

**HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI**

**MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
FACULTY OF SCIENCE**

Maisterintutkielma
Matematiikan, fysiikan ja kemian opettajan maisteriohjelma
Fysiikan opintosuunta

Kriittinen ajattelu fysiikan opettajaopiskelijoiden tasavirtapiiritehtävien ratkaisuisissa

Arttu Brade
2021

Ohjaaja: dos. Maija Nousiainen
Tarkastajat: dos. Maija Nousiainen ja prof. Ismo Koponen.

Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Fysiikan aineenopettajan suuntautumisvaihtoehto	
Tekijä – Författare – Author			
Arttu Brade			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
KRIITTINEN AJATELUN FYSIIKAN OPETTAJAOPISKELIJOIDEN TASAVIRTAPIIRITEHTÄVIEN RATKAISUISSA			
Työn laji – Arbetets art – Level	Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages	
Maisterintutkielma	7.6.2021	51	
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Yleissivistävän koulutuksen pääasiallisia tavoitteita on luoda yhteiskuntaan valveutuneita, osallistuvia ja aktiivisia kansalaisia, jotka tekevät perusteltuja päätöksiä ja muodostavat mielipiteensä loogisen päättelyketjun tuloksena. Tällaista perustelevaa ja pohtivaa ajattelua kutsutaan kriittiseksi ajatteluksi. Vaikka kriittisen ajattelun kehittäminen nähdään koulutuksen tärkeänä tavoitteena, ovat kriittisen ajattelun taidot usein työelämän kannalta riittämättömällä tasolla jopa korkeakouluista valmistuvilla. Varsinkin yleisten ajattelun taitojen on havaittu olevan korkeakouluopiskelijoilla usein korkeintaan tyydyttävällä tasolla. Kriittisen ajattelun tutkimus on yhteiskunnallisesti merkittävää, mutta silti sitä on fysiikan kontekstissa tehty vain vähän. Siksi kriittisen ajattelun tutkiminen on mielenkiintoista ja ajankohtaista.</p> <p>Kriittinen ajattelu määriteltiin tässä tutkimuksessa kokoelmaksi korkeamman ajattelun taitoja ja tietoja, joita käytetään, kun informaatiota tunnustetaan, analysoidaan, tulkitaan ja yhdistellään. Taitoihin kuuluu myös tiedon, johtopäätösten, selitysten ja väitteiden luotettavuuden arviointi sekä oman ajattelun reflektointi. Kriittisen ajattelun prosessin tunnustettiin ongelmanratkaisussa koostuvan seuraavista vaiheista: ongelman tarkastelu, päätelmän tekeminen ja päätelmän perustelu, ja ajatusprosessin reflektointi. Ajattelulla on aina jokin kohde. Jotta ajattelu voi olla kriittistä, tulee ajattelijalla olla sekä kriittisen ajattelun yleisiä taitoja että riittävästi tietoa ajattelun aiheesta, jotta hän voi muodostaa ajattelullaan perusteltuja päätelmiä. Opetuksessa painotetaan näitä aihekohtaisia tietoja ja taitoja, mutta yleiset ajattelun taidot jäävät formaalissa opetuksessa usein sivuosaan.</p> <p>Tässä tutkielmassa tutkittiin fysiikan opettajaopiskelijoiden kriittistä ajattelua tasavirtapiiritehtävien vastausten avulla. Sähköoppi sisältää monimutkaisia ja toisistaan riippuvia käsiterakenteita, ja virtapiiritehtävien ratkaisu vaatii kriittistä ajattelua sisältävää päättelyä. Aineistona käytettiin Helsingin yliopistossa 2019 järjestetyn Fysiikan käsitteenmuodostus I – kurssin osana suoritettua kokeen vastauksia. Kokeesta tuli saada hyväksyttävä tulos kurssin läpäisemiseksi. Kokeen kysymykset koostuivat yksinkertaisista tasavirtapiiritehtävistä, joita piti analysoida Ohmin ja Kirchhoffin lakien avulla. Vastausten analysointia varten luotiin kriittisen ajattelun teorian avulla mittari, jonka avulla analysoitiin vastauksissa esiintyvää kriittistä ajattelua. Mittariin valittiin neljä kriittisen ajattelun piirrettä, jotka ovat syy-seuraussuhteen havaitseminen, ongelman osa-alueiden ja olettamusten havainnointi, perustelu ja ongelman kokonaisuuden huomiointi. Mittarin avulla vastaukset analysoitiin. Tuloksista tutkittiin kriittisen ajattelun piirteiden yhteyttä ongelmanratkaisuun, sekä erilaisten ajatuskulkujen ja ratkaisustrategioiden ilmenemistä kokeilaiden vastauksissa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka kriittisen ajattelun piirteet ja erilaiset ratkaisustrategiat ilmenevät, ja onko kriittisellä ajattelulla siirtovaikutusta tehtävien välillä.</p> <p>Tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä kriittisen ajattelun olevan yhteydessä ongelmanratkaisun onnistumisen ja fysiikan ymmärryksen kanssa. Kriittisen ajattelun piirteitä havaittiin hyväksytyissä koesuorituksissa enemmän kuin hylätyissä kokeissa. Myös koetta uusissa kriittisen ajattelun pisteet nousivat kullakin perättäisellä koesuorituksella. Ratkaisustrategioita tarkastellessa havaittiin viisi erilaista strategiaa, jotka luokiteltiin sen mukaan, mitä suuretta piiristä pyritään selvittämään ensin. Jännitteen ratkaisu piiriin komponenttien yli näyttää tutkimuksen perusteella olevan yhteydessä paremman kriittisen ajattelun kanssa kuin muut strategiat. Yksikään vastaus, jossa ratkaisua lähdettiin rakentamaan ratkaisemalla ensin komponenttien läpi kulkeva virta, ei sisältänyt syy-seuraussuhde -kategorian kriittistä ajattelua. Myös muut kriittisen ajattelun piirteet olivat heikommalla tasolla kuin jännite ensin -strategiassa. Kriittisen ajattelun siirtovaikutuksesta ei havaittu tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota eri tehtävien välillä, elleivät tehtävät olleet hyvin samantyyppiset.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Kriittinen ajattelu, tieteellinen ajattelu, virtapiirit, ratkaisustrategiat, Ohmin laki, Kirchhoffin lait			
Säilytyspaikka – Förvaringsställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

1. Johdanto	1
2. Tieteellinen, ja kriittinen ajattelu	2
2.1 Mitä ajattelu on	2
2.2 Tieteellinen ajattelu.....	3
2.3 Kriittinen ajattelu.....	4
2.3.1 Kriittisen ajattelijan taidot ja taipumukset.....	5
2.3.2 Tiedon ja kriittisen ajattelun suhde.....	8
2.3.3 Kriittinen ajattelu yleisenä ja alakohtaisena taitona	9
2.3.4 Kriittinen ajattelu luonnontieteissä ja fysiikassa	10
2.4 Kriittisen ajattelun mittaaminen	10
2.4.1 Critical thinking in electricity and magnetism – testi	12
3 Tasavirtapiirien sähköoppia.....	13
3.1 Varaus ja sähkökenttä	14
3.2 Sähkökenttä ja virta.....	14
3.3 Virta johtimessa.....	17
3.4 Ohmin laki, ja Kirchhoffin jännitelaki	18
3.5 Komponentit, ja niiden kytkennät.....	20
4. Tutkimusmenetelmä ja tutkimuskysymykset.....	21
4.1 Aineiston kerääminen.....	22
4.2 Tehtävien esittely	23
5. Analyysi.....	24
5.1 Oman mittarin esittely.....	25
5.2 Analyysin vaiheet.....	27
6. Tulokset	28
6.1 Kriittisen ajattelun piirteet tasavirtapiiritehtävien ratkaisuisa.....	28
6.2 Päättelyketjut ja ratkaisustrategiat	31
6.2.1 Esimerkkejä eri strategioiden käytöstä ja tyyppisten virheiden esiintymisestä.....	33
6.3 Siirtovaikutus tehtävien välillä.....	36
7. Pohdinta ja johtopäätökset	39
Lähteet.....	42
Liite A.....	46

1. Johdanto

Kriittisen ajattelun voidaan lyhyesti määritellä olevan perusteltua ja pohtivaa päätöksentekoa uskomuksista ja toiminnasta, toisin sanoen jonkinlaista järkevää ja hyvää ajattelua. Tällaista ajattelua tarvitaan paitsi tieteellisessä ja akateemisessa ongelmanratkaisussa ja päätöksenteossa, myös arkipäiväisissä tilanteissa sekä työelämässä. Kriittinen ajattelu on lopulta taito, jossa on mahdollista olla enemmän tai vähemmän taitava. Tästä seuraa, että kriittistä ajattelua on mahdollista opetella, harjoitella ja oppia.

Kriittinen ajattelu on valveutuneen kansalaisen perustaito ja demokraattisessa yhteiskunnassa toimimisen kulmakivi, joka nähdään usein eräänä tärkeimmistä yleissivistävän koulutuksen tavoitteista. Kriittiseen ajatteluun kykenevät kansalaiset ovat valveutuneita ja osallistuvia. He kykenevät itsenäiseen ajatteluun, toimintansa ja uskomustensa perusteluun sekä niiden kriittiseen tarkasteluun. Kriittisen ajattelun taitoja ei opetuksessa kuitenkaan juuri priorisoida, mikä johtaa siihen, että taidot voisivat usein olla paremmalla tasolla. Korkeakoulusta valmistuvilla opiskelijoilla on havaittu riittämättömiä kriittisen ajattelun taitoja työelämän kannalta (Tynjälä, Slotte, Nieminen, Lonka & Olkinuora, 2006). Varsinkin yleisten, geneeristen kriittisen ajattelun taitojen on havaittu olevan korkeakouluopiskelijoilla usein korkeintaan tyydyttäviä. Vain 40 prosentilla opiskelijoista nämä taidot olivat hyvällä tai paremmalla tasolla (Ursin, Hyytinen & Silvennoinen, 2021). On myös havaittavissa, etteivät kriittisen ajattelun taidot juuri kehity opintojen aikana (Arum & Roksa, 2011).

Tässä tutkielmassa tutkitaan fysiikan opettajaopiskelijoiden kriittistä ajattelua, sen esiintymistä ja ajattelun kulkua tasavirtapiiritehtävien avulla. Sähköoppi ja tasavirtapiirit soveltuvat hyvin kriittisen ajattelun tutkimiseen, sillä vaikka sähköopin perustasoiset tehtävät ovat yksinkertaisia, vaativat ne kuitenkin hyvää ymmärrystä sähköopin fysiikasta. Sähköopin tehtävät sisältävät monimutkaisia käsiterakenteita, joiden ymmärrys on usein haastavaa (esim. Kokkonen & Nousiainen, 2016; Kokkonen & Mäntylä, 2018). Tasavirtapiirien ongelmanratkaisu vaatii kriittistä ajattelua, ja ratkaisujen yksinkertaisuus antaa mahdollisuuden analysoida sitä tehtävien vastauksista. Tutkielmassani kuvailen ensin kriittisen ajattelun teoriaa, sen määritelmiä, piirteitä ja osa-alueita. Esittelen, kuinka kriittisessä ajattelussa esiintyy sekä ajattelun aiheeseen liittyviä tietoja ja taitoja että yleisiä ajattelun taitoja. Tämän jälkeen kuvaan, kuinka kriittinen ajattelu näkyy luonnontieteissä ja fysiikassa, ja kuinka sitä voidaan mitata. Koska tutkielman aineisto koostuu tasavirtapiiritehtävien

ratkaisuista, esittelen virtapiiritehtävien sähköopin teoriaa siltä osin kuin se on aineiston tulkinnan kannalta tarpeellista.

Tutkimuksessa tulkitaan virtapiiritehtävien vastauksista ajattelun kulkua ja kriittisen ajattelun piirteitä, eli sitä, minkälaista kriittistä ajattelua vastauksissa mahdollisesti ilmenee. Tuloksista analysoidaan ja tehdään johtopäätöksiä kriittisen ajattelun yhteydestä ongelmanratkaisuun, erilaisiin ajatuskulkuihin ja ratkaisustrategioihin, jotka tasavirtapiiritehtävissä ilmenevät.

2. Tieteellinen, ja kriittinen ajattelu

Ajattelu on meille kaikille yhteinen taito, jonka olemassaoloa ja olemusta emme arkielämässä juuri kyseenalaista. Vaikka ajattelemmekin jatkuvasti, emme useinkaan mieti, mitä ajattelu on, miten se voidaan määritellä ja kuinka se tapahtuu. Myös muut eläimet osaavat selvästi ajatella ja järkeillä (Call & Tomasello, 2005), mutta tästä huolimatta ajattelu on ihmisen henkilökohtaisen identiteetin muodostumisen ja itse ihmisyyden käsitteen ytimessä (Holoyak & Morrison, 2005). Ilman aisteja, kieltä tai puhekykyä oleva henkilö ei ole menettänyt ihmisyydestään kriittisiä piirteitä, mikäli tämän mieli ja ajatukset ovat eheät. Ajattelu on siis jollain tasolla perustavanlaatuinen ja välttämätön osa ihmisyyden olemassaoloa. Descartesin sanoin: ”ajattelen, siis olen”.

Seuraavissa kappaleissa perehdytään ajattelun määritelmiin ja osa-alueisiin. Tämän jälkeen tarkastellaan tieteellisen ajattelun piirteitä, ja lopulta tutkitaan siihen vahvasti liittyvää ja tämän tutkielman kannalta oleellista kriittistä ajattelua. Sen avulla muodostetaan myöhemmin tutkimuksen analyysin mittari, jonka pohjalta aineistoa tulkitaan.

2.1 Mitä ajattelu on

Ajattelun biologisia mekanismeja voidaan havaita hermostossa kulkevien sähkökemiallisten signaalien avulla. Ne muodostavat jollakin tavalla aivoissa rakenteita ja prosesseja, jotka ilmenevät ajatuksina ja muistoina. Neurobiologian keskeisiä ja mielenkiintoisia avoimia kysymyksiä onkin, kuinka nämä korkeamman tason prosessit muodostuvat hermosolujen välisistä kemiallisista vuorovaikutuksista (Fox, Andrews-Hanna & Christoff, 2016). Tässä tutkielmassa ajattelua käsitellään kuitenkin enimmäkseen kognitiotieteiden näkökulmasta. Kognitiotieteissä ei oteta kantaa ajattelun pohjimmai-

siin mekanismeihin, mutta pystytään kuitenkin havaitsemaan, määrittelemään ja lajittelemaan ajattelua ja tietoa, sekä löytämään vastauksia siihen, minkälainen ajattelu, tiedon käsittely ja esittäminen johtaa toivottuun käyttäytymiseen.

Ajattelua on vaikea määritellä tyydyttävällä tavalla, vaikka jokaisella meistä on siitä henkilökohtaista kokemusta. Ääni, jolla puhumme päämme sisällä itsellemme, on selkeästi ajattelua, mutta niin ovat lukemattomat muutkin ei-kielelliset kuvitelmat ja päätelmät. Näemme mielessämme maisemia ja tapahtumia, käsittelemme numeroita matemaattisesti, teemme päätelmiä hyvinkin abstraktilla tasolla tai annamme ajatustemme ”harhailia” ilman selkeitä tavoitteita. Myös unien näkeminen ja haaveilu ovat ajattelua (Holoyak ym., 2005). Ajattelu voidaan määritellä esimerkiksi tarkoitukseen pyrkiväksi mielen mallien jäsentelyksi maailman todellisista ja kuviteltavissa olevista tiloista. Tämän määritelmän mukaan ajattelu on siis prosessi, jolla mieli manipuloi jonkinlaista sisäistä mallia maailmasta, oli se sisäinen tai ulkoinen, tai enemmän tai vähemmän todellinen. (Holoyak ym., 2005).

Ajattelemalla on myös mahdollista saavuttaa ymmärrystä maailmasta. Fysiikassa ja muissa luonnontieteissä pyritään ymmärtämään maailmaa perusteltujen mallien ja viimekädessä kokeellisuuden avulla, mutta esiempiiriset luonnonfilosofit kuten Platon ja Aristoteles rakensivat laajoja selitysmalleja fyysikaalisesta maailmasta ainoastaan ajattelun ja logiikan avulla. Nämä mallit osoittautuivat lopulta miltei kaikki hyvin puutteellisiksi ja jopa epätosiksi, mutta ilmiselvästi he olivat tehneet mielessään jotain, mikä eroaa jokapäiväisestä ajattelusta, arkisesta päättelystä tai haaveilusta. Tällainen ajattelu on tieteellistä.

2.2 Tieteellinen ajattelu

Tieteellisellä ajattelulla tarkoitetaan niitä mielen prosesseja ja ajattelun malleja, joita käytetään, kun järkeillään tieteellisessä kontekstissa (Dunbar & Fugelsang, 2005). Tällaisen ajattelun ymmärtäminen on ollut pitkään mielenkiintoinen ja paljon tutkittu kysymys niin filosofisesti kuin kognitiotieteiden näkökulmasta (Klahr, 2000). Kuinka tieteelliseen tietoon päädytään, kuinka kokeita tulisi suunnitella ja tulkita, kuinka tiede itsessään rakentuu ja kuinka tieteellisen ajattelun mallit luovat uutta tietoa (Dunbar ym., 2005)? Tieteellinen ajattelu eroaa arkipäiväisestä ajatuskulusta tavoitteensa ja rakenteensa puolesta siten, että siinä korostuvat johtopäätösten tekemisen ja ongelmanratkaisun kannalta tärkeät prosessit, kuten induktiivinen ja deduktiivinen logiikka, hypoteesien testaus ja kausaali-mallit (Dunbar ym., 2005). Tällainen ajattelu on yleensä tavoitteellista ratkaisuun, selitykseen tai ymmärrykseen pyrkivää. Tieteellisen ajattelun ytimessä on ajattelun järjestelmällisyys, tiedon ja väitteiden

perusteltavuus sekä pyrkimys totuuteen. Seuraavaksi tarkastellaan tieteellisen ajatteluun kiinteästi liittyvää kriittistä ajattelua.

2.3 Kriittinen ajattelu

Kriittinen ajattelu liittyy tieteelliseen ajatteluun monella tavalla, ja ne ovat tulkittavissa monelta osin päällekkäisiksi ja risteäviksi kokonaisuuksiksi. Monesti termejä käytetäänkin keskenään vaihtokelpoisesti (Hyytinen, Toom & Shaveson, 2019). Molemmat ajattelun mallit sisältävät vaatimuksen väitteiden ja toiminnan hyvälle perusteluille ja todistuksille. Osaltaan kriittisen ajattelun voidaan katsoa olevan tieteellisen ajattelun piiriin kuuluva osa-alue, tieteellisen ajattelun työkalu, mutta toisaalta sen voidaan myös katsoa olevan sen välttämätön vaatimus. Tällöin kriittinen ajattelu voidaan nähdä suurempana kokonaisuutena, jota voidaan tieteellisen kontekstin lisäksi soveltaa laajasti myös muihin elämän osa-alueisiin.

Kriittinen ajattelu voidaan arkikielestä tulevassa miellelyhtymässä tulkita olevan *kriittistä* siinä merkityksessä, että se olisi jollain tavalla kyynistä ja vikoja etsivää, mutta tieteellisessä yhteydessä se tarkoittaa laajempaa, positiivisempaa ajattelun taitojen kirjoa, jolla on paljon yhtymäkohtia tieteelliseen ajatteluun. Kriittinen ajattelu on tärkeä taito, joka koetaan tärkeäksi niin koulutuksen tavoitteena kuin yleisesti yhteiskunnan jäsenen taitona (Halpern, 2014). Sen ymmärretään sisältävän erilaisia korkeamman ajattelun muotoja, kuten ongelmanratkaisua, argumentointia, tilanteiden moniulotteista tarkastelua ja arviointia. Kuitenkin kriittisen ajattelun tarkka määrittelyminen on hankalaa (Bensley, 2011), ja vaikka kriittisen ajattelun on vuosisatoja nähty olevan yksi koulutuksen tärkeimmistä tehtävistä ja modernissa yhteiskunnassa toimimisen kannalta oleellinen taito, on vaikea löytää yksimielisyyttä siitä, mitä kriittinen ajattelu lopulta *on*, kuinka sitä voisi opettaa ja vahvistaa, ja kuinka sitä voitaisiin mitata.

Kriittisen ajattelun juuret johtavat antiikin Kreikkaan ja länsimaisen filosofian juurille saakka (Hyytinen, 2015). Sokrateen dialogeissa näkyy ajatus, jossa järjen avulla arvioidaan uskomuksia, mielipiteitä ja tietoa. Sokrateen oppilas Platon jatkoi rationaalisen päättelyn traditioita ja varsinkin tämän seuraaja Aristoteles, jotta pidetään länsimaisen tieteen isänä, voidaan nähdä pitäneen syvällistä ja perustelevaa ajattelua hyveenä myös tieteellisen ja kriittisen ajattelun moderneilla määritelmillä (Bensley, 2011). Keskiajalla yleistyi käsitys siitä, että formaalin, haastavan tiedon oppiminen auttaa

oppijaa sisäistämään myös muuta tietoa. Esimerkiksi latinan opiskelu kehittäisi päättelykykyä myös muissa aiheissa. Tieteet ovat eriytyneet ja erikoistuneet tästä eri suuntiin, mutta ajatuksessa voi silti olla perää: yhdessä kontekstissa hyväksi havaittuja ajattelun taitoja voidaan käyttää myös muissa tilanteissa, ja kriittisen ajattelun taidot voivat siirtyä varsin erilaisista aiheista toisiin. (esim. Tiruneh, De Cock, Weldeslassie, Elen & Janssen, 2016; Siegel, 1991; Oljar & Koukal, 2019)

Aikaisen kriittisen ajattelun määritelmän on laatinut John Dewey (1910) Hän määritteli kriittisen ajattelun olevan aktiivista, pitkäjänteistä ja perusteellista uskomusten ja tiedon arviointia. Tästä aikaisesta määritelmästä on päädytty uusiin täsmennyksiin, joista eräs laajalti käytetty on Robert Ennisin. Hän määrittelee kriittisen ajattelun ”perusteelliseksi ja pohtivaksi päätöksentekoksi uskomuksista ja toiminnasta” (Ennis, 1991 s.6). Lyhyesti määriteltynä kriittisen ajattelun voidaan siis tiivistää olevan jollain tavalla järkevää ja hyvää ajattelua, jonka tulee täyttää jonkinlaiset vaatimukset perustellusta päätöksenteosta, mutta tämä ei vielä kovin hyvin perustele, mitä se varsinaisesti on. Yleinen tapa tarkastella kriittistä ajattelua on luokitella, minkälaisia erilaisia ajattelun taitoja ja piirteitä kriittinen ajatteliija käyttää ajatteluprosessissaan. Kriittinen ajattelu vaatii toki muutakin kuin vain kokoelman erilaisia taitoja: sen lisäksi niitä tulee käyttää järkevällä tavalla. Seuraavassa kappaleessa kuvataan, minkälaisia nämä taidot ovat, ja kuinka niitä on käytettävä.

2.3.1 Kriittisen ajattelijan taidot ja taipumukset

Ennis (1991) esittelee kriittisen ajattelijan käsitteen, joka on hyödyllinen kriittisen ajattelun määrittelyssä. Kriittinen ajatteliija on idealisoitu malli henkilöstä, joka omaa kaikki taidot ja taipumukset kriittiselle ajattelulle, ja käyttää niitä onnistuneesti perusteellisessa päätöksenteossaan ja toiminnassaan. Ennis jakaa kriittisen ajattelijan taidot viiteen osa-alueeseen: 1) ongelman tai tilanteen tunnistaminen, 2) päätelmän pohjustus, 3) päätelmän tekeminen, 4) metakognitiiviset taidot ja 5) aputaidot.

Ongelmanratkaisuun kuuluu Ennisin määritelmässä kolme vaihetta. Ongelman asettaminen vaatii taitoja, joilla ongelmaa tarkastellaan ja ymmärretään. Kriittinen ajatteliija havaitsee ongelmasta oleelliset osa-alueet ja oletukset, sekä ymmärtää siihen liittyvät määritelmät ja ehdot. Kun ongelma on ymmärretty, ryhtyy kriittinen ajatteliija rakentamaan ratkaisuaan. Päätelmän pohjustus koostuu tapahtuman kriittisestä tarkastelusta, jossa ajatteliija ottaa huomioon sen oleelliset käsitteet, ja löytää niiden väliset yhteydet ja syy-seuraussuhteet. Viimeisessä ongelmanratkaisun vaiheessa päätelmä rakennetaan loogisella päättelyllä, deduktiolla ja induktiolla.

Loput Ennisin ajattelun taitojen osa-alueet koostuvat aputaidoista, joilla henkilö reflektoi omaa ajatteluaan ja ennakkokäsityksiään, sekä pohtii ajatteluketjunsä järkevyyttä. Nämä osa-alueet sisältävät myös kriittisen ajattelun kannalta tärkeitä argumentoinnin taitoja, jotka liittyvät oleellisesti päätelmän tekemisen lisäksi kommunikointiin ja tehdyn päätelmän viestintään. Argumentoinnin voidaan katsoa olevan sosiaalinen interaktio, jossa argumentin tekijä kertoo kuulijalle kantansa uskottavasti (Muller & Perret-Clermont, 2009), eli millä tavalla henkilö viestii ja perustelee tehdyn päätelmänsä muille. Päätelmän synty- ja arviointiprosessissa ongelmanratkaisija joutuu argumentoimaan kantaansa itselleen, joten argumentoinnilla on myös sisäinen, päätelmän synnyn kannalta tärkeä elementti (Kuhn, 2005).

Fisher (2001) puolestaan esittää kriittisen ajattelijan omaavan seuraavat taidot:

- Ongelman osa-alueiden, erityisesti syiden ja johtopäätösten identifiointi
- Olettamusten tunnistaminen ja arviointi
- Ajatusten ja ilmaisun selkeytys ja tulkinta
- Väitteiden hyväksyttävyyden ja uskottavuuden arviointi
- Selitysten ja väitteiden luonti, analyysi ja arviointi
- Päätöstenteko ja päätösten analyysi ja arviointi
- Päätelmien laatiminen ja argumenttien tekeminen.

Myös Fisherin mainitsemat taidot voidaan jakaa ongelmanratkaisun eri vaiheisiin. Tarkasteltavaa ongelmaa analysoidaan, ja sen pääkohdat ja oletukset tunnistetaan. Näiden pohjalta rakennetaan uskottava päätelmä, jonka hyvyttä kyetään arvioimaan, ja joka pystytään argumentoimaan.

Pelkät ajattelun taidot eivät kuitenkaan johda itsestään kriittiseen ajatteluun, vaan niitä on myös käytettävä. Kriittinen ajattelijä omaa siis sekä oleelliset ajattelun taidot että tarvittavat taipumukset niiden käyttöön (Siegel, 1988). Taipumuksella kuvataan henkilön valmiuksia, asenteita ja ominaisuuksia, joita voidaan pitää taitojen lisäksi edellytyksenä sille, että näitä taitoja todella myös käytetään. Kriittinen ajattelijä ei siis vain omaa tiettyjä taitoja, vaan hän on myös tietynlainen *henkilö*. Siegel ottaa käyttöön termin ”kriittinen henki” kuvaamaan näitä ominaisuuksia, asenteita ja piirteitä. Hän ei itse erotellut, mitä ominaisuuksia tarkalleen tarkoitti, ja kriittisen hengen määrittely onkin jälleen hankalaa. Sillä voidaan päätellä olevan ajattelijan kognitiivisten taipumusten lisäksi myös moraalinen ja emotionaalinen ulottuvuus. (Holma, 2016).

Ennis (1991) antaa kriittiselle ajattelijalleen seuraavat 12 taipumusta:

- pyrkimys selkeään käsitykseen tilanteesta
- keskittyminen tehtävään
- kokonaisuuden huomiointi
- pyrkimys syy-seuraussuhteen ymmärrykseen
- pyrkimys omaksumaan asiasta hyvät tiedot
- vaihtoehtoisten selitysten etsintä
- pyrkimys vaadittavaan tarkkuuteen
- omien ennakkotietojensa ja uskomustensa reflektointi
- pyrkimys omaamaan avoin mieli vaihtoehtoisille näkemyksille
- pidättyminen tekemästä päätöstä vailla perusteluja
- kykeneminen kantaansa vaihtamiseen perustelujen kautta
- kriittisen ajattelun taitojen käyttäminen

Kriittisen ajattelijan taipumuksien sijaan voidaan myös puhua hyveistä, pidetäänhän monia edellä mainituista taipumuksista melko universaalisti hyvän kansalaisen piirteinä. Kriittisen ajattelijan hyveitä ovat Ritchhartin (2002) mukaan:

- Avomielisyys
- Uteliaisuus
- metakognitiivisuus, eli oman ajatteluprosessin tiedostaminen
- totuuteen ja ymmärrykseen pyrkiminen
- strateginen ajattelu ja skeptisismi
- Motivaatio
- Havainnointi

Kriittisen ajattelun voidaan siis katsoa olevan sellaista hyvin perusteltua ja perustelevaa ajattelua, jossa käytetään niitä korkeamman tason kognitiivisia taitoja, jotka siihen liitetään. Kriittisen ajattelun prosessi ongelmanratkaisussa voidaan nähdä koostuvan vaiheista. Ensimmäinen vaihe on ongelman tarkastelu, johon kuuluu sen osa-alueiden ja käsitteiden sekä niiden välisten yhteyksien tunnistaminen. Toinen vaihe on päätelmän tekeminen, joka koostuu loogisesta päättelystä ja järkeilystä, jossa otetaan huomioon ongelmasta tunnistetut osa-alueet, ongelman kokonaisuus ja käsitteiden väliset relaatiot. Viimeinen vaihe on ongelman ratkaisun hyvä argumentointi. Siihen liittyvät ajattelijan oman ajatusketjun, päätelmän ja ennakkokäsitysten kriittinen tarkastelu ja reflektointi.

2.3.2 Tiedon ja kriittisen ajattelun suhde

Epistemologisesti *tieto* voidaan jakaa propositio-, ja proseduraalitietoon (Smith, 2002). Propositio-tieto on tietoa siitä, minkälainen maailma on. Se koostuu toteamuksista ja väittämistä, ”faktoista”. Tällaisella tiedolla voidaan perustella uskomuksia, päätyä päätelmiin ja todistaa väittämiä. Proseduraalinen tieto taas on tietoa siitä, kuinka jotain tehdään. Esimerkiksi polkupyörällä ajamisen taidon voidaan katsoa olevan proseduraalista tietoa, mutta myös tieto siitä, miten ongelmia analysoidaan ja ratkotaan, ovat myös tällaisia taitotietoja. Tältä kannalta kriittinen ajattelu vaatii vain proseduraalista tietoa, jos se määritellään edellä mainittujen ajattelun taitojen avulla. On kuitenkin selvää, että proseduraalinen tieto sisältää aina jonkin verran myös propositiotietoa (Smith 2002). Polkupyörällä ajamisen taito sisältää luultavasti paljonkin tietoa esimerkiksi polkupyörän rakenteesta, liikennesäännöistä, turvalaitteista kuten kypärästä ja niin edelleen. Näin voidaan sanoa, että myös ajattelun taidot sisältävät propositionaalista tietoa ajattelusta ja ajattelun sisällöstä. Ajattelu ei koskaan ole olemassa tyhjiössä, vaan sillä on aina jokin kohde. Jonkinlainen propositionaalinen tieto siitä mitä ajatellaan, on välttämättä ajattelussa mukana. Jotta tästä ajattelun *kohteesta* voitaisiin ajatella kriittisesti, pitää siitä ensin siis tietää riittävä määrä ”faktuaalista” tietoa.

Henkilöllä on oltava käsiteltävästä aiheesta riittävästi tietämystä ymmärtääkseen, minkälainen päätely asiasta on järkevää ja kohtuullista. Pelkillä ajattelun taidoilla voidaan päästä sinänsä loogisesti pitäviin väitteisiin, mutta ilman tietoa ajattelun kohteesta nämä väitteet eivät voi olla hyvin perusteltuja, joten ajattelija ei voi saavuttaa tällaisella ajattelulla uutta tietoa (Kant 1781). Yleisiä ajattelun taitoja ja tietoja voidaan käyttää kunnolla hyödyksi vain, jos taustatieto aiheesta on riittävä (Hyytinen 2015). Vasta tällainen ajattelu, joka yhdistää propositionaalista tietoa ajattelun kohteesta ja propositionaalista tietoa siitä miten ajatella, voi olla kriittistä ajattelua. Kriittisessä ajattelussa on siis kysymys propositionaalisen substanssiteidon ajattelun kohteesta, kriittisen ajattelutaidon, sekä ”kriittisen hengen” synteisistä.

Lopulta kriittinen ajattelu on prosessi, joka mahdollistaa perustellun päätöksenteon toiminnasta tai uskomuksesta. Se sisältää taitoja tunnistaa, analysoida, tulkita ja yhdistellä informaatiota, ja päätyä sen avulla perusteltuun johtopäätöksiin (Hyytinen ym., 2019). Taitoihin kuuluu myös tiedon, johtopäätösten, selitysten ja väitteiden luotettavuuden arviointi ja oman ajattelun reflektointi. Kriittinen ajattelu sisältää sekä propositionaalista tietoa ajattelun aiheesta, että proseduraalista tietoa siitä, kuinka käsitellä tätä tietoa kriittisesti.

2.3.3 Kriittinen ajattelu yleisenä ja alakohtaisena taitona

On monitulkintaista, onko kriittinen ajattelu ensisijaisesti yleinen taito, jota voidaan soveltaa tieteenalasta ja ajattelun aiheesta toiseen, vai pääasiassa kontekstista ja ajattelun kohteesta riippuvainen alakohtainen taito (Smith 2002). Mikäli kriittinen ajattelu nähdään työkaluna, jolla esimerkiksi fysiikan ongelmaa ratkaistessa fysikaalista tietoa käsitellään ja prosessoidaan sekä luodaan perusteltuja ja argumentteja tämän tiedon pohjalta, voi vaikuttaa siltä, että prosessi on välttämättä tiukasti kiinni fysikaalisen tiedon propositionaalisessa puolessa. Tässä ajattelussa syntyneitä johtopäätöksiä ja perusteluja ei tällöin voi käyttää, jos ongelma olisikin esimerkiksi kielellinen. Kriittinen ajattelu jää alakohtaiseksi prosessiksi eikä siirtoa tieteenalojen välillä voi syntyä (Fischer, Chinn, Engelmann, & Osborne, 2018). Vaikka kriittinen ajattelu liittyy aina johonkin kontekstiin, siitä voidaan tunnistaa myös yleisiä ajattelun piirteitä. Mikäli tarkastellaan edellisissä kappaleissa todettuja määritelmiä kriittisen ajattelijan taidoista ja taipumuksista, on määritelmissä selvästi myös yleistettävissä olevia piirteitä, kuten ongelmanratkaisussa käytettävä logiikka tai oman ajatteluprosessin reflektointi. Nämä piirteet saattavat saada hieman erilaisia muotoja riippuen ajattelun kontekstista, mutta voidaan sanoa, että kriittisen ajattelun ydinkohdat ovat pohjimmiltaan yleistettävissä ja käytettävissä monilla eri tieteenaloilla. (Esim. Siegel, 1991; Oljar ym., 2019). Näkökulmien välillä vallitsee jonkin verran erimielisyyttä, mutta yhä useampi tutkija näyttää hyväksyneen eräänlaisen synteetin siitä, että kriittinen ajattelu eroaa kontekstien välillä, ja aihekohtainen propositionaalinen tieto on tarpeellista. Tämän lisäksi on olemassa monia yleistettävissä olevia ajattelun taitoja ja piirteitä, jotka voivat siirtyä aiheesta toiseen. (Tiruneh ym., 2016)

Opetuksessa päädytään helposti tilanteeseen, jossa opettajat ajattelevat, ettei heidän tehtävänsä ole opettaa yleisiä ajattelun taitoja, vaan keskittyä oman erityisosaamisensa alakohtaisiin piirteisiin. Opiskelijoiden oletetaan omaavan tarvittavat yleiset taidot jo saapuessaan kunkin opettajan opetettaviksi (Barrie, 2006, 2007). Tämä on ristiriidassa aiemmin mainitun ajatuksen kanssa, jossa kriittisen ajattelun osaaminen nähdään valveutuneen kansalaisen perustaitona, ja sen olevan sivistykseen tähtäävän opetuksen eräs tärkeimmistä tehtävistä. Alakohtaisten taitojen oppiminen ja soveltaminen ja kriittisen ajattelun harjoittelu tällä tavalla johtavat varmaankin myös yleisten ajattelun taitojen harjaantumiseen. Korkeakoulusta valmistuvilla on kuitenkin usein heikot kriittisen ajattelun taidot (Ursin, ym., 2021).

2.3.4 Kriittinen ajattelu luonnontieteissä ja fysiikassa

Kriittinen ajattelu vaatii sekä substanssitietoa että ajattelun taitoja. Koska eri tieteissä substanssitieto eroaa toisistaan, myös kriittinen ajattelu on riippuvaista kontekstista ja aiheesta, jossa tietoa käsitellään (Tiruneh ym., 2016). Fysiikka vaatii luonnontieteenä luonnollisesti monia yleisiä ajattelun taitoja. Käyttäen Ennisin kriittisen ajattelijan taidoista ja taipumuksista tunnistettuja ongelmanratkaisun vaiheita fysiikan ongelman kontekstiin, ovat pääkohdat hyvin samanlaiset eri tieteiden välillä. Ennen varsinaista ongelmanratkaisua tulee ongelman tarkasteluvaiheessa ongelmasta löytää siihen oleelliset käsitteet, niiden väliset yhteydet ja ongelman osa-alueet. Varsinaisessa ongelmanratkaisuvaiheessa kriittinen ajattelijä päätelee ratkaisun käsitteellisen tietonsa ja mahdollisten matemaattisten taitojensa avulla, ja kolmannessa vaiheessa rakentaa päätellen argumentoinnin taitojensa avulla hyvän perustelun. Kriittinen ajattelu ei vaikuta fysiikassa olevan tällä tavalla tarkasteltuna kovin erityistä, mutta painotuksia tutkittaessa huomataan fysikaalisen ajattelun kannalta tärkeä erityispiirre.

Fysiikan ja luonnontieteiden kannalta erityisasemassa ovat erilaisten käsitteiden ja käsiterakenteiden relaatiot (Koponen & Nousiainen, 2015). Kriittinen ajattelu fysiikan kontekstissa tarvitsee ajattelun taitoja, joilla käsitteitä ja käsiterakenteita voidaan tutkia ja analysoida. Fysiikka voidaan varsinkin toisen asteen opinnoissa nähdä kokoelmana erilaisia tietoja ja matemaattisia taitoja, jotka jäävät oppijan mielessä helposti irrallisiksi toisistaan, tai niiden välillä nähdään vain lineaarisia riippuvuuksia. Esimerkiksi sähkövarauksen ymmärretään muodostavan ympärilleen sähkökentän, ja tuntevan ulkoisten kenttien aiheuttaman voiman, mutta näiden tietojen yhteys sähkövirran syntyyn on voinut jäädä muodostumatta. Tosiasiassa käsitteet ovat moniulotteisesti liittyneet toisiinsa ja muodostavat monihaarisia käsiterakenteita. Käsitteiden relaatioiden muodostaman kokonaisuuden tunnistaminen ja sitä kautta ilmiöiden syy-seuraussuhteiden näkeminen on tärkeässä osassa fysiikan kriittisessä ajattelussa. (Tiruneh ym., 2016)

2.4 Kriittisen ajattelun mittaaminen

Kriittistä ajattelua tutkittaessa on tärkeää pystyä mittaamaan sitä jollakin tavalla, ja tätä varten on kehitetty erilaisia testejä, jotka pyrkivät mittaamaan kriittistä ajattelua joko yleisellä tasolla tai jonkin tarkemmin rajatun aiheen kontekstissa (Tiruneh ym., 2016). Kriittistä ajattelua mittaavat testit voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: itsearviointiin perustuviin ja suoritusperusteisiin testeihin (Hyytinen, 2015). Itsearviointitestit voivat olla esimerkiksi kyselyitä tai haastatteluja, joissa koehenkilöt arvioivat omia taitojaan tai sitä, kuinka he ovat niissä kehittyneet. Nämä voivat olla ongelmallisia,

sillä on havaittu, että koehenkilöillä on usein epärealistinen kuva omista taidoistaan ja niiden kehittymisestä (Halpern, 1993). Itsearviointi on kuitenkin epäsuoraa: se ei mittaa ajattelun taitoja itsessään, vaan henkilön omaa käsitystä niistä. Suoritusperusteiset testit toimivat kuten perinteisempi koesuoritus, joissa koehenkilöille annetaan ratkaistavaksi erilaisia ongelmia, joihin heidän tulee vastata. Yleisimmät ongelmatyypit ovat monivalintatehtävä ja avoin tekstivastaus, joissa kummassakin on omat hyvät ja huonot puolensa.

Monivalintatehtävissä annetaan vastausvaihtoehdot, joista koehenkilö valitsee mielestään oikean. Tällaiset testit voidaan tarkastaa nopeasti, ja ne nähdään kätevinä ja ajankäytöllisesti tehokkaina. Monivalintatestit ovatkin kriittisen ajattelun mittaamisen valtavirtaa (Ennis 1991, Shavelson 2010) ja ne ovat maailmalla yleisemmässä käytössä myös perinteisissä koulukokeissa. Monivalintatehtävien ongelmana on kuitenkin niiden kyseenalainen tehokkuus (Lindblom-Ylänne, Lonka & Leskinen, 1996). Monivalintatehtävät tuskin vaativat korkeamman ajattelun muotoja samoin kuin avoimet tekstivastaukset, ja niihin voidaan helpommin vastata käyttäen yksinkertaisempia tekniikoita kuten ulkoa opettelua. Monivalintatehtävät eivät myöskään voi tuoda ilmi, kuinka koehenkilö on päätenyt vastaukseensa (Lindblom-Ylänne ym., 1996), mikä on varsinkin ajattelun mittaamisen kannalta iso puute (Tiruneh ym., 2016). Kysymyksen laatiminen on myös vaikea tehtävä, sillä vastauksen tunnistaminen on helpompaa kuin sen laatiminen. Vastausvaihtoehdoista voi olla mahdollista tunnistaa oikea vastaus poissulkemalla epätodennäköisempiä vaihtoehtoja ja löytää oikea vastaus, johon he eivät muuten päätyneet. Arvaaminen on monivalintatehtävissä myös yleinen strategia (Hyytinen ym., 2019; Hyytinen, Postareff & Lindblom-Ylänne, 2020). Monivalintatehtävät voivat täten antaa optimistisemmän kuvan koehenkilöiden taidoista kuin ne todellisuudessa ovat.

Avoin tekstivastaus nähdään ratkaisuna monivalintatehtävän ongelmiin. Koehenkilöt muodostavat itse vastauksensa kokeen kysymyksiin, jolloin koehenkilöiden on itse analysoitava ja syntetisoitava käytettävissä olevasta informaatiosta, ja heidän omasta aiheosaamisestaan vastaus, ja laatia ratkaisun perustelut (Shavelson, 2010). Tällainen kysymyksen ratkaisu vaatii korkeamman tason ajattelua kuin monivalintatehtävän, ja mikä tärkeintä, koska ratkaisu on perusteltu, voidaan sen avulla tulkita, kuinka henkilö on päätenyt tulokseensa, ja sitä kautta kuinka hän on ajatellut. Avoimen tekstivastauksen huonoina puolina nähdään sen arvioinnin vaativuus (Attali, 2014), ja tätä kautta tämäntyyppisen tehtävän antaminen varsinkin suurelle joukolle tutkittavia on hankalaa, vaatii paljon työvoimaa ja on kallista, mutta on kriittisen ajattelun mittaamiseen yleensä monivalintaa parempi tehtävätyyppi (Tiruneh ym., 2016).

Toinen kriittisen ajattelun mittaamisessa tärkeä kysymys on mittarin raja-
aus. Pyritäänkö mittaamaan yleisiä kriittisen ajattelun taitoja vai onko mittari rakennettu erityisesti mittaamaan jollekin tietylle alalle ominaista kriittistä ajattelua tai ainakin ajattelua tässä kontekstissa? Valtaosa kriittisen ajattelun mittareista on rakennettu mittaamaan yleistettävissä olevia taitoja melko laajalla aihe-
rajauskella. Esimerkiksi Cornell Critical Thinking Test (CCTT) (Ennis, Millman & Tomko, 1985) ja Halpern Critical Thinking Assessment (HCTA) (Halpern, 2010) käsittelevät loogisia ongelmia arkipäiväisissä tilanteissa ja pyrkivät näin mittaamaan varsin laajaa ja yleistettävää kriittistä ajattelua. Lawson's Classroom Test of Scientific Reasoning (CTSR) (Lawson, 1978) on rakennettu mittaamaan tieteellistä ja kriittistä ajattelua yleisessä luonnontieteiden kontekstissa. Lisäksi biologian kontekstiin on kehitetty Biology Critical Thinking Exam (McMurray, 1991), mutta tämän lisäksi alakohtaisia testejä ja kriittisen ajattelun mittareita on varsinkaan fysiikan kontekstissa hyvin vähän. (Tiruneh ym., 2016)

Seuraavaksi esitellään Critical Thinking in Electricity and Magnetism (CTEM) testi, joka on fysiikan kontekstiin ja erityisesti sähkömagnetismissä tarvittavien kriittisen ajattelun taitoihin suunnattu mittari.

2.4.1 Critical thinking in electricity and magnetism –testi

CTEM -testi on Dawit Tirunehin ja kumppaneiden (Tiruneh ym., 2016) kehittänyt yliopisto-opiskelijoille suunniteltu kriittisen ajattelun mittari, joka pyrkii mittaamaan kriittisen ajattelun taitoja fysiikan, erityisesti sähkömagnetismin kontekstissa. Sähkömagnetismi on valittu mittariin käytännön syistä. Testi on suunnattu erityisesti yliopisto-opintojen alkuvaiheessa oleville, ja sähköopin perusteet ovat yleensä aiheena sekä fyysikoille että insinööreille opintojen alkuvaiheessa (Tiruneh ym., 2016). Sähkömagnetismista löytyy myös paljon yksinkertaisia tehtäviä, jotka kuitenkin vaativat ymmärrystä melko monimutkaisista käsitteistä, jolloin tällaisten tehtävien vastauksia analysoimalla on mahdollista tehdä tulkintoja, minkälaista ajattelua koehenkilö on käyttänyt. Itse mittari sisältää monivalintatehtävistä ja vapaista tekstivastauksista koostuvat sähkömagnetismin kysymykset sekä arviointimatriisi, jonka perusteella vastauksista voidaan analysoida kriittisen ajattelun piirteitä.

CTEM -testi on rakennettu kokoamalla muista kriittisen ajattelun mittareista yhteisiä piirteitä, jotka on muokattu fysiikkaan ja sähkömagnetismin kontekstiin sopiviksi. Jotta mittari olisi vertailukelpoinen aiempien testien kanssa, ja jotta voitaisiin tutkia kriittisen ajattelun siirtovaikutusta yleisistä taidoista fysiikan kriittiseen ajatteluun, testiin valikoituvat muiden mittarien analyysin ja sähkömagnetismin kontekstin perusteella samat kriittisen ajattelun piirteet kuin HCTA testissä. Ne ovat

järkeily, hypoteesin testaus, argumenttien analyysi, todennäköisyys ja epävarmuustarkastelu, sekä ongelmanratkaisu ja päätöksentekotaidot. Kuten aiemmin mainitussa kriittisen ajattelijan määritelmässä, voidaan CTEM -testissä esitetty kriittisen ajattelun prosessi jakaa vaiheisiin. Ennen ongelmanratkaisua tapahtuvaan ongelman tarkasteluun, varsinaiseen ongelmanratkaisun syntyyn ja perustelun rakentamiseen, sekä ajattelijan omaan reflektointiin omasta ajatteluprosessistaan.

CTEM -testiin valikoidut tehtävät vaativat ongelmien kriittistä tarkastelua monelta kannalta. Arviointimatriisin perusteella tehtävistä voi saada paljonkin pisteitä, vaikka vastaus olisi väärin, kunhan on käyttänyt oikeita käsitteitä, ja ratkaisu on edennyt loogisesti, eli vastauksesta ilmenee kriittistä ajattelun piirteitä. Tehtävissä tulee usein tunnistaa oletuksia, joita tehtävänannoissa ei ole välttämättä eksplisiittisesti kerrottu. Esimerkiksi komponentteja voi pitää ideaaleina tai epäideaaleina, kunhan kumpi tahansa kanta on perusteltu. CTEM -mittaria hyödynnetään tämän tutkielman myöhemmässä vaiheessa, kun rakennetaan oma mittari, jolla tutkielman aineistoa analysoidaan.

3 Tasavirtapiirien sähköoppia

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kriittistä ajattelua tasavirtapiiritehtävissä. Koska kriittinen ajattelu sisältää aina proseduraalista tietoa ajattelun aiheesta, on oleellista kiinnittää huomiota tasavirtapiirien ominaisuuksiin. Myöhemmin tasavirtapiiritehtävissä esiintyvää kriittistä ajattelua analysoidaan sähköopin ja kriittisen ajattelun teorian avulla. Sähköoppia käsittelevät kappaleet pohjautuvat Randall Knightin (2008) oppikirjaan, ellei toisin mainita.

Virta on sähköopissa keskeinen käsite. Eräs tapa kuvata sitä on määrittää virran olevan poikkileikkauksen läpi kulkevan varauksen määrä ajanyksikköä kohden. Varauksen yksikkö Coulomb on määritelty olevan se varauksen määrä, jonka yhden ampeerin virta kuljettaa yhdessä sekunnissa. Tällöin virran yksikkö, ampeeri, vastaa juuri liikkuvan varauksen määrää sekuntia kohden. Esimerkiksi virtapiirissä metallijohtimessa kulkeva virta onkin varauksenkuljettajien, oleellisesti elektronien, liikettä. Seuraavaksi tarkastellaan mitä varaukset ovat, ja kuinka niitä voidaan liikuttaa. Tämän jälkeen tarkastellaan lainalaisuuksia, jotka pätevät virralle virtapiireissä, virran yhteyttä konduktanssiin ja resistanssiin, ja päästään tätä kautta Ohmin ja Kirchhoffin lakeihin. Varauksen käsitteeseen palataan uudelleen, kun tarkastellaan kondensaattoreita.

3.1 Varaus ja sähkökenttä

Sähköisiä varauksia on kahdenlaisia, positiivisia ja negatiivisia. Varattu hiukkanen muodostaa ympärilleen sähkökentän, joka välittää sähkömagneettisen vuorovaikutuksen, jonka muut varatut hiukkaset voivat kokea. Samanlaiset varaukset kohdistavat toisiinsa hylkivän voiman, ja erilaiset varaukset puoleensavetävän voiman. Tätä voimaa kutsutaan Coulombin voimaksi. Voima voidaan laskea alla olevalla kaavalla, jossa F on varatun hiukkasen tuntema voima, k on Coulombin vakio, q_1 ja q_2 ovat varausten suuruudet, ja d on varausten välinen etäisyys.

$$|\mathbf{F}| = k \frac{|q_1 q_2|}{d^2}$$

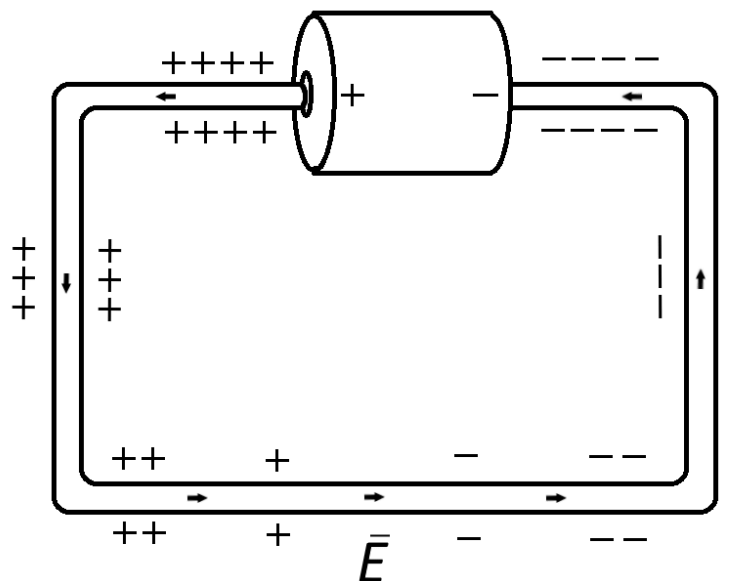
Varaukset siis tuntevat voiman, joka riippuu varausten suuruudesta ja niiden etäisyydestä toisiinsa. Coulombin voima kertoo varaukseen vaikuttavan voiman etäisyyden funktiona toiseen varaukseen nähden. Voima kuitenkin lopulta johtuu toisen varausten synnyttämistä sähkökentistä ja kentän voimakkuudesta siinä pisteessä, jossa toinen, tarkasteltava varaus on. Sähkökenttä voidaan muodostaa yksittäisen varauksen luoman kentän lisäksi myös muilla tavoilla. Esimerkiksi aineessa oleva varausjakauma luo myös sähkökentän, joka välittää voimaa samalla tavalla. Voidaan siis muotoilla lauseke Sähkökentän voimakkuudelle varattuun hiukkaseen vaikuttavan voiman avulla, joka riippuu vain hiukkasen varauksesta ja varattuun hiukkaseen kohdistuvasta voimasta. Sähkökenttä E avaruuden pisteessä (x, y, z) , jossa varattu hiukkanen q on, riippumatta siitä miten tämä kenttä on syntynyt, saadaan hiukkaseen vaikuttavan voiman F avulla.

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

3.2 Sähkökenttä ja virta

Sähkökenttä aiheuttaa varaukseen voiman, joka voi Newtonin II:n lain mukaisesti aiheuttaa sille kiihtyvyyden ja saada sen liikkeelle. Koska sähkövirta on oleellisesti varausten liikettä, on oletettavaa, että ne on ensin jollakin tavalla saatu liikkeelle. Johtimessa liikkuva varaus myös törmää nopeasti johdinaineen atomeihin ja hidastuu, joten varaus on myös jollakin tavalla pidettävä liikkeessä.

Johtimessa varauksia liikuttaa ja liikettä ylläpitää johtimen sisällä oleva sähkökenttä. Kun johtimen päiden välille luodaan varausero eli jännite, pyrkivät jännitelähteen navoilla olevat varaukset tasoittumaan johdinta pitkin. Tilannetta voidaan tarkastella varatun kondensaattorin avulla. Varatun kondensaattorin levyille on kertynyt varausero: toisella levyllä on ylimääräistä positiivista varausta ja toisella negatiivista. Erimerkkiset varaukset tuntevat toisiinsa puoleensavetävän voiman, joka pitää ne kondensaattorilevyjen sisäpinnalla. Toiselle levyllä varauksia vetävän voiman lisäksi samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan, joten ne pyrkivät asettumaan mahdollisimman kauas toisistaan. Kun levyt yhdistetään johtimella, pääsevät varaukset liikkumaan. Hylkivä voima työntää osan varauksista johtimen sisälle. Koska tämä tapahtuu kondensaattorin kummaltakin levyltä samaan aikaan, siirtyy johtimeen erimerkkistä varausta kummastakin päästä. Johtimessa olevat ylimääräiset varaukset asettuvat keskinäisen hylkimisvoiman ansiosta johtimen pinnalle. Varaukset asettuvat tasaisesti koko johtimen pituudelle siten, että johtimen päiden välinen varausero jakautuu tasaisesti (ks. kuva 1). Tilannetta voi varatun kondensaattorin lisäksi tarkastella yhtä hyvin muunlaisella jännitelähteellä, kuten esimerkiksi paristolla. Sähköisen epätasapainon eli jännitteen syntymekanismi vaihtelee, mutta varausten jakautuminen johtimen pituudelle noudattaa samanlaista mallia.



kuva 1: Jännitelähteen napojen välinen varausero jakautuu tasaisesti koko johtimen pituudelle.

Kun varaukset ovat jakautuneet johtimen pinnalle, voidaan tarkastella, minkälainen vaikutus tällä on johtimen sisällä. Jos oletetaan johtimen poikkileikkaukseksi ympyrä, on ylimääräinen varaus jakau-

tunut johtimen pinnalle muodostaen ympyränmuotoisen varausjakauman. Koska koko johtimen päiden välinen varausero on jakautunut johtimen lineaarisesti, on kunkin yksittäisen poikkileikkausten varaus erisuuri, jolloin tästä varauserosta syntyy poikkileikkausten välille sähkökenttä johtimen sisälle (ks. kuva 2). Kentän voimakkuus varausrenkaiden välissä voidaan määrittää varausjakaumien potentiaalieron avulla:

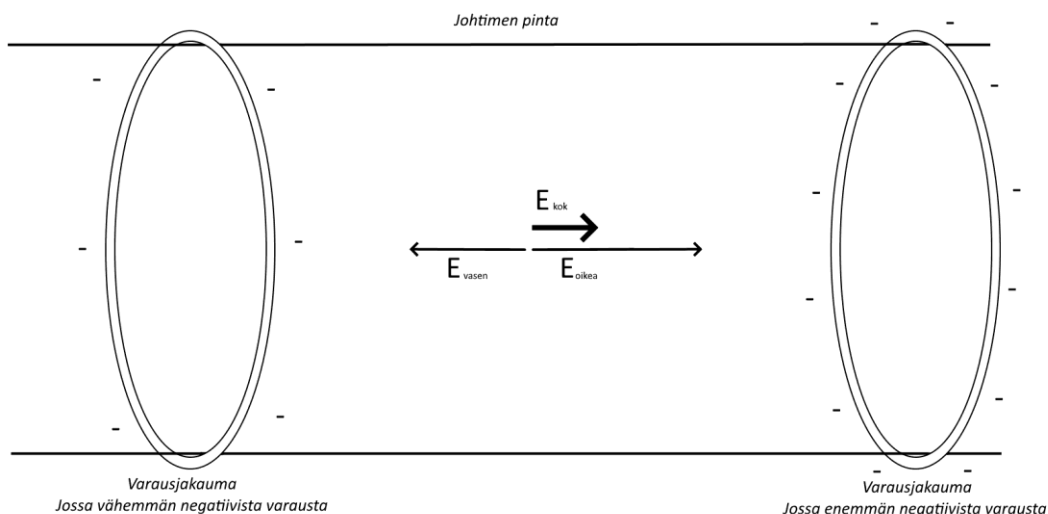
$$E = -\frac{dV}{ds}$$

Jossa dV on potentiaalin muutos pienellä matkalla ja ds on tämä pieni matka.

Jos tarkastellaan vain sähkökentän voimakkuutta, ja koska tasapaksussa johtimessa sähkökenttä on joka kohdassa yhtä voimakas, päästään yksinkertaisempaan muotoon, joka kuvaa sähkökenttää johtimen sisällä:

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta s} = \frac{\Delta V}{L}$$

Jos tarkasteltavaksi pituudeksi valitaan koko johtimen pituus, huomataan, että tasapaksussa johtimessa olevan sähkökentän voimakkuus riippuu lopulta vain potentiaalierosta, eli jännitteestä johtimen päiden välillä.



kuva 2: Varaukset jakautuvat johtimen pinnalle muodostaen johtimen eri kohtien välille varauseron. Varausjakaumien välille muodostuu sähkökenttä.

Varausero johtimen eri kohtien välillä voi olla yllättävänkin pieni, jotta sähkökenttä johtimen sisällä pystyy liikuttamaan suurta määrää varausta. Parinkymmenen yksittäisen elektronin ero varauksessa muutaman senttimetrin välein riittää ylläpitämään johtimen sisällä hyödyllisen suuruista virtaa esimerkiksi sähkölaitteen toimintaan.

3.3 Virta johtimessa

Kun varausten liike ymmärretään, voidaan tarkastella, miten virta käyttäytyy johtimessa.

Elektronit lähtevät liikkeelle sähkökentän ansiosta. Tosin nämä varauksenkuljettajat itsessään liikkuvat varsin hitaasti, mutta koska johtimessa on valmiiksi valtava määrä elektroneja ja ne kaikki tuntevat toisiinsa hylkivän voiman, voidaan päätellä, että työntämällä elektroneja missä tahansa johtimen kohdassa, ne liikkuvat koko piirissä. Varaukset pyrkivät hylkivän voiman ansiosta pitämään toisiinsa etäisyyttä, ja jos jokin varaus liikahdaa, se työntää eteenpäin lähellänsä olevia varauksia, jotka vuorostaan jatkavat ketjureaktiota koko piirin läpi. Tästä syystä lamppu syttyy välittömästi, kun kytkintä painaa, vaikka johto olisi pitkä.

Johtimessa olevia elektroneja voi olla hyödyllistä ajatella eräänlaisena nesteinä, joka virtaa johdossa kuin vesi putkessa. Kun virtaava vesi tulee putkessa haaraan, on selvää, että putken haarautuminen ei vaikuta veden kokonaismäärään. Kaikki vesi joka haaraan tulee, lähtee sieltä pois. Samoin sähkövirran tapauksessa varaukset, jotka saapuvat piirissä haaraan, eivät lakkaa olemasta. Tulosuunnasta tulevat elektronit työntävät yhä enemmän elektroneja haaraan, ja kaikkien niiden on myös työnnyttävä haaraumasta eteenpäin. Tätä sääntöä kutsutaan Kirchhoffin virtalaiksi. Virtapiirin jokaisesta pisteestä lähtee virtaa yhtä paljon kuin sitä siihen tulee. Toisin sanoen johtimen kuhunkin pisteeseen tulevien, ja siitä lähtevien virtojen summa on nolla.

$$\sum I_{\text{sisään}} - \sum I_{\text{ulos}} = 0$$

Se kuinka paljon varausta kuhunkin haaraan virtaa risteyksen jälkeen, riippuu haarojen ominaisuuksista. Vesiputkianalogian mukaisesti: jos toinen haara vie kapeampaan putkeen tai putkessa on myöhemmin jokin este, vettä virtaa enemmän siihen haaraan, jossa sen on helpompaa virrata. Samoin sähkövirralle, haaroihin kulkevan virran suuruus riippuu siitä, kuinka helppoa sen on haaraan kulkea. Seuraavaksi tarkastellaan, mikä tekee sähkövirran kulusta helppoa tai vaikeaa.

3.4 Ohmin laki, ja Kirchhoffin jännitelaki

Johtimessa kulkevat elektronit törmäilevät jatkuvasti johdinaineen atomeihin. Jos oletetaan elektronien noudattavan likimain ideaalikaasulakia, eli jos ne oletetaan pistemäisiksi, liikkuvan metallissa vapaasti, ja niiden väliset törmäykset kimmoisiksi, voidaan laskea niiden nopeuden olevan törmäysten välillä hyvinkin suuri. Kuitenkin jos tarkastellaan tavanomaisen suuruista sähkövirtaa, ja laskeaan liikkuvan varauksen määrästä elektronien johtimen suuntainen nopeus, on se kuitenkin kohtalaisen pieni. Näennäinen ristiriita on kuitenkin selitettävissä. Elektronien hidas vaellusnopeus, eli kuinka suurella nopeudella ne kulkevat johtimen suuntaan, on seurausta siitä, että johtimen sisälle muodostuva sähkökenttä ei suinkaan saa elektroneja kulkemaan täsmälleen kentän suuntaan. Elektronit liikkuvat ja törmäilevät lämpöliikkeen vuoksi satunnaisesti johdinaineen atomeihin ja toisiinsa, jolloin sähkökentän aiheuttama voima ehtii kiihdyttää elektroneja kentän suuntaan näiden törmäysten välillä hyvin vähän. Elektronien suunta ehtii kuitenkin muuttua sähkökentän aiheuttaman voiman ansiosta sen verran, että elektronit liikkuvat johtimessa keskimäärin hieman kentän suuntaisesti. Tämä monien elektronien pieni keskimääräinen, kentän suuntaan etenevä selektiivinen liike ilmenee makroskooppisesti sähkövirtana.

Elektronien keskimääräiseen johtimen suuntaiseen nopeuteen vaikuttaa johtimessa olevan sähkökentän voimakkuus ja keskimääräinen aika, joka kuluu törmäysten välillä. Mitä suuremman ajan elektronit liikkuvat vapaasti törmäysten välillä sitä suurempaan nopeuteen sähkökentän välittävä voima ehtii niitä kiihdyttää. Elektronit saavuttavat siis suurempia sähkökentän suuntaisia nopeuksia aineessa, jossa törmäysten välillä kuluu enemmän aikaa. Koska virran suuruus riippuu johtimen poikkileikkauksen läpi kulkevan varauksen määrästä aikayksikköä kohti, virta on sitä suurempi, mitä suurempi on elektronien vaellusnopeus. Jos ne liikkuvat sähkökentän suuntaan nopeammin, sitä enemmän niitä kulkee johtimen poikkileikkauksen kautta kullakin aikavälillä. Liikkuvan varauksen määrään vaikuttaa elektronien vaellusnopeuden lisäksi myös niiden määrä. Eri aineissa voi olla samassa tilavuudessa eri määrä vapaasti liikkuvia elektroneja, jolloin niiden liikkeessä samalla vaellusnopeudella liikkuu varausta poikkileikkauksen läpi eri määrä. Virtaa kulkee samalla sähkökentän voimakkuudella enemmän aineessa, jossa törmäysten välillä kuluu enemmän aikaa, ja jossa on suurempi elektronitiheys. tällainen aine on parempi sähkönjohdin.

Määritellään aineelle ominainen suure, konduktiivisuus σ , joka kuvaa, kuinka helposti elektronit liikkuvat aineessa olevan sähkökentän ansiosta. Konduktiivisuus kuvaa siis sitä, kuinka helposti sähkövirta kulkee kyseisessä aineessa. Konduktiivisuus on suoraan verrannollinen elektronitiheyteen, sekä

törmäysten välillä kuluvaan aikaan, ja sitä kautta elektronien vaellusnopeuteen. Konduktiivisuuden vastaluku tällöin kuvaa vastaavasti, kuinka paljon elektronit reagoivat sähkökenttään. Tällä tavoin saadaan suure resistiivisyys, ρ .

$$\frac{1}{\sigma} = \rho$$

Otetaan seuraavaksi käyttöön suure virtatiheys, J , joka kuvaa virran määrää johtimen poikkileikkauksen pinta-alaa kohti. Koska johtimessa oleva sähkökenttä saa varauksenkuljettajat liikkeelle, ja konduktiivisuus kertoo kuinka paljon tämä kenttä varauksia liikuttaa, voidaan todeta, että virtatiheyteen vaikuttaa aineelle ominainen konduktiivisuus, ja johtimessa olevan sähkökentän voimakkuus.

$$J = \sigma E$$

Koska virtatiheys on virran määrä pinta-alaa kohti, saadaan virta, I

$$I = JA = A\sigma E = \frac{A}{\rho} E$$

Koska sähkökentän voimakkuus, E riippuu johtimen päiden välillä olevasta potentiaalierosta, ΔV sekä johtimen pituudesta, päädytään muotoon:

$$I = \frac{A}{\rho L} \Delta V$$

Keskimmäinen termi kertoo, kuinka suuri virta kyseisessä johdinkappaleessa kulkee, kun sen päiden välille asetetaan tunnettu potentiaaliero. Määritellään tämän avulla suure resistanssi R , joka kuvaa kuinka paljon johdin vastustaa sähkövirran kulkua. Konduktiivisuus ja resistiivisyys ovat aineelle ominaisia suureita. Resistanssi puolestaan on kullekin kappaleelle ominainen ja se riippuu aineen resistiivisyydestä sekä kappaleen geometriasta. Resistanssi sylinterimäiselle johtimelle saadaan:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Nyt voidaan muodostaa yhteys potentiaalieron eli jännitteen sekä virran välille.

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

Tämä verrannollisuus tunnetaan Ohmin lakina. Toisin sanoen johtimen päiden välille asetettu potentiaaliero saa johtimessa aikaan sähkökentän, joka vuorostaan saa aikaan virran, jonka suuruus on kääntäen verrannollinen kyseisen johtimen resistanssiin. Ohmin laki on oppikirjoissa usein kirjoitettu muodossa $U = RI$, mutta tämä muotoilu voi aiheuttaa sekaannusta syy- ja seuraussuhteen ymmärtämiselle. Ensinnäkin kyseinen tapa ilmaista Ohmin laki voi antaa ymmärtää jännitteen olevan seurausta virrasta eikä toisinpäin. On myös oleellista havaita, että piirissä kulkeva virta on seurausta jännitelähteen napajännitteen, sen sisäisen resistanssin ja piirin komponenttien resistanssin yhteisvaikutuksesta. Se minkälaisia komponentteja piirissä on, vaikuttaa siihen, kuinka suuri virta piirin kussakin haarassa kulkee.

Eräs huomattava sähköisen potentiaalio ominaisuus on, että suljetun kierroksen yli potentiaalierojen summa on nolla. Jos piirissä on jokin potentiaaliero luova komponentti, kuten paristo, on tämän potentiaalieron pudottava kierroksen ympäri kuljettaessa takaisin nolnaan. Jokainen kierrokseen kuuluva komponentti aiheuttaa jännitehäviötä, eli potentiaaliero jännitelähteeseen nähden pienenee kunkin komponentin jälkeen. Saadaan Kirchhoffin jännitelaki:

$$\Delta V_{kierros} = \sum_i (\Delta V)_i = 0$$

3.5 Komponentit, ja niiden kytkennät

Sähköopissa erilaiset virtapiirikytkennät ovat keskeisiä, joten on oleellista tarkastella tarvittavia komponentteja ja niiden tyypillisimpiä kytkentöjä.

Yksinkertaisin komponentti on vastus, joka vastustaa piirissä virran kulkua.



Kun vastuksen päiden välille asetetaan jännite, sen läpi kulkee virta Ohmin lain mukaisesti. Virran suuruus riippuu jännitteen suuruudesta ja vastuksen resistanssista.

Tyypillisimmät kytkennät ovat sarjaan- ja rinnankytkentä. Sarjaankytkennässä vastukset asetetaan peräkkäin. Tällöin haarattomassa piirissä kummankin vastuksen läpi kulkee sama virta Kirchhoffin virtalain mukaisesti. Rinnankytkennässä vastukset ovat rinnakkain. Silloin niille kulkeva virta jakautuu ja haarautuu kullekin vastukselle. Haaroissa kulkeva virta riippuu haarojen resistanssista. Sarjaankytkennän kokonaisresistanssi on sarjaan kytkettyjen vastusten resistanssien summa:

$R_{kok} = \sum_i R_i$ ja rinnankytkennässä kokonaisresistanssin käänteisluku saadaan resistanssien käänteislukujen summasta: $\frac{1}{R_{kok}} = \frac{1}{\sum_i R_i}$

Erilaisissa kytkennöissä kukin yksittäinen vastus noudattaa Ohmin lakia. Esimerkiksi piirin tai sarjaankytkennän haaran kokonaisvirtaa laskettaessa tulee ottaa huomioon Ohmin laki sekä Kirchhoffin lait.



Toinen keskeinen virtapiirien komponentti on kondensaattori. Kondensaattori kykenee keräämään varausta levyihinsä, jolloin se varastoi energiaa levyjen välille syntyvään sähkökenttään. Kondensaattori varataan asettamalla jännite sen päiden välille, jolloin levyt varautuvat keskenään erimerkkisiksi. Kondensaattorin varautuessa piirissä kulkee virta, mutta kondensaattorilevyjen välillä ei kulje varauksia. Kondensaattorin kykyä varastoida varausta kutsutaan kapasitanssiksi. $C = \frac{Q}{U}$, jossa C on kondensaattorin kapasitanssi ja Q on kullakin jännitteen arvolla V kondensaattoriin varastoituneen varauksen määrä.

Myös kondensaattoreita voidaan kytkeä vastusten tavoin sarjaan ja rinnan. Rinnankytkettyjen kondensaattorien kokonaiskapasitanssi on niiden kapasitanssien summa: $C_{kok} = \sum_i C_i$ ja sarjaankytkennässä kapasitanssien käänteislukujen summat ovat kokonaiskapasitanssin käänteisluku:

$$\frac{1}{C_{kok}} = \frac{1}{\sum_i C_i}$$

4. Tutkimusmenetelmä ja tutkimuskysymykset

Tässä tutkielmassa tutkitaan opettajaksi opiskelevien kriittistä ajattelua fysiikan sähköopin tasavirtapiiritehtävissä. Tutkimuksen tarkoituksena on kuvailla, millä tavalla kriittinen ajattelu ilmenee fysiikan aineenopettajiksi opiskelevien tasavirtapiiritehtävien ratkaisuisissa, ja kuinka tällainen ajattelu siirtyy tehtävien välillä. Tähän tavoitteeseen päästään vastaamalla seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitä kriittisen ajattelun piirteitä ilmenee tasavirtapiiritehtävien ratkaisuisissa?
2. Millä tavoin erilaiset ajattelumallit, päättelyketjut ja ratkaisustrategiat ilmenevät?
3. Minkälaista siirtovaikutusta tehtävätyyppien välillä on havaittavissa?

Kuten aiemmin tuotiin esille, on kriittisen ajattelun mittaaminen hankalaa. Tästä syystä tutkittavan aineiston valinta on tehtävä huolellisesti. Sen tulee jollakin tavalla tuoda esille koehenkilön ajattelua, jotta aineistoa tutkimalla voidaan päätellä, kuinka koehenkilön ajatukset ovat kulkeneet. Analyysissä on kiintoisaa, missä järjestyksessä päättelyketju on edennyt, onko koehenkilö käyttänyt hyödykseen kriittistä ajattelua, ja vaikuttaako se ratkaisun muodostumiseen niin toivottavan lopputuloksen, kuin vastauksen perustelun kannalta. Aineiston on mielellään oltava sellainen, että koehenkilö on joutunut käyttämään kognitiivisia resurssejaan, eli ajattelemaan mukavuusalueensa ulkopuolella, sillä rutiininomaisissa tehtävissä kriittistä ajattelua ei tarvita. Koehenkilön päättelyketjun on myös oltava tulkittavissa, jotta siitä voisi tehdä johtopäätöksiä ja tulkintoja kriittisen ajattelun esiintymisestä. On siis parempi, jos aineisto koostuu avoimista tekstivastauksista kuin monivalintatehtävistä, sillä vaikka tekstivastausten arviointi on työläämpää, ei monivalintatehtävistä pysty yhtä hyvin analysoimaan koehenkilön kriittistä ajattelua.

4.1 Aineiston kerääminen

Aineistona käytettiin Helsingin yliopistossa 2019 suoritettujen kurssikokeiden vastauksia, jossa kahdelletoista opettajaksi opiskelevalle oli annettu tehtäväksi sähköopin tasavirtapiiritehtäviä. Aineisto oli kerätty osana Fysiikan käsitteenmuodostus I-kurssia siten, että kokeen suoritus kuului kurssisuoritukseen. Kokeesta tuli saada riittävän monta pistettä (23/28), jotta kurssista pääsi läpi. Koetta sai yrittää uudelleen, kunnes siitä sai riittävän tuloksen, jolloin pisterajan ollessa melko tiukka suoritti suurin osa kokelaista kokeen monta kertaa. Seitsemän opiskelijaa kahdestatoista suoritti kokeen useammin kuin kerran, ja viisi useammin kuin kaksi kertaa. Yhteensä koesuorituksia kertyi 28, ja koska jokaiseen kokeeseen päätyi viisi tähän maisterintutkielman analyysiin päätynyttä tehtävää, on aineistossa yhteensä 140 analysoitavaa vastausta. Tehtävät tehtiin tietokoneella Examinarium-tenttitilassa ilman apuvälineitä kuten laskinta tai taulukkokirjaa.

Tutkimuksessa koehenkilöille arvottiin tehtäväksi yhdeksästä tehtävästä kuusi siten, että jokaiseen kokeeseen päätyi kolme tehtävää resistiivisistä tilanteista, ja kolme tehtävää, joissa piirissä oli vain kapasitanssia. Lisäksi kokeet oli järjestetty siten, että jokaiseen kokeeseen tuli kaksi samaa tehtävää joka kerralla, yksi vastuksista ja yksi kondensaattoreista. Kokeen suorittamiseen oli aikaa 115 minuuttia. Vastaukset ovat muutamien virkkeiden mittaisia tekstivastauksia, joissa koehenkilöt ovat vastanneet seuraaviin kysymyksiin.

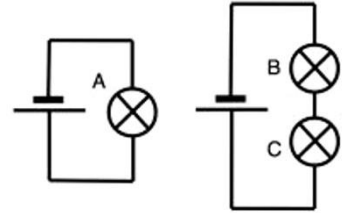
4.2 Tehtävien esittely

Koe koostui yhdeksästä tehtävästä. Tässä esitellään ne tehtävät, jotka valikoituivat tutkimukseen:

DC1

Virtapiiri koostuu ideaalisesta paristosta ja yhdestä lampusta (ks. kuva).

- Onko hehkulampun hehkulangassa sähkökenttä vai ei?
- Jos sähkökenttä on nolla, perustele miksi. Jos sähkökenttä on nolosta poikkeava, perustele miksi.



DC2

Tehtävänäsi on selvittää kokeellisesti hyvin tarkasti tuntemattoman vastuksen arvo. Kiinnität vastuksen 9 V paristoon ja mittaat virran useita kertoja olevan 15 mA.

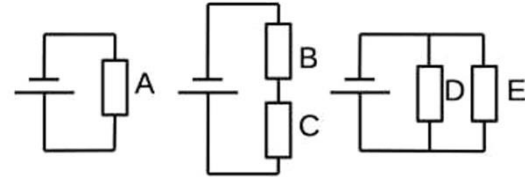
- Voitko päätellä, että vastuksen resistanssi on 600 Ω ?
- Jos kyllä, selitä miksi. Jos ei, selitä miksi.

DC3

Alla esitetyt virtapiirit koostuvat samanlaisista vastuksista ja paristoista.

Vastaa alla oleviin kysymyksiin Ohmin ja Kirchhoffin lakeja käyttäen.

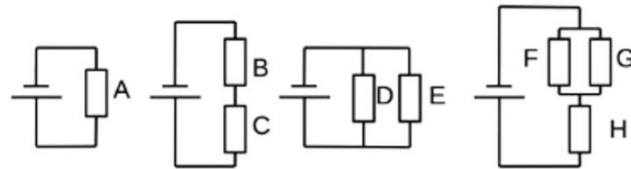
- Vertaa vastusten päiden välillä olevia jännitteitä.
- Vertaa sähkövirran suuruutta eri vastusten läpi.



DC4

Vastaa alla oleviin kysymyksiin Ohmin ja Kirchhoffin lakeja käyttäen.

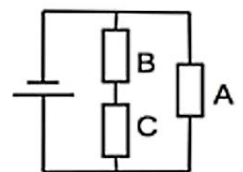
- Vertaa vastusten päiden välillä olevia jännitteitä.
- Vertaa sähkövirran suuruutta eri vastusten läpi.



DC5

Vastaa alla oleviin kysymyksiin Ohmin ja Kirchhoffin lakeja käyttäen.

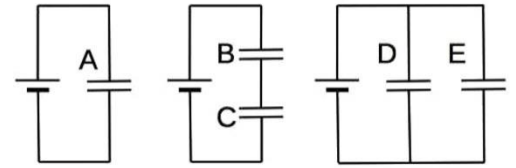
- Vertaa vastusten päiden välillä olevia jännitteitä.
- Vertaa sähkövirran suuruutta eri vastusten läpi.



CC1

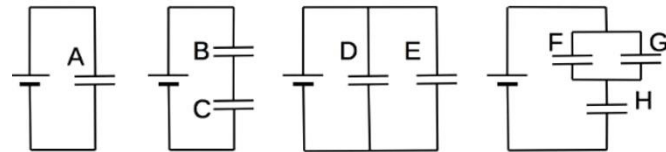
Alla esitetyt virtapiirit koostuvat samanlaisista paristoista ja samanlaisista kondensaattoreista. Vastaa alla oleviin tehtäviin.

1. Aseta kondensaattorit jännitteen mukaiseen järjestykseen.
2. Aseta kondensaattorit varauksen mukaiseen järjestykseen.



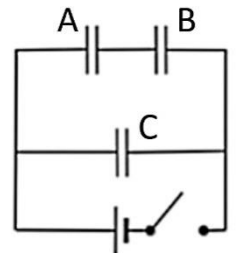
CC2 Alla esitetyt virtapiirit koostuvat samanlaisista paristoista ja samanlaisista kondensaattoreista. Vastaa alla oleviin tehtäviin.

1. Aseta kondensaattorit jännitteen mukaiseen järjestykseen.
2. Aseta kondensaattorit varauksen mukaiseen järjestykseen.



CC3

Kondensaattorit on kytketty kuvan osoittamalla tavalla. Kun kytkin suljetaan, minkä kondensaattorin jännite on korkein? Miksi?



5. Analyysi

Analyysi toteutettiin tarkastelemalla kutakin koetehtävän vastausta tässä työssä kehitellyllä mittarilla, joka esitellään seuraavassa kappaleessa. Mittarin avulla vastauksista tunnistettiin kriittisen ajattelun piirteitä. Aineiston analysoinnissa oli tärkeää valikoida ne kriittisen ajattelun piirteet, jotka ovat yhtäältä fysiikan kannalta oleellisia, ja joita toisaalta on mahdollista tulkita lyhyehköistä tekstivastauksista. Aineistoa oli määrällisesti paljon (N=140, koesuorituksia 28), joten mittarin kehittämisessä oli keskeistä optimoida toisaalta analyysin ajankäytön tehokkuus ja toisaalta myös analyysin kattavuus siten, että sen avulla pystyi löytämään vastauksista fysiikan kannalta tärkeitä kriittisen ajattelun piirteitä.

Ennisin kriittisen ajattelijan malli on varsin laaja ja se on tarkoituksella laadittu olemaan mahdollisimman kiistaton. Se on kuitenkin tämän tutkielman kannalta laajuudessaan epäkäytännöllinen, joten tämän tutkielman mittariin valikoitiin vain tähän työhön soveltuvat, varsinkin fysiikan kontekstissa oleelliset kriittisen ajattelun taidot ja osa-alueet, joiden avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä tutkimuskysymysten suunnassa.

5.1 Oman mittarin esittely

Kun tarkastellaan kriittisen ajattelun näkökulmasta sitä, kuinka ongelmanratkaisu etenee, voidaan se jakaa seuraaviin vaiheisiin: ongelman asettamiseen ja ratkaisun pohjustukseen, päätelmän tekemiseen sekä argumentointiin ja reflektointiin. Tutkimuksen aineistoa tarkastellessa kriittisen ajattelun näkökulmasta on siis tarpeellista etsiä sellaisia kriittisen ajattelun piirteitä ja taitoja, jotka ovat nähtävissä kokelaiden vastauksista, ja jotka mahdollistavat ongelmanratkaisun eri vaiheet. Aineiston analyysiin päätyi neljä etsittävää osa-aluetta, jotka valikoituivat kriittisen ajattelun yleisten piirteiden (Ennis 1991, Richhart & Perkins, 2005, Hyytinen, 2015), sekä CTEM –testissä mitattavien kriittisen ajattelun piirteiden pohjalta. Etsittävät kriittisen ajattelun taidot ovat syy-seuraussuhteen näkeminen, ongelman osa-alueiden ja olettamusten huomiointi, perustelu, ja ongelman kokonaisuuden huomiointi. Näistä kaksi ensimmäistä liittyvät ongelmanratkaisun ensimmäiseen ja toiseen vaiheeseen, kolmas päätelmän tekemiseen sekä argumentointiin, ja jälkimmäinen argumentointiin ja vastauksen reflektointiin.

Ennis (1991) tunnistaa syy-seuraussuhteen tunnistamisen liittyvän oleellisesti kriittisen ajattelun taitoihin. Lisäksi syy-seuraussuhteen merkitys kriittiseen ajatteluun on tunnistettavissa myös CTEM -testistä (Tiruneh ym., 2016) esimerkiksi hypoteesin testaukseen liittyvänä taitona. Ongelman osa-alueiden löytäminen ja olettamusten tekeminen ovat keskeisessä osassa kriittistä ajattelua niin Ennisin kriittisen ajattelijan taidoissa ja taipumuksissa (1991) kuin Fisherin kriittisen ajattelun määritelmässä (2001). CTEM -testin mittaamista kriittisen ajattelun taidoista osa-alueiden ja olettamusten huomiointi löytyy argumentin analyysi ja todennäköisyys ja epävarmuuden analyysi -alueilta. Väitteiden hyvä perustelu ja argumentointi vaatii kriittistä ajattelua ja kertoo, kuinka ongelmanratkaisija on tehnyt päätelmänsä. Argumentoinnin taitojen ja väitteiden perustelun rakentaminen on tärkeä osa kriittisen ajattelun taitoja Ennisillä (1991) ja Fisherillä (2001). Olemassa olevat kriittisen ajattelun mittarit kuten CTEM –testi mittaavat vastausten perustelun laatua (Tiruneh ym., 2016). Kokonaisuuden huomiointi löytyy sekä Ennisin kriittiselle ajattelijan taipumuksista että ajattelun taidoista. CTEM

-testissä kokonaisuuden huomiointi liittyy myös laajasti kriittisen ajattelun taitoihin.

1. Syy-seuraussuhteen tunnistaminen. Fysiikan ymmärtämisen näkökulmasta syy-seuraussuhteella tarkoitetaan tärkeää kykyä nähdä, mitkä käsitteiden väliset yhteydet ovat oleellisia, kuinka ne liittyvät toisiinsa, ja mikä tärkeintä, kuinka järkevä päättelyketju on. Onko johtopäätökseen päädytty hyvää ”reittiä” siten, että ongelman ratkaisu on edennyt kausaalisesti lähtien ilmiön syistä ja edennyt niiden aiheuttamiin seurauksiin. Sähköopissa on monia käsitteitä, jotka liittyvät ja vaikuttavat toisiinsa kumpaankin suuntaan, esimerkiksi jos vastuksen läpi kulkevaa virtaa kasvatetaan, kasvaa myös sen päiden välillä oleva jännite. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että virran kasvaminen aiheuttaa jännitteen nousun, vaan virta vastuksen sisällä itsessään johtuu sähköisestä epätasapainosta, eli oleellisesti potentiaali- eli jännite-erosta. Tällöin jännitteen kasvaminen on syy virran kasvamiselle.

2. Ongelman osa-alueiden ja olettamusten huomiointi. Fysiikan yksinkertaisetkin ongelmat rakentuvat monista osista ja alueista, jotka on päätelmässä otettava huomioon sekä yksittäin että osana ongelman kokonaisuutta. Onkin tärkeää tunnistaa ongelman eri osa-alueet, jotta sitä pystyy käsittelemään. Tilanteissa on myös aina mukana oletuksia, joita on tehtävä. Monesti ongelman kuvauksessa on jätetty mainitsematta yleisiä tietoja ja olettamuksia, jotka ratkaisijan on tehtävä itse, usein huomaamattaan. Esimerkiksi tämän tutkimuksen aineiston virtapiireissä on ongelmia, joissa samassa piirissä on komponentteja sekä sarjaan että rinnankytkettynä. Tilanteessa on tunnistettava sarjaan- ja rinnankytkennät erillisiksi aliongelmiksi ja käsiteltävä niitä erikseen, mutta myös suhteessa toisiinsa. Lisäksi jokaisessa tehtävässä on jännitelähde, johtimia ja komponentteja, joiden ideaalisuuksista ei ole mainittu lainkaan. On siis tehtävä oletus joko niiden ideaalisuudesta tai epäideaalisuudesta, joka saattaa vaikuttaa päättelyyn ratkaisevasti.

3. Perustelu Fysiikassa ongelmanratkaisun hyvä perustelu on erittäin tärkeää. Perustelu on ratkaisun laatimisen perusta, ja varsinkin koemuotoisessa testissä mihin kokeen suorittaja ”oikean vastauksen” lisäksi pyrkii. Kriittisen ajattelun kontekstissa perustelu liittyy vahvasti argumentoinnin taitoihin. Argumentointi on tärkeä osa kriittistä ajattelua, ja tarkoittaa sen kontekstissa kykyä perustella johtopäätös loogisella tavalla. Hyvässä argumentoinnissa väitteet ja johtopäätökset on tehty käyttäen järkeviä ja konsistenttejä tietoja ja askelia perustelun etenemisessä. Väitteet liittyvät toisiinsa ja johtopäätös seuraa väitteistä.

4. Ongelman kokonaisuuden huomiointi. Fysiikan ongelmat muodostuvat osasista, joiden tunnistaminen on tärkeää, mutta myös kokonaisuuden huomioiminen on tärkeää. Onko ratkaisun kannalta ajateltu oleellisia asioita ja käsitteitä, onko tarpeelliset ratkaisun vaiheet tehty, jätettiinkö jotain oleellista tekemättä ja tehtiinkö jotain ratkaisun kannalta tarpeetonta? Tähän osa-alueeseen kuuluu ratkaisun kannalta oleellista reflektointia siitä, miksi eri vaiheita ratkaisussa on suoritettu ja kuinka tarpeellisia ne ovat. Myös virhekäsitykset johtuvat monesti siitä, ettei ongelmia ja käsiterakenteita nähdä kokonaisuutena.

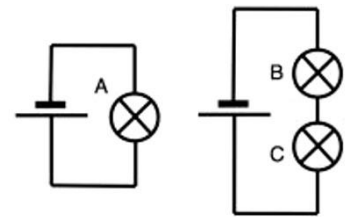
5.2 Analyysin vaiheet

Tutkimusaineisto (N=140 vastausta) analysoitiin kyseistä mittaria hyödyntäen siten, että jokaisesta mittarin osa-alueesta annettiin yksi piste, jos se voitiin tunnistaa vastauksesta. Alla on esitetty yksi esimerkki tutkimusaineiston vastauksesta ja tavasta, jolla kriittisen ajattelun piirteitä siitä tunnistettiin.

Esimerkki: tehtävä DC1

Virtapiiri koostuu ideaalisesta paristosta ja yhdestä lampusta (ks. kuva).

- Onko hehkulampun hehkulangassa sähkökenttä vai ei?
- Jos sähkökenttä on nolla, perustele miksi. Jos sähkökenttä on nollasta poikkeava, perustele miksi.



Kokelas 7. suorituskerta 5

”1. Kyllä on. 2. Liikkuva varaus aiheuttaa sähkökentän, jolloin jos virtapiirissä olevassa lampussa palaa valo, kulkee sen läpi silloin virta. Hehkulampuissa sähkövirta kulkee hehkulangan läpi, joka toimii vastuksena. Hehkulanka lämpenee ja alkaa hohtamaan valoa, kun sen läpi kulkee sähkövirta.”

Itse vastaus kohtaan a on teknisesti oikein, sillä hehkulangassa on sähkökenttä. Perustelu on kuitenkin monella tavalla puutteellinen, ja siitä voidaan havaita fysiikan kannalta virheellisiä oletuksia ja käsityksiä. Vastaus lähtee liikkeelle oletuksesta, että liikkuva varaus aiheuttaa sähkökentän. Tämän jälkeen oletetaan, että lamppu palaa, koska se on se kuumentunut piirissä kulkevan virran ansiosta. Virta

on tunnistettu varausten liikkeeksi, vaikkei sitä ole eksplisiittisesti ilmaistu, jolloin sähkökentän olemassaolo on perusteltavissa alkuoletuksen perusteella. Alkuoletuksen perusteella vaikuttaa, että vastauksessa on sekoitettu keskenään sähkö- ja magneettikentät, sillä johtimessa liikkuvat varaukset synnyttävät johtimen ympärille magneettikentän. Syy-seuraussuhde on siten mennyt oleellisella tavalla väärin päin. Virran olemassaolosta seuraa sähkökentän olemassaolo, vaikka kausaliteetti kulkee tällä tasolla toiseen suuntaan. Varaukset tuntevat kentässä voiman, joka työntää niitä kentän suuntaisesti ja ne lähtevät liikkeelle. Tehtävästä on jäänyt tunnistamatta tai käyttämättä oleellisia käsitteitä, jotka johtaisivat parempaan lopputulokseen. Kentän synnyn syynä on lopulta piirissä olevat potentiaalierot eli jännitteet. Vastauksessa on oletettu, että piirissä kulkee virta eli varaukset ovat liikkeessä. Kuitenkin on jäänyt refleктоimatta miksi ne liikkuvat, ja se on lopulta tehtävän tarkoitus. Vastauksen perustelu on kuitenkin looginen siinä mielessä, että mikäli alkuoletus ”liikkuva varaus aiheuttaa sähkökentän” pitäisi paikkaansa, olisi perustelu kohtalainen.

Tämä vastaus sai analyysissa yhden pisteen, sillä siitä voidaan tunnistaa yksi kriittisen ajattelun piirre neljästä analyysiin valitusta, perustelu, vaikka teknisesti väärin, on kuitenkin logiikaltaan pätevä ja kohtalaisesti rakennettu. Vastauksesta ei ole havaittavissa syy-seuraussuhteen kriittistä havainnointia, eikä vastaus saa pisteitä myöskään osa-alueiden ja olettamusten tunnistamisesta, eikä kokonaisuuden huomioinnista. Jokainen tehtävä analysoitiin ja pisteytettiin edellisessä kappaleessa esitetyllä tavalla, eli maksimipistemäärä jokaiselle vastaukselle on neljä.

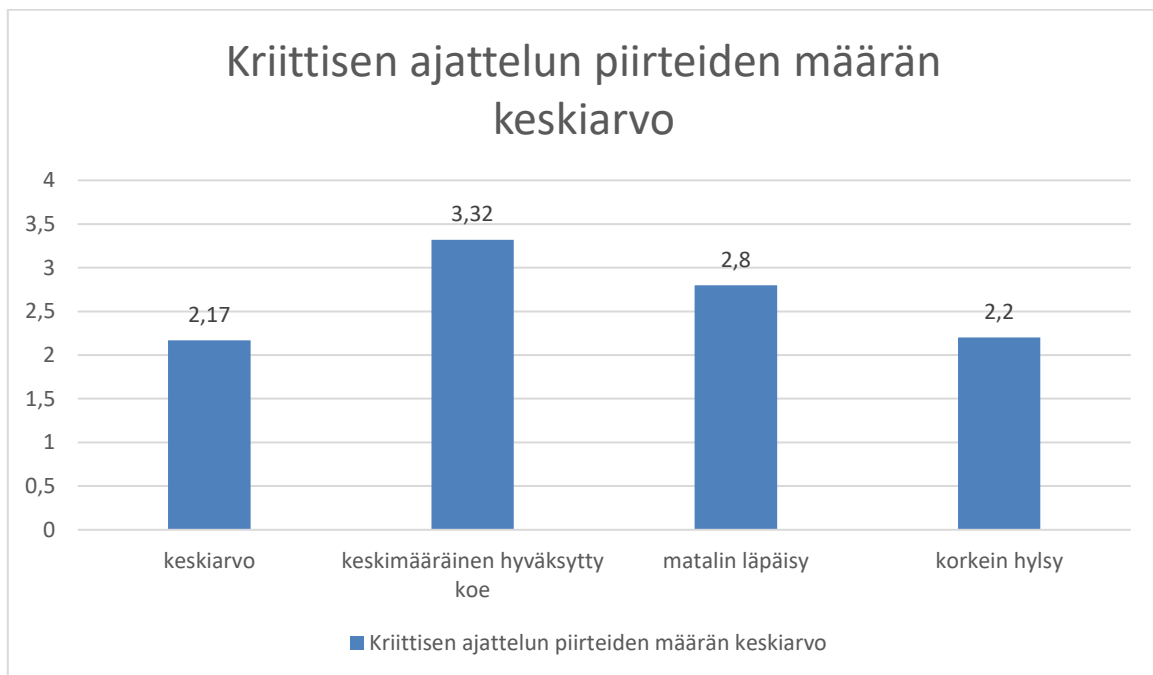
6. Tulokset

6.1 Kriittisen ajattelun piirteet tasavirtapiiritehtävien ratkaisuisa

Keskimääräisen koesuorituksen tehtäväkohtainen kriittisen ajattelun piirteiden määräksi saatiin analyysin perusteella 2,17 ja keskimääräiselle hyväksytylle kokeelle vastaava pistemäärä on 3,32. Tässä analyysissa ei oteta huomioon vastausten sisällöllisen tiedon traditionaalisempaa pisteytystä, mutta kriittisellä ajattelulla ja kokeen läpäisyillä voidaan selvästi havaita yhteys. Matalin hyväksytyyn kokeen¹ kriittisen ajattelun piirteiden pistemäärä oli tämän analyysin perusteella 2,8, ja hylättyjen ko-

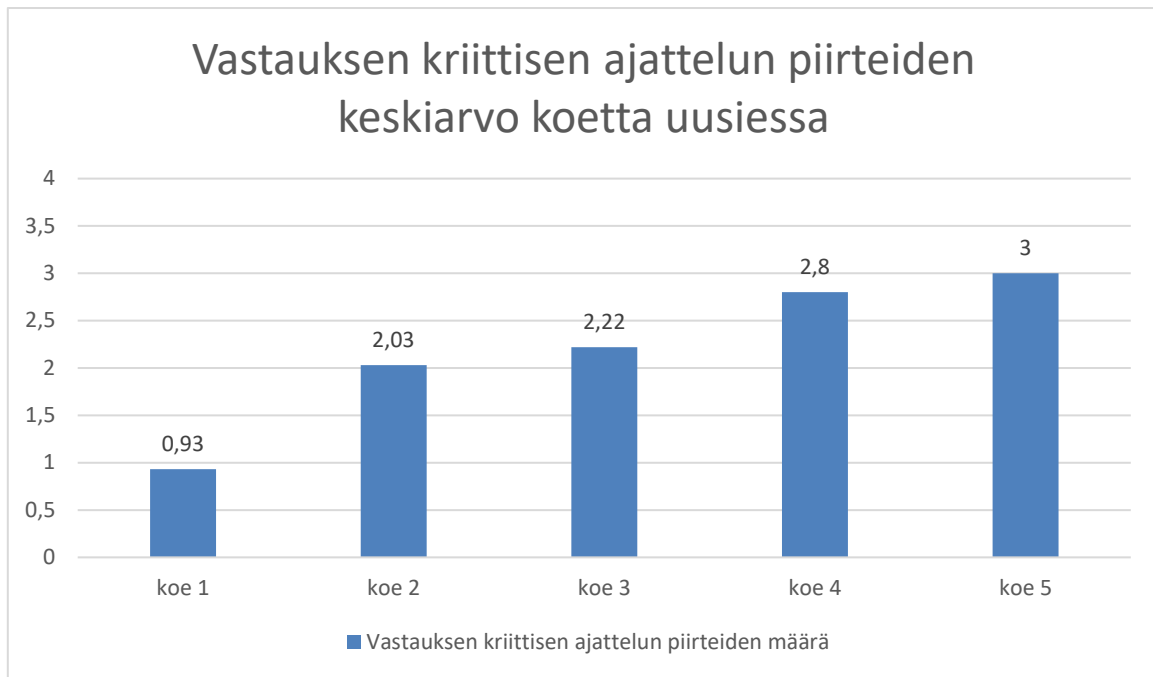
¹ Opiskelijoiden oli kurssilla suoritettava koe niin monta kertaa, että saivat läpipääsyyn vaadittavan hyväksytyyn suorituksen. (23/28 pistettä)

keiden korkein kriittisen ajattelun keskimääräinen pistemäärä oli 2,2. Hyväksytyt ja hylätyt koesuorituksen välillä on siis eroa paitsi traditionaalisemman pisteytyksen kannalta, mutta myös kriittisen ajattelun pisteiden osalta. Liitteen A taulukossa A1 on esitetty löydettyjen kriittisen ajattelun piirteiden määrä tehtävittäin kullekin koesuoritukselle. Kriittisen ajattelun piirteiden määräjien keskiarvot kaikista vastauksista ja keskimääräisestä hyväksytystä kokeesta kuvattiin kuvaajaan 1. Kuvaajaan on esitetty myös matalin kriittisen ajattelun piirteiden keskiarvo jolla koe on hyväksytty, sekä vastaavasti korkein keskiarvo jolla koetta ei ole hyväksytty.



kuvaaja 1: Tutkittujen kriittisen ajattelun piirteiden määrän keskiarvoja

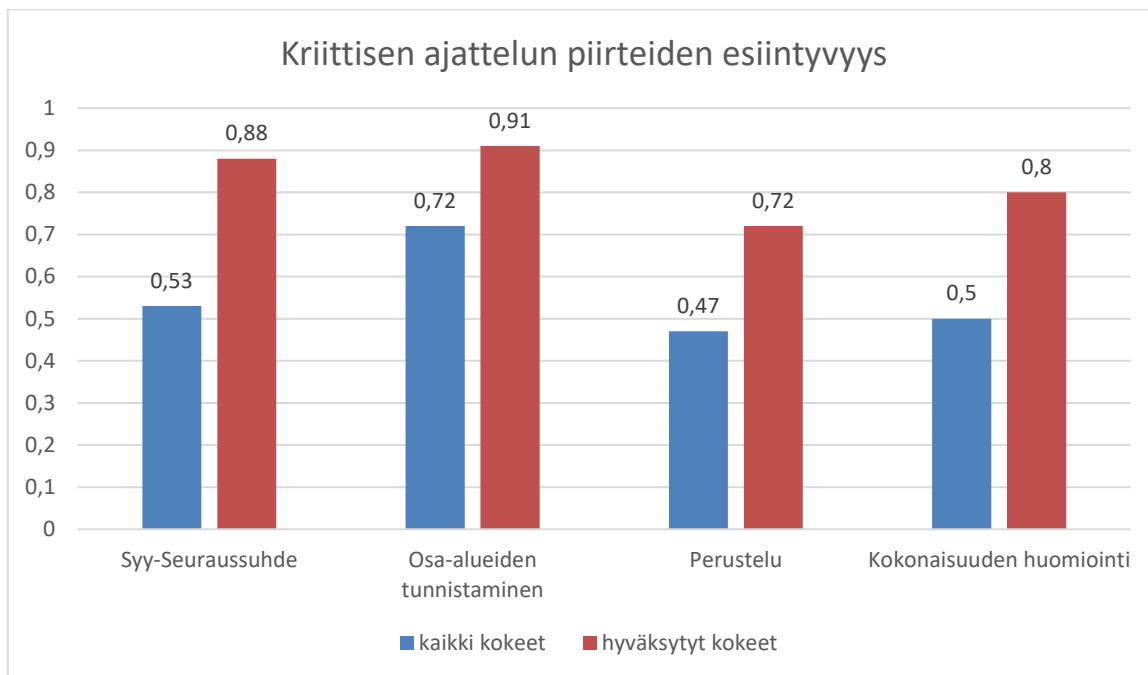
Tutkimuksessa tarkasteltiin myös kokelaiden kriittisen ajattelun piirteiden kehitystä näiden suorituskertojen välillä. Tässä ei suoranaisesti oteta kantaa vastausten sisällölliseen arviointiin, vaan ainoastaan siihen, sisältävätkö vastaukset viitteitä kriittisestä ajattelusta. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että kokelaat, jotka ovat suorittaneet kokeen useampaan kertaan, ovat myöhemmissä kokeissa saaneet paitsi enemmän pisteitä perinteisen sisällöllisen arvioinnin näkökulmasta, niin vastaukset ovat myös ilmentäneet enemmän kriittistä ajattelua. Kuvaajassa 2 on kuvattu kriittisen ajattelun piirteiden lukumäärien koekohtainen keskiarvo niiltä kokelailta, jotka suorittivat kokeen useammin kuin kerran. On nähtävissä, että myöhemmissä kokeissa esiintyy enemmän kriittisen ajattelun piirteitä.



kuvaaja 2: Kriittisen ajattelun piirteiden määrät koetta uusiessa.

Kriittisen ajattelun piirteiden keskimääräisen lukumäärän lisäksi on kiinnostavaa tietää, mitä yksittäisiä etsittyjä kriittisen ajattelun piirteitä vastauksissa näkyy, ja ovatko kokeessa menestyneet opiskelijat käyttäneet joitain tiettyjä kriittisen ajattelun taitoja enemmän kuin kokeessa huonommin menestyneet. Kunkin vastauksen kriittisen ajattelun piirteistä laskettiin kunkin yksittäisen piirteen koe-kohtainen esiintyvyys. Tulokset kirjattiin Liitteen A taulukkoon A2. Tuloksista laskettiin myös kullekin kriittisen ajattelun piirteelle keskimääräinen esiintyvyys sekä kaikissa koesuorituksissa että hyväksytyjen kokeiden kohdalla. Tulokset kerättiin kuvaajaan 3.

Havaitaan, että jotkut kriittisen ajattelun piirteet esiintyvät useammin kuin toiset. Yleisin analyysiin valikoituneista piirteistä on ongelman osa-alueiden tunnistaminen. Tämä piirre löytyy noin 72 prosentista kaikista vastauksista. Hankalin kriittisen ajattelun piirre taas näyttää olevan argumenttien perustelu, joka löytyy vain noin 47 prosentista vastauksista. Perustelu liittyy etsityistä kriittisen ajattelun piirteistä ehkä lähimmin perinteiseen koevastauksen pisteytykseen, onhan se arvioinnin kannalta tärkeä mittari sille, onko kokelas ymmärtänyt tehtävän vastauksen kannalta oleellisen fysiikan. Ero keskimääräisen koevastauksen, ja hyväksytyyn koevastauksen välillä näyttää kuitenkin olevan suurimmillaan syy-seuraussuhde, ja kokonaisuuden huomiointi osiossa. Perustelu osuudesta saadut pisteet uupuvat eniten myös hyväksytyissä kokeissa. joissa niissäkin vain 72 prosentista vastauksista löytyi riittävään perusteluun liittyvää kriittistä ajattelua.

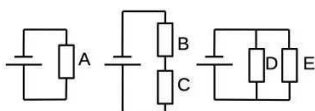


kuvaaja 3: Tutkittujen kriittisen ajattelun piirteiden keskimääräinen esiintyvyys.

6.2 Päättelyketjut ja ratkaisustrategiat

Vastauksia luokiteltiin sen mukaan, minkälainen päättelyketju ratkaisusta oli tulkittavissa. Vastauksista voitiin tunnistaa viisi erilaista strategiaa. Strategioiden lisäksi aineiston monissa vastauksissa havaittiin kaksi tyypillistä virhettä. Ratkaisustrategioiden analyysiin valikoituivat virtapiiritehtävä DC3 ja kondensaattoritehtävä CC1 niiden samankaltaisuuden takia, sillä kyseisten tehtävien virtapiirien kytkennät olivat muilta osin identtiset, paitsi tehtävässä DC3 oli vastuskomponentteja, ja tehtävässä CC1 vastaavat kytkennät oli toteutettu kondensaattoreilla. Kummankin tehtävän ratkaisussa voitiin tunnistaa samankaltaiset ratkaisustrategiat sekä keskenään analogiset tyypilliset virheet.

DC3

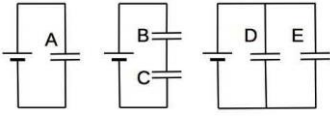


Alla esitetyt virtapiirit koostuvat samanlaisista vastuksista ja paristoista. Vastaa alla oleviin kysymyksiin Ohmin ja Kirchhoffin lakeja käyttäen.

1. Vertaa vastusten päiden välillä olevia jännitteitä.
2. Vertaa sähkövirran suuruutta eri vastusten läpi.

CC1

Alla esitetyt virtapiirit koostuvat samanlaisista paristoista ja samanlaisista kondensaattoreista. Vastaa alla oleviin tehtäviin.



1. Aseta kondensaattorit jännitteen mukaiseen järjestykseen.
2. Aseta kondensaattorit varauksen mukaiseen järjestykseen.

Kummankin tehtävän ensimmäisessä osassa kysytään komponenttien päiden välillä olevia jännitteitä, ja toisessa osassa vastusten läpi kulkevaa virtaa tai kondensaattoreihin kertynyttä varausta. Vaikka tehtävän osiot on numeroitu, ei mikään estä miettimästä jälkimmäistä osuutta ensin, tai yrittämällä ratkaista tehtävä jollakin toisella tavalla. Tehtävien ratkaisusta tunnistettiin viisi erilaista strategiaa, joissa ratkaisuun pyrittiin erilaisia reittejä.

Havaituissa ratkaisustrategioissa pyritään ratkaisemaan tai päättämään ensin

1. kunkin komponentin yli oleva jännite
2. kunkin komponentin läpi kulkeva virta
3. kunkin kondensaattorin varaus
4. piirin kokonaisresistanssi
5. piirin kokonaiskapasitanssi.

Strategiat 2 ja 4 liittyvät ensisijaisesti vastustehtäviin ja strategiat 3 ja 5 kondensaattoritehtäviin. Strategiat 2 ja 3 voidaan ajatella osittain rinnasteisiksi eri tehtävien välillä, ja samoin strategiat 4 ja 5. Tosin myös kondensaattoritehtävien vastauksista havaittiin strategiaa 2.

Lisäksi kummassakin tehtävässä on tunnistettavissa yleinen virhe, jossa jokaiseen piiriin, tai piirin haaraan kulkee sama virta kytkennöistä riippumatta. Lisäksi voitiin tunnistaa ajatus siitä, että koska sama virta kulkee joka piirissä ja haarassa, tämä virta on tuonut jokaiselle kondensaattorille saman määrän varausta. Tai vaihtoehtoisesti, jännitelähde jollakin tavalla tuottaa varausta vakiomäärän, joka on jakautunut tasan kondensaattorien kesken. Virheet näyttävät olevan yhteydessä toisiinsa, ja esiintyvät samoilla koesuorituskerroilla usein molemmissa tehtävissä. Tämän tyyppinen virhe voitiin tunnistaa kahdessakymmenessä koevastauksessa (35 prosenttia kaikista vastauksista).

6.2.1 Esimerkkejä eri strategioiden käytöstä ja tyypillisten virheiden esiintymisestä

Tehtävä DC3, vastaus kokelas 5, vastauskerta 2:

”Ohmin laki: $U=RI$. Kirchoffin 1.laki = Risteykseen tulevan virran summa on sama kuin risteyksestä lähtevän virran summa. $A = D = E = B > C$. Muissa on sama jännite, mutta C on pienempi jännitehäviön takia. $A = B = C > D = E$. Sähkövirran suuruus on sama A, B ja C, koska sama sähkövirta kulkee haarautumatta piirin läpi. D ja E sähkövirran suuruudet ovat pienemmät kuin A, B ja C Kirchoffin 1. lain mukaan, koska Sähkövirta haarautuu kahteen haaraan. D ja E sähkövirta keskenään sama eli puolet A, B ja C sähkövirroista, koska niiden vastukset ja jännitteet ovat samat.”

Vastauksessa on annettu ensin vastaus ensimmäiseen kysymykseen, mutta sen rakentaminen lähtee virran kautta. Vastaus kuuluu siis strategiaan 2. Lisäksi kokelas tulkitsee virheellisesti, että jokaisessa piirissä kulkee sama sähkövirta, joka sarjaankytkennässä kulkee kummankin vastuksen lävitse, ja rinnankytkennässä jakautuu puoliksi. ”Sähkövirran suuruus on sama A, B ja C, koska sama sähkövirta kulkee haarautumatta piirin läpi. D ja E sähkövirran suuruudet ovat pienemmät kuin A, B ja C ...koska Sähkövirta haarautuu kahteen haaraan”. Jännitekysymyksessä havaitaan virhe: BC sarjaankytkennässä virran tulosuunnasta katsottuna ensimmäisellä vastuksella sama jännite kuin A:lla, mutta toisella vastuksella pienempi jännite koska jännitehäviö ensimmäisessä on kuluttanut jännitettä pois.

Tehtävä CC1, vastaus kokelas 8, vastauskerta 3:

- 1. jännitelähde - komponenttien jännitehäviö = 0. Piirissä 2 on kaksi komponenttia sarjassa, jolloin jännitteen on jakauduttava näille molemmille eli vastuksien B ja C jännite on pienempi kuin A:ssa. Piirissä 3 E ja D ovat kytketty rinnan, jolloin niiden päiden välillä on sama jännite. Jännite vastaa samaa jännitettä, mikä A:lla on, koska niillä on sama jännitelähde. Jännite $(B=C) < (A=D=E)$.*
- 2. Kondensaattoreita kytkettäessä sarjaan varaus säilyy samana. Eli A ja B ja C saa saman varauksen. Piirissä kolme kondensaattorit ovat rinnan, jolloin lähdejännitteen tuottaman varauksen on jakauduttava molemmille komponenteille. Eli D ja E varaukset ovat samansuuruiset keskenään, mutta pienemmät kuin muissa. Varaus $(A=B=C) > (D=E)$*

Vastaus aloitetaan Kirchoffin jännitelaista, jonka avulla kokelas pyrkii ratkaisemaan ensin komponenttien yli olevan jännitteen, joten ratkaisu noudattaa strategiaa 1. Tällä tavoin on perusteltu jännitteen jakautuminen sarjaan kytkettyjen kondensaattorien kesken, mikä on perusteltu ja toimiva päätelyketju. Rinnankytkennän jännite on perusteltu olevan sama kuin yksittäisellä kondensaattorilla

käyttäen mallia, jossa komponentin navat ovat kiinni samalla tavalla samanlaisessa jännitelähteessä. Kyseessä on oikeastaan Kirchhoffin jännitelaki, mutta tällainen malli on havaittavissa monesta vastauksesta. Kakkoskohdassa havaitaan aineistossa yleisesti esiintyvä virhe: jännitelähde ”tuottaa” saman verran varausta joka piiriin, jolloin sen on rinnankytkennässä jakauduttava tasan kondensaattorien välille. Sarjaankytkennän varausta ei ole perusteltu, mutta luultavasti se johtuu ajatuksesta, että sama jännitelähde synnyttää joka piiriin saman virran, virta kulkee sarjaankytkennässä kummankin komponentin läpi ja varaa ne tällöin samalla tavalla kuin yksittäisen komponentin.

Esimerkkitehtävistä ensimmäisessä on siis lähdetty ratkaisemaan virtaa ensin, ja se sisältää ”sama virta joka haaraan” -tyyppivirheen. Toista tehtävää taas on ratkaistu jännitteen kautta, ja sekin sisältää tyypilliset virheet virrasta ja varauksesta. Vastaava luokittelu toteutettiin kaikille DC3 ja CC1 tehtäville. Tulokset on esitetty Liitteen A taulukossa A3, jossa on kuvattu ratkaisustrategia, kriittisen ajattelun piirteiden määrä, sekä tieto siitä, onko vastauksessa nähtävissä tyypillinen virhe.

Huomataan, että jännitteen ratkaiseminen tai päättely ratkaisun alkuvaiheessa on ylivoimaisesti yleisin strategia. Seuraavaksi tarkastellaan, onko strategian valinnalla yhteyttä kriittiseen ajatteluun, erityisesti syy-seuraussuhde-kategorian kannalta. Vaikka vastaus on mahdollisesti perusteltavissa järkevästi useaa eri reittiä, on syy-seuraussuhde varsinkin sähköopissa vaarana ymmärtää väärin. Koska Ohmin laki annetaan usein muodossa $U = RI$ on mahdollista ymmärtää se siten, että jännite seuraa virrasta ja resistanssista. Jos virran suuruutta on päätelty ensin jollakin tavalla, voi ongelmanratkaisijalle syntyä kiusaus rakentaa vastauksensa kausaaliteetti pääläellaan. Todellisuudessa virta syntyy, kun varaukset tuntevat sähkökentän ja siten potentiaalın epätasapainon, eli jännitteen, ja lähtevät johtimessa liikkeelle (Knight 2008).

Kriittisen ajattelun piirteiden keskimääräiset pisteet kullekin havaitulle ratkaisustrategialle kerättiin taulukkoon 1. Taulukkoon kerättiin myös kiinnostava tieto siitä, kuinka suuri osuus tehtävistä sisältää syy-seuraus-osa-alueen kriittistä ajattelua.

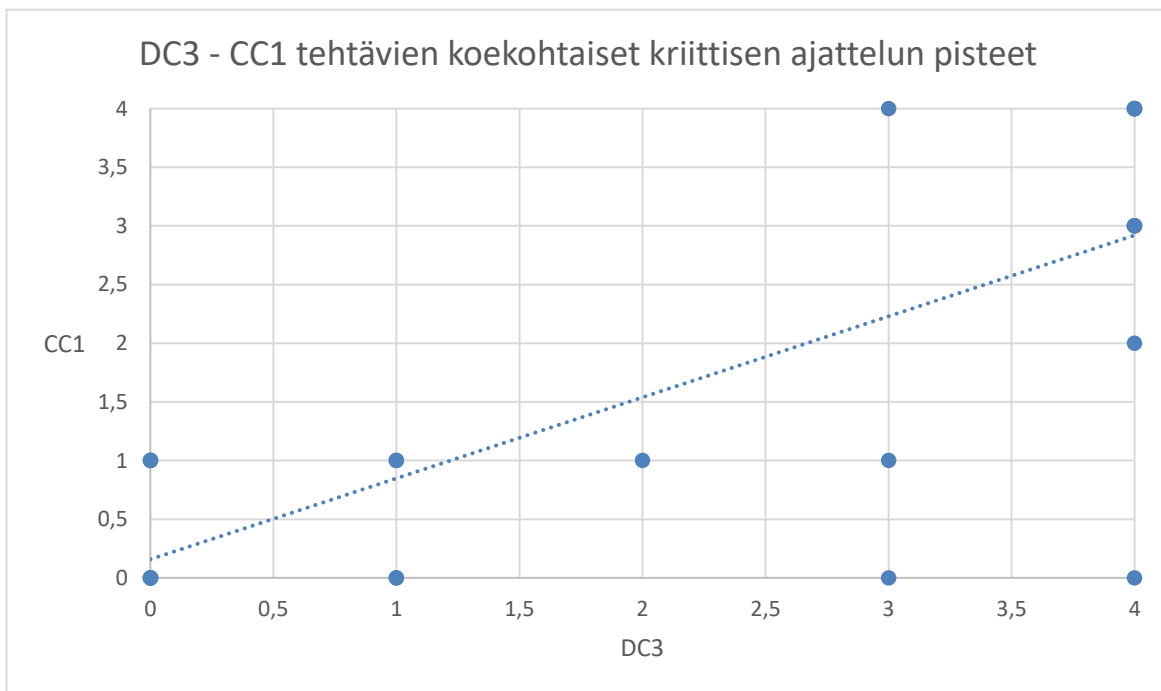
<i>Ratkaisustrategia</i>	<i>Kriittisen ajattelun piirteiden määrä keskimääräisessä vastauksessa</i>	<i>Prosentuaalinen osuus vastauksista, jotka saivat pisteen syy-seuraussuhde kategoriasta</i>
1. U (N = 37)	2,68	68 %
2. I (N = 8)	0,36	0 %
3. C (N=2)	0,64	0 %
4. R (N=2)	1,48	50 %
5. Q (N = 1)	4	100 %
6. Yleinen virhe (N = 20)	0,52	5 %

taulukko 1: Kriittisen ajattelun piirteet eri ratkaisustrategioissa. Maksimipistemäärä kriittisen ajattelun piirteitä on neljä

Tulosten perusteella näyttää siltä, että jännitteen päättely ensin on yleisin strategia (N=37). Se näyttää myös olevan yhteydessä kriittisen ajattelun esiintymisen kanssa, etenkin kun tarkastellaan syy-seuraussuhdetta. Yhdessäkään virta ensin -strategian vastauksessa ei löydy syy-seuraussuhde-kategorian kriittistä ajattelua. Virran ratkaiseminen ensin tai ratkaisun rakentaminen virran ratkaisun kautta ei ole varsinaisesti virhe. Hyvän ratkaisun voi perustella myös tätä kautta. Kuitenkin vaikuttaa siltä, että virran kautta ratkaisun rakentaminen ei ainakaan tässä aineistossa johtanut kovin usein toivottuihin lopputuloksiin. Huomionarvoista on, että vaikka kokonaisresistanssin ja kokonaisvarauksen kautta ratkaisuun päätyminen näyttää olevan yhteydessä kriittisen ajattelun kanssa, on aineistossa näiden vastausten osuus hyvin pieni, joten tämän suuntaisia yleistyksiä ei voida tehdä. Kokonaisresistanssin kautta ratkaisuun pyrittiin vain kahdessa vastauksessa, ja kokonaisvarauksen kautta ainoastaan yhdessä.

6.3 Siirtovaikutus tehtävien välillä

Tarkastellaan seuraavaksi, voidaanko havaita kriittisen ajattelun piirteiden siirtyvän tehtävyy-
pistä toiseen, ja sitä, onko kriittisen ajattelun piirteillä keskinäistä yhteyttä vastausten välillä. Tut-
kimuskysymyksessä kaksi tarkasteltujen tehtävien DC3 ja CC1 vastausten kriittisen ajattelun piir-
teiden määrät taulukoitiin ja pisteet piirrettiin koordinaatistoon (kuvaaja 4). Tehtävät valikoituivat
sillä perusteella, että ne löytyvät jokaisesta koesuorituksesta, ja koska ne ovat keskenään hyvin
samanlaiset. Tehtävissä virtapiirien rakenne on muuten samanlainen, mutta tehtävässä DC3 piirin
komponentit ovat jännitelähdettä lukuun ottamatta vastuksia ja tehtävässä CC1 kondensaattoreita.
Tehtävien samankaltaisuudesta voidaan olettaa kriittisen ajattelun mahdollisesti siirtyvän näiden
tehtävien välillä.



kuvaaja 4: Kriittisen ajattelun piireiden määrä tehtävissä DC3 ja CC1

Havaitaan, että datapisteisiin sovitettu suora näyttää muodostavan nousevan kuvion. Analyysin pe-
rusteella yhdessäkään koesuorituksessa ei ilmene tilannetta, jossa vastustehtävässä olisi ilmennyt vain
vähän etsittyjä kriittisen ajattelun piirteitä, mutta niitä olisi ollut kondensaattoritehtävässä paljon. Toi-
seen suuntaan sen sijaan yhteys ei ole yhtä selkeä. Yhdessä koesuorituksessa kokelas on ilmentänyt
DC3 tehtävässä kaikkia neljää mitattavaa kriittisen ajattelun piirrettä, mutta saanut silti nolla pistettä
kondensaattoritehtävästä. Tällaisia tapauksia on kuitenkin vain yksi, joten tämän perusteella ei voida

tehdä johtopäätöksiä. Seuraavaksi laskettiin taulukointiohjelmalla kaikkien väliset Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimet. Tulokset kerättiin taulukkoon 2:

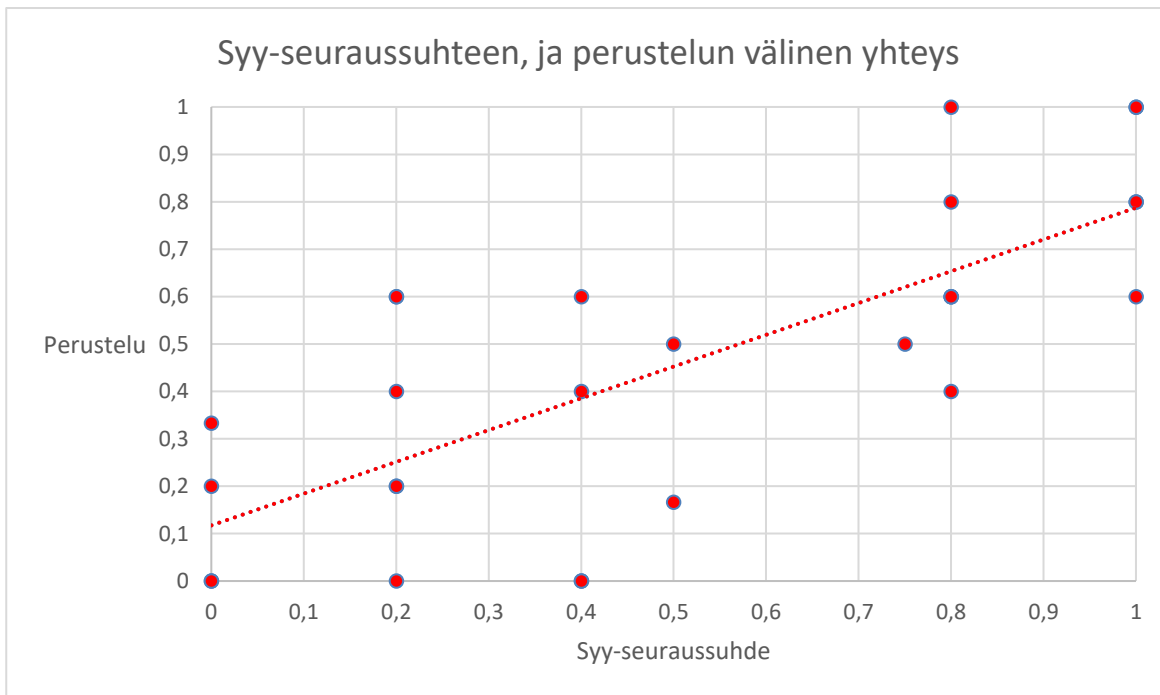
	<i>DC1</i>	<i>DC2</i>	<i>DC3</i>	<i>DC4</i>	<i>DC5</i>	<i>CC1</i>	<i>CC2</i>	<i>CC3</i>
<i>DC1</i>			0,15	-0,19	0,49	0,40	0,58	0,42
<i>DC2</i>			0,08	-0,5	-0,3	0,08	0,31	0,97 **
<i>DC3</i>	0,15	0,08		0,09	0,61 **	0,74 **	0,69 **	0,53
<i>DC4</i>	-0,19	-0,5	0,09			-0,05	0,28	0,37
<i>DC5</i>	0,49	-0,3	0,61 **			0,44	0,70 *	0,27
<i>CC1</i>	0,40	0,08	0,74 **	-0,05	0,44		0,59 *	0,77 **
<i>CC2</i>	0,58	0,31	0,69 **	0,28	0,70 *	0,59 *		
<i>CC3</i>	0,42	0,97 **	0,53	0,37	0,27	0,77 **		

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

taulukko 2: tehtävissä esiintyvän kriittisen ajattelun välinen korrelaatio

Kriittinen ajattelu tai sen puute näyttää siis siirtyvän tehtävästä toiseen ainakin samantyyppisten tehtävien välillä. Tilastollisesti merkitsevä korrelaatio nähdään esimerkiksi odotetusti tehtävien DC3 ja CC1 välillä ($p < 0,01$). Tehtävissä olevat kytkennät ovat identtiset, paitsi toisessa vastuskomponentit oli korvattu kondensaattoreilla. Toisaalta suurin osa tehtävistä näyttää olevan täysin riippumattomia toisistaan, ja osan välillä löytyy jopa negatiivinen korrelaatiokerroin, eli kriittisen ajattelun piirteiden määrä näyttää näiden tehtävien välillä olevan kääntäen verrannollinen keskenään. Nämä korrelaatiot eivät kuitenkaan ole tilastollisesti merkitseviä.

Tarkastellaan seuraavaksi kriittisen ajattelun piirteiden yhteyttä toisiinsa. Jokaisen koesuorituksen syy-seuraus-kategorian ja perustelukategorian kriittisen ajattelun keskimääräiset tehtäväkohtaiset pisteet taulukoitiin ja piirrettiin kuvaajaan (kuvaaja 5).



kuvaaja 5: syy-seuraus kategorian, ja perustelu- kategorian kriittisen ajattelun esiintyvyys.

Havaittiin, että näiden kriittisen ajattelun piirteiden välillä on yhteys: mikäli vastauksessa on nähty ilmiön syy-seuraussuhde hyvin, on ratkaisu todennäköisesti myös osattu perustella kriittisen ajattelun kannalta. Kaikista tehtävistä laskettiin analyysiin valikoituneiden kriittisen ajattelun piirteiden väliset Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimet, jotka taulukoitiin taulukkoon 3.

	<i>Syy-seuraus</i>	<i>Osa-alueet</i>	<i>Perustelu</i>	<i>Kokonaisuus</i>
<i>Syy-seuraus</i>		0,62 p < 0,001	0,75 p < 0,001	0,89 p < 0,001
<i>Osa-alueet</i>	0,62 p < 0,001		0,42 p = 0,027	0,73 p < 0,001
<i>Perustelu</i>	0,75 p < 0,001	0,42 p = 0,027		0,77 p < 0,001
<i>Kokonaisuus</i>	0,89 p < 0,001	0,73 p < 0,001	0,77 p < 0,001	

taulukko 3: Kriittisen ajattelun piirteiden välinen korrelaatio

Toisin kuin tehtäväkohtaisessa analyysissä, voidaan todeta, että kriittisen ajattelun osa-alueiden välillä näyttää löytyvän selvä yhteys. Jokaisen etsityn kriittisen ajattelun piirteen välillä löytyy tilastollisesti merkitsevä korrelaatio, joka on heikoimmillaankin osa-alueiden tunnistamis- ja perustelukategorioiden välillä, korrelaatiokertoimella 0,42. p = 0,027. Kriittisen ajattelun piirteet

näyttävät siis siirtyvän tasavirtapiiritehtävien sisällä tehtävätyypistä toiseen samatyypisten tehtävien välillä, ja analyysiin valitut kriittisen ajattelun piirteet näyttävät korreloivan merkitsevästi keskenään.

7. Pohdinta ja johtopäätökset

Tutkielman tavoitteena oli selvittää, millä tavoin kriittinen ajattelu ilmenee opettajaopiskelijoiden tasavirtapiiritehtävien ratkaisuisissa. Opiskelijat vastasivat tehtäviin kokeessa, jossa heille annettiin ratkaistavaksi kuusi tasavirtapiiritehtävää. Tutkimuksessa vastaukset analysoitiin etsimällä kustakin vastauksesta kriittisen ajattelun piirteitä, jotka valikoituivat analyysiin kriittisen ajattelijan taitojen ja taipumusten perusteella (Ennis, 1991; Siegel, 1988; Fisher, 2001; Richhart, 2002), sekä olemassa olevan kriittisen ajattelun mittarin (Tiruneh ym., 2016) avulla. Analyysissä tutkittiin, mitä erilaisia kriittisen ajattelun piirteitä vastauksista ilmenee, kuinka paljon kriittistä ajattelua kokelaat ovat esittäneet, kuinka erilaiset ajattelumallit ilmenevät ja nähdäänkö ajatteluketjun ja kriittisen ajattelun välillä yhteyttä. Lopuksi tutkittiin, siirtyvätkö kriittisen ajattelun piirteet tehtävien välillä.

Kriittisen ajattelun piirteitä havaittiin enemmän sellaisten kokeiden ratkaisuisissa, joiden pisteet olivat riittäneet kokeen läpäisyyn. Kriittisellä ajattelulla ja perinteisemmällä vastauksen arvioinnilla eli koemenestyksellä näyttää olevan yhteys. Ne kokeen suorittajat, jotka yrittivät koetta useammin kuin kerran, osoittivat myöhemmillä suorituskerroilla vastauksissaan enemmän kriittisen ajattelun piirteitä. Tämä saattaa johtua siitä, että suorituskerroilla fysiikan osaaminen on kasvanut esimerkiksi paremman kokeeseen valmistautumisen myötä, tai siksi, että koekysymykset ovat tulleet edellisillä suorituskerroilla tutuiksi. Fysiikan kokeessa mitataan ensisijaisesti fysiikan taitoja, mutta koska propositionaalinen sisältötieto on kiinteä osa kriittistä ajattelua kussakin kontekstissa (Tiruneh ym., 2016), on ymmärrettävää, että kriittisellä ajattelulla on yhteys koemenestyksen kanssa. Tämän tutkimuksen mukaan tällainen yhteys on olemassa, mutta tutkimuksen pohjalta ei voida tehdä yleisempiä johtopäätöksiä siitä, että juuri parempi kriittinen ajattelu olisi johtanut toivottaviin johtopäätöksiin. Hyväksytyn ja hylätyn kokeen välillä suurin ero kriittisen ajattelun piirteissä näytti olevan syy-seuraussuhteen huomioinnissa ja ongelman kokonaisuuden tarkastelussa. Näillä osa-alueilla saattaa olla vahvempi yhteys fysiikan tiedon ja ymmärryksen kanssa. Yleisin kriittisen ajattelun piirre sekä hyväksytyissä että hylätyissä kokeissa oli ongelman osa-alueiden tunnistaminen. Kokelailla ei ollut merkittäviä ongelmia tunnistaa sarjaan- ja rinnankytkentöjä tai komponentteja toisistaan. On kuitenkin huomionarvoista, että keskimääräisessä tehtävän vastauksessa esiintyi ainoastaan noin puolet etsityistä kriittisen ajattelun piirteistä. On yllättävää, että yliopisto-

opiskelijoilla esiintyy näin vähän kriittistä ajattelua yksinkertaisissa virtapiiritehtävissä. Samansuuntaisia tuloksia on löytynyt myös muissa tutkimuksissa, joissa virtapiirit on havaittu haastaviksi myös yliopistossa (esim. Kokkonen ym., 2016; Kokkonen ym., (2018)).

Kun tutkittiin virtapiiritehtävien ratkaisuihin ilmeneviä ajatuskulkuja ja ratkaisustrategioita, havaittiin mielenkiintoinen tulos. Kun ratkaistaan tehtävä päättämällä komponenttien yli olevat jännitteet ensin, vastauksessa näkyy huomattavasti enemmän kriittistä ajattelua. Erityisesti syy-seuraussuhteen havaitseminen näyttää olleen hyvin haastavaa, mikäli ratkaisua on yritetty jollakin toisella strategialla. Esimerkiksi komponenttien läpi kulkevan virran päättely ennen jännitettä ei varsinaisesti ole virhe, mutta se näyttää olevan yhteydessä siihen, ettei sähköpiirissä kulkevan virran, jännitteen, ja resistanssin relaatiota ja kausaliteettia ole kunnolla ymmärretty. Aineistossa on myös havaittavissa yleinen virhe, jossa paristo tuottaa samansuuruisen vakiovirran erilaisiin piireihin. Monesti tämä virhe esiintyy samassa vastauksessa kuin ”virta ensin” -ratkaisustrategia. Kondensaattoripiireissä tällaisen virheen rinnalla esiintyi usein ajatus siitä, että jokaisessa piirissä kaikki kondensaattorit ovat asettuneet samaan varaukseen. Tämä liittyy sellaiseen käsitykseen, jossa jokaisessa piirissä kulkee samansuuruisen virta, joka tuo kuhunkin kondensaattoriin saman määrän varausta. Sähköoppiin ja virtapiireihin sisältyy monia yleisiä virhekäsityksiä, joista tämä on yksi hyvin tyypillinen (Kokkonen ym., 2018). Tässä tutkielmassa ei varsinaisesti etsitty virhekäsityksiä ja tutkittu niiden esiintyvyyttä, mutta tällaiset virheet olivat yllättävän yleisiä, ja ne olivat kääntäen yhteydessä kriittisen ajattelun esiintymiseen.

Tarkasteltaessa kriittisen ajattelun siirtovaikutusta tehtävien välillä ja sisällä havaitaan odottamaton tulos: eri tehtävien välillä näyttää olevan varsin heikko korrelaatio kriittisen ajattelun esiintymisessä. Vain jos tehtävät ovat hyvin samantyyppisiä, voidaan ennustaa toisessa tehtävässä esiintyvää kriittistä ajattelua toisen tehtävän perusteella. Sen sijaan kriittisen ajattelun eri piirteiden välillä on nähtävissä vahvempi yhteys, ja kriittisen ajattelun piirteet näyttävät siirtyvän tehtävien ja tehtävätyyppien välillä. Tutkimuksen tulosten perusteella näyttäisi siltä, että kriittinen ajattelu korreloi koemenestyksen ja fysiikan ymmärryksen kanssa. Saattaisi olla paikallaan, että ajattelun taitojen opettamiseen ja harjoitteluun voitaisiin panostaa koulutuksessa enemmän. Vain noin 40 prosenttia korkeakouluopiskelijoista tällaiset yleiset taidot ovat hyvällä tasolla (Ursin ym., 2021). Alakohtaisia taitoja luonnollisesti tulee harjoiteltua kussakin oppiaineessa, mutta koska opettajat harvoin näkevät yleisten taitojen opettamisen kuuluvan heille (Barrie, 2006, 2007), olisi hyvä kenties käyttää kriittisen ajattelun opettamiseen tietoisesti resursseja. Toinen huomio liittyy ratkaisustrategioihin ja syy-seuraussuhteeseen nimenomaan sähköopin kontekstissa. Vaikka ”virta ensin” -tyyppinen strategia ei

ole sellaisenaan väärin, saattaisi olla hyvä korostaa opetuksessa virtapiiritehtävien ratkaisua jännitteen kautta. Myös virran synnyn ja jännitteen yhteys näyttää tämän tutkimuksen perusteella jäävän monella epäselväksi, ja tähän voisi opetuksessa kiinnittää enemmän huomiota. Oppikirjoissa Ohmin laki on usein esitetty suorana verrannollisuutena, $U=RI$, joka saattaa osaltaan aiheuttaa epäselvyyttä suureiden syy-seuraussuhteesta. Muodossa $I = U/R$ olisi kenties helpompi ymmärtää virran olevan seurausta jännitteestä.

Tutkimusta tarkastellessa on otettava huomioon valitun analyysimenetelmän sekä otannan vaikutus tuloksiin. Aineisto on kerätty fysiikan opettajaopiskelijoilta, joten kovin laajojen johtopäätösten tekeminen ei suppean otannan vuoksi ole mahdollista. Analyysimenetelmä on myös sovellettu teorian ja olemassa olevien kriittisen ajattelun mittarien pohjalta, mutta tutkimuksen luotettavuutta lisäisi, mikäli suoritettaisiin rinnakkaisanalyysi, tai jos analyysi suoritettaisiin toisella mittarilla. Näin saatuja tuloksia voitaisiin vertailla ja tutkia, saadaanko samoja johtopäätöksiä. Jatkotutkimuksissa voitaisiin perehtyä kriittisen ajattelun ja virhekäsitysten yhteyksiin, sekä tutkia, havaittaisiinko kriittiselle ajattelulle siirtovaikutusta hieman laajemmilla fysiikan osa-alueilla. Olisi esimerkiksi mielenkiintoista nähdä, havaittaisiinko kriittisen ajattelun piirteiden välillä yhteyksiä, jos samat koehenkilöt suorittaisivat tehtäviä sähköopin lisäksi esimerkiksi mekaniikasta.

Lähteet

- Arum, R., Roksa, J. (2011). Limited Learning on College Campuses. *Soc* 48, 203
- Attali, Y. (2014). A Ranking Method for Evaluating Constructed Responses. *Educational and Psychological Measurement*, 74(5), 795–808.
- Barrie, S. C. (2006). Understanding what we mean by the generic attributes of graduates. *Higher Education*, 51(2), 215–241.
- Barrie, S. C. (2007). A conceptual framework for the teaching and learning of generic graduate attributes. *Studies in Higher Education*. 32. 439–458.
- Bensley, D.A. (2011), “Rules for reasoning revisited: toward a scientific conception of critical thinking”, Teoksessa Ch. P. Horvath, J. M. Forte (toim.), *Education in A Competitive and Globalizing World: Critical Thinking*, (s.1–36) New York: Nova Science Publishers
- Call, J. Tomasello M, (2005) Reasoning and thinking in nonhuman primates. Teoksessa Holyoak, K. & Morrison, G (toim.), *Cambridge handbook of critical thinking*, (s.607–632) Cambridge: Cambridge university press
- Dewey, J. (1910). *How we think*. Boston, MA: D. C. Heath & Co.
- Dunbar, K., Fugelsang, J. (2005) Scientific Thinking and Reasoning Teoksessa Holyoak, K. & Morrison, G (toim.), *Cambridge handbook of critical thinking*, (s.705–725) Cambridge: Cambridge university press
- Ennis, R. (1991). Critical thinking: a streamlined conception. *Teaching Philosophy*, 14(1), 5–24. <https://doi.org/10.5840/teachphil19911412>
- Ennis, R. H., Millman, J. & Tomko, T. N. (1985). *Cornel critical thinking test level Z*. Pacific Grove, CA: Midwest publications.
- Fischer, F., Chinn, C., Engelmann, K & Osborne, J. (2018). *Scientific Reasoning and Argumentation: The Roles of Domain-Specific and Domain-General Knowledge*. Abingdon: Routledge.
- Fisher, A. (2001). *Critical thinking: An introduction*. Cambridge: Cambridge University press.
- Fox, K. C., Andrews-Hanna, J. R., & Christoff, K. (2016). The neurobiology of self-generated thought from cells to systems: Integrating evidence from lesion studies, human intracranial electrophysiology, neurochemistry, and neuroendocrinology. *Neuroscience*, 335, 134–150.

- Halpern, D. F. (1993). Assessing the effectiveness of critical-thinking instruction. *The Journal of General Education*, 42(4), 238–254.
- Halpern, D. F. (2010). *The halpern critical thinking assessment: Manual*. Modling, Austria: Schuhfried GmbH.
- Halpern, D. F. (2014). *Thought and knowledge (5th ed.)*. New York, NY: Psychology Press.
- Holma, K. (2016). The Critical Spirit: Emotional and Moral Dimensions Critical Thinking. *Studier i Pædagogisk Filosofi*. 4. 17. 10.7146/spf.v4i1.18280.
- Holyoak, K. Morrison, G. (2005) *Cambridge handbook of critical thinking* Cambridge: Cambridge university press
- Holyoak, K. Morrison, G. (2005) Thinking and reasoning: a readers guide Teoksessa Holyoak, K. & Morrison, G (toim.), *Cambridge handbook of critical thinking*, (s.1–9) Cambridge: Cambridge university press
- Hyytinen, H. (2015). *Looking Beyond the Obvious: Theoretical, Empirical and Methodological Insights into Critical Thinking*. University of Helsinki.
<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/154312>
- Hyytinen, H., Postareff, L. & Lindblom-Ylänne, S. 2020. Challenges in exploring individual's conceptions of knowledge and knowing: Examples of research on university students. Teoksessa E. K. Kallio (toim.) *Development of Adult Thinking: Interdisciplinary Perspectives on Cognitive Development and Adult Learning*. London: Routledge, 177–190.
- Hyytinen, H., Toom, A., & Shavelson, R. J. (2019). Enhancing Scientific Thinking Through the Development of Critical Thinking in Higher Education. Teoksessa M. Murtonen, & K. Balloo (toim.), *Redefining Scientific Thinking for Higher Education: Higher-Order Thinking, Evidence-Based Reasoning and Research Skills* (pp. 59–78). London: Palgrave Macmillan.
- Kant, I (1781). *Kritik der reinen Vernunft*; 1781
- Klahr, D. (2000). *Exploring Science: The Cognition and Development of Discovery Processes*. Cambridge: MIT Press
- Knight, R. D. (2008). *Physics for scientists and engineers: A strategic approach: with modern physics*. San Francisco: Pearson
- Kokkonen, T., & Mäntylä, T. (2018). Changes in University Students' Explanation Models of DC Circuits. *Research in Science Education*, 48(4), 753–775.

- Koponen, I. T., & Nousiainen, M. K. (2015). Didaktinen fysiikka opettajankoulutusta suuntaamassa. *LUMAT: International Journal on Math, Science and Technology Education*, 3(6), 729–743. <http://www.luma.fi/lumat/4102>
- Kuhn, D. (2005). *Education for thinking*. Cambridge, MA: Harvard University Press. p. 113
- Lawson, A. (1978). The development and validation of a classroom test of formal reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*, 15(1), 11–24.
- Lindblom-Ylänne, S., Lonka, K. & Leskinen, E. (1996). Selecting students for medical school: What predicts success during basic science studies? A cognitive approach. *Higher Education* 31: 507–527.
- McMurray, M.A., Beisenherz, P. and Thompson, B. (1991), Reliability and concurrent validity of a measure of critical thinking skills in biology. *J. Res. Sci. Teach.*, 28: 183–191.
- Muller Mirza, Nathalie & Perret-Clermont, Anne-Nelly. (2009). *Argumentation and Education: Theoretical Foundations and Practices*. New York: Springer
- Oljar, E., & Koukal, D. R. (2019). How to make students better thinkers. *The Chronicle of Higher Education*. 9 Feb 2019. Noudettu osoitteesta: https://www.academia.edu/38283261/How_to_Make_Students_Better_Thinkers luettu 25.5.2021
- Ritchhart, R. (2002). *Intellectual character: What it is, why it matters, and how to get it*. San Francisco, CA: Jossey-Bass
- Ritchhart, Ron & Perkins, D.N. (2005). Learning to think: The challenges of teaching thinking. Teoksessa Holyoak, K. & Morrison, G (toim.), *Cambridge handbook of critical thinking*, (s.775–802) Cambridge: Cambridge university press
- Shavelson, R. (2010). On the measurement of competency. *Empirical Research in Vocational Education and Training*. 2. 41–63.
- Siegel, H. (1988). *Educating for reason: Rationality, critical thinking, and education*. New York: Routledge.
- Siegel, H. (1991), The Generalizability of Critical Thinking. *Educational Philosophy and Theory*, 23: 18–30.
- Smith, Gerald. (2002). Are There Domain–Specific Thinking Skills? *Journal of Philosophy of Education*. 36. 207–227.

Tiruneh, D, & De Cock, M & Weldeslassie, A & Elen, J & Janssen, R. (2016). Measuring Critical Thinking in Physics: Development and Validation of a Critical Thinking Test in Electricity and Magnetism. *International Journal of Science and Mathematics Education*. 15. 10.1007/s10763-016-9723-0.

Tynjälä, P., Slotte, V., Nieminen, J. T., Lonka, K., & Olkinuora, E. (2006). From university to working life: graduates' workplace skills in practice. Teoksessa P. Tynjälä, J. Välimaa, & G. Boulton-Lewis (toim.), *Higher education and working life: collaborations, confrontations and challenges* (s. 77–88). (Advances in learning and instruction series). Elsevier Earli.

Ursin, J., Hyytinen, H., & Silvennoinen, K. (Eds.) (2021). *Korkeakouluopiskelijoiden geneeristen taitojen arviointi: Kappas! -hankkeen tuloksia*. (Opetus- ja kulttuuriministeriön julkaisu; No. 2021:6). Opetus- ja kulttuuriministeriö. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-263-892-2>

Liite A

kokelas	koe	Tehtävä							
		DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	CC1	CC2	CC3
1	1	2		0	1		0		3
	2	1		3	2		1		2
	3	1		4		4	3	4	
2	1	4		4		4	3		4
3	1		0	4		4	3	1	0
4	1		1	1	2		0		0
	2	1		4	1		4	1	
	3		2	4		3	4		4
5	1	1		0	2		0	1	
	2		0	0		3	0	0	
	3		3	0		0	0	1	
	4	3		3		4	4		4
6	1	0		1	1	0	0	0	0
	2		2	4		3	4		4
7	1		1	0	1		1	0	
	2	0		0		4	1	1	
	3		0	1		4	1	1	
	4		3	1		4	1	1	
	5	1		4	4		3		3
8	1		2	0		1	0	0	
	2	1		0		3	1		2
	3	1		3	1		0	0	
	4	1		4		4	2		3
9	1		2	4		4	0	3	
10	1	4		4		4	4	4	
11	1	4		2	1		1		0
	2		2	4	1		4	3	
12	1		2	4		4	4		4

taulukko A1: Kriittisen ajattelun piirteiden määrä kussakin tehtävässä

		Kriittisen	ajattelun	piirteet	
kokelas	koe	Syy-Seuraus	Osa-alueet	Perustelu	Kokonaisuus
1	1	0,4	0,6	0	0,2
	2	0,4	1	0	0,4
	3	0,8	1	0,6	0,8
2	1	1	1	0,8	1
3	1	0,75	1	0,5	0,67
4	1	0	0,6	0	0,2
	2	0,4	0,8	0,6	0,4
	3	0,8	1	0,6	1
5	1	0	0,75	0	0
	2	0,2	0,2	0,2	0
	3	0,2	0,2	0,4	0,2
	4	1	1	0,6	1
6	1	0	0,33	0,33	0
	2	1	0,8	0,8	0,8
7	1	0	0,4	0,2	0
	2	0,4	0,4	0,4	0,4
	3	0,2	0,8	0,6	0,4
	4	0,2	0,8	0,6	0,4
	5	0,8	0,6	0,8	0,8
8	1	0,2	0,2	0,2	0
	2	0,2	0,8	0	0,4
	3	0,5	0,5	0,16	0,33
	4	0,8	1	0,4	0,6
9	1	0,8	0,8	1	0,8
10	1	1	1	1	1
11	1	0,5	0,5	0,5	0,5
	2	0,8	1	0,6	0,4
12	1	1	0,75	1	0,75

taulukko A2: Kriittisen ajattelun piirteiden esiintyvyys

kokelas	koe	Ratkaisustrategia	DC3		Ratkaisustrategia	CC1	
			Kriittisen ajattelun pisteet	Tyypillinen virhe		Kriittisen ajattelun pisteet	Tyypillinen virhe
1	1	I	0	X	C	0	
	2	U	3		C	1	X
	3	U	4		U	3	
2	1	U	4		U	3	
3	1	U	4		U	3	
4	1	U	1			0	
	2	U	4		U	4	
	3	U	4		U	4	
5	1	I	0	X		0	
	2	I	0	X	U	0	X
	3	U	0	X	U	0	X
	4	U	3		U	4	
6	1	R	1	X		0	
	2	U	4		Q	4	
7	1	U	0		U	1	
	2	U	0	X	I	1	X
	3	U	1	X	I	1	X
	4	U	1	X	I	1	X
	5	U	4		U	3	
8	1	I	0	X	I	0	X
	2	U	0	X		1	X
	3	U	3		U	0	X
	4	U	4		U	2	X
9	1	U	4		U	0	
10	1	U	4		U	4	
11	1	R	2		C	1	
	2	U	4		U	4	
12	1	U	4		U	4	

U = ”Jännite ensin” I = ”virta ensin” R = ”kokonaisvastus ensin” C = ”kokonaiskapasitanssi ensin”,
Q = ”kokonaisvaraus ensin”

taulukko A3: Kriittisen ajattelun, ja ratkaisustrategian yhteys tehtävissä DC3 ja CC1