

**Opiskelijoiden argumentointi ja fysiikan
sisältötiedon osaaminen perusopinnotason
työ-energia- ja impulssi-
liikemääräperiaatteiden tehtävissä**

Justus Kinnunen

Pro gradu -tutkielma

Toukokuu 2019

Fysiikan ja matematiikan laitos

Itä-Suomen yliopisto

Justus Kinnunen

Opiskelijoiden argumentointi ja fysiikan sisältötiedon osaaminen perusopintotason työ-energia- ja impulssi-liikemääräperiaatteiden tehtävissä, 53 sivua

Itä-Suomen yliopisto

Fysiikan ja matematiikan laitos

Fysiikan aineenopettajakoulutus

Työn ohjaaja

FT Mikko Kesonen

Tiivistelmä

Viimevuosina luonnontieteiden opetus on siirtynyt perusopetuksessa yhä enenevässä määrin sisältötietojen opettelusta tiedon soveltamisen ja kriittisen ajattelun taitoihin painottaen tieteellisen lukutaidon merkitystä. Yhtenä tieteellisen lukutaidon kehittymiseen vaikuttavaksi tekijäksi on tunnistettu tieteellisen argumentoinnin osaaminen. Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena oli selvittää, millaista osaamista yliopisto-opiskelijoilla on perusopintotasolla fysiikan sisältötiedosta ja argumentin rakenteesta työ-energia- ja impulssi-liikemääräperiaatteiden tehtävissä. Fysiikan sisältötietoa on tarkasteltu resurssiperustaisen oppijan tiedon viitekehyksessä, jonka katsottiin selittävän vastauksia poikkeuksellisen hyvin. Tutkimusta varten suunniteltiin aikaisempien virhekäsityksiin keskittyneiden tutkimusten perusteella koekysymys Fysiikan peruskurssi I:n loppukokeeseen, johon vastasi 50 opiskelijaa. Kerätyn aineiston perusteella nähtiin suurimman osan osallistuneista opiskelijoista osaavan muodostaa rakenteeltaan hyviä argumentteja, joskin he päätyivät monesti soveltamaan epärelevantteja perusteluja, joiden takia vastaukset olivat monesti fysiikan sisältötiedon kanssa ristiriidassa. Liike-energioiden vertailun tehtävässä hieman yli puolet

opiskelijoista osasi vastata fysiikan sisältötiedon kannalta tehtävään oikein. Liikemäärien vertailun tehtävässä puolestaan hieman alle puolet opiskelijoista osasivat vastata fysiikan sisältötiedon kannalta tehtävään oikein. Molemmissa tehtävistä merkittävästi suurempi osa opiskelijoista osasi muodostaa argumentin rakenteen osalta hyvän vastauksen kuin fysiikan sisältötiedon kannalta oikean vastauksen. Saatujen tulosten perusteella voidaan muodostaa johtopäätös, että opiskelijoilla on vaikeuksia ymmärtää liike-energian ja liikemäärän käsitteitä reaali maailmaa kuvaavina suureina. Tällöin opiskelijat päätyivät monesti soveltamaan perusteluissaan tilanteeseen epäsopevaa resurssia ja he keskittyivät vertailemaan liike-energian ja liikemäärän määritelmistä suureiden painoarvoa.

Esipuhe

Haluan kiittää Pertti Silfsteniä, joka mahdollisti aineiston keräämisen kurssikokeessa. Tämä oli merkittävä tekijä, jonka johdosta tutkielmaan saatiin kerättyä erittäin paljastavaa materiaalia opiskelijoiden ajatuksista ja tehtävänratkaisumenetelmistä. Kiitokset myös Arttu Kettuselle kuvausavustajana toimimisesta videoidessani kurssikokeessa näytettävää aineistoa. Haluan kiittää erityisesti myös työn ohjaajaa Mikko Kesosta mielenkiintoisista keskusteluista viikoittaisissa gradu-tapaamisissa aihepiiristä ja sen opetuksesta. Lopuksi kiitos myös vaimolleni Saana Kinnuselle, joka jakoi viikosta toiseen myötäillä jorinoihini fysiikan opetuksesta sekä paasaukseeni resurssiperustaisesta oppijan tiedon viitekehityksestä.

Joensuussa 9. Toukokuuta 2019

Justus Kinnunen

1	Johdanto	1
2	Teoreettinen viitekehys	5
2.1	Työ-energiaperiaate	5
2.2	Impulssi-liikemääräperiaate	9
2.3	Työ-energiaperiaatteen ja impulssi-liikemääräperiaatteen oppiminen sekä niiden opetukseen liittyvät haasteet	10
2.4	Resurssiperustainen oppijan tiedon viitekehys	13
2.5	Tieteellinen argumentaatio	17
3	Menetelmät	23
3.1	Tutkimuksen tarkoitus ja tutkimusongelma	23
3.2	Kohderyhmä	24
3.3	Aineistonkeruumenetelmä ja toteutus	25
3.4	Aineiston analyysi	28
4	Tulokset	31
4.1	Videoaineiston perusteella muodostetut havainnot kelkkojen liikkeestä	31
4.2	Kelkkojen massojen vertailu	33
4.3	Kelkkojen liike-energioiden vertailu	35

4.4	Kelkkojen liikemäärien vertailu	42
5	Pohdinta	49
	Lähteet	54
Liite A	Videomateriaalin pohjalta laadittu tehtävä	60

Viimeaikoina luonnontieteiden opetuksen pääpaino on siirtynyt kouluopetuksessa kunkin oppiaineen sisältötiedon ulkopuolelle kohti luonnontieteellistä lukutaitoa, osaamista tai sivistystä¹ (Kokkonen & Laherto, 2018). Luonnontieteellisen sivistyksen karttumista edesauttavat tieteellisten käsitteiden ja prosessien, metakognitiivisten prosessien, kriittisen päättelykykyjen sekä tieteen sosiaalisten näkökulmien sisällyttäminen opetukseen (Cavagnetto, 2010). Tällöin oppijoiden tulisi yksittäisten oppiaineiden sisältötiedon sijaan harjaantua soveltamaan luonnontieteitä tilanteissa, joita he kohtaavat osana yhteiskuntaa ja omaa päivittäistä toimintaansa (Roberts, 2007). Luonnontieteellinen sivistys on noussut Suomessa keskeiseen rooliin opetuksessa ja se on huomioitu vuosiluokkien 7–9 opetussuunnitelman laaja-alaisessa L1 tavoitteessa (Pops 2014, s. 282), joka koskee oppilaan ajattelun ja oppimaan oppimisen taitoja:

Ajattelun taitoja kehitetään lisäksi luomalla monimuotoisia tilaisuuksia itsenäiseen ja yhteiseen ongelmanratkaisuun, argumentointiin, päättelyyn ja johtopäätösten

¹ Englanniksi *scientific literacy*, *science literacy*

tekemiseen sekä asioiden välisten vuorovaikutussuhteiden ja keskinäisten yhteyksien huomaamiseen ja siten systeemiseen ajatteluun.

Lainauksessa ilmenee luonnontieteelliselle sivistykselle ominaisia opetustavoitteita, joita esimerkiksi myös Roberts (2007) korostaa. Roberts (2007) kuvailee luonnontieteellisen sivistyksen merkitystä oppijan jokapäiväisessä toiminnassa heidän ymmärryksen tai tiedon soveltamisena tilanteissa, joihin sisältyy luonnontieteisiin liittyvä komponentti. Täten perusopetuksen yhtenä uudistettuna tavoitteena voidaan pitää juuri oppilaan luonnontieteellisen sivistyksen kehittymistä ja tieteellisen menetelmän ymmärtämistä.

Koska kielellisellä ilmaisulla on tieteen sosiaalisissa konteksteissa suuri vaikutus selittää ja tulkita ilmiöitä, on yhdeksi luonnontieteellisen sivistyksen kehittymiseen vaikuttavaksi tekijäksi tunnistettu tieteellinen argumentaatio. Kouluopetuksessa tieteellisen argumentoinnin painotuksen tutkimusta on tehty monilla eri ikäryhmillä ja näkökulmilla (mm. Berland & Hammer, 2012; Cavagnetto, 2010; Lee, ym., 2014; Sampson, Grooms & Walker, 2011). Tieteellisen argumentoinnin tarkoitus kouluopetuksessa on kehittää oppijoille ymmärrys tieteellisen tiedon muodostumisesta ja siten lisätä luonnontieteellistä lukutaitoa (Cavagnetto, 2010). Tähän tieteellisen tiedon muodostumiseen liittyvät oleellisesti pelkkien yksittäisten taitojen, kuten argumentointitaidon ja luonnonlakien ymmärtämisen, sijaan myös ”harmaa alue”, jossa tapahtuu eri taitojen välinen vuoropuhelu käytännön toimimisessa (Cavagnetto, 2010). Tieteellisen argumentaation hallitseminen edesauttaa yhden näkökulman mukaan ainakin neljän erilaisen taidon kehittymistä (Jimenez–Aleixandre & Erduran, 2007). Ne ovat:

- Asiantuntijoille tyypillisen kognition ja metakognition kehittyminen
- Kommunikaatiotaitojen kehittyminen
- Kriittisen ajattelun kehittyminen
- Tieteen tekemisen kulttuurin ja toimintamallien oppiminen

Näiden neljän taidon voidaan katsoa sisältyvän oleellisesti luonnontieteellisen sivistyksen kehittymiseen. Myös tieteellisen argumentaation ulkopuolelle sijoittuvan jokapäiväisen argumentoinnin voidaan katsoa vahvistavan luonnontieteellistä sivistystä, sillä kaikki argumentoinnin muodot edistävät kognitiivisten kykyjen kehittymistä (Kuhn, 2005). Tämä puolestaan ilmenee oppijan kykynä tehokkaasti ja tarkasti tulkita median ja arkielämän ideoita tieteen sisältötiedon mukaisessa kontekstissa ja siten argumentointia korostamalla saavutetaan koulutus, joka opettaa oppijoita kriittiseen ajatteluun.

Kouluopetuksessa tämä keskustelu ja tieteellinen argumentointi on huomioitu myös perusopetuksen opetussuunnitelmanperusteiden 2014 yleisissä tavoitteissa (Pops 2014, s. 20) seuraavasti:

”Oppilaita ohjataan käyttämään tietoa itsenäisesti ja vuorovaikutuksessa toisten kanssa ongelman-ratkaisuun, argumentointiin, päättelyyn ja johtopäätösten tekemiseen sekä uuden keksimiseen. Oppilailla tulee olla mahdollisuus analysoida käsillä olevaa asiaa kriittisesti eri näkökulmista.”

Tämän perusteella voidaan sanoa, että opetuksen painotuksessa on tapahtumassa siirtyminen sisältötiedon spesifeistä periaatteista ja laeista kohti laaja-alaisempia ja geneerisiä taitoja, joita oppijat pystyvät hyödyntämään omassa elämässään laajemmin (Kokkonen & Laherto, 2018). Tätä tietojen ja taitojen laajempaa hyödynnettävyyttä Kokkonen ja Laherto puolustavat argumentillaan (2018, s. 25) ”Kokeellisuuden rooli ei saa olla vain teoreettisten johtopäätösten vahvistaminen vaan oppilaiden on harjaannuttava käsittelemään tulkinnanvaraisia tuloksia ja punnitsemaan eri näkökulmien välillä.” Tässäkin korostuu tiedon epävarma luonne, johon tieteellisen argumentoinnin keinoin pureutumalla voidaan muodostaa johtopäätöksiä käsiteltävän aineiston luotettavuudesta. Argumentointia painottavalla opetuksella voidaan auttaa oppijoita kiinnittämään huomiota heidän käsittelemänsä tiedon luotettavuuteen, jolloin tehtävien

ratkaisuissa opiskelijat voivat arvioida mitkä tiedot ovat varmoja, mitkä todennäköisiä ja mitkä epävarmoja tai summittaisia (Lee ym. 2014).

Perusopetuksen suunnan muuttuessa yhä enenevässä määrin pois sisältötiedon opettelusta on luonnollista tutkia myös yliopisto-opiskelijoiden kohdalla luonnontieteelliseen sivistykseen liittyviä taitoja kuten argumentaatiota. Jatkumossa edellä mainittuun painopisteen muutokseen tämän tutkielman kontekstissa keskitytään kartoittamaan lähtötilannetta yliopisto-opiskelijoiden tieteellisen argumentaation osaamisesta perusopintotasolla.

Tutkielmassa tutkitaan fysiikan sisältötiedon lisäksi yliopisto-opiskelijoiden käyttämää argumentin rakennetta heidän työ-energia- ja impulssi-liikemääräperiaatteita koskevien tehtävien vastauksissa. Tämän tutkimuksen näkökulmana on tutkia tieteellisen argumentaation ja fysiikan sisältötiedon osaamisen välistä yhteyttä, jossa luonnontieteellinen sivistys ilmenee. Näiden tulosten pohjalta on mahdollista tunnistaa niitä osa-alueita opiskelijoiden osaamisessa, joihin voidaan vaikuttaa tekemällä muutoksia opetusmenetelmiin ja joiden avulla yliopisto-opiskelijoiden luonnontieteellinen sivistys kehittyisi opiskelujen aikana paremmin.

Teoreettinen viitekehys

Fysiikan opetuksen tutkimus on monesti keskittynyt tutkimaan oppijoiden käsityksiä fysiikan sisällöistä ja niihin liittyviä fysiikan sisältötiedon kanssa ristiriitaisia käsityksiä (McDermott & Redish, 1999). Tämän tutkimuksen yhteydessä näitä opiskelijoiden ristiriitaisia käsityksiä on hyödyllistä tutkia, sillä niiden sivuuttaminen kokonaisuudessaan poistaisi opiskelijoiden osaamisen arvioinnista merkittävän ulottuvuuden.

Tässä luvussa esitellään työ-energiaperiaate, impulssi-liikemääräperiaate, näihin periaatteisiin liittyviä fysiikan sisältötiedon kanssa ristiriitaisia käsityksiä ja oppimisen ongelmia. Luvussa esitellään myös oppijan tiedon viitekehystä, jossa opiskelijoiden osaamista arvioidaan, sekä tieteellisen argumentaation periaatteita ja rakennetta.

2.1 Työ-energiaperiaate

Työ-energiaperiaatteella tarkoitetaan periaatetta, jonka mukaan kappaleeseen tehty työ muuttaa sen mekaanista energiaa. Tämä tulos voidaan johtaa tarkastelemalla johonkin kappaleeseen vaikuttavan ulkoisen voiman vaikutusta kyseiseen kappaleeseen voiman liikuttaessa sitä. Tällöin lähtemällä liikkeelle kokonaisvoiman tekemän työn määritelmästä (Knight, 2008)

$$W = \int_{s_i}^{s_f} \bar{F}(t) \cdot d\bar{s}, \quad (2.1)$$

jossa W on tehty työ, s_i on alkupaikka, s_f on loppupaikka, $\bar{F}(t)$ on kappaleeseen kohdistuva kokonaisvoima ajan funktiona ja $d\bar{s}$ on infinitesimaalinen siirtymä.

Soveltamalla Newtonin toista lakia (Knight, 2008)

$$\bar{F}(t) = m\bar{a}(t), \quad (2.2)$$

jossa m on kappaleen massa ja $\bar{a}(t)$ on kappaleen kiihtyvyys ajan funktiona, voidaan muotoaan muuttamattomalle kappaleelle johtaa esitysmuoto

$$\bar{F}(t) = m \frac{d\bar{v}}{dt}, \quad (2.3)$$

jossa $d\bar{v}$ on infinitesimaalisen pieni nopeuden muutos ja dt on infinitesimaalisen pieni aikaväli. Nyt infinitesimaalisen pienelle siirtymälle $d\bar{s}$ voidaan kirjoittaa esitysmuoto

$$d\bar{s} = \bar{v}(t)dt, \quad (2.4)$$

jossa $\bar{v}(t)$ on kappaleen nopeus kyseisellä ajanhetkellä. Sijoittamalla yhtälöt (2.3) ja (2.4) yhtälöön (2.1) ja huomioimalla, että muuttuja, jonka suhteen integrointi suoritetaan, vaihtuu paikasta nopeudeksi, muuttuvat myös integrointirajat paikasta nopeuteen. Nyt kokonaisvoiman tekemälle työlle voidaan kirjoittaa

$$W = \int_{v_i}^{v_f} m \frac{d\bar{v}}{dt} \cdot \bar{v}(t)dt = \int_{v_i}^{v_f} m d\bar{v} \cdot \bar{v}(t). \quad (2.5)$$

Valitsemalla tarkastelukoordinaatistoksi karteesinen koordinaatisto, jossa \hat{i} on x-akselin suuntainen yksikkövektori, \hat{j} on y-akselin suuntainen yksikkövektori, \hat{k} on z-akselin suuntainen yksikkövektori ja koordinaattiakselit ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa, voidaan infinitesimaaliselle nopeuden muutokselle $d\bar{v}$ kirjoittaa

$$d\bar{v} = dv_x\hat{i} + dv_y\hat{j} + dv_z\hat{k}, \quad (2.6)$$

jossa dv_x on kappaleen x-akselin suuntaisen nopeuden infinitesimaalinen muutos, dv_y on kappaleen y-akselin suuntaisen nopeuden infinitesimaalinen muutos ja dv_z on kappaleen z-akselin suuntaisen nopeuden infinitesimaalinen muutos. Nopeudelle ajan funktiona puolestaan voidaan kirjoittaa

$$\bar{v}(t) = v_x(t)\hat{i} + v_y(t)\hat{j} + v_z(t)\hat{k}, \quad (2.7)$$

jossa $v_x(t)$ on kappaleen x-akselin suuntaisen nopeuden suuruus kyseisellä ajanhetkellä, $v_y(t)$ on kappaleen y-akselin suuntaisen nopeuden suuruus kyseisellä ajanhetkellä $v_z(t)$ on kappaleen z-akselin suuntaisen nopeuden suuruus kyseisellä ajanhetkellä. Nyt infinitesimaalisen nopeudenmuutoksen ja nopeuden ajan funktiona pistetulolle voidaan kirjoittaa

$$d\bar{v} \cdot \bar{v}(t) = dv_x v_x(t) + dv_y v_y(t) + dv_z v_z(t) \quad (2.8)$$

ja soveltamalla tätä kaavaan (2.5) saadaan kokonaisvoiman tekemälle työlle kirjoitettua

$$\begin{aligned} W &= \int_{v_i}^{v_f} m [dv_x v_x(t) + dv_y v_y(t) + dv_z v_z(t)] \\ &= \int_{v_i}^{v_f} m dv_x v_x(t) + \int_{v_i}^{v_f} m dv_y v_y(t) + \int_{v_i}^{v_f} m dv_z v_z(t). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Suorittamalla integrointi ja sijoitukset kokonaisvoiman tekemälle työlle voidaan johtaa edelleen

$$W = \frac{m}{2}(v_{x,f}^2 - v_{x,i}^2) + \frac{m}{2}(v_{y,f}^2 - v_{y,i}^2) + \frac{m}{2}(v_{z,f}^2 - v_{z,i}^2), \quad (2.10)$$

jossa $v_{x,f}$ on kappaleen x-suuntainen loppunopeus, $v_{x,i}$ on kappaleen x-suuntainen alkunopeus, $v_{y,f}$ on kappaleen y-suuntainen loppunopeus, $v_{y,i}$ on kappaleen y-suuntainen

alkunopeus, $v_{z,f}$ on kappaleen z-suuntainen loppunopeus ja $v_{z,i}$ on kappaleen z-suuntainen alkunopeus. Uudelleenjärjestelemällä termit nähdään, että

$$W = \frac{m}{2}(v_{x,f}^2 + v_{y,f}^2 + v_{z,f}^2) - \frac{m}{2}(v_{x,i}^2 + v_{y,i}^2 + v_{z,i}^2) \quad (2.11)$$

ja edelleen soveltamalla molempiin yhtälön oikealla puolla oleviin termeihin tietoa, että

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2, \quad (2.12)$$

jossa v on kappaleen nopeuden suuruus, v_x on kappaleen x-akselin suuntaisen nopeuden suuruus, v_y on kappaleen y-akselin suuntaisen nopeuden suuruus ja v_z on kappaleen z-akselin suuntaisen nopeuden suuruus, voidaan työlle johtaa

$$W = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2. \quad (2.13)$$

Soveltamalla tähän kineettisen energian määritelmää (Knight, 2008)

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad (2.14)$$

jossa E_k on kappaleen liike-energia, voidaan työlle kirjoittaa

$$W = E_{k,f} - E_{k,i}, \quad (2.15)$$

jossa $E_{k,f}$ on kappaleen liike-energia lopussa ja $E_{k,i}$ on kappaleen liike-energia alussa. Oleellisesti yhtälön oikea puoli on siten liike-energian muutos ΔE_k ja se voidaan kirjoittaa

$$W = \Delta E_k. \quad (2.16)$$

On siis saatu johdettua työ-energiaperiaate. Koska kyseessä on kokonaisvoima, on periaate voimassa riippumatta pinnan suunnasta tai pintojen välisestä kitkasta ja siten kokonaisvoiman kappaleeseen tekemä työ lisää kappaleen liike-energiaa, vaikka kyseessä ei olisikaan konservatiivinen tai vakiovoima.

2.2 Impulssi-liikemääräperiaate

Impulssi-liikemääräperiaatteella tarkoitetaan periaatetta, joka kertoo kuinka kappaleeseen jonkin aikaintervallin ajan kohdistettu voima muuttaa kappaleen liikemäärää. Sen voidaan ajatella olevan analoginen työ-energiaperiaatteen kanssa: molemmissa nolasta poikkeava kokonaisvoima muuttaa kappaleen liiketilaa ja siten tarkasteltavan suureen suuruus muuttuu voiman vaikuttaessa tietyn matkan tai ajan. Impulssi-liikemääräperiaate voidaan johtaa lähtemällä liikkeelle impulssin määritelmästä (Knight, 2008)

$$\bar{I} = \int_{t_i}^{t_f} \bar{F}(t) dt, \quad (2.17)$$

jossa \bar{I} on impulssi, t_i on aika alussa, t_f on aika lopussa. Liikemäärälle \bar{p} pätee ei relativistisilla nopeuksilla (Chabay & Sherwood, 2010)

$$\bar{p} = m\bar{v}, \quad (2.18)$$

jolloin liikemäärän muutokselle voidaan kirjoittaa

$$\Delta\bar{p} = m\bar{v}_f - m\bar{v}_i. \quad (2.19)$$

Nyt Newtonin toisesta laista voidaan johtaa jäykälle kappaleelle esitysmuoto

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F}(t) \quad (2.20)$$

ja kertomalla tämä puolittain dt :llä saadaan esitysmuoto

$$m d\bar{v} = \bar{F}(t) dt. \quad (2.21)$$

Integroimalla tämä puolittain saadaan

$$\int_{v_i}^{v_f} m d\bar{v} = m\bar{v}_f - m\bar{v}_i = \int_{t_i}^{t_f} \bar{F}(t) dt. \quad (2.22)$$

Yhdistämällä kaavat (2.17), (2.19) ja (2.22) saadaan johdettua impulssi-liikemääräperiaate

$$\Delta \vec{p} = \vec{I}, \quad (2.23)$$

jonka mukaan kappaleeseen kohdistettu impulssi aiheuttaa kappaleessa impulssin suuntaisen liikemäärän muutoksen.

2.3 Työ-energiaperiaatteen ja impulssi-liikemääräperiaatteen oppiminen sekä niiden opetukseen liittyvät haasteet

Fysiikan opettamisen tutkimuskirjallisuudessa on laajasti tutkittu teoreemiin liittyviä opiskelijoiden käsityksiä ja oppimisen ongelmia (mm. Lawson & McDermott, 1987; Pride, Vokos & McDermott, 1998; Rautiainen, 2015; Dega & Govender, 2016). Opiskelijoilla ilmenevistä fysiikan sisältötiedon vastaisista käsityksistä käytetään monesti termiä virhekäsitys² (Hammer, 1996). Opiskelijoilla voi olla perustavanlaatuisia ongelmia erottaa liike-energia ja liikemäärä toisistaan (Bryce & MacMillan, 2009). Kun opiskelijat eivät erota toisistaan skalaarista liike-energiaa ja vektorisuuretta liikemäärä, he eivät myöskään osaa vastata yksinkertaisiin kysymyksiin kappaleiden törmäyksistä (Close & Heron, 2010).

Yhdistyneissä Kuningaskunnissa laaditussa tutkimuksessa (Bryce & MacMillan, 2009) havaittiin, että monet yliopiston perustason opiskelijoille suunnatuista tekstikirjoista eivät tue riittävästi opiskelijan käsitteellistä ymmärrystä liike-energiasta ja liikemäärästä. Syyksi he katsovat oppikirjojen puutteelliset esimerkit, jotka monesti käsittelevät

² Englanniksi *misconception, preconceptions, alternative conceptions*

esimerkiksi vain täysin kimmoisia tai kimmottomia törmäyksiä (Bryce & MacMillan, 2009). Nämä erikoistapaukset eivät perustele vastausta siten, että se tukisi opiskelijoiden käsitteellistä ymmärrystä myös reaalimaailman epäideaaleissa tilanteissa (Bryce & MacMillan, 2009). Bryce ja MacMillan (2009) havaitsivat tutkimuksessaan etenkin vanhemmille oppijoille suunnattujen kirjojen laiminlyövä oppijoiden vaikeuksia ymmärtää aihetta tarjoamalla tyypistettyjä selityksiä ilmiöille. Oppikirjat käsitelivät monesti fysikaan lakeja vain matemaattisina kaavoina ja siten jättivät opiskelijoille hyvin vähän vaihtoehtoja ulkoopettelu³ lisäksi (Bryce & MacMillan, 2009). Esimerkiksi heidän tutkimistaan vanhemmille opiskelijoille (16–18 vuotiaille) suunnatuista 15 kirjasta vain 9 esitti, että jonkin aikavälin yli vaikuttava voima muuttaa kappaleen liikemäärää ja vain 7 näistä esitti impulssin ja liikemääränmuutoksen käsitteille lisäselityksiä. Työ-energiaperiaatteen osalta tilanne oli parempi, vain 2 käsitellyistä 15 kirjasta kyseistä periaatetta ei mainittu.

Opiskelijoilla on havaittu vaikeuksia liittää voimaa, joka vaikuttaa kappaleeseen jonkin matkan tai aikavälin yli, kappaleen liike-energian tai liikemäärän muutokseen (Lawson & McDermott, 1987). Lawson ja McDermott (1987) myös havaitsivat opiskelijoiden käyttävän usein perusteluissaan kompensatioajattelua, vaikka tiedossa ei olisi kahdelle suurelle tarkkoja suuruuksia. Tällöin opiskelijat perustelevat vastauksensa suhteuttamalla näiden suureiden painoarvoa kahden eri kappaleen välillä tutkittaessa esimerkiksi työ-energiaperiaatetta tai impulssi-liikemääräperiaatetta. Tällainen ajattelumalli ei aina tuota oikeaa vastausta, jos opiskelija esimerkiksi työ-energiaperiaatetta käsittelevässä tehtävässä ratkaisee tehtävää liike-energian kaavasta $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ja päätyy virheellisesti antamaan toiselle suureista suuremman painoarvon.

³ Englanniksi *rote learning*

Tällöin opiskelija ajattelee liike-energiaa vain sen määritelmän kautta, eikä huomioi sitä reaali maailmaa kuvaavana käsitteenä (Lawson & McDermott, 1987).

Sama ongelma toistuu työ-energiaperiaatteen ja impulssi-liikemääräperiaatteen kanssa. Opiskelijat eivät välttämättä näe syy-seuraussuhdetta, jossa esimerkiksi kappaleeseen jonkun matkan yli vaikuttava nollasta poikkeava kokonaisvoima muuttaa vääjäämättä kappaleen liike-energiaa, vaan he käsittelevät kyseistä periaatetta vain matemaattisena relaationa ”voima kertaa matka on yhtä suuri kuin liike-energian muutos”. (Lindsey, Heron & Shaffer, 2009)

Opiskelijoilla on myös havaittu ongelmia työn käsitteen ymmärryksessä (Lindsey ym. 2009). Heillä on tapana ajatella työn etumerkin eli suunnan, johon työtä on tehty⁴ riippuvan valitusta koordinaatistosta. Tällöin esimerkiksi tarkasteltaessa systeemiä, jossa kaksi kappaletta on kiinnitetty toisiinsa jousella ja joususta puristetaan kasaan molemmista päistä yhtä paljon, opiskelijat voivat päätellä kappaleiden ja jousen muodostamaan systeemiin tehtyn työn olevan nolla. Syynä päätelmään on opiskelijoiden virheellinen näkemys siitä, että siirtymät ovat eri suuntaiset, mutta yhtäsuuret (Lindsey ym. 2009). Jousen kappaleisiin kohdistavan voiman ja siirtymän lähempi tarkastelu paljastaa, että molemmille kappaleille siirtymä ja jousen kohdistama voima ovat eri suuntaiset ja siten molemmille kappaleille työn etumerkki on sama.

Työn käsitteen ymmärrykseen läheisesti linkittyvä ongelma oppimiselle on opiskelijoiden taipumus olettaa energian säilyminen systeemissä (Lindsey ym. 2009). Opiskelijat ovat monesti sisäistäneet energian säilymisen olevan merkittävä yleinen

⁴ Systeemin ulkopuolinen kappale on vuorovaikutuksellaan kohdistanut systeemiin voiman ja, riippuen tarkasteltavasta voimasta tai vastavoimasta, tehnyt työtä systeemiin tai systeemi on tehnyt työtä systeemin ulkopuoliseen kappaleeseen.

periaate, mutta he eivät osaa tulkita tai soveltaa sitä oikein käytännön tilanteissa (Lindsey ym. 2009). Tällöin oppilaat eivät tunnista tai sivuuttavat kokonaan tarkasteltavan systeemin ulkopuolelta vuorovaikuttavan voiman merkitystä systeemin mekaaniselle energialle ja päätyvät toteamaan energian säilyvän. Esimerkiksi tarkasteltaessa työ-energiaperiaatteen mukaisessa tilanteessa vain kelkan liike-energiaa, saattavat opiskelijat todeta energian säilyvän hahmottamatta tarkasteltavan systeemin rajoittuvan vain kelkkaan. Siten kelkkaan kohdistuva kokonaisvoima ja sen aiheuttanut kappale eivät ole osa systeemiä vaan kokonaisvoima muuttaa vääjäämättä kelkan liike-energiaa. Soveltamalla tätä kahden vertailtavan kelkan tilanteeseen saadaan iso ristiriita, jos niihin vaikuttavat yhtä suuret voimat yhtä pitkän matkan ja ne lähtevät levosta liikkeelle. Molempien kelkkojen liike-energian on voiman vaikutusmatkan jälkeen oltava edelleen nolla, koska energia on säilynyt ja se on alussa nolla, tai kappaleella on maaliviivalla oltava liike-energiaa ja energia ei siten ole säilynyt.

2.4 Resurssiperustainen oppijan tiedon viitekehys

Resurssiperustaisella oppijan tiedon viitekehyksellä⁵ tarkoitetaan näkökulmaa oppimiselle ja ajattelulle, jossa oppijoilla nähdään olevan käytössä monenlaisia arkielämästä ja formaaleista oppimistilanteista opittuja ajatusmalleja eli resursseja, joilla he selittävät erilaisia tilanteita ympäröivästä maailmasta (Hammer, 2000). Tässä oppijatiedon viitekehyksessä voidaan nähdä aikaisemmin tässä luvussa esitettyjen oppimisen haasteiden olevan kyseiseen tilanteeseen fysiikan formalismin kannalta epäsoveliaan resurssin aktivoitumisen seurausta, pikemminkin kuin joidenkin syvälle

⁵ Englanniksi *resources-based framework*

juurtuneiden ja universaalien virhekäsitysten aiheuttamia (Hammer, 1996). Tällöin myös saman oppijan erilaiset vastaukset sisällöllisesti samanlaisiin kysymyksiin, jotka on esitetty eri tavalla, voidaan selittää tehtävänannon aktivoimalla ajatusmallilla (Steinberg & Sabella, 1997). Esimerkkinä tästä Barniol ja Zavala havaitsivat (2014), että kahden vektorin pistetuloa käsiteltäessä opiskelijat, joille pistetulon laskemiselle oli asetettu kontekstiksi työ, osasivat laskea kahden vektorin pistetulon paremmin kuin vertailuryhmä, jolle pistetulo esitettiin matemaattisena laskuna ilman kontekstia.

Hammer ja kollegat (2005) selittävät tätä eri resurssien akitvoitumista sosiaalisella ja episteemisellä viitekehysellä, johon oppijat asettavat itsensä. Tätä prosessia kuvaa englanninkielinen termi *framing* ja siihen viitataan tässä tutkimuksessa suomennetulla termillä viitekehystämisen⁶. Hammer ja kollegat (2005) määrittelevät tämän viitekehystämisen oppijan tulkintana kysymyksestä *Mitä täällä tapahtuu?* Se määrittelee millaista tietoa oppija sisäistää kyseisestä tilanteesta oppijan asettamien ennako-odotusten kautta (Redish, 2014). Tällöin oppija voi kokonaan sivuuttaa opettajan omasta mielestään korostaman asian, jos hänen ennako-odotustensa luoma viitekehys ei vastaa sitä kokonaisuutta, johon opettaja on yrittänyt tiedon ja oppimisen asettaa.

Tässä resurssiperustaisessa oppijan tiedon viitekehyksessä opetuksen tarkoitus on auttaa oppijoita jalostamaan heidän alkuperäisiä ajatusmallejaan fysiikan sisältötiedolle hyödylliseksi resurssiksi. Oppijoilla voi olla esimerkiksi vapaasti suomennettu

⁶ Sana viitekehystämisen on valittu kuvaamaan tätä *framing* -prosessia siitä syystä, että se kuvaa tutkielman kirjoittajan mielestä hyvin sitä sekä tiedollista että tiedostamatonta prosessia, jossa oppija tulkitsee jotakin tilannetta tai ilmausta. Tällöin oppija tulkitsee kyseistä asiaa ja asettaa itsellensä odotuksia sitä kohtaan aikaisempien odotusrakenteiden avulla asettaen näin toiminnalleen ja ajattelulleen viitekehysten, jossa hän kyseistä asiaa tulkitsee.

ajatusmalli siitä, että ”samanlaiset paristot tuottavat saman määrän sähköä” (Grayson, 2004, s. 1127). Tässä alkuperäisessä resurssissa sähkö voi tarkoittaa sähkövirtaa, jännitettä, energiaa, tehoa tai jopa yhdistelmää näistä käsitteistä (Grayson, 2004) ja opetuksen tarkoitus on muokata resurssin käyttö sellaiseksi, että se jatkossa vastaavassa tilanteessa aktivoituessaan tarkoittaa oppijalle ”samanlaiset paristot tuottavat saman jännitteen”.

Richards, Jones ja Etkina (2018) jaottelevat resurssit eri kategorioihin niiden tyyppin mukaan, jolloin heidän mukaansa löytyy kolmea eri tyyppistä resurssia: p-primejä⁷, kuten DiSessa ne määrittelee (1993), käsitteellisiä resursseja ja epistemologisia resursseja (Hammer, 2000). Näistä p-primit ovat kaikkein yksinkertaisimpia ja irtonaisimpia rakenteeltaan: ne ovat henkilön yksittäisiä havaintoja siitä, kuinka maailma toimii (DiSessa, 1993). Esimerkki p-primitistä voi olla DiSessan kuvailema ”hiipuminen⁸”, joka auttaa ymmärtämään sitä, kuinka kaikki arkielämässä tavattu liike, kuten pallon vieriminen, pysähtyy aikanaan.

Käsitteelliset resurssit poikkeavat p-primeistä siten, että ne ovat kooltaan ja käsityslaajuudeltaan suurempia. Conlin, Gupta ja Hammer (2010, s. 20) antavat ymmärtää käsitteellisten resurssien olevan p-primien pohjalta muodostettuja kehittyneempiä ja tilannesidonnaisia ajatusmalleja sanomalla vapaasti suomennettuna ”fenomenologiset primitiivit ovat esimerkki resursseista, mutta eivät missään nimessä kuvaa koko resurssien joukkoa eivätkä niiden laajuutta”. Liikettä tarkasteltaessa oppilas saattaa todeta, että avaruudessa kulkevaan kappaleeseen tulee kohdistua voima, jotta se

⁷ Englanniksi *p-prim*, lyhenne englanninkielisestä ilmauksesta *phenomenological primitives*

⁸ Englanniksi *dying away*

jatkaisi liikettään vakio nopeudella. Tällöin hän on aktivoinut p-primin ”ylläpitäminen⁹”, joka ei itsessään ole väärä, mutta tässä tilanteessa aktivoituessaan se tuottaa fysiikan sisältötiedon kanssa ristiriitaisen päätelmän. Toinen opiskelijoiden käyttämä termi on alkuvoima¹⁰, joka heidän mielestään tarvitaan liikkeen aikaansaamiseksi. Tätä alkuvoimaan liittyvää ”liikkeellepanon¹¹” p-primin aktivoitumista pyritään opetuksella muokkaamaan ja opetuksen onnistuessa oppilas pystyy vaimentamaan kyseisen p-primin tässä tilanteessa ja aktivoimaan sen pohjalta kehitetyn fysiikan sisältötiedon mukaisen käsitteen impulssista toisessa tarkasteltavassa tilanteessa (Hammer, 1996). Tällöin tämän ylläpitämisen p-primin pohjalta on mahdollisesti muodostettu fysiikan sisältötiedon mukainen uusi käsitteellinen resurssi liikemäärästä ja liikkeellepanon p-primistä on muodostettu impulssin käsitteellinen resurssi (Hammer, 1996).

Epistemologiset resurssit sisältävät oppijoiden käsitykset oppimisesta ja tiedosta. Näihin sisältyvät esimerkiksi metakognitio, antropomorfismi ja ajatukset, ”tieto on epävarmaa” sekä ”tieto tulee auktoriteetiltä” (Richards ym. 2018). Esimerkkinä viimeisestä opettajat huomaavat aloittelevien fysiikan opiskelijoiden pyytävän kysymykseen vastausta luottaen, että opettaja auktoriteettinä varmistaa heidän vastauksensa olevan oikein tai väärin. Aloittelevilla opiskelijoilla on myös taipumus katsoa tiedon olevan varmaa, mikä poikkeaa asiantuntijoiden näkemyksestä tiedon epävarmuudesta (Hammer & Elby, 2003). Esimerkkinä antropomorfismista voidaan nimetä opiskelijoiden tapaa selittää esimerkiksi kelan indusoiman sähkömotorisen voiman sillä, että kela pyrkii tai haluaa vastustaa sen läpäisevän magneettivuon muutosta.

⁹ Englanniksi *maintaining agency*

¹⁰ Englanniksi *initial force*

¹¹ Englanniksi *actuating agency*

Tällöin opiskelija projisoi ihmisten tapoja tai ominaisuuksia elottomiin esineisiin. Näiden epistemologisten resurssien aktivoitumiseen voidaan nähdä vaikuttavan sen, kuinka oppija näkee, että hänen tulee lähteä ratkaisemaan esitettyä ongelmaa. Siten viitekehystämisen seurauksena saman oppijan päätyminen erilaisiin epistemologisiin viitekehyksiin voi johtaa täysin eri resurssien aktivoitumiseen ja sitä kautta myös erilaisiin vastauksiin (Richards ym. 2018).

Tämän tutkielman yhteydessä resurssiperustainen oppijan tiedon viitekehys toimii työkaluna aineiston tulkinnassa. Tästä näkökulmasta katsottuna opiskelijoiden vastaukset selittyvät poikkeuksellisen hyvin erilaisten resurssien aktivoitumisella ja vastauksista voidaan muodostaa pitkälle johdettuja päätelmiä opiskelijoiden osaamisesta. Se ei kuitenkaan anna täydellistä varmuutta tulkinnan oikeellisuudesta, sillä ihmisen kognitio on haasteellinen tutkimuskohde sen ainutlaatuisuuden ja tutkimusasetelman ainutkertaisuuden takia.

2.5 Tieteellinen argumentaatio

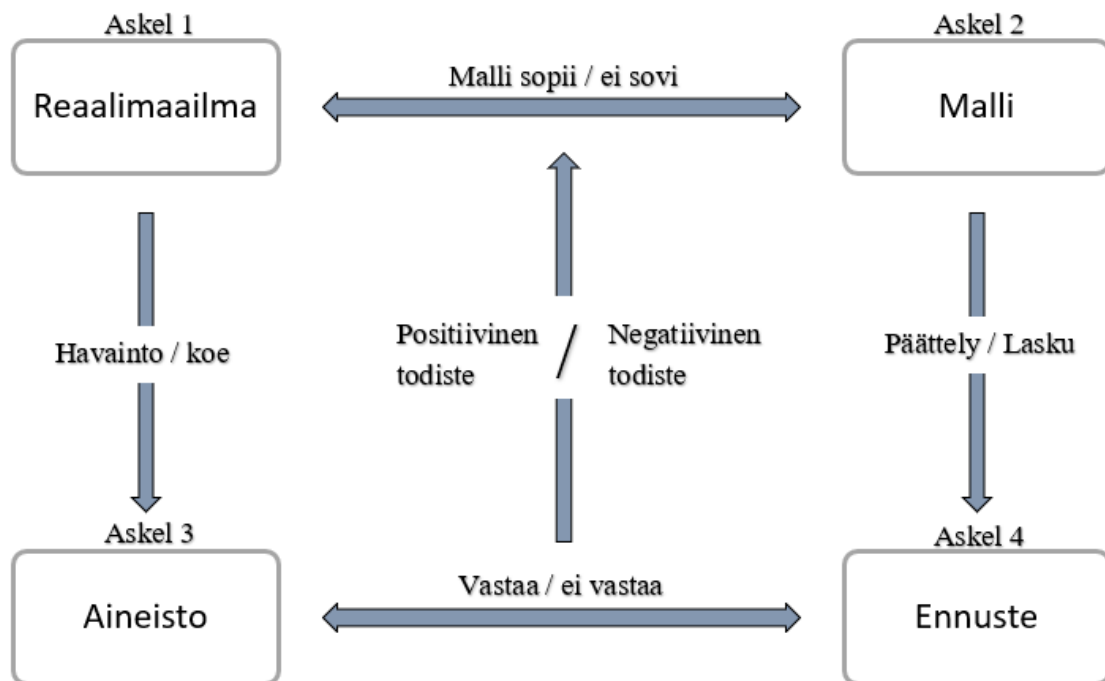
Jotta tieteellinen argumentaatio¹² voitaisiin määritellä, tulee määritellä logiikan tieteenhaara, josta se on eronnut. Logiikan voidaan määritellä tutkivan joukkoa erillisiä, asiayhteydestä riippumattomia sääntöjä, joilla voidaan tuottaa oikeita päätelmiä annetuista alkuolettamuksista. Kun tieteellisiä teorioita aksiomatisoidaan, logiikan voidaan ajatella olevan matematiikan muoto, jonka tehtävä on auttaa tutkijaa testaamaan väitteen johdonmukaisuutta ja dedusoida johtopäätöksiä (Evans, 2002). Näiden

¹² Englanniksi *scientific argumentation*

muodostettujen johtopäätöksiä totuusarvo riippuu vain aksioomien, eli käytettyjen alkuolettamusten, totuusarvosta, jota logiikka itsessään ei arvioi tai kyseenalaista.

Ihmisten tapa järkeillä puolestaan ei perustu aksioomiin, vaan uskomuksiin, joihin järkeilijällä on eriasteista luottamusta (Evans, 2002). Siten ihmisten järkeily tuottaa johtopäätöksiä, jotka ovat usein luonteeltaan todennäköisiä totuuksien sijaan (Evans, 2002). Tätä järkeilyn ja tieteellisen tiedon tuottamisen prosessia kuvaa yksinkertaistetusti Gieren malli, joka on esitetty kuvassa 1. Tieteellinen argumentaatio kuvaa tätä ihmisten järkeilyn tapaa, joka sijoittuu tiettyyn sosiaaliseen ympäristöön. Täten argumentoinnin voidaan nähdä olevan joko yksilön aktiviteetti, jossa yksilö pyrkii ajattelulla ja kirjoittamisella tuottamaan alkutiedoistaan johtopäätöksiä, tai neuvotteleva sosiaalinen aktiviteetti jonkun ryhmän sisällä, jonka tarkoitus on tuottaa ryhmälle konsensus jonkin ilmiön luonteesta kilpailevien väittämien ja perusteluiden avulla. (Driver, Newton & Osborne, 2000)

Edellä mainitusta näkökulmasta tarkasteltuna tieteellisen argumentoinnin tarkoitus on ratkaista ongelmia (yhteistyössä muiden kanssa) laatimalla selityksiä ongelmaan. Yksilöt vertailevat kilpailevia selityksiä ja niiden perusteluita pyrkien tunnistamaan sen mallin, joka parhaiten selittää saatavilla olevaa todistusaineistoa ja logiikkaa (Berland & Raiser, 2009). Täten Sandoval ja Millwood (2005, s. 24) toteavat vapaasti suomennettuna, että ”Selitykset ovat tieteen keskeinen luomus ja niiden konstruoiminen ja arvioiminen sisältävät argumentoinnin sisimmän käytännön tieteessä.” Edellä mainittu voidaan ymmärtää siten, että argumentaatio ja ilmiöiden selitykset ovat toisiaan täydentäviä käytänteitä, joissa ensin ilmiön selitys luo pohjan, jonka perusteella väitteen kannattajat yrittävät tieteellisen argumentaation keinoin vakuuttaa muut ilmiön ymmärryksestään ja luoda siten yhteisön hyväksymän selityksen (Berland & Reiser, 2009).



Kuva 1. Gieren malli tieteellisen tiedon syntyyn johtavista vuorovaikutuksista (mukaillen Giere, 1991).

Tieteellisen argumentaation keskeinen tarkoitus on auttaa tiedeyhteisöä arvioimaan hypoteesien luotettavuutta ja väitteiden oikeellisuutta. Tämän se voi saavuttaa paljastamalla ja huomioimalla ideoiden ja aineiston epäjohdonmukaisuuksia. Berland ja Reiser (2009) kiteyttävät asian siten, että jonkin asian puolesta argumentoivat yksilöt pyrkivät ymmärtämään ilmiöitä, saattamaan nämä tiedot sanoiksi ja vakuuttaa muut omista ajatuksistaan. Berlandin ja Hammerin (2012) mukaan näiden kolmen tavoitteen saavuttamiseksi ei riitä, että yksilö konstruoi ja tukee väitteitään todistusaineistolla ja loogisilla perusteilla, vaan yksilön täytyy myös uudelleenarvioida omia ja muiden väitteitä, todistusaineistoa sekä perusteluja.

Toulmin (1958) määrittelee kirjassaan *The Uses of Argument* argumentoinnille neljä pääelementtiä ja kaksi muuta ominaisuutta, jotka ilmenevät monimutkaisemmissa argumenteissa, ja ne ovat esitetty kuvassa 2. Nämä neljä pääelementtiä ovat:

- (*Data*) Aineisto: faktat, joihin argumentoijat vetoavat tukiessaan väitettään.
- (*Claim*) Väite: johtopäätös, joka pyritään osoittamaan todeksi.
- (*Warrant*) Perustelut: syyt, joiden ehdotetaan oikeuttavan yhteyden aineiston ja väitteen välillä.
- (*Backing*) Teoreettinen pohjatieto: perusolettamukset, joiden itsessään oletetaan olevan yleisesti hyväksytyjä ja jotka oikeuttavat nämä väitteet.

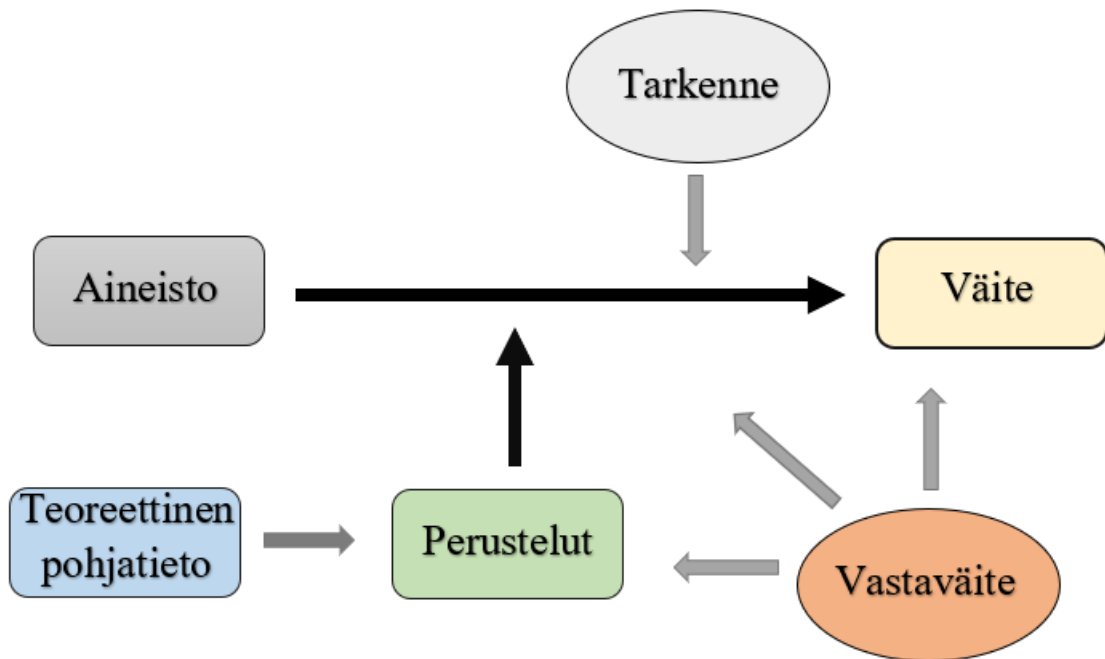
Ja kaksi muuta ominaisuutta:

- (*Qualifier*) Tarkenne: määrittelee olosuhteet tai kriteerit, jolloin väite on tosi ja siten asettaa väitteelle rajoituksia.
- (*Rebuttal*) Vastaväite: määrittelee olosuhteet tai kriteerit, jolloin väite ei ole totta.

Huomioitavaa kuitenkin on, että Toulminin mallilla ei voida arvioida väitteiden oikeellisuutta, vaan sen käyttö rajoittuu argumentin rakenteen ja muodostumisen tarkasteluun. Väitteiden oikeellisuuden tarkastelussa tulee sisällyttää tarkasteluun edellä mainittujen elementtien lisäksi myös tutkimuskohteen tietämystä, jotta väitteiden paikkansapitävyyttä voidaan arvioida.

Tämän lisäksi jotkin lähteet, kuten Blair ja Johnson (1987) pyrkivät luomaan normeja, analyysin prosesseja sekä kriteereitä argumentin konstruointiin ja arviointiin. He tunnistivat kolme kriteeriä, jotka jokaisen argumentin olettamuksien tulee toteuttaa:

- *Asiaankuuluvuus*: Onko väitteen ja olettamuksien sisällön välillä riittävä yhteys?
- *Riittävyys*: Tuottaako olettamus riittävästi todisteita väitteelle?
- *Hyväksyttävyyys*: Ovatko olettamukset tosia, todennäköisiä tai luotettavia?



Kuva 2. Toulminin malli tieteellisestä argumentoinnista. Mallissa neljä pääelementtiä on esitetty laatikoilla ja kaksi muuta ominaisuutta ellipseillä (mukaiillen Toulmin, 1958).

Näiden lisäyksien avulla argumentin laatua voidaan edelleen tarkastella syvemmin ja tehdä johtopäätöksiä argumentin oikeellisuudesta. Myös Sampson ja kollegat (2011) päätyivät arvioimaan kirjoitettuja argumentteja saman tyyppisin kriteerein, mutta esittämään laajemman kriteeristön. Nämä kriteerit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, empiirisiin kriteereihin ja teoreettisiin kriteereihin, seuraavasti:

Empiiriset kriteerit

- Argumentin väitteen yhteensopivuus aineiston ja perusteluiden kanssa
- Aineiston ja perusteluiden riittävyys argumentin väitteen takaamiseksi
- Argumentin selitysvoima reaali maailman tilanteissa
- Argumentoinnissa käytetyn todistusaineiston laadukkuus

Teoreettiset kriteerit

- Argumentoinnin myötä muodostetun selityksen riittävyys
- Argumentoinnin myötä muodostetun selityksen hyödyllisyys
- Argumentin johdonmukaisuus sisältötiedon ja periaatteiden kanssa

Näiden yleisten pääkriteerien avulla vastauksille voidaan luoda kullekin tehtävätyypille tyypillisiä ja tarkastelun tasoon sopivia argumentoinnin laadun kriteereitä, joista esimerkkinä voidaan pitää edellä mainittua Blairin ja Johnsonin (1987) kriteeristöä.

Tässä tutkielmassa tieteellistä argumentaatiota hyödynnetään tutkimalla opiskelijoiden vastauksissa esiintyvän argumentin rakennetta. Joidenkin vastausten kohdalla on myös täytynyt soveltaa Blairin ja Johnsonin (1987) tai Sampsonin ja kollegoiden (2011) kriteereitä perusteltaessa argumentista tunnistettuja rakenteita. Vastauksista tunnistettujen argumentin rakenteiden avulla on myös muodostettu johtopäätöksiä opiskelijoiden tieteellisestä sivistyksestä.

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tarkoitus, tutkimusongelma, aineistonkeruu- ja analyysimenetelmät.

3.1 Tutkimuksen tarkoitus ja tutkimusongelma

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää opiskelijoiden tieteellisen argumentoinnin käyttöä ja keskittyä tutkimaan millaisia perusteluita opiskelijat antavat vastauksilleen. Näistä vastauksista voidaan muodostaa johtopäätöksiä opiskelijoiden osaamisesta; rajoittuuko yksittäisen opiskelijan osaaminen kaavan ulkoa opetteluun ja sopivia suureita sisältävän kaavan soveltamiseen, vai annetaanko vastauksille ja kaavojen käytölle argumentteja, jotka puoltavat juuri tämän kaavan käyttöä. Siten tutkimuskysymykseksi rajautui:

Miten opiskelijat osaavat perustella vastauksiaan fysiikan sisältötiedon ja argumentoinnin rakenteen näkökulmista työ-energia- ja impulssi-liikemääräperiaatteiden tehtävissä?

Tähän kysymykseen vastauksia etsimällä on mahdollista luoda tarkempi kuva opiskelijoiden osaamisesta. Opiskelijan tieteellisen argumentaatiotaidot ovat kytköksissä hänen luonnontieteelliseen sivistykseensä (Kokkonen & Laherto, 2018). Tällöin

tutkimalla opiskelijoiden vastauksista heidän muodostaman argumentin rakennetta, voidaan tuottaa tietoa siitä, kuinka hyviä perusteluja opiskelija pystyy tuottamaan väitteilleen. Perustelun laatu on osaltaan kytköksissä opiskelijan käsitteelliseen osaamiseen ja siten on mahdollista muodostaa kokonaisvaltaisempi kuva opiskelijoiden osaamisesta. Työ-energia- ja impulssi-liikemääräperiaatteiden kohdalla tutkielman kirjoittajalle ei ole tullut vastaan aikaisempia tutkimuksia argumentoinnin rakenteen tutkimuksista, jolloin tutkielman tarkoitus on täydentää näistä aiheista jo olemassa olevaa tutkimustietoa.

Jos opiskelijoiden tieteellinen argumentointi on hyvää, mutta fysiikan sisältötiedollisesti vastaus ei ole koherentti, tiedämme opiskelijalle olevan mahdollista tuottaa tehtävään oikea vastaus soveltamalla koherenttia fysiikan sisältötietoa. Nyt resurssiperustaisesta oppijan tiedon viitekehystä katsottuna voimme nähdä, että opiskelijan tilanteeseen soveltama fysiikan sisältötiedon resurssi ei sovellu kyseisen tehtävätyypin ratkaisemiseen ja hän päätyy siten virheelliseen väitteeseen. Jos opiskelija puolestaan antaa fysiikan sisältötiedollisesti oikean, mutta argumentin rakenteeltaan puutteellisen vastauksen, voidaan muodostaa jälleen johtopäätöksiä opiskelijan osaamisesta. Hän on tällöin voinut arvata vastauksen tai osaa tehtävän, muttei hallitse vastauksen laatimiseen vaadittavia taitoja sillä tasolla, jolla hän vakuuttaisi lukijan vastauksen oikeellisuudesta. Näissä kahdessa tapauksessa saadaan opiskelijoiden osaamista kokonaisvaltaisempi kuva kuin tarkastelemalla vastauksia vain opiskelijan sisältötiedon osaamisen näkökulmasta.

3.2 Kohderyhmä

Tutkimuksen kohderyhmäksi valikoitui Fysiikan peruskurssi I:n opiskelijat, sillä kurssin sisältö vastaa tutkielmassa käsiteltävää fysiikan aihealuetta. Monet kurssin opiskelijoista ovat ensimmäisen vuoden opiskelijoita, joten opiskelijoille ei välttämättä ole kerennyt muodostua vielä yliopistotason syvempää ymmärrystä fysiikan ilmiöistä. Täten aineisto

mittaa opiskelijoiden tietoja ja taitoja perusopintotason alkupuolella ja tutkimustuloksia on mahdollista hyödyntää mietittäessä opetuksen kehittämistä.

Kurssille osallistujat ovat pääsääntöisesti fysiikan, matematiikan, kemian ja tietojenkäsittelytieteiden opiskelijoita. Fysiikan pää- ja sivuaineopiskelijoille kurssi on pakollinen.

3.3 Aineistonkeruumenetelmä ja toteutus

Aineistonkeruu toteutettiin vuoden 2018 Fysiikan peruskurssi I:llä. Kurssi käsitteli Newtonin mekaniikkaa, yksi- ja kaksiulotteisia liikeilmiöitä ja pyörimisliikettä jäykille kappaleille. Kurssi koostui luennoista sekä laskuharjoituksista ja kurssin oppimateriaaleina olivat luentodiat ja Randall D. Knightin kirjan (Knight, 2008) luvut 1–14. Luento opetus oli algebrapainotteista ja laskuharjoitukset keskittyivät yleensä¹³ tehtävien matemaattiseen ratkaisemiseen sopivasta kaavasta. Tämän lisäksi kurssilla oli kolme tutoriaaliharjoitusta, joissa oli käsitelty tarkemmin voimaa, työtä ja impulssi-liikemääräperiaatetta (Kesonen, Harjulampi, Leinonen, Hirvonen & Asikainen, 2018). Tutkimuksen suoritusajankohta on lähellä perusopetuksen opetussuunnitelman periaatteiden 2014 voimaantuloa (viimeistään 2016 syksystä alkaen), jolloin kurssille osallistuvat opiskelijat eivät ole vielä ehtineet osallistua muuttuneiden painopisteiden opetukseen osana peruskouluopetustaan.

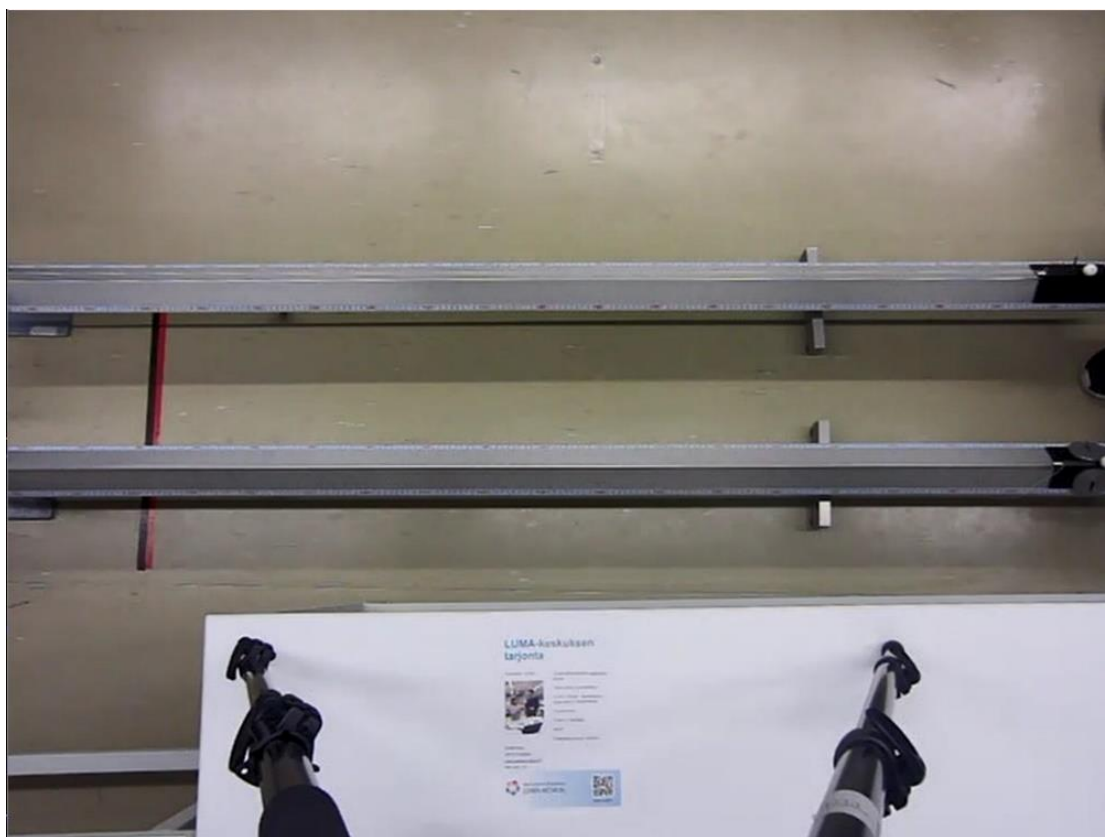
Jotta vastaukset olisivat mahdollisimman huolellisesti perusteltuja, valikoitui aineistonkeruumenetelmäksi opiskelijoiden kurssikokeeseen laadittu tehtävä, joka

¹³ Tutkielman kirjoittaja toimi kurssilla myös viikoittain laskuharjoitusten pitäjänä ja sai siten tarkempaa tietoa kurssin toimintatavoista ja joidenkin opiskelijoiden ilmaisemista vaikeuksista.

perustui Lawsonin ja McDermottin (1987) tutkimusartikkelissa esitettyyn tehtävään. Tehtävä oli kaikille pakollinen, mutta halutessaan kukin opiskelijoista sai kieltää vastauksen tutkimuskäytön. Tehtävään vastasi yhteensä 50 opiskelijaa, joista 45 antoi luvan vastauksen tutkimuskäytölle. Yhteensä opiskelijoilla oli 120 minuuttia aikaa tehdä kurssikoe, jolloin kutakin viidestä tehtävästä kohti jäi noin 24 minuuttia aikaa. Kurssikokeen tehtäväpaperilla tämän tutkimuksen aineistonkeruussa käytetty tehtävä oli ensimmäisenä.

Tutkimusaineiston keruussa käytettyä tehtävää varten havaintoaineistoksi oli kuvattu video, joka pyöri jatkuvalla toistolla koko kurssikokeen ajan. Videolla kaksi kelkkaa oli asetettu rinnakkain ilmatyynyradoille. Aluksi ne olivat levossa lähtöviivalla ja tämän jälkeen ne päästettiin irti. Lähtöviivalla molempien kelkkojen etäisyys maaliviivasta oli yhtä suuri. Toisen kelkan päälle oli asetettu punnukset, jolloin sen massa oli suurempi. Kun molempiin kelkkoihin kohdistettiin yhtä suuri ja saman suuntainen kokonaisvoima, se kelkka, jonka massa oli suurempi, sai Newtonin toisen lain mukaisesti pienemmän kiihtyvyyden ja saapui maaliviivalle myöhemmin. Kuvassa 3 on esitetty kuvakaappaus videon lähtötilanteesta ja kuvassa 4 kuvakaappaus ajanhetkeltä, jolloin kevyempi kelkka tavoittaa maaliviivan.

Tehtävänannossa opiskelijoille kerrottiin, että videolla molempiin kelkkoihin kohdistetaan narujen avulla samat vakiovoimat \bar{F} koko matkan alusta maaliviivalle, joka videossa on merkitty puna-mustalla viivalla. Lisäksi heille kerrottiin, että ilmatyynyradan ja kelkan välisen kitkakertoimen voitiin approksimoida olevan nolla ja kelkkojen lähtevän liikkeelle samalta etäisyydeltä maaliviivasta. Tehtävänanto on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä A.



Kuva 3. Kuvakaappaus alkutilanteesta, jossa molemmat kelkat ovat levossa samalla etäisyydellä maaliviivasta. Kuvassa alemman kelkan päällä on lisäpunnuksia, jolloin alemman kelkan massa on suurempi. Kuvassa vasemmalla puna-mustalla viivalla on merkitty maaliviivaa.

Opiskelijoiden tuli edellä kuvatun aineiston perusteella vastata liitteen A kysymyksiin. Kysymyksissä opiskelijoiden tuli laatia videoaineiston pohjalta vähintään kaksi havaintoa. Näitä havaintoja ja fysiikan sisältötietoja soveltamalla heidän tuli perustella olivatko ylemmän kelkan massa, liike-energia ja liikemäärä suurempia, yhtä suuria vai pienempiä kuin alemman kelkan vastaavat suuret.



Kuva 4. Kuvankaappaus ajanhetkeltä, jolla kevyempi kelkka saavuttaa puna-mustan maaliviivan.

3.4 Aineiston analyysi

Aineiston analysoinnissa apuna käytettiin vastausten luokittelua kategorioihin sisällön analyysin menetelmin. Tällä menetelmällä on mahdollista kiteyttää tekstistä sisältösidonnaisia kategorioita tai luokkia (Elo & Kyngäs, 2008). Näille kategorioille oli aineiston perusteella määritetty kriteerit, jotka kunkin vastauksen tuli täyttää päätyäkseen kyseiseen luokkaan. Vastauksista luokiteltiin sekä fysiikan sisältötietoa että yleisesti muodostetun argumentin rakennetta. Aineistosta paljastui selvät luokat kullekin tehtävälle ja nämä luokat olivat toisensa poissulkevia, eli kukin havainto tai vastaus kuului vain yhteen fysiikan sisältötiedolliseen tai argumentoinin rakenteen luokkaan.

Tulosten analysoinnissa havaintoja on tulkittu tehtävärajojen yli, sillä tehtävänannossa mainittiin, että vastaus tulee perustella havaintoja ja fysiikan sisältötietoja apuna käyttäen. Tällöin opiskelijaa ohjattiin käyttämään hyväksi heidän omia havaintojaan ja niitä ei oletettu kopioitaviksi uudelleen jokaisen tehtävän kohdalle. Fysiikan sisältötietoa ja argumentoinnin rakennetta apuna käyttäen yksittäisten opiskelijoiden vastausten sisältöä voitiin arvioida kvalitatiivisesti ja muodostaa kvantitatiivista aineistoa kuhunkin luokkaan kuuluneiden vastausten lukumääristä.

Argumentoinnin rakennetta arvioitaessa keskityttiin Toulminin mallista (ks. kuva 2) poimituihin kolmeen elementtiin: havaintoihin, perusteluihin ja väitteeseen. Nämä kolme elementtiä on valittu tarkasteluun siitä syystä, että opiskelijat harvoin sisällyttivät vastauksiinsa tarkennetta perusteluun väitteen voimassaolosta, vastaväitettä, joka muokkaisi perustelua tai fysiikan lain tai periaatteen ulkopuolelle ylettyvää teoreettista kontekstia. Näiden kolmen elementin avulla vastaukset luokiteltiin argumentin rakenteensa mukaisiin kategorioihin, jotka olivat:

- Havainto + Perustelu + Väite (H+V+P)
- Havainto + Väite (H+V)
- Väite + Perustelu (V+P)
- Väite (V)
- Havainto (H)

Suluissa on ilmaistu kyseiselle kategorialle lyhenne, jota käytetään jatkossa kuvaamaan kyseistä kategoriaa. Siten esimerkiksi H+V+P -kategoriaan kuulunut vastaus sisälsi havaintoja suureista, ilmiöistä tai fysiikan laeista, väitteen annettuun kysymykseen ja perustelun, joka liitti havainnot ja väitteen yhteen. Muissa kategorioissa yksi tai useampi näistä elementeistä uupui ja siten vastauksessa olevan argumentin voitiin katsoa olevan rakenteeltaan puutteellinen, sillä esimerkiksi pelkkä havainto merkityksellisestä

suureesta ja havainnon pohjalta tehty väite ei yleensä riitä vakuuttamaan lukijaa väitteen oikeellisuudesta ilman perusteluja.

Fysiikan sisältötiedon osalta aineistossa ilmenneet vastaukset on luokiteltu niiden sisällön perusteella kahteen pääluokkaan. Nämä luokat ovat fysiikan sisältötiedon mukaiset ja sen kanssa ristiriitaiset vastaukset. Vastaukset on jaoteltu yleisten vastaustyyppien mukaan alaluokkiin, jotka on esitetty taulukoissa 1–4. Luokat on pyritty muodostamaan sisällön analyysille tyypillisesti (Elo & Kyngäs, 2008) kattamaan mahdollisimman suuren joukon vastauksia, mutta pyrkien säilyttämään fysiikan sisältötiedon osalta erilaiset ajatusmallit omiksi alaluokikseen silloin, kun se on mahdollista.

Tässä luvussa esitellään tutkimukset tulokset opiskelijoille esitettyihin kysymyksiin sekä oikeat vastaukset että tyypilliset vastaukset. Ensimmäisessä tehtävässä kysyttiin lupaa vastausten tutkimuskäytölle, joten vastausten analysointi aloitetaan opiskelijoiden muodostamista havainnoista havaintoaineistoksi kuvatusta videosta. Taulukoissa 2–4 fysiikan sisältötiedon vastainen tai sen kanssa ristiriitainen vastaus on ilmaistu termillä ”väärä vastaus” ja sisältötiedon mukainen vastaus termillä ”oikea vastaus” taulukon asetteluun liittyvistä syistä.

4.1 Videoaineiston perusteella muodostetut havainnot kelkkojen liikkeestä

Tehtävässä tarkoituksena oli muodostaa videoaineiston perusteella vähintään kaksi havaintoa kelkkojen liikkeistä. Tällaisia havaintoja olivat esimerkiksi havainto ylemmän kelkan suuremmasta kiihtyvyydestä ja havainto ylemmän kelkan saapumisesta maaliin ennen alempaa kelkkaa. Vastauksista suurimmassa osassa oli fysiikan sisältötiedon mukaisia havaintoja, mutta mukaan mahtui myös fysiikan sisältötiedon suhteen ristiriitaisia tai epärelevantteja havaintoja. Yleisesti havainnot oli tehty puhekielisin ilmauksin, jolloin esimerkiksi ylemmän kelkan suurempaa kiihtyvyyttä kuvattiin monesti

ilmaisulla ”ylempi kelkka kiihtyy nopeammin”. Tämä ”nopeammin” termi oli yleisesti käytössä kuvaamassa toisen kelkan suurempaa nopeutta, kiihtyvyyttä tai aikaisemmin maaliin saapumista. Taulukossa 1 on esitetty kuhunkin luokkaan kuuluneiden vastausten lukumäärät. Muu fysiikan sisältötiedon mukainen havainto -kategoriaan luokitellut havainnot sisälsivät jonkin edellä mainituista poikkeavan havainnon, kuten ”kelkat kimpoavat lopussa taaksepäin”, mikä ei tehtävän kannalta ollut mielekäs, mutta oli fysikaalisesti oikein.

Taulukko 1. Opiskelijoiden havainnoista muodostetut luokat ja esiintyneiden havaintojen suhteelliset esiintyvyydet, kun opiskelijat tekivät kaikkiaan 117 havaintoa. Keskimäärin opiskelijat tekivät 2,60 havaintoa keskihajonnan ollessa 0,74.

Havainto	(N=117)
Fysiikan sisältötiedon mukainen havainto	94%
Kiihtyvyyksien vertailu	27%
Loppunopeuksien vertailu	15%
Muu havainto	15% ^a
Havainto vain kiihtyvästä liikkeestä	13%
Kiihtyvyydet tasaisia	11%
Käytettyjen aikojen vertailu	9%
Fysiikan sisältötiedon kanssa ristiriitainen havainto	6%
Muu havainto	3%
Liike/nopeus tasaista	3%

^a 4 opiskelijaa tässä luokassa teki kaksi havaintoa.

Muu fysiikan sisältötiedon vastainen havainto -kategoriaan luokitellut havainnot sisälsivät ilmaukset, kuten ”ylemmän kelkan kiihtyvyys kasvaa nopeammin kuin alemman kelkan kiihtyvyys”, ”törmäyksen jälkeen liikemäärät säilyvät”, ”molemmilla kelkoilla on sama nopeus maaliviivalla” ja ”molemmat kelkat ovat liikkeessä kokoajan”. Näistä viimeisin on luokiteltu kategoriaan siitä syystä, että tarkasteltaessa kelkkojen liikkeitä lähtöviivalta maaliin asti, molemmat kelkat ovat aluksi hetken paikallaan¹⁴ ja lähtevät vasta sitten liikkeelle, jolloin tulkinnan mukaan kelkat eivät ole liikkeessä kokoajan lähtöviivalta maaliviivalle.

4.2 Kelkkojen massojen vertailu

Tehtävässä opiskelijoiden tuli määrittää kumman kelkan massa on suurempi, vai ovatko kelkkojen massat yhtä suuret. Tehtävässä alemmalla kelkalla oli suurempi massa, johon opiskelijoiden tuli päätyä soveltamalla Newtonin toista lakia. Kun tiedettiin molempiin kelkkoihin kohdistettavan yhtä suuret vakiovoimat, voitiin Newtonin toisesta laista johtaa kiihtyvyyden ja massan välille relaatio $a = \frac{F}{m}$, josta nähdään kiihtyvyyden olevan kääntäen verrannollinen massaan ja siten kun ylemmän kelkan havaittiin saavan suurempi kiihtyvyys, tuli ylemmällä kelkalla olla pienempi massa kuin alemmalla kelkalla.

Vastauksen argumenttiin sisältyy tällöin myös kaikki kolme tarkasteltavaa argumentoinnin rakenteen elementtiä: havainnot kiihtyvyyksien suuruuksista, yhtä suurista vakiovoimista ja Newtonin toisesta laista, väite ylemmän kelkan pienemmästä massasta ja perustelu kiihtyvyyden kääntäen verrannollisuudesta massan kanssa. Kaikkiaan tehtävään tuli 43 oikeaa vastausta ja 2 väärää vastausta. Nämä tulokset on

¹⁴ Videolla tämä paikallaanolo kestää n. 2,5 sekuntia.

esitetty taulukossa 2. Väärissä vastauksissa molemmat opiskelijoista tekivät johtopäätöksen, että ylemmällä kelkalla oli suuremman nopeuden tai kiihtyvyyden takia myös suurempi massa. Toinen väärin vastanneista opiskelijoista perusteli tätä lisäksi sillä, ettei kitkaa tarvinnut huomioida, jolloin massa ei hidasta liikkeellelähtöä. Edellä mainitun voidaan puolestaan katsoa osoittavan selvää Newtonin toisen lain ymmärtämättömyyttä. Jotta vastauksen katsottiin olevan oikein, sen tuli täyttää vähintään kolme kriteeriä:

- Maininta fysiikan laista tai periaatteesta, esimerkiksi:
 $F = ma$, Newtonin toisen lain perusteella tai dynamiikan peruslain perusteella.
- Maininta vakiovoimasta, joka on molemmille kelkoille yhtä suuri. Esim. $F_y = F_a$ tai sanallinen selitys kuten ”molempiin kelkkoihin kohdistettiin yhtä suuri voima”.
- Havainto ylemmän kelkan suuremmasta kiihtyvyydestä, esim. $a_y > a_a$ tai vastaavasti ”alempi kelkka kiihtyy hitaammin”.

Taulukko 2. Kelkkojen massojen vertailun tehtävästä muodostettu vastausluokkien jakauma (N=45). Vastauksissa esiintyneet fysiikan sisällöt on luokiteltu päätyypeittäin kategorioihin ja kunkin kategorian vastauksista on tunnistettu niiden argumentin rakenne (ks. sivu 28).

Fysiikan sisältö	Tyhjä	H	V	V+P	H+V	H+V+P
Oikea vastaus					7%	87%
Hyvät perustelut						85%
Puutteelliset perustelut					7%	2%
Väärä vastaus					2%	2%

Puutteelliset perustelut -kategoriaan kuuluvissa vastauksissa puuttui maininta symbolisesti tai sanallisesti Newtonin toisesta laista tai vakiovoimasta ja siten fysiikan sisältötietojen kannalta vastauksen katsottiin olevan puutteellisesti perusteltu.

Esimerkki tyypillisestä hyvin perustelluksi katsotusta vastauksesta:

$F = ma \Rightarrow \frac{F}{m} = a$, tämän perusteella voimme sanoa, että ylemmän kelkan massa on pienempi koska F on sama, mutta ylemmän kiihtyvyys on suurempi.

Tästä vastauksesta löytyvät kaikki mainitut kriteerit, se on fysiikan kannalta riittävän täsmällinen ja vastaa annettuun kysymykseen. Nyt resurssiperustaisesta oppijan tiedon viitekehystä katsottuna voidaan nähdä, että tehtävän ratkaiseminen oikein on vaatinut vertailun resurssin oikeanlaista aktivoitumista. Newtonin toista lakia tarkastelemalla opiskelija on osannut muodostaa oikean väitteen massojen keskinäisistä suuruuksista. Tästä vastauksesta löytyvät myös kaikki tarkasteltavat argumentoinnin rakenteen piirteet: havainnot kiihtyvyyksistä, yhtä suurista vakiovoimista ja Newtonin toisesta laista, väite ylemmän kelkan pienemmästä massasta ja Newtonin toiseen lakiin pohjautuva, joskin hieman implisiittinen perustelu.

4.3 Kelkkojen liike-energioiden vertailu

Tässä tehtävässä opiskelijoiden tuli selvittää kummalla kelkalla oli suurempi liike-energia, vai ovatko kelkkojen liike-energiat yhtä suuret kunkin kelkan ylittäessä maaliviivan. Tehtävässä kelkkojen liike-energiat olivat yhtä suuret maaliviivalla, mihin opiskelijoiden tuli päätyä käyttämällä hyväksi työ-energiaperiaatetta. Työenergiaperiaatteen mukaan kappaleeseen tehty työ muuttaa kappaleen liike-energiaa. Tällöin huomattiin kelkkojen lähtevän samalta etäisyydeltä maaliviivasta liikkeelle yhtä suurien vakiovoimien vaikutusten alaisina. Siten molempiin kelkkoihin tehtiin yhtä suuri määrä työtä ja huomioimalla molempien kelkkojen liikkeelle lähteminen levosta, oli

niiden liike-energia maaliviivalla yhtä suuri kuin niihin tehty työ. Näin ollen kelkkojen liike-energiat olivat maaliviivalla yhtä suuret. Argumentti sisälsi jälleen kaikki hyvään vastaukseen vaaditut elementit: havainnot yhtä suurista vakivoimista, yhtä pitkää matkaa ja työ-energiaperiaatteesta, väite liike-energioiden yhtä suuruudesta ja perustelu kelkkoihin tehdyistä yhtä suurista töistä. Opiskelijoiden vastausten suhteelliset osuudet on esitetty kategorioittain taulukossa 3. Hyvät perustelut -kategoriaan on luokiteltu ne vastaukset, joissa mainitaan:

- Molempiin kappaleisiin kohdistetaan yhtä suuri voima. Esim. $F_y = F_a$.
- Molempien kappaleiden kulkema matka on yhtä pitkä. Esim. ”matkat olivat yhtä pitkät”.
- Perustelu työ-energiaperiaatteen tai havainnon, että kappaleeseen tehty työ muuttaa sen liike-energiaa, nojalla. Tähän on luettu mukaan myös implisiittiset relaatiot, joissa liike-energia on mainittu olevan $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ja työn $W = Fs$, mutta niille kahdelle ei ole sanallisesti tai symbolein mainittu yhteyttä.

Esimerkkivastaus hyvin perustellusta vastauksesta:

$\Delta E_k = F \cdot s$, koska molemmat kappaleet lähtevät levosta ja kulkevat saman matkan vakivoimalla F , liike-energia on yhtä suuri.

Tämän tyyppisessä vastauksessa tuodaan ilmi liike-energian muutokseen vaikuttavat tekijät eli kappaleeseen kohdistuva (kokonais)voima, joka vaikuttaa jonkin matkan yli ja muuttaa siten kappaleen liike-energiaa. Resurssiperustaisen oppijan tiedon viitekehystä opiskelijalla voidaan nähdä aktivoituneen oikea resurssi oikeassa tilanteessa, sillä opiskelija on hyödyntänyt työ-energiaperiaatetta. Lisäksi kappaleet ovat aluksi levossa, joten niillä ei ole liike-energiaa ja siten muutoksen ollessa molemmille yhtä suuri, ovat myös liike-energiat lopussa yhtä suuret. Vastauksesta löytyvät myös kaikki argumentoinnin rakenteen tarkasteltavat piirteet: havainnot yhtä suurista

vakivoimista, yhtä pitkstä matkasta ja työ-energiaperiaatteesta, väite liike-energioiden yhtäsuuruudesta ja perustelu implisiittisesti levosta lähtemisellä, jolloin liike-energiat lähtöviivalla ovat nolla ja siten muutoksien ollessa yhtä suuret, ovat ne myös maaliviivalla yhtä suuret.

Puutteelliset perustelut luokassa olevissa vastauksissa puuttuu yksi tai useampi edellä mainituista hyvän vastauksen kriteereistä ja joissain vastauksista väitteen voidaan katsoa olevan enemmän tai vähemmän arvaus. Esimerkkivastaus puutteelliset perustelut -kategoriaan kuuluvasta vastauksesta:

Liike-energia on yhtä suuri, koska molempiin kelkkoihin vaikuttaa yhtä suuri voima, eikä se energia ole hävinnyt minnekään.

Vastauksesta ilmenee, että opiskelija tunnistaa työtä tekevän voiman merkityksen liike-energian muutokselle, muttei perustele vastaustaan fysiikan kannalta riittävän täsmällisesti. Vastauksessa myös argumentin rakenne kärsii: opiskelija tekee havainnon yhtä suurista voimista ja väittää liike-energioiden olevan yhtä suuria. Kuitenkaan ilman mitään viittausta kappaleeseen tehtyyn työhön tai liike-energiaan voidaan katsoa, että ”energia ei ole hävinnyt minnekään” lausahduksen ja väitteen välillä ei ole riittävää yhteyttä, jotta sen voitaisiin katsoa olevan argumentaation rakenteen mukainen perustelu. Tällöin energian säilyvyyden voidaan nähdä olevan enemmänkin ulkoa opeteltu hokema, kuin kelkan ja narun avulla kelkkaan kiihdyttävän voiman kohdistavan kappaleen muodostaman systeemin ominaisuus. Tässä tilanteessa tarkasteltavaksi systeemiksi on tehtävänannossa rajattu kelkka, jolloin voima vaikuttaa systeemin ulkopuolelta ja siten muuttaa kelkan liike-energiaa muuttuu ja sen mekaaninen energia ei säily.

Taulukko 3. Kelkkojen liike-energioiden vertailun tehtävästä muodostettu vastausluokkien jakauma (N=45). Vastauksissa esiintyneet fysiikan sisällöt on luokiteltu päätyypeittäin kategorioihin ja kunkin kategorian vastauksista on tunnistettu niiden argumentin rakenne (ks. sivu 28).

Fysiikan sisältö	tyhjä	H	V	V+P	H+V	H+V+P
Oikea vastaus				2%	6%	45%
Hyvät perustelut						36%
Puutteita perusteluissa				2%	4%	
Kompensaatioajattelu					2%	9%
Väärä vastaus	2%	2%	4%		9%	31%
Oikeita lähtökohtia					2%	7%
Kompensaatio v eduksi			4%		7%	22%
Kompensaatio m eduksi						2%
Ei vastausta	2%	2%				

Kompensaatioajattelu näkyi monesti vastauksista massan ja nopeuden keskinäisenä vertailuna. Resurssiperustaisesta oppijatiedon viitekehuksesta tarkasteltuna voidaan nähdä kompensatioajattelun johtuvan vertailun resurssin aktivoitumisena väärässä tilanteessa. Tällöin osa opiskelijoista päätyi oikeaan ratkaisuun ajattelemalla eri suureiden vaikutuksien kumoavan toisensa. Esimerkki kompensatioajattelua sisältävästä vastauksesta:

$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$, liike-energian kaava 'suosii' kelkkaa, joka saavuttaa suuremman nopeuden, joskin hitaamman kelkan suurempi massa kompensoi tilannetta. Tietämättä kelkkojen tarkkoja nopeuksia tai massoja, oletan ylemmän kelkan liike-energian yhtä suureksi kuin alemmalla kelkalla.

Vastauksesta käy ilmi, että opiskelija tunnistaa päättelynsä rajoitukset absoluuttisen vastauksen antamiseen ja hän siten päätyy arvaamaan tuloksen tässä tapauksessa oikein. Tässä vastauksessa voidaan resurssiperustaisesta oppijatiedon viitekehyksestä tarkasteltuna nähdä opiskelijan aktivoivan kompensatioresurssin ja päätyvän perustelemaan vastauksen kyseisen resurssin avulla. Vastauksen argumentti sisältää kaikki tarkasteltavat argumentoinnin rakenteen kriteerit: havainnot liike-energian kaavasta, nopeuksista ja massoista, väite ylemmän kelkan suuremmasta liike-energiasta ja perustelu liike-energian kaavasta toteamalla sen suosivan nopeutta (koska se on korotettu toiseen potenssiin). Tämä edellä mainitussa vastauksessa esiintynyt nopeuden "suosiminen" on väärissä vastauksissa erotettu omaksi kategoriakseen taulukossa 3 (kompensatio nopeuden eduksi) havainnollistamaan ajattelun yleisyyttä suhteessa massan "suosimiseen". Tyypillinen vastaus kompensatioajattelusta nopeuden v eduksi:

Ylemmällä kelkalla on suurempi liike-energia, koska sen kaavassa nopeus on korotettu neliöön $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

Vastaus sisältää argumentoinnin rakenteesta kaikki tarkastelussa olevat ominaisuudet: havainnot implisiittisesti edeltävien tehtävien perusteella massoista ja nopeuksista ja suoraan havainto liike-energian kaavasta, väite ylemmän kelkan suuremmasta liike-energiasta ja perustelu nopeuden korotuksella neliöön liike-energian kaavassa.

Vastaus, jossa massa puolestaan oli ajateltu merkittävämmäksi tekijäksi, perusteli sitä seuraavasti:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2, \quad \text{jossa} \quad v = \frac{s}{t} \left(\begin{array}{l} s=matka \\ t=aika \end{array} \right).$$

Aiemmin jo todettiin, että ylemmän kelkan massa on pienempi kuin alemman. Liike-energia on sitä suurempi, mitä isompi massa kelkoilla on tai nopeus.

Esim.

$$\text{(ylä)} E_y = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ kg} \cdot \left(\frac{1}{5} \text{ m/s}\right)^2 = 0,02 \text{ J}$$

$$\text{(ala)} E_y = \frac{1}{2} \cdot 3 \text{ kg} \cdot \left(\frac{1}{6} \text{ m/s}\right)^2 = 0,04 \text{ J}$$

Nopeuden ero ei ole iso, joten massa vaikuttaa enemmän. Alempi kelkka jää sen verran jälkeen kiihtyvyydessä, että massa vaikuttaa. Täten ylemmässä on pienempi liike-energia.

Tästä vastauksesta huomataan, kuinka opiskelija katsoo nopeuksien eron maaliviivalla olevan niin pieni, että hänen perusteluissaan kiihtyvyyksien ero puolestaan on niin selvä, että se oikeuttaa toteamaan massojen eron olevan sellaista, että alempi kelkka saa suuremman liike-energian. Tätä hän perustelee sijoittamalla sattumanvaraisia arvoja massoille ja nopeuksille päätyen valitsemaan arvot, joilla alemman kelkan liike-energiaksi tulee suurempi arvo. Resurssiperustaisesta oppijan tiedon viitekehyksestä katsottuna opiskelijan voidaan nähdä käyttävän perusteluissaan hyödyksi ”laskemisen resurssia”, jolloin perustelu pohjautuu hänen suorittamiinsa varmistaviin ”tarkastus” laskuihin. Argumentaation rakenteesta voidaan vastauksen katsoa sisältävän jälleen kaikki tarkasteltavat ominaisuudet: havainnot massoista nopeuksista ja liike-energian kaavasta, väite alemman kelkan suuremmasta liike-energiasta ja perustelu liike-energian kaavaan ja nopeuksien ja massojen suhteeseen viittaamalla.

Oikeita lähtökohtia sisältäneissä väärissä vastauksissa oli selvästi kirjavin joukko erilaisia vastauksia. Näissä vastauksissa joko tehtiin ylimääräisiä (virheellisiä) oletuksia, ei perusteltu vastausta tai vastaus ajautui oikeista periaatteista sivuraiteille. Esimerkki tähän luokkaan kuuluvasta, sivuraiteille ajautuneesta, vastauksesta:

Liike-energian yhtälö on $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Liike-energian muutos johtuu voiman tekemästä työstä $W = F \cdot s$

$$\Rightarrow F \cdot s = \frac{1}{2}mv^2 \quad || \quad s = \frac{v}{t}$$

$$\Rightarrow F \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow \frac{F}{\Delta t} = \frac{1}{2}mv \quad || \quad F = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

\Rightarrow Alemmalla kelkalla on pienempi liike-energia kuin ylemmällä kelkalla.

Tästä vastauksesta huomataan opiskelijan lähteneen ratkaisemaan tehtävää oikein, mutta työ-energiaperiaatteen sisäistäminen on voinut jäädä hänellä puutteelliseksi. Nyt opiskelija jatkaa kaavan käsittelyä sijoittamalla virheellisen relaation matkalle ja tämän jälkeen käsittelee nopeuden muutosta ja loppunopeutta toistensa kanssa samoina suureina. Hän päätyy supistamaan nopeudet ilman selitystä, että tässä tilanteessa nopeuden muutos sattuu olemaan yhtä suuri, kuin loppunopeus, sillä molemmat kappaleet lähtivät liikkeelle levosta. Edellä kuvatusta kaavojen johtamisesta voidaan todeta, ettei opiskelija tunnista jonkin matkan yli vaikuttavan kokonaisvoiman muuttavan kappaleen liike-energiaa, vaan käsittelee periaatetta vain matemaattisena oliona. Resurssiperustaisesta oppijan tiedon viitekehyksestä katsottuna opiskelijan voidaan ajatella käyttävän perusteluissaan hyödyksi työ-energiaperiaatteeseen perustuvaa resurssia, mutta päätyvän soveltamaan viimeisessä vaiheessa vertailun resurssia hänen yrittäessään määrittää kunkin kelkan aikaväleille, massoille ja nopeuksille niiden keskinäisestä suuruudesta johtopäätöstä. Vastauksen argumentista löytyvät kuitenkin kaikki argumentaation rakenteen tarkasteltavat ominaisuudet: havainnot yhtä suurista vakivoimista, yhtä pitkistä matkasta ja työ-energiaperiaatteesta, väite alemman kelkan pienemmästä liike-energiasta ja matemaattinen perustelu työenergiaperiaatteeseen sijoitettujen termien avulla. Opiskelija on merkinnyt aikaisemmissa tehtävissä, kummalla kelkalla on suurempi voiman vaikutusaika, massa ja nopeus maaliviivalla, joten perustella

on katsottu olevan riittävä yhteys Sampsonin ja kollegoiden kriteerein (2011) havaintoihin ja väitteeseen (ks sivut 21–22).

4.4 Kelkkojen liikemäärien vertailu

Tässä tehtävässä opiskelijoiden tuli määrittää kummalla kelkalla on maaliviivalla suurempi liikemäärä vai ovatko ne yhtä suuret. Tehtävässä ylemmällä kelkalla oli maaliviivalla pienempi liikemäärä kuin alemmalla kelkalla. Tähän päätelmään opiskelijoiden tuli päätyä hyödyntämällä impulssi-liikemääräperiaatetta. Sen mukaan kappaleeseen kohdistettu impulssi, joka riippuu voiman suuruudesta ja sen vaikutusajan pituudesta, muuttaa kappaleen liikemäärää. Molemmat kappaleet olivat aluksi levossa, jolloin niiden liikemäärät lähtöviivalla olivat nolla. Ylempi kelkka saavutti suuremman kiihtyvyytensä ansiosta maaliviivan lyhyemmässä ajassa, jolloin se vietti vähemmän aikaa lähtö- ja maaliviivojen välissä, ja sai voiman vaikutuksesta pienemmän impulssin. Tällöin ylemmän kelkan liikemäärä myös muuttui vähemmän ja oli siten pienempi maaliviivalla kuin alemman kelkan liikemäärä. Argumentoinnin rakenteesta kyseisessä vastauksessa löytyvät kaikki tarkasteltavat ominaisuudet: havainnot impulssi-liikemääräperiaatteesta, yhtä suurista vakiovoimista ja erisuurista ajoista, väite ylemmän kiekon pienemmästä liikemäärästä maaliviivalla ja perustelu impulssi-liikemääräperiaatteeseen viitaten voiman vaikutusaikojen eroihin. Opiskelijoiden vastausten suhteelliset osuudet on esitetty kategorioittain taulukossa 4. Jotta vastaus täyttäisi hyvien perusteluiden kriteerit, tuli siitä löytyä seuraavat maininnat:

- Molempiin kelkkoihin kohdistuu yhtä suuri voima. Esim. $F_y = F_a$.
- Ylempi kelkka saavuttaa maaliviivan lyhyemmässä ajassa. Esim. $t_y < t_a$ tai sanallisesti ”ylempi kelkka saavuttaa maaliviivan nopeammin”.

- Perustelu impulssi-liikemääräperiaatteen sanallisen maininnan tai matemaattisen formalismin $I = \Delta p$ ja $I = F \cdot t$ avulla, kun niistä on suoraan tai implisiittisesti havaittavissa relaatio voimaan ja aikaan ja liikemäärän muutokseen.

Taulukko 4. Kelkkojen liikemäärien vertailun tehtävästä muodostettu vastauksistaluokkien jakauma (N=45). Vastauksissa esiintyneet fysiikan sisällöt on luokiteltu päätyypeittäin kategorioihin ja kunkin kategorian vastauksista on tunnistettu niiden argumentin rakenne (ks. sivu 28).

Fysiikan sisältö	tyhjä	H	V	V+P	H+V	H+V+P
Oikea vastaus						40%
Hyvät perustelut						38%
Kompensaatio m eduksi						2%
Väärä vastaus	7%	2%	4%	2%	21%	22%
Kompensaatio v eduksi					2%	2%
Kompensaatio yhtä suuriksi				2%	11%	9%
Muu perustelu					4%	11%
Ei perusteluita			4%		4%	
Ei vastausta	7% ^b	2%				

^b Tähän kategoriaan kuuluneissa vastauksissa ei ollut edes tehtävänannon numeroa. Koska ei voida tietää ovatko opiskelijat unohtaneet vastata tähän tehtävään, vai eivätkö he ole osanneet vastata ja ovat siten jättäneet kohdan täysin tyhjäksi, on myös nämä vastaukset sisällytetty tilastoihin.

Edellä mainituilla kriteereillä arvioituna tyypillinen esimerkki hyvin perustellusta vastauksesta:

Liikemäärä $\bar{p} = m\bar{v}$, koska massat ja nopeudet eivät ole tiedossa käytetään impulssiperiaatetta: $\Delta p = I = Ft$, F =vakio, mutta t , eli voiman vaikutusaika, on alemmalle kelkalle pidempi eli $t_y < t_a$ josta saadaan $p_y < p_a$, eli ylemmän kiekon liikemäärä on lopussa pienempi.

Vastauksesta havaitaan opiskelijan tiedostavan liikemäärän riippuvuuden massasta ja nopeudesta, mutta hän ei käytä niitä vastauksessaan hyväksi ja päätyy soveltamaan erilaista resurssia hyödyntävää impulssi-liikemääräperiaatetta. Lisäksi opiskelija mainitsee voiman olevan vakio ja siten implisiittisesti sen olevan yhtä suuri molemmille kappaleille, mikä puolestaan oli ilmoitettu tehtävänannossa, ja päätyy oikean lopputulokseen tarkastelemalla voiman vaikutusaikaa. Argumentista löytyvät kaikki tarkasteltavat argumentoinnin rakenteen ominaisuudet: havainnot impulssi-liikemääräperiaatteesta, yhtä suurista vakiovoimista ja erisuurista ajoista, väite ylemmän kiekon pienemmästä liikemäärästä lopussa (maaliviivalla) ja perustelu impulssi-liikemääräperiaatteeseen viitaten voiman vaikutusaikojen erosta.

Aineiston perusteella tämä tehtävä oli hyvin polarisoiva, oikeaan vastaukseen päätyneet opiskelijat perustelivat vastauksensa sekä fysiikan sisältötiedon että argumentoinnin rakenteen kannalta hyvin sisällyttäen oleelliset tiedot vastaukseen. Siten tässä tehtävässä ei ilmennyt puutteelliset perustelut osiota, johon kuuluvien vastauksien voitaisiin katsoa ainakin osittain perustuvan arvaukseen. Sen sijaan yksi opiskelija päätyi kompensatioajattelussa suosimaan massaa virheellisen kaavan johdon takia ja siten päätyi oikeaan lopputuloksen liikemäärien yhtäsuuruudesta:

$$p = mv, \quad m_2 > m_1, \quad v_1 > v_2$$

$$F = ma \quad a = \frac{v}{t} \quad \Rightarrow F = m \frac{v}{t}$$

$$p = m \cdot m \frac{v}{t} \rightarrow \text{Liikemäärä pienempi koska massalla suurempi merkitys.}$$

Vastauksesta huomataan opiskelijan tekemän kaavaan sijoituksessa virheen ja päätyvän johtamaan liikemäärälle virheellisen esitystavan. Mikä on lisäksi paljastavaa, opiskelijan johtaessa voimalle esitysmuodon $F = m \frac{v}{t}$, hän on oleellisesti yhden kertolaskun päässä impulssi-liikemääräperiaatteesta, joskin nopeuden ja ajan muutokset tulisi formaalissa päättelyssä tarkastella muutoksina. Opiskelija ei kuitenkaan tunnista massan ja nopeuden tulon yhtäsuuruutta liikemäärän suuruuden kanssa, eikä käsittele kiihtyvyyttä nopeuden muutoksena aikayksikössä ja päätyy siten fysiikan sisältötietojen kannalta ristiriitaiseen esitykseen. Argumentoinnin rakenne on sellainen, että siitä löytyvät kaikki tarkasteltavat ominaisuudet: havainnot Newtonin toisesta laista, erisuurista massoista ja nopeuksista ja implisiittinen havainto yhtä suurista vakiovoimista, väite ylemmän kelkan pienemmästä liikemäärästä ja perustelu johdetun kaavan avulla.

Kompensaatioajattelua ilmeni jälleen merkittävässä osassa vastauksista. Se on väärissä vastauksissa jaettu jälleen nopeuden eduksi kompensoimiseen, jolloin päädyttiin ylemmän kelkan suurempaan liikemäärään ja tasapainottavaan kompensoitioon, jolloin päädyttiin liikemäärien yhtäsuuruuteen.

Toinen kompensoatioajattelua nopeuden hyväksi sisältäneistä vastauksista:

Liikemäärä p saadaan yhtälöstä $p = mv$, jossa m on kappaleen massa ja v on kappaleen nopeus. Koska ylemmän kappaleen nopeus maaliviivalla on suurempi, kuin alemman kappaleen, on sen liikemäärä suurempi. kuin alemman kappaleen, on sen liikemäärä suurempi. Massa vaikuttaa toki myös liikemäärän suuruuteen, mutta koska tietoja massojen erosta ei ole annettu on oletettava massojen olevan melko lähellä toisiaan.

Tästä havaitaan kyseisen opiskelijan tunnistavan jälleen päättelynsä rajoitukset ja pyrkivän niistä huolimatta muodostamaan vastauksen kysymykseen. Argumentaation

rakenteesta tähän vastaukseen on sisällytetty kaikki kolme ominaisuutta. Toinen nopeuden eduksi kompensatiota sisältänyt vastaus käsitteli pääasiallisesti suureiden vertailua epäyhtälöin ja vastaus päättyi naivisti toteamaan liikemäärän olevan ylemmälle kappaleelle suurempi kuin alemmalle ilman suurempia perusteluita.

Esimerkki vastauksesta, jossa massa ja nopeus kompensoivat liikemäärät yhtä suuriksi:

$p = mv$. Liikemäärän ollessa massan ja nopeuden tulo, on ylemmän kelkan liikemäärä jotakuinkin yhtä suuri riippuen kelkkojen massojen ja nopeuksien suhteesta. Ylemmällä kelkalla massa on pienempi ja nopeus suurempi, alemmalla kelkalla päinvastoin.

Vastauksesta huomataan jälleen opiskelijan tiedostavan päättelynsä rajoitukset hänen todetessaan liikemäärän riippuvan massojen ja nopeuksien suhteesta. Tämä ei kuitenkaan aja kyseistä opiskelijaa hylkäämään ajatusmalliaan, vaan opiskelija tyytyy toteamaan liikemäärien olevan yhtä suuria. Argumentissa ilmauksen ”jotakuinkin yhtä suuri riippuen kelkkojen massojen ja nopeuksien suhteesta” on katsottu sisältävän riittävän yhteyden väitteen ja havaintojen välille, jotta sitä voidaan pitää perusteluna ja siten vastauksesta löytyvät kaikki kolme tarkasteltavaa ominaisuutta.

Muu perustelu -kategoriaan kuuluvat vastaukset päättyivät virheelliseen vastaukseen asettamalla liikemäärät yhtä suuriksi sillä perusteella, että molempiin kelkkoihin kohdistettiin sama voima. Samaan kategoriaan luokiteltiin myös kelkkojen massojen vertailun tehtävässä väärin vastanneiden opiskelijoiden vastaukset, sillä heidän järjearkeillessään ylemmän kelkan massasta suuremman kuin alemman kelkan massasta, oli luonnollisesti myös liikemäärä maaliviivalla ylemmälle kelkalle suurempi kuin alemmalle kelkalle. Lisäksi tähän kategoriaan kuuluivat vastaukset, joissa liikemäärien yhtäsuuruus perusteltiin sisällyttämällä perusteluihin liikemäärän säilyminen jossakin muodossa. Yhdessä vastauksessa perusteltiin liikemäärien yhtäsuuruuksia voiman momentin perusteella.

Esimerkki tähän kategoriaan luokitellusta voiman momentilla virheellisesti perustelevasta vastauksesta:

Liikemäärä on yhtä suuri, sillä \bar{F} on sama, kuten myös matka(lanka).

$$\sum M = \bar{r} \times \bar{F}.$$

Tässä tapauksessa on perusteltua olettaa kyseisen opiskelijan sekoittaneen englanninkielisen liikemäärän termin, *momentum*, ja vääntömomentin keskenään ja havainnut siten koeasetelmassa esiintyvän jotakuinkin tähän kaavaan sopivia termejä. Kuitenkin tämänkin perustelun syvempi tarkastelu olisi osoittanut opiskelijalle kyseessä olevan kaavan vääryyden, jos hän olisi huomioinut tarkastella ristitulon matemaattista operaattoria. Nyt voima ja voiman säteeksi kuvattu matka ovat samansuuntaiset, jolloin ristitulo tuottaa tuloksen nolla. Tämä puolestaan ei ole yhtäpitävä liikemäärän määritelmän kanssa, josta on syytä olettaa opiskelijan tietävän sen riippuvan reaaliselle kappaleelle sen liiketilasta. Argumentaation rakenteesta tässä vastauksessa on katsottu olevan vain havainnot yhtä suurista vakiovoimista ja yhtä pitkistä matkoista ja väite liikemäärän yhtäsuuruudesta. Perustelua vastaukseen ei sisälly, sillä sen on tulkittu jäävän liian implisiittiseksi tässä asiayhteydessä.

Esimerkkivastaus liikemäärän säilymisen avulla perustelevan opiskelijan vastauksesta:

Yhtä suuri liikemäärä, koska liikemäärä säilyy ja on siis yhtä suuri alussa ja lopussa. Alussa molempien liikemäärä on 0, koska ne ovat levossa, joten liikemäärä on yhtä suuri myös lopussa.

Tämän tyyppisissä vastauksissa opiskelijat ovat soveltaneet liikemäärän säilymistä törmäyksissä ja päätyneet sen avulla tulokseen, jossa molemmilla kelkoilla on yhtä suuri liikemäärä. Tästä esimerkkivastauksesta on tulkittu löytyvän kaikki kolme tarkasteltavaa argumentoinnin rakenteeseen liittyvää ominaisuutta.

Ei perusteluita -kategoriaan luokiteltiin ne vastaukset, joissa on esitetty vain vastaus ylemmän kelkan liikemäärän suuruudesta suhteessa alempaan, mutta vastaukselle ei ole annettu liikemäärän määritelmän $p = mv$ lisäksi tilannesidonnaisia perusteluita. Lisäksi ei vastausta -kategoriaan on luokiteltu ne vastaukset, joissa ei esitetty väittämää liikemäärien suuruuksien suhteesta, ja ne vastaukset, jotka olivat muuten tyhjiä tai eivät sisältäneet edes tehtävän kirjainta.

Pääosin opiskelijat osasivat perustella vastauksensa argumentoinnin rakenteen kriteereillä hyvin: 89% heistä sisällytti vastauksiinsa argumentin rakenteen keskeiset tekijät, eli havainnot, väitteen ja perustelut. Vastaavasti 76% vastaajista perusteli liike-energioiden vertailun hyvin ja 62% perusteli liikemäärien vertailun hyvin argumentin rakenteen osalta.

Tämän perusteella voidaan muodostaa johtopäätös, että opiskelijat sisällyttävät vastauksiinsa yleensä hyvän argumentin ja siten heillä olisi monesti koherenttia fysiikan sisältötietoa soveltamalla mahdollisuus vastata tehtävään kattavasti perustellusti. Kuitenkin sisällyttämällä näihin havaintoihin myös tutkimustulokset fysiikan sisältötiedon osaamisesta voidaan muodostaa merkityksellisempiä johtopäätöksiä heidän tieteellisestä sivistyksestään ja opetuksen kehitysmahdollisuuksista.

Fysiikan sisältötiedon osalta oikeita vastauksia oli 94% massojen vertailun tehtävässä, 53% liike-energioiden vertailun tehtävässä ja 40% liikemäärien vertailun tehtävässä. Huomioimalla vain oikeat vastaukset oikeilla perusteluilla, oli liike-energioiden ja -määrien vertailuissa hyvin samankaltainen määrä oikeita vastauksia: liike-energialle 36% ja liikemäärälle 38%. Täten massojen vertailun tehtävässä suurempi osa opiskelijoista osasi vastata fysiikan sisältötiedon mukaan oikein kuin perustella vastauksensa

argumentin rakenteen osalta hyvin. Ero on kuitenkin vain 5 prosenttiyksikköä, joten sen suuruuden perusteella ja tutkimuksen otannan huomioiden on mahdotonta muodostaa johtopäätöksiä. Kelkkojen liike-energioiden vertailun tehtävässä puolestaan pienempi osa opiskelijoista osasi vastata fysiikan sisältötiedon mukaan oikein kuin perustella vastauksensa argumentin rakenteen osalta hyvin. Eroa näiden kahden mittausparametrin välillä oli 23 prosenttiyksikköä. Vastaavasti kelkkojen liikemäärien vertailun tehtävässä pienempi osa opiskelijoista osasi vastata fysiikan sisältötiedon mukaan oikein kuin perustella vastauksensa argumentin rakenteen osalta hyvin. Liikemäärien vertailun tehtävässä ero näiden mittausparametrien välillä oli 22 prosenttiyksikköä.

Näiden havaintojen perusteella voidaan muodostaa johtopäätös, etteivät opiskelijat tunnista aina liike-energian ja liikemäärien vertailujen tehtävien aineistoista mitkä tiedot ovat varmoja ja mitkä summittaisia. Siten heidän muodostaessaan tehtävän vastaukseen argumenttia he päätyvät perustelemaan vastauksensa epävarmoja tietoja hyödyntäen. Kompensaatioajattelun yleisyyteen liike-energian ja liikemäärän vertailun tehtävissä voidaan katsoa resurssiperustaisessa oppijan tiedon viitekehyksessä johtuvan opiskelijan heikoista argumentaatiotaidoista. Tällöin opiskelijat eivät tunnista esimerkiksi Blairin ja Johnsonin (1987) kriteerein olettamuksiansa *hyväksyttävyyttä* tai vastaavasti Sampsonin ja kollegoiden (2011) empiirisistä kriteereitä käyttämällä he eivät tunnista *aineiston ja perusteluiden riittävyttä argumentin väitteen takaamiseksi ja argumentoinnissa käytetyn todistusaineiston laadukkuutta*. Siten tässä viitekehyksessä opiskelijoiden voidaan katsoa puutteellisten argumentaatiotaitojen takia päätyvän soveltamaan tilanteeseen sopimatonta resurssia.

Mahdollisena osasyllisenä kompensatioajatteluun voidaan nähdä tehtävä, jossa opiskelijoiden tuli verrata kelkkojen massoja. Tällöin resurssiperustaisen oppijan tiedon viitekehysten mukaan opiskelijoiden vastauksia voidaan selittää sillä, että heille aktivoitui tässä tehtävänannossa vertailun p-primin pohjalta rakennettu fysiikan sisältötietoa hyväksikäyttävä vertaileva käsitteellinen resurssi. Tehtävään vastatessaan

opiskelijat aktivoivat toisen, voimaa koskevan käsitteellisen resurssin ja käyttävät tätä vertailun resurssia apuna määrittäessään ”jos toisella kelkalla on suurempi nopeus, on sillä oltava pienempi massa, koska voima oli vakio”. Nyt tehtäväkonteksti on voinut ohjata opiskelijoita käyttämään myöhemmissä tehtävissä kompensatioajatteluun liittyvää vertailun käsitteellistä resurssia, jos opiskelijat eivät ole osanneet aktiivisesti etsiä virheitä omasta ajatteluprosessistaan ja luoda vastaväitettä kompensatioajatteluun pohjautuvalle perustelulle. Tällöin opiskelijat ovat viitekehystäneet itsensä tehtävän ratkaisulle epäsuotuisasti.

Tämän tyyppistä ajatusprosessin muuttamista vaativat tehtävät voivat johtaa osaa opiskelijoista soveltamaan vääränlaista resurssia tilanteeseen nähden. Ajatusprosessin muutokset voivat olla etenkin kurssikokeessa välttämättömiä, jotta tehtävät erottelevat heikot ja hyvät sisältötiedot omaavat opiskelijat toisistaan. Tehtävänannot oli laadittu aikaisempien tutkimusten pohjalta (Lawson & McDermott, 1987; Pride ym. 1998), joissa oli tutkittu fysiikan aihepiiriä ja siihen liittyviä virhekäsityksiä ja siten myös tässä tutkimuksessa päädyttiin tämän kaltaisiin tehtäviin.

Vastauksista paljastui monilla opiskelijoilla olevan vaikeuksia käsitellä liike-energiaa ja liikemäärää reaali maailmaa kuvaavina suureina. He perustelivat vastauksiaan vain matemaattisen formalismin avulla liike-energian tai liikemäärän kaavasta kiinnittämättä huomiota syy-seuraussuhteeseen kappaleen ja siihen vaikuttavan voiman välillä. Tämän kaltaisia ymmärtämisen ongelmia on havaittu aikaisemmissakin tutkimuksissa (Lawson & McDermott, 1987; Pride ym. 1998). Osasyynä tähän voidaan tämän tutkimuksen teoreettisesta viitekehystä tarkasteltuna pitää kurssin ja sillä saadun opetuksen luonnetta: laskuharjoituksissa opiskelijat keskittyivät kaavojen käyttöön ja opetteluun ja niiden painopiste oli erilaisten tehtävätyyppien laskennallisessa ratkaisemisessa. Käsitteellinen ymmärrys oli kuitenkin kurssin tutoriaaliharjoituksissa opiskelun keskiössä, kuten sitä on Kesosen ja kollegoiden (2018) tutkimuksessa kuvattu. Jos opiskelijat eivät ole osallistuneet näihin tutoriaaliharjoituksiin, ovat he voineet

loppukokeessa asettaa itsensä laskuharjoituksissa toistuneeseen ”kaavojen tarkastelun” viitekehykseen ja siten he eivät ole kyenneet hyödyntämään näissä tehtävissä oikeaan vastaukseen vaadittavia resursseja.

Myös liikemäärän säilymisellä väitteensä perustelevat vastaukset liikemäärien vertailun tehtävässä voidaan nähdä vääränlaisten resurssien aktivoitumisena. Sen sijaan, että opiskelijat perustelisivat vastauksensa impulssi-liikemääräperiaatteen avulla, käyttävät he vastauksessaan hyväksi liikemäärän säilymistä. Kurssilla käsitellyistä laskuharjoituksista kaikissa törmäyksiä koskevissa tehtävissä käsiteltiin erikoistapauksia täysin kimmoisista tai täysin kimmottomista törmäyksistä, joissa liikemäärä säilyy. Täten opiskelijoille on voinut jäädä mieleen Brycen ja MacMillanin (2009) kuvailema hokema liikemäärän säilymisestä, jolloin sitä soveltaneet opiskelijat ovat olettaneet sen olevan voimassa aina. Nämä opiskelijat ovat siten virheellisesti aktivoineet tässä yhteydessä liikemäärän säilymisen käsitteellisen resurssinsa toteamalla liikemäärän säilyvän ja olevan siten yhtä suuri kummallekin kulkalle sekä alussa että lopussa.

On syytä huomioida, että tutkimuksessa käytetyt mittausparametrit fysiikan sisältötiedosta ja argumentaation rakenteesta eivät ole täysin toisistaan riippumattomia. Yleensä tyhjät tai heikosti fysiikan sisältötiedon näkökulmasta perustellut vastaukset olivat myös argumentin rakenteen osalta heikkoja. Vastausjakaumista ei kuitenkaan muodostu diagonaalimatriisia, jossa fysiikan sisältötieto ja argumentaation rakenne kulkevat käsikädessä tyhjästä vastauksesta hyvään vastaukseen, jolloin näiden kahden arvioitavan kriteerin voidaan katsoa olevan toisistaan eroavia. Vastausjakaumien perusteella fysiikan sisältötiedon pohjalta hyvät vastaukset vaativat ainakin osittain hyvät perustelut, mutta hyvä argumentin rakenne puolestaan ei edellytä vastaukselta koherenttia fysiikan sisältötietoa.

Edellä mainittujen seikkojen johdosta voidaan ehdottaa, että opetuksessa tulisi kiinnittää huomiota, etenkin yliopisto-opiskelujen alkuvaiheessa, hyvän vastaustekniikan

opettamiseen. Tällöin ottamalla huomioon mitä vastaukseen tulee sisällyttää, kuinka vastausta aletaan muodostaa ja kuinka vastauksessa argumentoidaan saatavilla olevan aineiston perusteella, olisi opetuksella mahdollista tukea koherentin fysiikan sisältötiedon soveltamista erilaisissa tilanteissa ja siten myös luonnontieteellisen sivistyksen kehittymistä.

- Barniol, P. & Zavala, G. (2014). Force, velocity, and work: The effects of different contexts on students' understanding of vector concepts using isomorphic problems. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10, 020115. doi:10.1103/PhysRevSTPER.10.020115
- Berland, L. K. & Hammer, D. (2012). Framing for scientific argumentation. *Journal of Research in Science Education*, 49(1), 68–94. doi:10.1002/tea.20446
- Berland, L. & Reiser, B. J. (2009). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education* 93 (1), 26–55. doi:10.1002/sce.20286
- Blair, J. A. & Johnson, R. H. (1987). Argumentation as dialectical. *Argumentation*(1), 41–56. doi:10.1007/BF00127118
- Bryce, T. & MacMillan, K. (2009). Momentum and kinetic energy: Confusable concepts in secondary school physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(7), 739–761. doi:10.1002/tea.20274
- Cavagnetto, A. R. (2010). Argument to foster scientific literacy: A review of argument interventions in K–12 science contexts. *Review of Educational Research*, 80(3), 336–371. doi:10.3102/0034654310376953

- Chabay, R. W. & Sherwood, B. A. (2010). *Matter and Interactions* (kolmas painos).
Yhdysvallat: John Wiley & Sons, Inc.
- Close, H. G. & Heron, P. R. (2010). Research as a guide for improving student learning:
An example from momentum conservation. *American Journal of Physics*, 78(9),
961–969. doi:10.1119/1.3421391
- Conlin, L. D., Gupta, A. & Hammer, D. (2010). Framing and resource activation:
Bridging the cognitive-situative divide using a dynamic unit of cognitive analysis.
Teoksessa S. Ohlsson & R. Catrambone (toim.), *Proceedings of the 32nd Annual
Conference of the Cognitive Science Society* (s. 19–25). Austin, TX: Cognitive
Science Society.
- Dega, B. G. & Govender, N. (2016). Assessment of students' scientific and alternative
conceptions of energy and momentum using concentration analysis. *African
Journal of Research in Mathematics, Science and Technology Education*, 22(3),
201–213. doi:10.1080/18117295.2016.1218657
- DiSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*,
10(2-3), 105–225.
- Driver, R., Newton, P. & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific
argumentation in classrooms. *Science Education*, 287–312. doi:
10.1002/(SICI)1098-237X(200005)84:3<287::AID-SCE1>3.0.CO;2-A
- Elo, S. & Kyngäs, H. (2008). The qualitative content analysis process. *Journal of
Advanced Nursing*, 62(1), 107–115.
- Evans, J. S. (2002). Logic and human reasoning: An assessment of the deduction
paradigm. *Psychological Bulletin*, 128(6), 978–996. doi:0.1037//0033-
2909.128.6.978

- Giere, R. N. (1991). *Understanding scientific reasoning* (kolmas painos). Fort Worth, TX: Holt, Rinehart & Winston.
- Grayson, D. J. (2004). Concept substitution: A teaching strategy for helping students disentangle related physics concepts. *American Journal of Physics*, 72(8), 1126–1133. doi:10.1119/1.1764564
- Hammer, D. (1996). More than misconceptions: Multiple perspectives on student knowledge and reasoning, and appropriate role for education research. *American Journal of Physics*, 64(10), 1316–1325. doi:10.1119/1.18376
- Hammer, D. (2000). Student resources for learning introductory physics. *American Journal of Physics*, 68(7), S52–S59. doi:10.1119/1.19520
- Hammer, D. & Elby, A. (2003). Tapping epistemological resources for learning physics. *Journal of the Learning Sciences*, 12(1), 53–90. doi: 10.1207/S15327809JLS1201_3
- Hammer, D., Elby, A., Scherr, R. E. & Redish, E. F. (2005). Resources, framing, and transfer. Teoksessa J. P. Mestre (toim.), *Transfer of learning from modern multidisciplinary perspective* (s. 89–119). Greenwich, CT: Information Age Publishing.
- Hauvelen, A. V. & Zou, X. (2001). Multiple representations of work-energy processes. *American Journal of Physics*, 69(2), 184–194. doi:10.1119/1.1286662
- Jimenez-Aleixandre, M. P. & Erduran, S. (2007). Argumentation in science education: An overview. Teoksessa S. Erduran & M. P. Jimenez-Aleixandre (toim.), *Argumentation in science education: Perspectives from classroom-based research* (s. 3–28). Dordrecht, Alankomaat: Springer.

- Kesonen, M., Harjulampi, E., Leinonen, R., Hirvonen, P. E. & Asikainen, M. (2018). Työkäsitteen oppiminen tutoriaali-intervention aikana. *FMSERA Journal*, 2(1), 111–121. Haettu 6.5.2019 osoitteesta <https://journal.fi/fmsera/article/view/69778>
- Knight, R. D. (2008). *Physics for scientists and engineers – A strategic approach* (toinen painos). San Francisco: Pearson.
- Kokkonen, T. & Laherto, A. (2018). Tiedeopetuksen muuttuvat taivoitteet -sisältötiedosta luonnontieteelliseen lukutaitoon. *Ainedidaktiikka*, 2(1), 20–38. doi: 10.23988/ad.69250
- Kuhn, D. (2005). *Education for Thinking*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Lawson, R. A. & McDermott, L. C. (1987). Student understanding of the work-energy and impulse-momentum theorems. *American Journal of Physics*, 55(9), 811–817. doi:10.1119/1.14994
- Lee, H.-S., Liu, O. L., Pallant, A., Crofts Roohr, K., Pryputniewicz, S. & Buck, Z. E. (2014). Assessment of uncertainty-infused scientific argumentation. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(5), 581–605. doi:10.1002/tea.21147
- Lindsey, B. A., Heron, P. R., & Shaffer, P. S. (2009). Student ability to apply the concepts of work and energy to extended systems. *American Journal of Physics*, 77(11), 999–1009. doi:10.1119/1.3183889
- McDermott, L. C. & Redish, E. F. (1999). Resource letter: PER-1: Physics education research. *American Journal of Physics*, 67(9), 755–767. doi:10.1119/1.19122
- Opetushallitus. (2016). *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014* (4. painos). Helsinki: Next Print Oy.

- Osborne, J. (2010). Arguing to learn in science: The role of collaborative, critical discourse. *SCIENCE*, 328(5977), 463–466. doi:10.1126/science.1183944
- Pride, T. O., Vokos, S. & McDermott, L. C. (1998). The challenge of matching learning assessments to teaching goals: An example from the work-energy and impulse-momentum theorems. *American Journal of Physics*, 66(2), 147–157. doi:10.1119/1.18836
- Rautiainen, A. (2015). *Virhekäsityksiä työ-energia- ja impulssi-liikemäärä-periaatteista -tapaustutkimus opiskelejakeskusteluista*. (Pro gradu -tutkielma). Itä-Suomen yliopisto.
- Redish, E. F. (2014). Oersted Lecture 2013: How should we think about how our students think. *American Journal of physics*, 82(6), 537–551. doi:10.1119/1.4874260
- Richards, A. J., Jones, D. C. & Etkina, E. (2018). How students combine resources to make conceptual breakthroughs. *Research in Science Education*. doi:10.1007/s11165-018-9725-8
- Roberts, D. A. (2007). Scientific literacy/science literacy. Teoksessa S. K. Abell & N. G. Lederman (toim.), *Handbook of Research on Science Education* (s. 729–780). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Sampson, V. Grooms, J. & Phelps Walker, J. (2011). Argument-driven inquiry as a way to help students learn how to participate in scientific argumentation and craft written arguments: An exploratory study. *Science Education*, 95(2), 217–257. doi:10.1002/sce.20421
- Steinberg, R. N., & Sabella, M. S. (1997). Performance on multiple-choice diagnostics and complementary exam problems. *The Physics Teacher*, 35(3), 150–155. doi:10.1119/1.2344625

Toulmin, S. (1958). *The Uses of Argument*. Cambridge: Cambridge University Press.

Videomateriaalin pohjalta laadittu tehtävä

Vastaa tähän kysymykseen erilliselle konseptipaperille. Videossa molempiin kelkkoihin kohdistetaan narun avulla sama vakiovoima \bar{F} koko matkan alusta maaliviivalle, joka videossa on merkitty puna-mustalla viivalla. Ilmatyynyradan ja kelkan välisen kitkakertoimen voidaan approksimoida olevan nolla. Lisäksi molemmat kelkat lähtevät liikkeelle samalta etäisyydeltä maaliviivasta.

- a) Saako vastauksiasi käyttää tutkimuskäytössä? (**Kyllä/Ei**) Tutkimuskäytössä vastaukset anonymisoidaan ja mitään henkilötietoja ei käytetä osana tutkimusta. Lisäksi kaikkia henkilötietoja käsitellään GDPR -tietosuoja-asetuksen määrittelemällä tavalla. (0p)
- b) Kirjaa ylös vähintään **KAKSI** havaintoa kelkkojen liikkeestä videolla. (1p)
- c) Onko ylemmän kelkan massa suurempi, pienempi vai yhtä suuri kuin alemman kelkan massa. Perustele vastauksesi käyttäen hyväksi havaintojasi kelkkojen liikkeistä ja fysiikan sisältötietoja. (1p)
- d) Tarkastele kelkkojen liikettä liikkeelle lähdöstä maaliviivan ylitykseen asti. Onko ylemmällä kelkalla maaliviivalla suurempi, pienempi vai yhtä suuri liike-

energia kuin alemmalla kelkalla? Perustele vastauksesi käyttäen hyväksi havaintojasi kelkkojen liikkeistä ja fysiikan sisältötietoja. (2p)

- e) Tarkastele kelkkojen liikettä liikkeelle lähdöstä maaliviivan ylitykseen asti. Onko ylemmällä kelkalla maaliviivalla suurempi, pienempi vai yhtä suuri liikemäärä kuin alemmalla kelkalla? Perustele vastauksesi käyttäen hyväksi havaintojasi kelkkojen liikkeistä ja fysiikan sisältötietoja. (2p)