/s, sillä muutokset ovat nopeita. Alla olevassa kuvaajan mittauksissa näytteenottotaajuus oli 200 mittausta sekunnissa. Käynnistetään mittaus ja päästetään anturi putoamaan mahdollisimman suoraan alaspäin, kun kuvaaja alkaa piirtymään näytölle.

LoggerPro piirtää mittausdatan  $(t, a)$ -koordinaatistoon (kuva 24), jossa positiivinen suunta on alaspäin, ja sen takia putoamiskiihtyvyyden merkki on positiivinen. Hyppääjä on paikallaan välillä 0–1,8 s. Hypyn aluksi benjihyppääjän kiihtyvyys kasvaa hyvin nopeasti putoamiskiihtyvyyteen, ja sen jälkeen hyppääjä putoaa vakiokiihtyvyydellä. Tällöin hyppääjään vaikuttaa vain gravitaatio, sillä kumilanka on vielä löysä. Benjihyppääjän voimakuviot hypyn eri vaiheissa on esitetty kuvassa 25 ja tilanne 1 kuvaa hypyn alussa olevaa vapaan pudotuksen väliä 1,8–2 s.

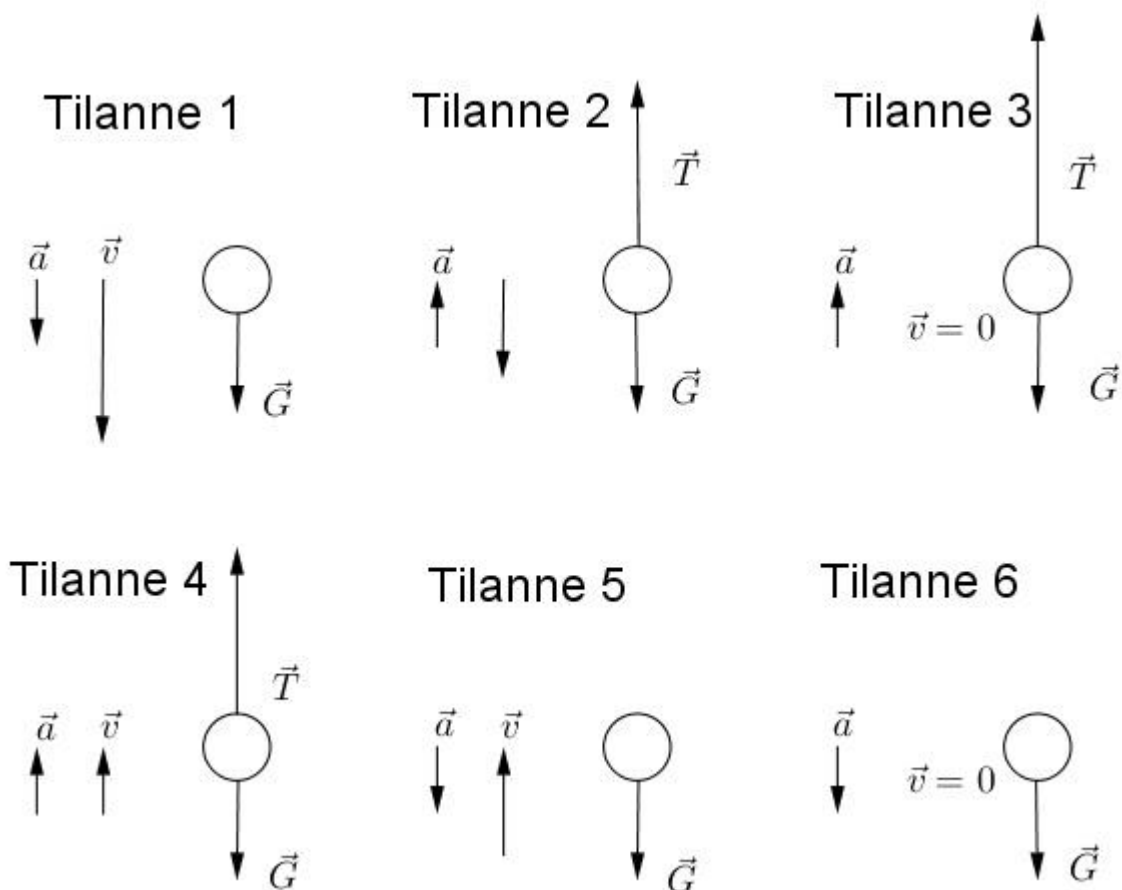
Kuvan 25 tilanteessa 2 kumilanka on kiristynyt, mikä aiheuttaa hyppääjään langan jännitysvoiman  $T$ , jonka takia hyppääjän vauhti alkaa hidastua. Tämä näkyy kuvaajalla kiihtyvyyden pienenemisenä. Kiihtyvyyden funktion ollessa nolla langan jännitysvoima ja gravitaatio ovat hetkellisesti yhtä suuret. Tilanteessa 3 hyppääjä on alhaalla ja sen nopeus on hetkellisesti nolla. Tällöin kumilangan jännitysvoima on suurin ja aiheuttaa hyppääjälle ylöspäin suuntautuvan kiihtyvyyden. Kuvajasta nähdään, että ala-asemassa hyppääjän kiihtyvyys on hetkellisesti hyvin suuri.

Tilanteessa 4 kumilanka on vielä tiukkana, joten se kiihdyttää hyppääjän vauhtia. Tilanteessa 5 kumilanka on löystynyt ja hyppääjään vaikuttaa vain gravitaatio, joten hyppääjällä on vain gravitaation aiheuttama putoamiskiihtyvyys. Tilanteessa 6 hyppääjä on ylhäällä ja sen nopeus on hetkellisesti nolla, mutta gravitaation aiheuttama kiihtyvyys ei ole. Lopulta benjihyppääjä pomppii edestakaisin kuten vaimennettu harmoninen värähtelijä.



Kuva 24: Benjihyppäjän (t,a)-kuvaaja. Kuvassa olevat numerot viittaavat kuvan 25 eri tilanteisiin.





Kuva 25: Benjihyppäjän voimakuviot.

### 5.3.6 Heiluri

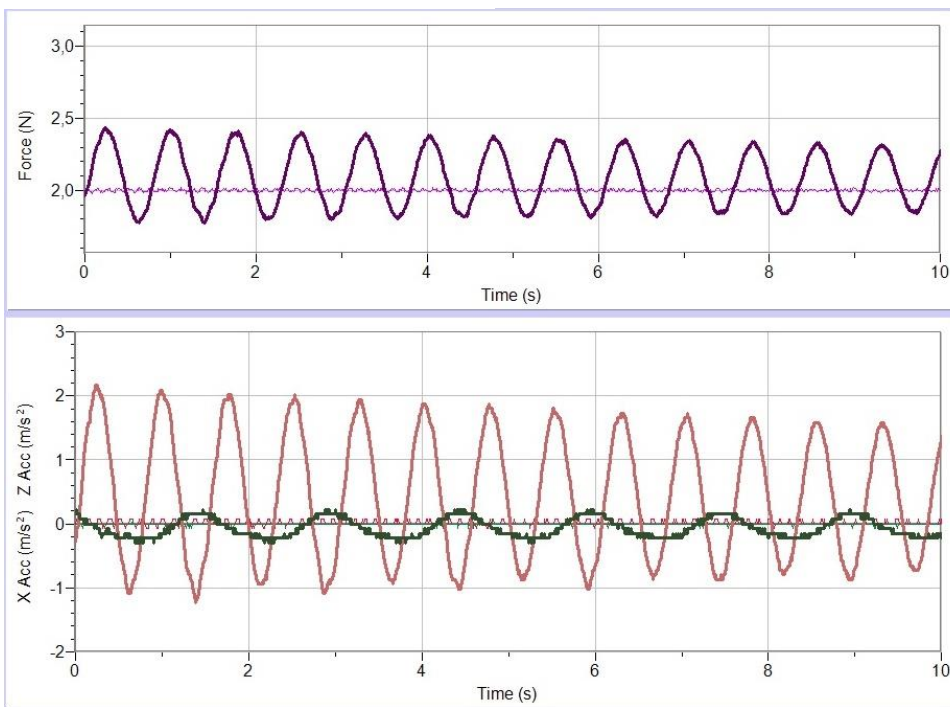
Yleensä heilurikokeessa käytetään voima-anturia, jolloin itse anturia ei voi käyttää heilurina johtojen takia. Jos kokeen tekee WDSS-anturilla, johdot eivät haittaa mittauksia. Kiihtyvyyssanturin ripustuksessa on kuitenkin oltava tarkempi kuin pelkän voima-anturin, sillä kiihtyvyyssanturi ei saa päästä pyörimään akselinsa ympäri. Käytännössä tämän voi estää käyttämällä narun sijaan kiinteää heilurin vartta tai tekemällä v-ripustuksen kuten kuvassa 26. WDSS:n kääntymistä sivusuunnassa on pyritty estämään laittamalla taitettu juomapilli naruun voima-anturin koukun kohdalle.

Mittauksissa näytteenottotaajuus oli 200 mittausta/s. Nollataan voima-anturi ennen kuin WDSS ripustetaan roikkumaan voima-anturin koukusta. Tämän jälkeen ripustetaan WDSS heiluriksi ja nollataan kiihtyvyyssanturit, kun heiluri on paikallaan. Tehdään ensimmäinen mittaus heilurin ollessa paikallaan, jolloin  $(t, F)$ -kuvaajaan saadaan näkyviin langan jännitysvoima. Se on yhtä suuri kuin heilurin paino heilurin ollessa paikallaan.



Laitetaan WDSS heilumaan ja käynnistetään mittaus. Ensimmäiset heilahdukset lähtevät monesti vinoon, tai anturi kääntyy vähän, joten kannattaa odottaa hetki heilumisen tasaantumista ennen kuin käynnistää mittauksen. Heiluria ei kannata laittaa heilumaan kovin suurella amplitudilla, sillä silloin se lähtee herkemmin vinoon tai pyörimään akselinsa ympäri. Piirretään LoggerProlla x- ja z-suuntaisten kiihtyvyyksien ja voiman kuvaajat omiin koordinaatistoihinsa (kuva 27). X-suuntainen kiihtyvyys on kohti radan keskipistettä, eli sen pitäisi kuvata normaalikihtyvyyttä. Z-suuntaisen kiihtyvyyden puolestaan pitäisi kuvata heilurin tangentialikihtyvyyttä.

Kuva 26: Heilurikokeen koejärjestely.

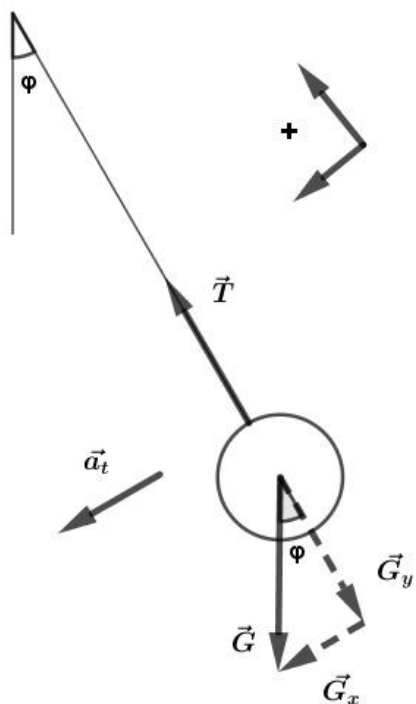


Kuva 27: Heilurin (t,a)- ja (t,F)-kuvaajat. Kiihtyvyyden kuvaajassa x-suuntainen kiihtyvyys on kuvattu punaisella viivalla ja z-suuntainen vihreällä viivalla.

Kuvasta 27 nähdään, että voima ja normaalikihtyvyys ovat maksimi- ja minimiarvoissaan aina samalla hetkellä. Voiman ja normaalikihtyvyyden maksimiarvojen kohdalla heiluri on ala-asemassa, ja tällöin nopeus on suurin. Silloin kun voima ja normaalikihtyvyys ovat minimiarvoissaan, heiluri on ääriasemassa. Tällöin nopeus on nolla ja siten normaalikihtyvyydenkin pitäisi olla. Näin ei kuitenkaan ole, vaan normaalikihtyvyys on peräti negatiivinen, minkä ei pitäisi fysikaalisesti olla mahdollista.

WDSS-anturin ongelmana heilurin mittauksissa on se, että anturi ei erota liikkeen suuntaista ja gravitaation liikkeen suuntaista komponenttia toisistaan. Kun heiluri ei ole tasapainoasemassaan, gravitaatio kohdistaa siihen liikkeen suuntaisen komponentin, mikä vääristää mittaustuloksia ja minkä vuoksi ääriasemassa x-suuntainen kiihtyvyys ei ole nolla. Jos kiihtyvyyssanturi nollattaisiinkin ääriasemassa, tasapainoaseman kiihtyvyyden arvo puolestaan vääristyisi.

Koska WDSS-anturilla voidaan mitata kiihtyvyyttä kolmeen suuntaan, voisi ajatella, että anturilla voitaisiin mitata heilurin tangenttikiihtyvyys  $a_t$ . Kuvassa 27 on esitetty myös heilurin z-suuntainen kiihtyvyys eli tangenttikiihtyvyys. Z-suuntainen kiihtyvyys saadaan siis mitattua, mutta se ei ole heilurin tangenttikiihtyvyys. Kuvassa 28 on heilurin voimakuvio sen ollessa ääriasemassa, jonka on ajateltu olevan noin  $30^\circ$  sivussa tasapainoasemasta. Tällöin tangenttikiihtyvyyden pitäisi olla kuvassa olevan ennusteen perusteella  $a_t = g \sin(30) \approx 5 \text{ m/s}^2$  eli paljon suurempi kuin mitattu z-suuntainen kiihtyvyys on. WDSS-anturilla ei siis pystytä mittaamaan heilurin normaali- tai tangenttikiihtyvyyttä vaan ainoastaan langan heiluriin kohdistamaa tukivoimaa.



### Heilurin liikeyhtälö

$$\vec{T} + \vec{G} = m\vec{a}$$

### Liikeyhtälöt komponenteittain

$$y : \vec{T} + \vec{G}_y = 0$$

$$x : \vec{G}_x = m\vec{a}_t$$

x-suuntaisesta liikeyhtälöstä saadaan

$$G \sin(\varphi) = ma_t$$

ja edelleen

$$a_t = g \sin(\varphi)$$

Kuva 28: Heilurin voimakuvio ääriasemassa.

## 6. Ennakkokäsitykset ja kokeet

Luvussa 2.2 käytiin läpi oppilaiden yleisiä kiihtyvyyteen liittyviä ennakkokäsityksiä. Luvussa 5 puolestaan esiteltiin kiihtyvyyksanturilla tehtäviä kokeita, joista joillakin voidaan mahdollisesti korjata näitä ennakkokäsityksiä tieteellistä tietoa vastaaviksi. Joidenkin ennakkokäsityksien korjaamiseen voidaan käyttää useampaa koetta ja toisaalta aivan kaikkiin ei pystytä näillä kokeilla vaikuttamaan.

### 6.1 Kiihtyvyys ja voima

Kiihtyvyys vaatii kasvavan voiman -ennakkokäsitys pohjautuu ennakkokäsitykseen, jonka mukaan tasainen nopeus vaatii vakio voiman (esim Halloun & Hestenes 1985). Tässä tapauksessa ei siis riitä, että kiihtyvyyttä käsiteltäessä pyritään korjaamaan ennakkokäsitystä, vaan korjaaminen on aloitettava jo nopeuden kohdalla. Toisaalta ennakkokäsitykset ovat pysyviä, joten aiheeseen voi olla tarpeellista palata vielä kiihtyvyyttä käsiteltäessä. Vakiovoima saa aikaan vaunun tasaisen kiihtyvyyden vaunun kiihdytys punnuksella -kokeessa toisin kuin ennakkokäsityksen perusteella tapahtuu. Myös punnuksen nosto -koe sopii tähän, kunhan nollauksen tekee punnuksen roikkuessa narussa ja pakottaa siten tulokset noudattamaan dynamiikan peruslakia.

Kiihtyvyys vaatii kasvavan voiman -ennakkokäsitys vaikeuttaa myös Newtonin toisen lain  $F = ma$  ymmärtämistä, koska laki on ennakkokäsityksen vastainen. Siksi voimaa kvantifioitaessa on syytä korostaa vaunun kiihdytys punnuksella -kokeessa voiman ja nimenomaan kiihtyvyyden verrannollisuutta. Kiihtyvyyksanturin hyvä puoli tässä kokeessa on se, että tällä anturilla tehtävissä mittauksissa tulee vakiovoiman ja tasaisen kiihtyvyyden yhteys oppilaille selvemmin esille kuin ultraäänianturilla tehtävissä mittauksissa.

### 6.2 Kiihtyvyys ja nopeus

Monilla oppilailta on vaikeuksia ymmärtää kiihtyvyyden määritelmää, ja siksi he helposti sekoittavat nopeuden ja kiihtyvyyden (esim. Trowbridge & McDermott 1981). Jotta kiihtyvyyksanturia voidaan käyttää mittauksissa, kiihtyvyyden on jo oltava kvantifioitu. Samalla kokeella, jolla osoitettiin kiihtyvyyksanturin mittaavan kiihtyvyyttä, voidaan kiihtyvyys myös kvantifioida. Koska nopeus ja kiihtyvyys menevät helposti sekaisin, tämä koe on tärkeä, jotta oppilaat ymmärtävät, että ultraäänianturi- ja kiihtyvyyksanturi mittaavat eri suureita.

Ongelmat kiihtyvyyden määritelmässä heijastuvat kahden kappaleen kiihtyvyyksien vertailuun, joka on oppilaille monesti vaikeaa. Tässä työssä esitellyistä kokeista mikään ei varsinaisesti sovellu kiihtyvyyksien vertailuun, vaan tähän vertailuun olisi hyvä käyttää kahta samaan aikaan liikkuvaa kappaletta. Jos käytettävissä on toinen kiihtyvyyksanturi ja kaksi herkkäliikkeistä vaunua, vertailu on helppo toteuttaa.

Kuvaajien tulkinnessa vaikeinta oppilaille on yleensä nopeuden laskeminen kiihtyvyyden kuvaajasta (Hale 1996). Laudan tönäisy ja hissien kiihtyvyys -kokeissa tätä harjoiteltiin, mutta mikään ei estä tekemästä tätä muissakin kokeissa, sillä LoggerProlla nopeuden laskeminen graafisella integroinnilla kiihtyvyyden kuvaajasta käy vaivattomasti.

### 6.3 Kiihtyvyyden suunta

Monet oppilaat ajattelevat, että nopeus ja kiihtyvyys ovat aina saman merkkiset, joten negatiivinen kiihtyvyys tarkoittaa aina hidastuvaa liikettä (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987). Vaunu rampilla -kokeessa vaunun kiihtyvyys on koko ajan negatiivinen, vaikka vaunun vauhti, joka on nopeuden itseisarvo, kasvaakin vaunun tullessa alas ramppia. Tässä kokeessa käy hyvin ilmi, että pelkästä kiihtyvyyden kuvaajasta ei voida päätellä, kasvaako vai pieneneekö kappaleen nopeus. Tämän ennakkokäsityksen kannalta on molempien anturien mittausdata hyödyllistä, jotta kummankin suureen merkit ovat näkyvissä.

Tilanteet, joissa kappale vaihtaa rampilla suuntaa, ovat vaikeita oppilaille, ja heidän ennakkokäsityksensä mukaan kiihtyvyys menee nolnaan samalla kuin nopeuskin (esim. Trowbridge & McDermott 1981). Vaunu rampilla -koe soveltuu hyvin tämänkin ennakkokäsityksen korjaamiseen. Ultraäänianturilla kiihtyvyyden saa laskettua mittausdatasta, mutta oppilaiden ennakkokäsityksen korjaamiseen se ei välttämättä riitä varsinkaan, jos heillä on vielä taipumus sekoittaa nopeus ja kiihtyvyys. Kiihtyvyydenturin mittausdatasta piirretystä  $(t,a)$ -kuvaajasta sen sijaan käy hyvin selväksi, ettei kiihtyvyys mene nolnaan missään vaiheessa ramppia. Ennakkokäsityksen kannalta kiihtyvyydenturi tuo siis tähän kokeeseen selkeyttä ja helpottaa ennakkokäsitykseen vaikuttamista.

Suuntaa vaihtavan kappaleen kiihtyvyyttä voidaan tarkastella myös benjihyppääjäkokeessa, vaikkei siinä nopeutta mitatakaan. Oppilaille ei siis välttämättä ole yhtä selvää kuin vaunu rampilla -kokeessa, että nopeus on nolla kääntopisteissä. Benjihyppääjän kuvaajaa tulkittaessa voikin kokeilla, ovatko oppilaat ymmärtäneet, että suuntaa vaihdettaessa kiihtyvyys ei ole nolla, vaikka nopeus onkin nolla. Tämän voi toteuttaa esimerkiksi antamalla oppilaille tehtäväksi selittää kuvaajan muoto ja piirtää hyppääjän voimakuviot hypyn eri vaiheissa. Jos oppilas esittää, että hyppääjä on takaisin ylhäällä muualla kuin kuvaajan vaakasuoralla kohdalla, hänen ennakkokäsityksensä vaikuttaa vielä ajatteluun.

### 6.4 Kiihtyvyys ympyräradalla

Ympyräradalla vaikuttaviin voimiin liittyy monia ennakkokäsityksiä, joista johtuen monilla oppilailla on ennakkokäsitys, että ympyräradalla vakionopeudella liikkuvalle kappaleelle ei ole kiihtyvyyttä. Tähän ennakkokäsitykseen voidaan vaikuttaa vain kokeilla, joissa kiihtyvyydenturia pyöritetään vakionopeudella. Yksinkertaisimmillaan kiihtyvyydenturia voidaan pyörittää narun päässä, jolloin havaitaan, että kappaleen kiihtyvyys on kohti radan keskipistettä.

Normaalikiihtyvyyden voi kvantifioida myös voima-anturin avulla, mutta silloin kiihtyvyys ei näy tuloksissa yhtä konkreettisesti. Kiihtyvyyden tarkka mittaaminen on tärkeää varsinkin, jos oppilaille ei ole vielä aivan selvää, että kiihtyvyyden aiheuttaa vakiovoima, ei muuttuva voima. Normaalikiihtyvyyden kokeisiin kiihtyvyyssanturi tuo siis merkittävän lisän ennakkokäsityksiin vaikuttamisen kannalta, sillä kiihtyvyys saadaan mitattua suoraan eikä esimerkiksi voiman kautta.

## 7. Pohdinta

Seuraavat pohdinnat ovat kirjoittajan omia kokemuksia ja havaintoja anturien käyttömahdollisuuksista. Kutakin koetta tarkastellaan erikseen, ja pohditaan kokeiden suoritusta eri antureilla. Huomiota kiinnitetään siihen, tuoko kiihtyvyyssanturi kokeisiin mitään uutta tai auttavatko sillä saadut mittaustulokset ennakkokäsityksien korjaamista.

Kokeissa vaadittavan välineistön takia enin osa kokeista on tehtävä demonstraationa, sillä suurimmalla osalla lukioista on esimerkiksi korkeintaan yksi ilmatyyny rata tai muu vastaava. Pelkällä luennoinnilla on ennakkokäsityksiin kuitenkin vaikea vaikuttaa (Ahtee 1998; Rusanen & Lappi 2014a), joten kokeita käsittelevien alalukujen yhteyteen on koottu muutamia kysymyksiä, joita voi antaa oppilaille pohdittavaksi ennen koetta tai sen jälkeen. Heilurikokeen yhteydessä kysymyksiä ei ole, koska aiemmin todettiin, ettei WDSS-anturilla saada mitattua heilurin normaali- tai tangenttikiihtyvyyttä.

### 7.1 Yleiset huomiot kokeiden tekemisestä

Suurimmassa osassa kokeista on käytetty kahta eri anturia. Voima- ja kiihtyvyyssanturi yleensä tukevat toisiaan ja mittaavat eri suureita, joten kokeet voi hyvin tehdä molemmilla. Ultraääni- ja kiihtyvyyssantureilla mitataan liikkeen muuttumista, joten esimerkiksi vaunun kiihdytys punnuksella -kokeeseen kannattaa selvyyden vuoksi valita joko ultraääni- tai kiihtyvyyssanturi. Näillä antureilla saatavat tulokset ovat hyvin samanlaiset, ja kaksien tulosten käsittely vie tietysti enemmän aikaa muutenkin rajallisesta ajasta. Toisaalta vaunu rampilla -kokeessa eri antureilla mitatut tulokset tukevat toisiaan.

WDSS-anturin langattomuus helpottaa kaikkien kokeiden tekemistä huomattavasti. Monet kokeista voi tehdä myös langallisilla kiihtyvyyssantureilla, mutta tällöin jo koejärjestelyissä on otettava huomioon, kuinka johdot on sijoitettava, jotteivat ne ole tiellä ja siten vääristä mittaustuloksia. Langattomuus ja tuloksien tallentaminen anturiin mahdollistavat mittauksien teon luokan ulkopuolella ja laajentavat näin koevalikoimaa. WDSS-anturia on kaiken kaikkiaan todella helppo käyttää.

## 7.2 Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä

Koe, jossa kiihtyvyyssanturin osoitetaan mittaavan kiihtyvyyttä, on tärkeä tehdä myöhempiä kokeita varten, sillä oppilaiden on ymmärrettävä, että kiihtyvyyssanturilla todella voidaan mitata kiihtyvyyttä. Koska ennakkokäsityksien muuttaminen on muutenkin vaikeaa, oppilaille ei saa olla mitään epäilyksiä, etteikö WDSS:llä voi mitata kiihtyvyyttä. Erityisen tärkeää tämä on silloin, kun ennakkokäsitys on täysin tieteellisen tiedon vastainen, kuten normaalikiihtyvyyden kokeessa, jossa vastoin oppilaiden ennakkokäsitystä osoitetaan, että ympyräradalla vakionopeudella liikkuva kappale on kiihtyvässä liikkeessä.

Toisaalta jotta koetta voidaan käyttää osoittamaan, että WDSS mittaa kiihtyvyyttä, kiihtyvyys pitää ensin kvantifioida. Jos sen tekee tällä kokeella, koe on silloin ehdottomasti tehtävä ensin ultraäänianturilla. Jos haluaa välttää kokeen tekemisen kahdesti, kokeet voi tehdä samalla kertaa ja käsitellä ensin ultraäänianturin tulokset ja kvantifioida kiihtyvyyden ja sen jälkeen esitellä WDSS-anturin ja näyttää sillä mitattujen kiihtyvyyksien olevan samat kuin ultraäänianturilla mitatut.

Koska oppilaille on vaikeuksia erottaa nopeutta ja kiihtyvyyttä, tätä koetta tehdessä on hyvä korostaa nopeuden ja kiihtyvyyden olevan eri suureita. Lisäksi graafista integrointia tehdessä on syytä korostaa, että kiihtyvyys lasketaan nimenomaan nopeuden muutoksesta eikä hetkellisestä nopeudesta. Monesti oppilaat nimittäin laskevat kiihtyvyyden käyttäen hetkellistä nopeutta (Trowbridge & McDermott 1981). Samalla voidaan muistuttaa, että kiihtyvyys tarkoittaa nopeuden muutosnopeutta, joten kiihtyvyyden arvoa ei voida laskea hetkellistä nopeutta käyttäen. Kun nopeuden ja kiihtyvyyden kuvaajat ovat samaan aikaan esillä, voidaan nopeuden ja kiihtyvyyden arvoja tarkastella eri pisteissä ja huomata, etteivät nämä ole yhtä suuret.

Oppilaat voivat muuttaa ennakkokäsityksiään vasta sen jälkeen, kun he tiedostavat niiden olevan virheellisiä (Tynjälä 1999). Siksi ennen koetta oppilaille voikin antaa pohdittavaksi esimerkiksi pienissä ryhmissä tilanteen, jossa auto kulkee alas mäkeä kasvavalla nopeudella. Tehtävänä on pohtia, ovatko sen nopeus ja kiihtyvyys joskus yhtä suuret. Jos ovat, niin ovatko ne yhtä suuret koko matkan vai jossain tietyssä kohdassa mäkeä. Kokeen jälkeen nopeuden ja kiihtyvyyden arvoihin on vielä hyvä palata ja korostaa, että ne ovat eri suureita ja niillä on eri yksiköt, joten ne eivät voi olla yhtä suuria.

## 7.3 Vaunun kiihdytys punnuksella

Vaunun kiihdytys punnuksella -koe on nopeampi tehdä kiihtyvyyssanturilla, ja sen tulosten käsittely on nopeampaa. Toisaalta ultraäänianturilla tehtävässä kokeessa pystytään osoittamaan, että voima riippuu vain vuorovaikutuksen suuruudesta eikä vuorovaikutuksen kohteesta. Useilla oppilaille on ennakkokäsitys, jonka mukaan suurempimassaiseen kappaleeseen kohdistuu pienempi voima vuorovaikutustilanteessa (Hestenes, Wells & Swackhamer 1992). Kiihtyvyyssanturilla tehdyssä kokeessa tämä ei tule yhtä selväksi, sillä siinä vaunun eli vuorovaikutuksen kohteen massaa kasvatetaan, jotta vaunun kiihtyvyys pieneneisi.

Toisaalta kiihtyvyyssanturilla tehdyssä kokeessa voidaan mitata suoraan kaikkia kiinnostavia suureita, vaunun massaa ja kiihtyvyyttä, joten voiman kvantifiointi etenee suoraviivaisemmin. Ultraäänianturilla tehtäviä mittauksia varten impulssi ja liikemäärän muutos on kvantifioitava ennen voimaa. Impulssia ei kuitenkaan pystytä mittaamaan voiman avulla ennen kuin voima on kvantifioitu, vaan sen sijaan mitataan liikemäärän muuttumista. Impulssi ja liikemäärän muutos ovat toki yhtä suuret, mutta joitakin oppilaita tämä voi hämätä. Voiman ja kiihtyvyyden yhteys voi siis tulla selvemmäksi kiihtyvyyssanturilla tehtävissä mittauksissa.

Oppilaiden ennakkokäsityksen mukaan nopeus ja voima ovat verrannolliset ja liikkeen muuttaminen vaatii muuttuvan voiman (esim. Halloun & Hestenes 1985). Koska oppilaiden ennakkokäsitys on tieteellisen tiedon kanssa pahasti ristiriitainen, vaunun kiihdytys punnuksella -koetta tehdessä on syytä korostaa, että putoava punnus kohdistaa vaunuun nimenomaan vakiovoiman, joka aiheuttaa vakiokiihtyvyyden.

Oppilaille voi myös antaa pohdittavaksi ennen koetta, millainen voima vaunuun vaikuttaa (vakio vai muuttuva) ja millaisen kiihtyvyyden se aiheuttaa. Ennakkokäsityksen mukaan vakiovoima ei siis aiheuttaisi vaunulle kiihtyvyyttä. Samoja asioita voidaan pohtia yhdessä myös kokeen jälkeen, jottei kokeen läpikäynti ole vain luennointia.

Kokeen voisi toki tehdä ultraäänianturilla samalla tavalla kuin kiihtyvyyssanturilla, koska ultraäänianturin mittausdatasta saadaan määritettyä vaunun kiihtyvyydet, jos mittauspisteitä kertyy tarpeeksi nopeuden kulmakertoimen määrittämistä varten. Joidenkin oppilaiden voi tällöin kuitenkin olla vaikea hahmottaa, että nopeuden kulmakerroin on kiihtyvyys. Lisäksi tällöin joidenkin oppilaiden voi olla vaikea ymmärtää, että kiihtyvyys ja voima ovat verrannolliset eivätkä ennakkokäsityksen mukaiset voima ja nopeus.

Anturin valintaan vaikuttaa paljon se, missä järjestyksessä opettaja on päättänyt käsitellä asiat. Jos impulssi on kvantifioitu ennen voimaa, koe kannattaa ehkä tehdä ultraäänianturilla, sillä tällöin voidaan osoittaa, ettei vuorovaikutuksen kohteen massa vaikuta voiman suuruuteen. Jos taas impulssia ei ole kvantifioitu, koe kannattanee tehdä kiihtyvyyssanturilla, jolloin voiman ja nimenomaan kiihtyvyyden yhteys tulee selväksi.

#### 7.4 Vaunu rampilla

Vaunu rampilla -kokeen tulosten käsittely on yhtä helppoa kummallakin anturilla, sillä LoggerPro piirtää halutut kuvaajat automaattisesti. Ennakkokäsityksen kannalta kiihtyvyyssanturi tuo kokeeseen ehdottomasti uutta näkökulmaa, sillä tällöin tulee vakiokiihtyvyys vaunun liikkuessa selvemmin näkyviin. Jos halutaan vain tutkia, mikä on auton nopeus tai kiihtyvyys rampilla erilaisilla kallistuskulmilla tai tönäisyn voimakkuuksilla, ultraäänianturi riittää aivan hyvin, koska sen mittaustuloksista saadaan määritettyä helposti kiihtyvyys.

Jos mittaukset tehdään vain ultraäänianturilla, oppilaiden voi olla vaikea hahmottaa sitä, että kiihtyvyys ei ole nolla, vaikka nopeus onkin nolla pelkän  $(t,v)$ -kuvaajan perusteella. Erityisen vaikeaa tämä on sellaisille oppilaille, joilla on vaikeuksia erottaa nopeutta ja kiihtyvyyttä toisistaan. Heidän voi olla vaikea ymmärtää,



että vaunulla on vakiokiihtyvyys koko matkan eikä se siten välillä käy nollassa. Toisaalta pelkällä kiihtyvyyksanturilla tehtävässä kokeessa ei välttämättä tule selväksi se, että nopeus menee nolnaan kääntöpisteessä, mikä on oleellista ennakkokäsityksen kannalta. Kokeessa kannattaakin käyttää molempia antureita ja vielä korostaa, että ne mittaavat eri suureita.

Ennen vaunu rampilla -koetta oppilaille voi antaa pohdittavaksi tilanteen, jossa auto nousee mäkeä ylös hidastuvalla vauhdilla, muuttaa suuntaa, jolloin nopeus on hetkellisesti nolla, ja palaa takaisin alas kasvavalla vauhdilla. Oppilaiden tehtävä on kuvailla auton kiihtyvyyttä ylä- ja alamäessä sekä ylhäällä. Ennakkokäsityksensä mukaan vastaavat oppilaat sanovat vaunun kiihtyvyyden olevan nolla ylhäällä ja nopeuden lisäksi kiihtyvyyden vaihtavan ylhäällä merkkiään. (Trowbridge & McDermott 1981) Koe osoittaa, että ennakkokäsitys on virheellinen, joten kokeen jälkeen on hyvä antaa oppilaiden ensin itse miettiä syytä. Tämän jälkeen voi muistuttaa, että vaunun suunta muuttuu ylhäällä, joten vaunu on kiihtyvässä liikkeessä.

### 7.5 Laudan tönäisy

Laudan tönäisy -koe on helppo tehdä, eikä se vaadi paljon välineitä, joten sitä voi käyttää oppilastyönä, jolla harjoitellaan anturien käyttöä myöhempiä kokeita varten. Tosin tällöin tarvitaan useita kiihtyvyyksantureita, mutta koska liike on suoraviivaista, koe voidaan aivan hyvin tehdä myös langallisella kiihtyvyyksanturilla tai älypuhelimeen ladattavalla kiihtyvyyksanturisovelluksella.

Kokeessa pääsee myös harjoittelemaan oppilaille vaikeaa graafista integrointia. LoggerPron avulla kiihtyvyyden kuvaajasta saadaan helposti laskettua laudan nopeus. LoggerPron avulla on myös mahdollista tehdä graafinen integrointi uudelleen, jolloin saadaan laskettua laudan kulkema matka, joka on melko lähellä konkreettisesti mittanauhalla mitattua matkaa. Näin tehtynä graafista integrointia pääsee paitsi harjoittelemaan useamman kerran, myös sen vaikutus tulee selvemmin esille, kun koneella mitattuja matkoja verrataan tutummin mitattuihin matkoihin.

Graafiseen integrointiin liittyvät vaikeudet johtuvat yleensä siitä, että oppilaalla ei ole selkeää käsitystä, mitä kuvaajan ja x-akselin väliin jäävä pinta-ala kuvaa (McDermott, Rosenquist & van Zee 1987). Opetettaessa graafista integrointia onkin keskityttävä siihen, että oppilaat ymmärtävät, että esimerkiksi  $(t,a)$ -kuvaajalla kuvaajan ja aika-akselin välinen pinta-ala kertoo kappaleen nopeuden muutoksen. Oppilaille on lisäksi syytä korostaa, että tällä tavalla saadaan nimenomaan kappaleen nopeuden muutos eikä nopeutta, sillä kiihtyvyys kuvaa sitä, kuinka nopeasti kappaleen nopeus muuttuu. Laudan nopeutta voidaan tässä kokeessa mitata myös ultraäänianturilla, jolloin nähdään kiihtyvyyden kuvaajalle tehdyn graafisen integroinnin todella kertovan kappaleen nopeuden muutoksen.

## 7.6 Punnuksen nosto

Punnuksen nosto -kokeessa on WDSS-anturin etuna verrattuna pelkkään voima-anturiin se, että samalla kertaa saadaan näkyviin sekä voiman että kiihtyvyyden kuvaajat. Jos opettaja tekee kokeen demonstraationa, hänen ei tarvitse seistä pöydän takana koneen lähellä, vaan hän voi seisoa siellä, mistä oppilaat näkevät hänet parhaiten.

Lisäksi WDSS-anturin etuna on se, että tällä anturilla pystytään tutkimaan nimenomaan kappaleeseen vaikuttavia voimia, mikä selkeyttää koetta oppilaan kannalta. WDSS-anturi ei kuitenkaan mittaa kokonaisvoimaa, joten jos koetta haluaa käyttää liike vaatii vakiovoiman -ennakkokäsityksen muuttamiseen, voima-anturi on nollattava sen roikkuessa narussa. Ennen kokeen tekemistä tällä tavalla oppilaat voivat pohtia, vaikuttaako kappaleeseen vakio- vai muuttuva voima ja millainen on kappaleen kiihtyvyys, kun kappaletta nostetaan ensin tasaisella nopeudella ja sitten muuttuvalla nopeudella.

Jos voima-anturin nollaa ennen kuin anturi ripustetaan naruun roikkumaan, tuloksia käsiteltäessä on syytä korostaa, että anturi ei mittaa kokonaisvoimaa, vaan narun anturiin kohdistamaa tukivoimaa. Tämän seurauksena  $(t,F)$ -kuvaaja ei ole nolla, vaikka anturin kiihtyvyys onkin nolla.

## 7.7 Hissin kiihtyvyys

Myös hissien kiihtyvyyden mittauksessa on WDSS-anturin etuna verrattuna voima-anturiin se, että tällä anturilla pystytään mittaamaan nimenomaan hississä matkustavaan olioon kohdistuvia voimia. Se on tässä työssä esitellyistä kokeista ainoa, jossa korkeusanturia hyödynnetään. Jos oppilaiden tehtävänä olisi kuvaajien tulkinta eikä heillä olisi tietoa siitä, lähteekö hissi levosta, korkeusanturin mittausdatasta piirretty kuvaaja olisi ainoa tapa erottaa, milloin hissi on paikoillaan ja milloin se liikkuu tasaisella nopeudella. Lisäksi korkeusanturilla saadaan mitattua nousukorkeus, joka voisi olla kiinnostava tieto, jos mittauksia tehdään esimerkiksi huvipuiston laitteissa.

Hissin kiihtyvyys -kokeessa harjoiteltiin graafista integrointia, kun hissien nopeuden muutos määritettiin  $(t,a)$ -kuvaajasta hissien kiihdyttäessä ja jarruttaessa. Kuten laudan tönäisy -kokeessa myös hissien kiihtyvyys -kokeessa graafista integrointia tehdessä on syytä korostaa, että kuvaajan ja x-akselin väliin jäävä pinta-ala on yhtä suuri kuin hissien nopeuden muutos.

Toisin kuin laudan tönäisy -kokeessa, hissien kiihtyvyys on negatiivinen joko vauhdin kasvaessa tai pienentyessä valitusta positiivisesta suunnasta ja kulkusuunnasta riippuen. Hissien kiihtyvyys -kokeessa graafista integrointia voidaan siis harjoitella niin, että graafinen integrointi tehdään myös x-akselin alapuolella olevaan pinta-alaan ja tällöin x-akseli pinta-alan rajaajana tulee selvemmin esille. Lisäksi kun x-akseli ei olekaan koordinaatiston alareunassa, oppilaat ymmärtävät paremmin juuri sen olevan pinta-alaa rajaava tekijä eikä automaattisesti koordinaatiston alareuna, kuten he joskus ajattelevat (McDermott,

Rosenquist & van Zee 1987). Viimeistään tehdessä graafista integrointia x-akselin alapuolella olevaan pinta-alaan on syytä muistuttaa, että graafisessa integroinnissa suureiden merkit on otettava huomioon. Koska hissin vauhti pienenee, hissin nopeuden muutoksen on oltava negatiivinen positiiviseen suuntaan liikuttaessa.

## 7.8 Normaalikiihtyvyys

Kiihtyvyyssanturilla saadaan mitattua normaalikiihtyvyys, mikä ei onnistu suoraan millään muulla anturilla. Voima-anturilla normaalikiihtyvyys saadaan kyllä kvantifioitua, mutta sillä normaalikiihtyvyyttä ei saada konkreettisesti näkyviin. Normaalikiihtyvyyden mittaaminen suoraan auttaa korjaamaan yleistä ennakkokäsitystä, jonka mukaan ympyräradalla vakionopeudella liikkuvalla kappaleella ei ole kiihtyvyyttä.

Kokeesta saatavat kuvaajat ovat tasaisempia pyörityslaitteella tehdyssä kokeessa, mutta narulla pyörittäminen on nopeampi tehdä ja se vaatii vähemmän välineitä. Ennakkokäsityksen takia koe kannatta tehdä edes sillä, jolloin voi näyttää, että ympyräradalla tasaisella nopeudella liikkuvan kappaleen kiihtyvyys on kohti radan keskipistettä. Samalla myös nähdään, ettei kiihtyvyyttä ole nopeuden suuntaan, mikä auttaa etenkin sellaisia oppilaita, jotka sekoittavat nopeuden ja kiihtyvyyden. WDSS-anturi helpottaa siis itse normaalikiihtyvyyden kokeen tekemistä ja siihen liittyviin ennakkokäsityksiin vaikuttamista.

Ennen normaalikiihtyvyyden mittausta oppilailta voidaan kysyä ympyräradalla tasaisella nopeudella liikkuvaan kappaleeseen vaikuttavia voimia ja kappaleen kiihtyvyyttä sekä pyytää näihin perusteluja. Ennakkokäsityksen mukaan vastaavien oppilaiden mielestä kappaleen kiihtyvyys on nolla. Varsin todennäköisesti perusteluissa esiintyy arkikokemuksen pohjalta syntynyt ennakkokäsitys keskipakoisvoimasta, mutta koska tässä työssä keskitytään kiihtyvyyteen liittyvien ennakkokäsitysten muuttamiseen, pohdintaa keskipakoisvoimasta eroon pääsemiseksi ei tehdä.

Kun kiihtyvyyssanturia pyöritetään joko narun päässä tai pyörityslaitteella, ennakkokäsitys osoitetaan virheelliseksi. Kokeen jälkeen oppilaille on taas hyvä antaa hetki aikaa pohtia, miksi ympyräradalla tasaisella nopeudella liikkuva kappale on kiihtyvässä liikkeessä. Vasta sitten heitä voi muistuttaa siitä, että ympyräradalla kappaleen suunta muuttuu koko ajan ja suunnan muuttuessa kappale on aina kiihtyvässä liikkeessä. Halutessaan sitä voi konkretisoida antamalla kiihtyvyyssanturin oppilaalle ja kehottamalla häntä kävelemään ja kääntymään jossain vaiheessa, jolloin kaikki näkevät, että kääntyessä todella on kiihtyvyyttä. WDSS-anturilla tällainen koe on helppo ja nopea tehdä.

## 7.9 Benjihyppääjä

Benjihyppääjän kiihtyvyys voidaan mitata vain kiihtyvyyssanturilla, sillä benjihyppääjä ei välttämättä pysy suorassa linjassa, mikä estää mittausten tekemisen ultraäänianturilla. Samanlaisen kiihtyvyyden kuvaajan saa

myös tutkittaessa pallon pomppimista, jota voi mitata ultraäänianturilla. Tällöin kiihtyvyyttä ei kuitenkaan saada mitattua suoraan, vaan se saadaan graafisella derivoinnilla nopeuden kuvaajasta.

Benjihyppääjän nopeus on nolla ylhäällä kääntöpisteessä, mutta kiihtyvyys ei ole, joten kyseessä on sama ilmiö kuin auto rampilla -kokeessa. Benjihyppääjällä voisi siis yrittää vaikuttaa tähän liittyvään ennakkokäsitykseen, mutta koska nopeutta ei mitata, benjihyppääjän kääntöpisteiden löytäminen kuvaajalta on vaikeampaa kuin kääntöpisteiden löytäminen vaunu rampilla -kokeessa, joten ilmiön hahmottaminen on hankalampaa. Benjihyppääjää voisikin käyttää testinä, ovatko oppilaat ymmärtäneet kiihtyvyyden olevan kääntöpisteessä eri suuri kuin nolla.

### 7.10 Heiluri

Samoin kuin punnuksen nosto -kokeessa myös heilurikokeessa langaton voima-anturi selkeyttää mittauksia oppilaan kannalta, kun anturi itsessään on heiluri ja sillä voidaan mitata nimenomaan langan heiluriin kohdistavamaa tukivoimaa. WDSS-anturilla voidaan mitata normaalikihtyvyyttä joko tasapaino- tai ääriasemassa siitä riippuen, kummassa asemassa anturi on nollattu. Tangenttikihtyvyyttä ei pystytä mittaamaan lainkaan, joten WDSS-anturi soveltuu huonosti heilurikokeeseen.

## 8. Johtopäätökset

Kiihtyvyydsanturia voidaan käyttää monipuolisesti lukion fysiikan opiskelun apuna. Dynamiikan opiskeluun yleisesti kuuluviin kokeisiin kiihtyvyydsanturi tuo lisää konkretiaa, sillä sen avulla kiihtyvyyttä pystytään mittaamaan suoraan. Tällöin mittauksista jää yksi välivaihe pois, kun ultraäänianturin mittausdatasta piirretylle  $(t,v)$ -kuvaajalle ei tarvitse tehdä graafista derivointia kiihtyvyyden määrittämiseksi. Graafinen derivointi on nopea ja helppo tehdä tietokoneella, mutta sen tarkoituksen ymmärtäminen on voinut olla vaikeaa niille oppilaille, joilla on muutenkin vaikeuksia erottaa nopeutta ja kiihtyvyyttä toisistaan. Erityisen hyvin tämä tulee esille vaunu rampilla -kokeessa, jossa nopeuden ja kiihtyvyyden erottaminen on tärkeää.

Dynamiikan kokeissa käytetään ultraäänianturin lisäksi yleisesti voima-anturia. Kokeissa käytetyssä WDSS-anturissa on myös voima-anturi, ja WDSS-anturin langattomuus helpottaa koejärjestelyä. Erillistä punnusta ei tarvita, kun anturia itsessään voi käyttää punnuksena ja tutkia nimenomaan punnukseen vaikuttavia voimia. Lisäksi saadaan mitattua kappaleen kiihtyvyys voiman lisäksi, mutta koe voidaan silti tehdä yhdellä anturilla.

WDSS-anturi reagoi gravitaatioon kuten kiihtyvyyteen, mikä pitää huomioida suunniteltaessa kokeita, joissa anturi ei ole pysty- tai vaakasuorassa. Jos anturin kallistuskulma suhteessa pystysuoraan pysyy vakiona, gravitaation liikkeen suuntaan aiheuttamasta komponentista päästään eroon nollaamalla liikkeen

suuntainen kiihtyvyyssanturi WDSS-anturin ollessa lähtöpaikassaan. Jos taas anturin kallistuskulma suhteessa pystysuoraan muuttuu, kuten heilurikokeessa käy, gravitaation aiheuttamasta liikkeen suuntaisesta komponentista ei päästä eroon nollaamalla anturia eikä sellaisia mittauksia voida tehdä WDSS-anturilla.

Kiihtyvyyssanturi on välttämätön, jos kokeissa kappaleen kiihtyvyys muuttuu ja varsinkin, jos muutokset ovat nopeita, kuten benjihyppääjäkokeessa. Kiihtyvyyssanturi olisi välttämätön luokan ulkopuolella tehtävissä mittauksissa sekä kokeissa, joissa kappale ei liiku suoraviivaisesti, sillä näitä ei pystytä tekemään ultraäänianturilla.

Ennakkokäsityksiin vaikuttamisen kannalta on kiihtyvyyden mittaaminen suoraan hyvä ja siten kiihtyvyyden näkeminen konkreettisemmin varsinkin, jos ennakkokäsityksen mukaan tilanteessa ei ole kiihtyvyyttä. Yleensä tällaisia ilmiöitä ovat kääntopisteen ja ympyräradalla kulkevan kappaleen kiihtyvyys.

Normaalikiihtyvyyden koe kuuluu yleensä dynamiikan opiskeluun ainakin suullisena empiriana, ja kiihtyvyyssanturi todella osoittaa ympyräradalla vakionopeudella liikkuvalla kappaleella olevan kiihtyvyyttä kohti radan keskipistettä. Ennakkokäsityksen muuttamisen kannalta tuo kiihtyvyyden mittaaminen vaikeasti hahmotettavaan tilanteeseen konkretiaa.

Voidaan siis todeta, että kiihtyvyyssanturi on hyvä konkretisoimaan kiihtyvyyttä ja sen suuntaa varsinkin sellaisissa tapauksissa, joissa ennakkokäsityksen mukaan ei ole kiihtyvyyttä. Kiihtyvyyssanturi sopii siis hyvin kvalitatiivisiin mittauksiin, esimerkiksi osoittamaan, että kappaleen kääntyessä se on aina kiihtyvässä liikkeessä. Kvantitatiivisiin mittauksiin sen sijaan ultraäänianturi voi olla toimivampi, sillä sen mittaustulosta piirretyt kuvaajat ovat tasaisempia ja siten oppilaille selkeämpiä. Poikkeuksen tähän tekee normaalikiihtyvyyden kvantifiointi, jota ei voida tehdä suoraan muilla antureilla.

Kaikissa älypuhelimissa on kiihtyvyyssanturi, ja moniin niistä saa ladattua sovelluksen, jolla puhelimella voidaan mitata kiihtyvyyksiä. Oppilaille voisikin antaa luokassa tehtyjen mittausten jälkeen kokeelliseksi kotitehtäväksi mitata jonkin kappaleen kiihtyvyyttä. Seuraavalla oppitunnilla voidaan vertailla, kuka sai mitattua suurimman kiihtyvyyden. Jos oppilas on ollut tunneilla tarkkana, hän on tajunnut, että muuttamalla kävelysuuntaa äkillisesti saa helposti aikaan suuren kiihtyvyyden.

Kokeiden todellista vaikutusta ennakkokäsityksiin ei testattu, vaan se jätetään joko kirjoittajan tai jonkun muun mahdollisen jatkotutkimuksen lähtökohdaksi. WDSS-anturi on ollut markkinoilla jo useita vuosia ja muita kiihtyvyyssantureita vielä sitäkin kauemmin, joten on hämmästyttävää, ettei vielä ole tutkittu sitä, miten kiihtyvyyssanturilla tehtävät mittaukset vaikuttavat kiihtyvyyteen liittyviin ennakkokäsityksiin.

Monet kiihtyvyyteen liittyvistä ennakkokäsityksistä johtuvat nopeuteen liittyvistä ennakkokäsityksistä. Koska arkielämään kuuluu liikkuminen, nopeuteen liittyvät ennakkokäsitykset ovat yleisiä, niitä on paljon ja niiden muuttaminen on vaikeaa. Nopeus, kiihtyvyys ja voima ovat mekaniikan peruskäsitteitä, ja niiden väärin

ymmärtäminen vaikuttaa koko mekaniikan oppimiseen. Kiihtyvyyssanturilla on helppo tehdä kvalitatiivisia mittauksia ja konkretisoida kiihtyvyyttä, millä luultavasti olisi helppo vaikuttaa oppilaan ennakkokäsitykseen. Tosin yksi koe ei riitä poistamaan ennakkokäsitystä, mutta ehkä se antaa ajattelemisen aihetta oppilaille, mikä johtaa lopulta ennakkokäsityksen muuttumiseen tieteelliseksi tiedoksi.

## Lähteet

- Ahtee, M. 1992. Oppilaiden käsitykset valo-opin ilmiöistä ja niiden ottaminen huomioon opetuksessa. Helsinki: Helsingin yliopisto. 104 s s.
- Ahtee, M. 1998. *Luonnontieteiden opettaminen ja konstruktivismi*. Teoksessa Lavonen, J. & Erätuuli, M. (toim.) *Tuulta purjeisiin- Matemaattisten aineiden opetus 2000-luvulle*, Jyväskylä, Atena Kustannus, 138-153
- Aksela, M. & Juvonen, R. 1999. *Kemian opetus tänään*. Edita.Helsinki .
- Amin, T.G., Smith, C.L. & Wiser, M. 2014. *Student Conceptions and Conceptual Change: Three Overlapping Phases of Research*. Teoksessa Lederman, N. G. & Abell, S. K. (toim) *Handbook of research on science education*. Volume 2. New York: Routledge. xii, 956 s
- Anon., *Fysiikan sähköinen ylioppilaskoe –Tiedote fysiikan opettajille ja opiskelijoille*, luettavissa [https://www.ylioppilastutkinto.fi/images/sivuston\\_tiedostot/Sahkoinen\\_tutkinto/fysiikka\\_tiedote.pdf](https://www.ylioppilastutkinto.fi/images/sivuston_tiedostot/Sahkoinen_tutkinto/fysiikka_tiedote.pdf), viitattu 12.11.2017
- Anon., *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2015*
- Beichner, R. J. 1994. *Testing student interpretation of kinematics graphs*. American journal of Physics 62: 750-762.
- Caramazza, A., McCloskey, M. & Green, B. 1981. *Naive beliefs in “sophisticated” subjects: Misconceptions about trajectories of objects*. Cognition 9: 117-123.
- Chi, M. T., Slotta, J. D. & De Leeuw, N. 1994. *From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts*. Learning and instruction 4: 27-43.
- Chi, M. 2005. *Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust*. Journal of the Learning Sciences 14: 161-199.
- Clement, J. 1982. *Students’ preconceptions in introductory mechanics*. American Journal of physics 50: 66-71.
- Driver, R. 1985. *The pupil as scientist?* Repr. painos. Milton Keynes: Open U. P. 113 s s.
- Finley, F. N., Stewart, J. & Yaroch, W. L. 1982. *Teachers’ perceptions of important and difficult science content*. Science education 66: 531-538.
- Galili, I. & Bar, V. 1992. *Motion implies force: where to expect vestiges of the misconception?* International Journal of Science Education 14: 63-81.
- Gardner, P. 1984. *Circular motion: Some post-instructional alternative frameworks*. Research in Science Education 14: 136-145.
- Digabi 2017, <https://digabi.fi/tekniikka/ohjelmistot/>, viitattu 7.2.2017
- Gunstone, R. 1984. *Circular motion: Some pre-instruction alternative frameworks*. Research in Science Education 14: 125-135.

- Hale, P. L. 1996. *Building conceptions and repairing misconceptions in student understanding of kinematic graphs: using student discourse in calculator based laboratories* .
- Halloun, I. A. & Hestenes, D. 1985a. *Common sense concepts about motion*. American journal of physics 53: 1056-1065.
- Halloun, I. A. & Hestenes, D. 1985b. *The initial knowledge state of college physics students*. American journal of Physics 53: 1043-1055.
- Hestenes, D., Wells, M. & Swackhamer, G. 1992. *Force concept inventory*. The physics teacher 30: 141-158.
- Hämäläinen, A., 2017a, *Opettajien laboratorioskurssit –Voima ja sen mittaaminen*, luettavissa [http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/kokon\\_1\\_2/luento.html](http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/kokon_1_2/luento.html), viitattu 3.4.2017
- Hämäläinen, A., 2017b, *Opettajien laboratorioskurssit – Pyörimisliike ja ympyräliike*, luettavissa [http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/kokon\\_1\\_3/luento.html](http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/kokon_1_3/luento.html), viitattu 31.10.2017
- Koponen, I. T. & Kokkonen, T. 2014. *A Systemic view of the learning and differentiation of scientific concepts: The case of electric current and voltage revisited*. Frontline Learning Research 2: 140-166.
- Kurki-Suonio, K. & R. 1998. *Ajatuksia didaktisesta fysiikasta*. Teoksessa Lavonen, J. & Erätuuli, M. (toim.) *Tuulta purjeisiin- Matemaattisten aineiden opetus 2000-luvulle*, Jyväskylä, Atena Kustannus. 62-82
- Leino, J. 1994. *Theoretical considerations on constructivism*. Teoksessa Ahtee, M. & Pehkonen, E. (toim.) *Constructivist viewpoints for school teaching and learning in mathematics and science*. Helsinki: Helsingin yliopisto, opettajankoulutuslaitos. 13-18
- Liu, G. & Fang, N. 2016. *Student Misconceptions about Force and Acceleration in Physics and Engineering Mechanics Education*. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING EDUCATION 32: 19-29.
- Löfström, J., Virta, A. & Van den Berg, M. 2010. *Who actually sets the criteria for social studies literacy? The national core curricula and the matriculation examination as guidelines for social studies teaching in Finland in the 2000's*. JSSE-Journal of Social Science Education 9.
- López, M. 2003. *Angular and linear acceleration in a rigid rolling body: students' misconceptions*. European journal of physics 24: 553.
- McCloskey, M., Caramazza, A. & Green, B. 1980. *Curvilinear motion in the absence of external forces: naive beliefs about the motion of objects*. Science (New York, N.Y.) 210: 1139-1141.
- McDermott, L. C., Rosenquist, M. L. & Van Zee, E. H. 1987. *Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics*. American Journal of Physics 55: 503-513.
- Nemirovsky, R. & Rubin, A. 1992. *Students' Tendency To Assume Resemblances between a Function and Its Derivative*. .
- Opetushallitus 2017, luettavissa [http://www.oph.fi/saadokset\\_ja\\_ohjeet/opetusuunnitelmien\\_ja\\_tutkintojen\\_perusteet/lukiokoulutus](http://www.oph.fi/saadokset_ja_ohjeet/opetusuunnitelmien_ja_tutkintojen_perusteet/lukiokoulutus), viitattu 7.2.2017



- Pehkonen, E. 1994. *Teachers' and pupils' beliefs in focus – a consequence of constructivism*. Teoksessa Ahtee, M. & Pehkonen, E. (toim) *Constructivist viewpoints for school teaching and learning in mathematics and science*. Helsinki: Helsingin yliopisto, opettajankoulutuslaitos. 27-33
- Rosenblatt, R., Sayre, E.C. & Heckler, A.F. 2009. *Modeling students' conceptual understanding of force, velocity, and acceleration*. Proceedings of the 2009 PER Conference, Ann Arbor, MI. , s. 245-248.
- Rosenblatt, R., Sayre, E.C., Heckler, A.F., Henderson, C., Sabella, M. & Hsu, L. 2008. *Toward a comprehensive picture of student understanding of force, velocity, and acceleration*. Aip Conference Proceedings. , s. 183.
- Rusanen, A-M. & Lappi, O. 2014a. *Käsitteellisen muutoksen lyhyt historia*. Teoksessa Rusanen, A-M., Koponen, I. T. & Lappi, O. (toim.) *Käsitteellinen muutos ja sen mallit*, Helsinki, Unigrafia. 7-16
- Rusanen, A-M. & Lappi, O. 2014b. *Mitä on käsitteellinen muutos?* Teoksessa Rusanen, A-M., Koponen, I. T. & Lappi, O. (toim.) *Käsitteellinen muutos ja sen mallit*, Helsinki, Unigrafia. 17-23
- Sadanand, N. & Kess, J. 1990. *Concepts in force and motion*. The Physics Teacher 28: 530-533.
- Salmenkivi, E. 2013. *Ylioppilastutkinnon rakenne- ja reaalikoeuudistusten vaikutuksia: miten lisääntynyt valinnaisuus ohjaa lukiolaisia*. Kasvatus & aika 7: 24-39.
- Searle, P. 1985. *Circular motion concepts of first year engineering students*. Research in Science Education 15: 140-150.
- Thornton, R. K. & Sokoloff, D. R. 1998. *Assessing student learning of Newton's laws: The force and motion conceptual evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula*. American Journal of Physics 66: 338-352.
- Trowbridge, D. E. & McDermott, L. C. 1980. *Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension*. American journal of Physics 48: 1020-1028.
- Trowbridge, D. E. & McDermott, L. C. 1981. *Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension*. American journal of Physics 49: 242-253.
- Tynjälä, P. 1999. *Oppiminen tiedon rakentamisena : konstruktivistisen oppimiskäsityksen perusteita*. Helsinki: Kirjayhtymä. 214 s s.
- Valtioneuvoston asetus ylioppilastutkinnosta 915/2005 luettavissa  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2005/20050915>, viitattu 9.10.2017
- Vernier 2017a, <https://www.vernier.com/>, viitattu 22.2.2017
- Vernier 2017b, *Wireless Dynamics Sensor System*, luettavissa  
<https://www.vernier.com/files/manuals/wdss.pdf>, viitattu 22.2.2017
- Vernier 2017c, <https://www.vernier.com/products/software/lp/>, viitattu 22.2.2017
- Vernier 2017d, <https://www.vernier.com/products/sensors/wireless-sensors/wdss/>, viitattu 22.2.2017
- Whitaker, R. J. 1983. *Aristotle is not dead: Student understanding of trajectory motion*. American Journal of Physics 51: 352-357.

Ylioppilastutkintolautakunta 2017, luettavissa

[https://www.ylioppilastutkinto.fi/images/sivuston\\_tiedostot/Sahkoinen\\_tutkinto/aikataulu.pdf](https://www.ylioppilastutkinto.fi/images/sivuston_tiedostot/Sahkoinen_tutkinto/aikataulu.pdf), viitattu 7.2.2017