



Evoluutiota koskeva lähtötaso ja ymmärryksen kehittymisen moninaiset polut biotieteiden yliopisto-opinnoissa

TOMI KIVILUOMA¹ JA ILONA SÖDERVIK¹

tomi.kiviluoma@helsinki.fi

¹Helsingin yliopisto, kasvatustieteellinen tiedekunta, Yliopistopedagogiikan keskus (HYPE)

Tiivistelmä

Evoluutio edustaa yhtä biologian keskeisimmistä ilmiöistä, jonka osaaminen kuuluu alan perustaitoihin. Tästä huolimatta vielä yliopistossakin evoluution mekanismit ovat tutkitusti haastavia oppia. Lähtötason tiedetään ennustavan menestystä opinnoista, mutta tiedon ja osaamisen vaikutusmekanismit oppimiselle ovat moninaiset. Tutkimme biologian ja ympäristötieteiden kandiopiskelijoiden (N = 50) evoluutioilmiön ymmärryksen kehittymistä kahden vuoden ajan. Toistimme avoimia kirjallisia tehtäviä sisältävän kyselylomakkeen kolmesti syksyisin (2019, 2020, 2021). Opiskelijoiden lähtötasossa oli suurta hajontaa ja lähtötaso ennusti käsitteellisen ymmärryksen kehityksessä tapahtuneita määrällisiä ja laadullisia muutoksia. Ensimmäinen opintovuosi tasoitti osaamisen eroja opiskelijoiden välillä, mutta kolmantena vuonna heikomman lähtötason opiskelijoiden tiedon karttuminen seisautui. Tuloksemme korostavat aiemman tiedon laadun merkitystä uuden oppimiselle ja tieteellisemmän käsityksen omaksumiselle.

Avainsanat

evoluutio, ennakkokäsitykset, käsitteellinen ymmärrys, yliopisto-oppiminen

Conceptual understanding about evolution: The diversity of learning paths in undergraduates

Abstract

This longitudinal study explored the development of a conceptual understanding about evolution and how prior knowledge about the topic affects knowledge acquisition. Undergraduate students (N = 50) of biological and environmental sciences participated in three measurement points – baseline (2019), follow-up 1 (2020), and follow-up 2 (2021) – completing the same questionnaire with open-ended tasks. A mixed-methods approach was used for quantitative scoring of the answers and qualitative thematic analysis to describe the development of individual students' conceptual understanding. Some lower-prior-knowledge students experienced desirable shifts in their explanatory models about evolutionary processes, but an equal amount exhibited fragmented learning progress. Students with a more robust prior understanding of such a complex, emergent phenomenon are more likely to perform better and can integrate more scientific concepts in their knowledge framework. Our results underline the importance of the quality of prior knowledge for adopting a more scientific understanding.

Keywords

evolution, higher education, conceptual understanding, prior knowledge

Johdanto

Luonnontieteiden monet teoriat ja ilmiöt haastavat oppijaa arkijärjen vastaisilla mekanismeillaan (Thacker & Sinatra, 2022; Vosniadou, 2014). Biologian opetuksessa yksi tällaisista haastavimmista ja eniten tutkituista ilmiöistä on evoluutio (Bishop & Anderson, 1990; Evans, 2013; Gregory, 2009; McLure ym., 2020). Evoluution läpileikkaava merkitys biologian tieteenalalle on kiistaton. Dobzhansky (1973) mukailen, ilman evoluutiota mikään biologiassa ei käy järkeen. Evoluution mekanismien ymmärtäminen kuuluukin biologian oppiaineen perustaitoihin ja luonnontieteissä laajemmin vaikuttavan tai merkityksellisen tiedon (englanniksi *powerful knowledge*) piiriin (Dempster, 2023; Muller & Young, 2019). Samalla evoluutioilmiö on monessa mielessä arkijärjen ja intuitiivisen ajattelun vastainen, mikä edesauttaa naiivien ja epätieteellisten käsitysten syntymistä (Inagaki & Hatano, 2013). Arkinen tai intuitiivinen järkeily nojaa mekanismeihin, jotka sopivat hankalasti yhteen eliöiden kehityshistoriaa ja sopeutumiseen vaikuttavia tapahtumia selittävien tekijöiden kanssa. Viimeaikaisten tutkimusten perusteella tiedetään, että korkean osaamisen tason omaavien asiantuntijoidenkin päättelyprosessi on hitaampi tapauksissa, jotka edellyttävät intuitiivisen ajattelun vastustamista (Mason & Zaccoletti, 2020; Shtulman & Valcarcel, 2012).

Tämän artikkelin tooreettinen viitekehys sijoittuu kognitiivisen oppimistutkimuksen sisällä käsitteellisen ymmärryksen rakentumisen ja käsitteellisen muutoksen teorioihin. Tarkastelemme ytimekkäästi biologian ja evoluution oppimisen kannalta keskeisiä näkökulmia, kuten aikaisempien käsitysten merkitystä oppimisprosessissa sekä käsitteellisen ymmärryksen rakentumista.

Evoluutiota koskevat ennakkokäsitykset ja käsitteellisen ymmärryksen rakentuminen

Lähtötaso-osaamista ja aikaisempaa tietoa (englanniksi *prior knowledge*) on pidetty yhtenä merkittävimpanä oppimiseen vaikuttavana tekijänä ja siksi se on pysynyt keskeisenä mielenkiinnon kohteena oppimistutkimuksessa (Ausbubel, 1968; Dochy ym., 1999; Taber, 2017). Lähtötaso rakentuu kaikista ennakkokäsityksistä ja taidoista, joita oppija kantaa oppimistilanteeseen (Dochy & Alexander, 1995). Lähtötaso ennustaa hyvin tulevaa menestystä samankal-

taisissa oppimistehtävissä tai yleisesti kurssiarvosanoilla mitattuna (Binder, Sandmann, ym., 2019; Hailikari ym., 2007). Nämä löydökset osoittavat yksilöllisten erojen vakauden, eivätkä sellaisenaan kuvaa lähtötason merkitystä uuden tiedon omaksumiselle (Simonsmeier ym., 2022). Tiedon määrän sijaan keskeistä oppimiselle vaikuttaa olevan ennakkokäsitysten laatu ja yhteensopiuvuus tieteellisen teorian kanssa (McCarthy & McNamara, 2021; Simonsmeier ym., 2022). Evoluutio onkin ihanteellinen ilmiö tämän yhteyden tarkasteluun.

Epätieteelliset käsitykset evoluutiosta kumpuavat inhimillisistä ajattelun vinoumista, joiden taustalla vaikuttaa tarve nähdä luonnonilmiöissä tarkoituksenmukaisuutta ja tarjota niille toimijuutta. Lisäksi evoluutio tapahtuu aikajänteillä, jotka ovat vaikeita ihmiselle käsittää kokemusmaailmansa kautta. Merkittävässä katsauksessaan Gregory (2009) luokittelee näiden vinoumien alkulähteitä ja seurauksia. Yksi tyypillisimpiä epätieteellisiä käsityksiä evoluutiosta on niin kutsuttu teleologinen selitysmalli. Tässä evoluutio ymmärretään prosessina, jonka suuntana tai päämääränä olisi tuottaa ympäristöönsä parhaalla mahdollisella tavalla sopeutuneita yksilöitä. Toinen tyypillinen naiivi käsitys liittyy sopeutumista edistävien ominaisuuksien periytymiseen. Yksittäisen eliön ominaisuudet voivat sen elinkaaren aikana silminnähävästi muuttua, mutta vain sukusolujen geneettisessä materiaalisissa tapahtuva muuntelu periytyy jälkeläisille. (Gregory, 2009).

Nämä ja muut perustavanlaatuiset evoluutioilmiön periaatteet opiskellaan kouluvuosien aikana useaan kertaan. Tästä huolimatta ilmiön oppimiseen liittyviä haasteita esiintyy kaikenikäisillä oppijoilla, myös yliopisto-opiskelijoilla (Bishop & Anderson, 1990; Nehm & Reilly, 2007). Usein näitä löydöksiä on tulkittu siten, että oppiminen on mahdollisesti jäänyt pinnalliselle tasolle eikä pysyvään ajattelun muuttumiseen johtavaa käsitteellistä muutosta ole saavutettu. Evoluutioilmiön oppimiseen liittyvistä tutkimuksista kuitenkin valtaosa on tehty perusopetuksen kontekstissa, määrällisesti ja poikkileikkaus-tutkimusasetelmia hyödyntäen, mikä korostaa tarvetta käsitteellisen ymmärryksen laadullisen kehittymisen tarkastelulle korkeakoulukontekstissa.

Käsitteellisellä muutoksella tarkoitetaan oppimisen muotoa, jossa aikaisempia käsityksiä perustavanlaatuisesti uudelleen järjestellään siten, että olemassa olevat käsitteet saavat uusia merkityksiä samalla kun joitakin epätieteellisiä käsityksiä pyritään työntämään taka-alalle (Potvin, 2017). Täyttääkseen kä-

sitteellisen muutoksen kriteerit oppimisessa täytyy siis tapahtua skeemojen, käsitteiden tai niiden välisten suhteiden uudelleenjärjestäytymistä (engl. *knowledge restructuring*) (Chi, 2013). Mikäli oppijan ennakkokäsityksissä on pääasiassa tiedollisia aukkoja epätieteellisten käsitysten sijaan, oppiminen edellyttää usein yksinkertaisempaa oppimisen muotoa, tietorakenteiden rikastumista (engl. *knowledge enrichment*) (Carey, 1991).

Aikaisemmin ajateltiin, että onnistuessaan oppimisprosessi noudattelee kuka-takuinkin reittiä naiiveista käsityksistä kohti tieteellistä ymmärrystä kouluvuosien aikana (Posner ym., 1982). Toisaalta opettajat ovat luokkahuonehavaintojensa pohjalta nähneet, että oppijoiden kehityspolut eivät useinkaan suoraviivaisesti noudata tällaista loogisen kumuloituvaa osaamisen kehittymisen mallia, vaan ainoastaan osa oppijoista onnistuu tässä ja mahdollisesti saavuttaa käsitteellisen muutoksen. Toisinaan oppijat, joiden osaamisessa on käsitteellisen muutoksen tarpeita, jäävät silti jumiin aikaisempiin käsityksiinsä tai saavutetut muutokset ovat hetkellisiä ja johtavat epäkoherenttiin tai epäsystemaattiseen kehityskulkuun. Tämänhetkinen tutkimus siis toisaalta tunnistaa käsitteellisen ymmärryksen kehittymiseen liittyviä haasteita ja ilmiöitä laajasti, mutta pitkäjäsenasetelmien ollessa hyvin harvinaisia, osaamisen kehittymisen syvempää tarkastelua on raportoitu tutkimuskirjallisuudessa varsin niukasti. Tähän tutkimusaukkoon vastaamme hyödyntäen pitkäjäsenaineistoa biologian keskeisten ilmiöiden oppimisesta. Vastaamme tässä artikkelissa seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Kuinka ymmärrys ja osaaminen evoluutiosta ilmiönä kehittyvät ensimmäisten kahden vuoden yliopisto-opintojen aikana?
2. Minkälaiset tekijät evoluutiota koskevassa lähtötasossa selittävät opiskelijoiden oppimisen kehityspolkuja kahden ensimmäisen kandidivuoden aikana?

Menetelmät

Osallistujat

Tutkimuksen osallistujat ($N = 50$) aloittivat opintonsa Helsingin yliopiston bio- ja ympäristötieteellisessä tiedekunnassa syksyllä 2019 joko biologian ($n = 31$) tai ympäristötieteiden ($n = 19$) kandiohjelmassa ja heistä jokainen osallistui tutkimukseen kunakin kolmena mittausajankohtana. Osallistujien keski-ikä opintojen alussa oli 22,4 ($SD = 6,8$). Huomionarvoista on, että opiskelijat on valikoitu opinto-ohjelmiin saman lukion opetussuunnitelman perusteisiin pohjautuvan pääsykokeen tulosten perusteella. Näin ollen opiskelijoiden taustaopinnot biologiassa ennen yliopisto-opintojen aloittamista olivat keskenään suhteellisen samanlaisia.

Tutkimuksen toteutuksessa noudatettiin Tutkimuseettisen neuvottelukunnan ohjeistusta. Tutkimuslomakkeisiin vastaaminen kuului osaksi opetustilannetta, mutta opiskelijat päättivät tutkimusluvan antamisesta jokaisessa mittausajankohdassa erikseen. Tutkimukseen osallistuminen oli vapaaehtoista ja tutkittavilla oli mahdollisuus vetäytyä tutkimuksesta missä tahansa vaiheessa ilman seuraamuksia.

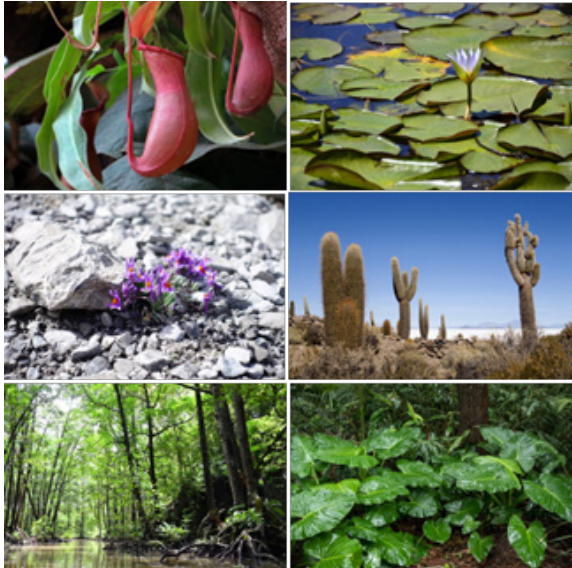
Tutkimusmittarit

Osaamisen ja ymmärryksen arvioimista varten kehitimme kyselylomakkeen, joka koostui kahdeksasta eritasoisesta avoimesta tehtävästä. Näistä tehtävistä kolme käsittelivät evoluutiota koskevaa osaamista ja tässä tutkimuksessa keskityimme näiden tehtävien tarkasteluun (Taulukko 1, Kuvio 1). Tutkimusinstrumentin laatimiseen osallistui viimeisen vuoden biologian aineenopettajaopiskelija, biologian aineenopettaja sekä kaksi bio- ja ympäristötieteellisen tiedekunnan opettajaa, joista erityisesti toinen tutkii evoluutioilmiötä ja opettaa sisältöä tutkimuksen kohderyhmänä olevalle joukolle, tuntien siten hyvin kyseisen ilmiön oppimiseen liittyviä haasteita.

Taulukko 1. Kyselylomakkeen evoluution ymmärrystä mittaava tehtävänanto

<i>Tehtävä</i>	<i>Tiedon taso</i>	<i>Pisteet (max)</i>
3a) Nimeä, mistä ilmiöstä kuvakollaa- sissa (Kuvio 1) esiintyvät kasvit ovat osoitus. Vastaukseksi riittää yksi sana	Faktoasaaminen	2
3b) Luettele, mitkä ovat kohdassa 3a) nimeämäsi ilmiön keskeisimmät edelly- tykset.	Ymmärtäminen	4
3c) Selitä kohdassa 3a) nimeämäsi ilmiö prosessitasolla.	Soveltaminen	20

Opiskelijat vastasivat tehtäviin yksilöllisesti opintoihin kuuluvan luennon osana, tenttimäisessä tutkimustilanteessa syyskuussa 2019 (lähtötaso), syyskuussa 2020 (1. seuranta) ja lokakuussa 2021 (2. seuranta). Jokaisen tutkimustilanteen alussa kerroimme opiskelijoille tekevämme oppimistutkimusta asiantuntijuuden kehittymisestä bio- ja ympäristötieteissä. Lisäksi kerroimme kyselylomakkeen sisältävän tarkoituksella vaikeusasteiltaan erilaisia tehtäviä ja kehoitimme heitä vastaamaan parhaimman osaamisensa mukaan. Tutkimusinstrumenttiin kuuluva, evoluutiotehtävään liittyvä kuva (Kuvio 1) oli osana opiskelijoille jaettavaa materiaalia ja heijastettiin lisäksi luentosalin etuosassa olevalle valkokankaalle. Tutkittavilla oli 60 minuuttia aikaa vastata kysymyksiin kirjallisesti.



Kuvio 1. Tehtävän aineistona esitetty kuvakollaasi erilaisista kasvilajeista elinympäristöissään

Aineiston analyysi

Toteutimme aineiston analyysin monimenetelmällisiä keinoja hyödyntäen. Pisteytimme jokaisen opiskelijan (N = 50) vastaukset erikseen mallivastausten perusteella tehdyn pisteytysmatriisin avulla. Pisteytysmatriisissa huomioitiin evoluutiota koskevan tiedon laatu siten, että keskeisimmistä käsitteistä (kuten luonnonvalinnan mekanismien kuvailusta) sai painotetusti enemmän pisteitä. Yksi tapa mitata oppimista on raportoida arvioitavien tehtävien pisteiden väliset erotukset. Kyseinen muuttuja kertoo tiedon karttumisesta (englanniksi *knowledge gains*). Laskimme molempien seurantamittausten yksilökohtaisten pisteiden erotukset normalisoidun pistekertymän kaavalla $\frac{\text{Seuranta}(\%) - \text{Lähtötaso}(\%)}{(100\% - \text{Lähtötaso}(\%))}$. Normalisoidussa pistekertymässä huomioidaan opiskelijoiden välinen varianssi ja suhteutetaan yksilölliset pisteiden muutokset

siihen, kuinka paljon opiskelijan olisi ollut mahdollista parantaa (Coletta & Steinert, 2020).

Vertailimme pisteiden ja kertymien keskiarvoja t-testeillä. Käytimme toistettujen mittausten t-testiä koko otoksen pisteiden ja kertymien keskinäisessä vertailussa. Lähtötasotestissä erottui kaksi yhtä suurta ($n = 25$) ryhmää pisteiden mediaaniarvon molemmiin puolin. Jaoin opiskelijat tämän perusteella heikomman ja korkeamman lähtötason ryhmään, joiden keskiarvoja vertailimme riippumattomien ryhmien t-testillä. Testien tueksi laskimme efektikoot (Cohenin d) sekä 95 % luottamusvälit.

Laadullisen analyysin tavoitteena oli sisältölähtöisesti luokitella yksittäisten opiskelijoiden vastauksissa ilmenevää muutosta. Tarkastelimme kunkin opiskelijan kunkin kolmen mittauskerran vastauksia huomioiden evoluutioon liittyvien käsitteiden määrää ja laatua. Nimesimme kunkin opiskelijan kunkin kolmen mittauskerran vastauksista ydinsisältöjä, joita opiskelijat olivat kuvailleet. Tämän perustana hyödynsimme laatimiamme mallivastauksia ja pisteytysmatriisia. Ydinsisältöjä olivat esimerkiksi 'luonnonvalinta', 'mutaatiot', 'lajiutumisen' ja 'sattuma'. Mahdollisuuksien mukaan nimesimme vastauksista Gregoryyn (2009) viitekehyksen mukaisen johtavan epätieteellisen käsityksen, joka määrittäi opiskelijan selitysmallia. Seuraavaksi tarkastelimme, kuinka nämä ydinsisällöt muuttuivat opiskelijan vastauksissa eri mittausajankohdissa. Tämän luokittelumenettelyn perusteella muodostui neljä muutosprofiilia:

- i. Pirstaleinen: Ei selkeää kehityspolkua. Käsitteistön laatu ja ydinsisällöt vaihtelevat vuosien välillä huomattavasti.
- ii. Vakaa: Keskeiset ydinsisällöt pysyvät vakaina pistemäärien heilahtelusta huolimatta. Seurantavastauksissa käsitteistön laadussa ei eroa lähtötasoon nähden.
- iii. Rikastuminen: Keskeisten ydinsisältöjen sekä käsitteiden määrä ja laatu lisääntyvät lähtötasoon nähden. Lähtötasovastauksesta ilmenevä selitysmalli ei muutu.

- iv. Siirtymä: Keskeiset ydinsisällöt muuttuvat niin, että on perusteltua puhua epätieteellisen selitysmallin muutoksesta kohti tieteellistä. Seurantavastauksissa opiskelija ei esimerkiksi enää kuvaa evoluutiota päämäärän omaavana sopeutumisprosessina, vaan korostaa geneettisen muuntelun ja luonnonvalinnan merkitystä läpi sukupolvien.

Muutosprofiilien nimeämisessä sovelsimme erityisesti käsitteellisen muutoksen teoreettisia näkökulmia ja hyödynsimme aikaisempien tutkimusten tuloksia siltä osin kuin löysimme vastaavuutta. Viimeaikaiset tutkimukset ovat nojanneet latenttien profiilien analyysiin, joka ei kohdallamme ollut mahdollista pienen aineiston vuoksi. Profiilit pirstaleinen (engl. *fragmentation*) ja vakaa (engl. *enduring*) vastaavat aiemmin raportoituja nimityksiä (Edelsbrunner ym., 2018; Flaig ym., 2018). Niin ikään profiilit rikastuminen (engl. *enrichment*) ja siirtymä (engl. *shift*) nojautuvat käsitteellisen muutoksen teorioihin, joissa oppimisen laadullisia eroja tyyppillisesti kuvataan näiden termien avulla (Chi, 2013).

Tulokset

Ymmärryksen kehittyminen

Ensimmäisen mittauksen perusteella opiskelijoiden lähtötaso, erityisesti ymmärrystä ja soveltamista mittaavissa tehtävissä, oli heikkoa ja evoluutio edellytyksineen tunnistettiin huonosti (Taulukko 2). Pisteet nousivat kohtalaisen tasaisesti seurantamittauksissa tehtävää 3b lukuun ottamatta. Kolmannen opiskeluvuoden alussa (2021) suurin osa opiskelijoista tunnisti evoluution ilmiönä, mutta edellytysten nimeämisessä oli haasteita. Soveltavaa osaamista mittaavassa tehtävässä (3c) pisteet nousivat tasaisesti, mutta keskiarvo jäi heikohkole tasolle.

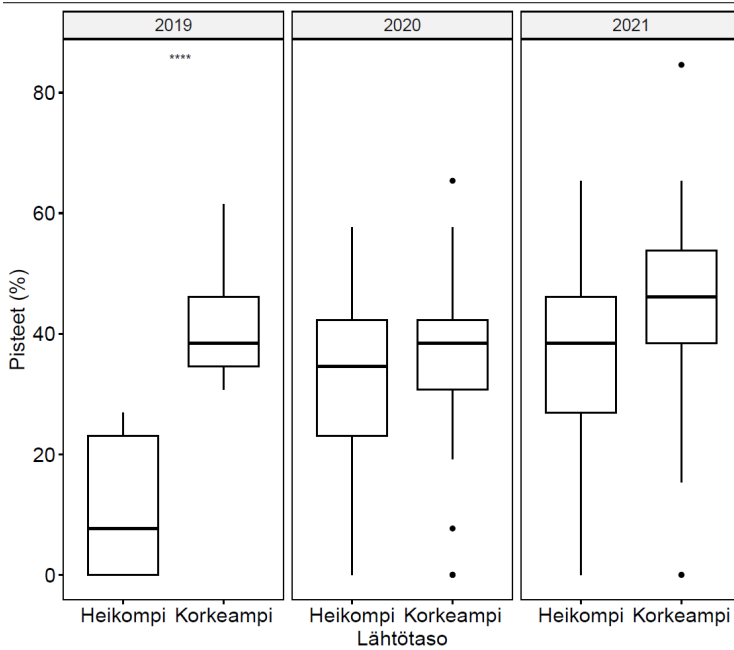
Taulukko 2. Opiskelijoiden saamien tehtäväkohtaisten sekä kokonaispisteiden sekä pistekertymien keskiarvot (M) ja -hajonnat (SD)

Tehtävä (max)	2019		2020		2021	
	M	SD	M	SD	M	SD
3a (2)	1,4	0,9	1,7	0,7	1,7	0,7
3b (4)	1,6	1,3	1,5	1,0	1,7	1,0
3c (20)	3,8	2,9	5,2	3,2	7,0	3,8
Yhteensä (%)	26,3	17,4	32,5	16,9	40,0	18,9
Kertymä	-	-	0,04	0,3	0,2	0,3

Ensimmäisessä seurannassa (vuonna 2020) pieni kertymäarvo osoittaa pisteiden nousun kuitenkin olleen maltillista ja keskiarvo eroaakin lähtötasosta vain hiivenen merkitsevästi, $t(49) = 2,1$; $p = 0,04$; $d = 0,29$. Toisen seurannan (vuonna 2021) pisteet nousivat merkitsevästi paitsi lähtötasoon ($t(49) = 4,5$; $p < 0,001$; $d = 0,63$) myös ensimmäiseen seurantaan ($t(49) = 2,8$; $p < 0,01$; $d = 0,41$) nähden laajasta hajonnasta huolimatta. Lisäksi toisen seurannan kertymä eroaa merkitsevästi nollassa, $t(49) = 4,5$; $p < 0,001$; $d = 0,56$.

Lähtötason perusteella muodostettujen ryhmien väliset erot

Käytimme lähtötasomittauksen yhteispisteiden mediaaniarvoa 7,5 jakopisteenä muodostaessa opiskelijoista kaksi yhtä suurta vertailukelpoista ryhmää. Kuviossa 2 esitetään ryhmien menestykset tehtävissä kunakin mittausajankohtana. Heikomman lähtötason opiskelijat paransivat osaamistaan merkitsevästi ensimmäisessä seurantamittauksessa (2020), mutta hajonta ryhmän sisällä kasvoi. Toisessa seurannassa (2021) korkeamman lähtötason opiskelijat vuorostaan paransivat omaa osaamistaan, kun heikomman lähtötason opiskelijoiden tiedon karttumisen seisahtui. Ryhmien menestyksen välillä ei ilmenyt tilastollisesti merkitsevää eroa enää seurantamittauksissa.



Kuvio 2. Evoluutiotehtävän kokonaispisteiden (%) kehitys lähtötason perusteella muodostettujen ryhmien välillä; **** $p < .0001$

Moni korkeamman lähtötason opiskelija menetti pisteitä ensimmäisessä seurantamittauksessa, kuten nähdään negatiivisesta pistekertymästä (Taulukko 3).

Taulukko 3. Pistekertymien tunnuslukujen (M, SD) erot lähtötason perusteella muodostettujen ryhmien välillä ja tilastollisen merkitsevyyden testit.

Muuttuja	Heikompi		Korkeampi		t	df	p	d	CI 95 %
	M	SD	M	SD					
Kertymä 1 (2020)	0,22	0,16	-0,13	0,33	4,7	35	<0,001	1,3	[-12; 7]
Kertymä 2 (2021)	0,27	0,20	0,05	0,32	2,9	40	0,005	0,8	[-18; 3]

Lähtötason vastausten ydinsisältöjen laatu oli vaihtelevaa (Taulukko 4). Puolet opiskelijoista selittivät evoluutiota luonnonvalinnan lisäksi jonkun muun mekanismin, kuten perinnöllisen muuntelun tai lajiutumisen kautta. Tunnusomaista heikomman lähtötason opiskelijoille oli kyvyttömyys tunnistaa oikeaa ilmiötä tai käyttää yksinomaan lajiutumista selittävänä esimerkkinä.

Taulukko 4. Lähtötason (2019) vastauksien ydinsisältöjen esiintymisfrekvenssit esitettyinä muutosprofiilien sekä heikomman (H) ja korkeamman (K) lähtötason mukaan

Ydinsisältö	Pirstaleinen		Vakaa		Rikastuminen		Siirtymä		Yhteensä	
	H (7)	K (3)	H (5)	K (12)	H (5)	K (9)	H (8)	K (1)	H (25)	K (25)
Luonnonvalinta ja joku muu	2	1	-	9	2	9	1	1	5	20
Vain luonnonvalinta	-	2	1	3	2	-	1	-	4	5
Vain lajiutumisen tai muuntelu	-	-	2	-	-	-	3	-	5	-
Ei pisteitä	5	-	2	-	1	-	3	-	11	-

Kuviossa 3 esitetään yksittäisten opiskelijoiden pisteiden kehitykset lähtötason sekä laadullisen analyysin avulla muodostettujen muutosprofiilien mukaan. Korkeamman lähtötason opiskelijoiden ymmärrys pysyi enimmäkseen vakaana tai he kokivat tiedon rikastumista. Vakaan muutosprofiilin opiskelijoita yhdisti pisteiden lasku ensimmäisen (2020) ja toisen (2021) seurantamittauksen välillä selitysmallin pysyessä suhteellisen muuttumattomana. Pirstaleisen muutosprofiilin omaavien kahden korkeamman lähtötason opiskelijan vastauksissa ilmeni teleologista selitysmallia, eivätkä he enää toisessa seurantamittauksessa selittäneet yksiselitteisesti evoluutiota. Seuraavat katkelmat korkeamman lähtötason opiskelijalta havainnollistavat tätä:

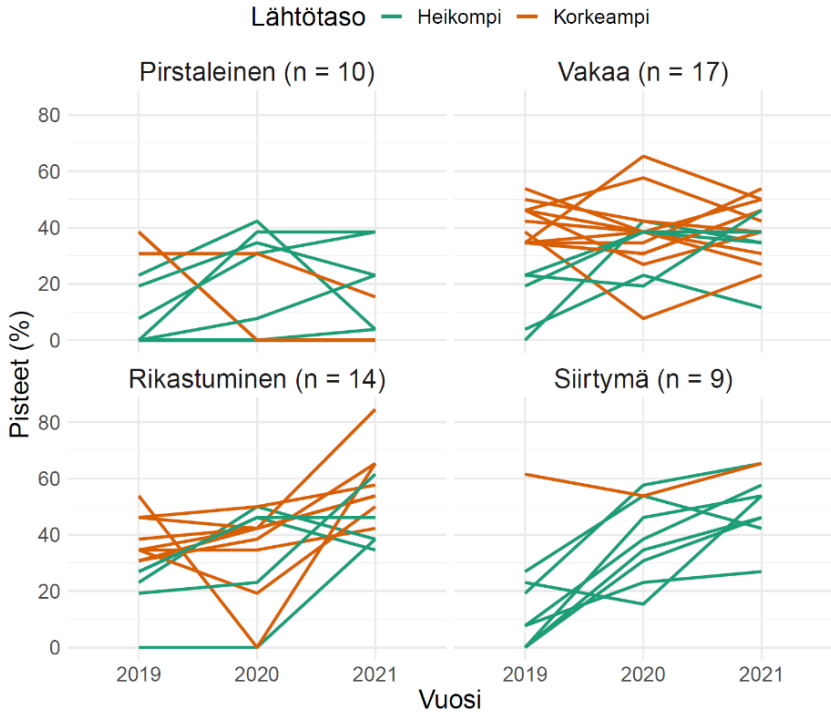
”Erilaisissa ympäristöissä elävät kasvit ovat kehittyneet eri lajeikseen pyrkäkseen sopeutumaan paremmin ympäristöön [...]” (id44; 2019)

”Elämää ilmenee kaikkialla maapallolla. Solutasolta alkaen eri eliöt ovat sopeutuneet elämään jossain saaden edun juuri omasta paikastaan ja tavastaan elää. Jokainen eliö on erilainen riippuen ympäristöstään. [...]” (id44; 2021)

Muutosprofileissa rikastuminen ja siirtymä pistekehitykset seurasivat odotetusti vastausten laadullisen sisällön kehitystä. Käsitteistön määrä ja laatu puolestaan kasvoivat erityisesti seurantamittausten välillä. Tyypillistä siirtymää kokenutta heikomman lähtötason opiskelijaa edustavat seuraavat saman opiskelijan vastauksista eri vuosina poimitut katkelmat:

”Kasvit sopeutuvat ympäristöönsä ja luonnonvalinta suosii selviytymistä tukevia ominaisuuksia kuten kuivuuden sietämistä. (id51; 2019)

”Yksilöiden välillä on eroja. Ne, joiden ominaisuudet sopeutuvat parhaiten ympäristöön, kykenevät lisääntymään paremmin. Ajan myötä niiden geenit ja fenotyyppi yleistyvät populaatiossa ja populaatio on sopeutunut ympäristönsä haasteisiin. Mitä enemmän populaatiossa on muuntelua, sitä paremmin se säilyy ympäristön muuttuessa.” (id51; 2021)



Kuvio 3. Opiskelijoiden yksilölliset oppimispolut muutosprofiilien mukaan esitettyinä

Pohdinta

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli tarkastella biotieteiden yliopisto-opiskelijoiden käsitteellisen ymmärryksen kehittymistä ensimmäisten opintovuosien aikana. Hyödynsimme kolmessa aikapisteessä kerättyä evoluutioilmion ymmärrystä mittaavaa avoimiin vastauksiin perustuvaa tehtävää. Opiskelijoiden vastauksia tarkasteltiin monimenetelmällisesti: määrällisesti tehtävissä menestymistä pisteyttäen ja pistekertymien muutosta raportoiden sekä laadullisesti vastauksissa esitettyjä keskeisimpiä ydinsisältöjä ja niissä tapahtuneita muutoksia aikapisteiden välillä tarkastellen. Näistä muutoksista tunnistettiin

neljä muutosprofiilia: *pirstaleinen* (osaamisen kehittyminen on epäsystemaattista mittausten kesken), *vakaa* (vain maltillisia muutoksia), *rikastuminen* (osaaminen parantui, mutta enimmäkseen määrällisesti) ja *siirtymä* (laadullisesti huomattava muutos käsitteellisessä ymmärryksessä). Pyrkinessämme paremmin ymmärtämään oppijoiden osaamisen karttumiseen liittyviä laadullisia ja määrällisiä eroja opiskelijat jaettiin ensimmäisen mittausten menestyksen perusteella heikommat ja korkeammat lähtötiedot omaavien ryhmään.

Tulosten perusteella nähdään, että opiskelijoiden käsitteellinen ymmärrys kehittyi kohtalaisen paljon ensimmäisten opintovuosien aikana. Lähtötasoryhmien väliset piste-erot tasoittuivat merkittävästi ensimmäisessä seurantamittauksessa. Tämän voidaan ajatella johtuvan siitä, että ensimmäisenä opintovuonna kaikki opiskelijat osallistuvat peruskursseille, joilla ymmärrystä esimerkiksi evoluutioilmiöstä syvennetään. Lähtötaso ei siis ollut niin vahvasti yhteydessä menestykseen kuin aiemmissa tutkimuksissa (Simonsmeier ym., 2022). Keskeiset erot ymmärryksen kehitymisessä olivatkin pääosin laadullisia.

Heikomman lähtötason omaavien opiskelijoiden ymmärrys kehittyi monimuotoisempia polkuja pitkin kuin aiempien tutkimusten perusteella olisi voinut olettaa (Binder, Schmiemann, ym., 2019). Pirstaleista ja siirtymää edustaneiden heikomman lähtötason opiskelijoiden määrät olivat yhtä suuret. Siirtymää kokeneiden opiskelijoiden osalta voidaan nähdä viitteitä käsitteellisestä muutoksesta. Erityisen kiintoisaa on, että tiedon rikastumiseen ja käsitteelliseen muutokseen johtava oppiminen tapahtui kehityspolkuja tulkiten toisen opiskeluvuoden aikana.

Pistekertymät kuitenkin osoittavat, että vaikka yleisellä tasolla opintojen aikana tapahtui osaamisen ja ymmärryksen karttumista, monilla opiskelijoilla pisteet jäivät suhteellisen mataliksi vielä seurantamittauksissakin. Oppimisesta huolimatta harva heikomman lähtötason opiskelija vastasi myöhemmin yhtä kattavasti kuin korkeamman lähtötason opiskelijat. Nämä tulokset ovat linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa siltä osin, että ne osoittavat yliopisto-opiskelijoilla olevan yhä hankaluuksia evoluutioilmiön perusteiden ymmärtämisessä (Lennox & Kampourakis, 2013).

Tulostemme huomiointi opetuksessa

Ensimmäisen vuoden opinnot onnistuivat tasoittamaan osaamiseroja. Useampi heikomman lähtötason opiskelija tunnisti seurantamittauksissa evoluution ilmiönä ja osasi kuvailla luonnonvalinnan mekanismeja. Tämä tulos on odotettava ja toivottava, sillä ensimmäisen vuoden perusopinnot sisältävät runsaasti kaikille yhteistä opetusta evoluutioon ja eliökunnan historiaan liittyen. Kehityspolut kuitenkin osoittavat, että vain harvojen heikomman lähtötason omaavan opiskelijan kohdalla nämä opinnot johtavat syvempiin ja pysyviin muutoksiin ajatusrakenteissa. Pirstaleisen ja vakaan profiilin opiskelijoiden osaamiskehitystä leimasi taantumainen tai pysähtyminen toisen opintovuoden aikana, mikä näkyi vähäisenä osaamisen kehittymisenä kolmannessa mittauksessa. Vastaava kehitysprofiili on löydetty myös aikaisemmissa yliopisto-kontekstiin sijoittuneissa tutkimuksissa (Flaig ym., 2018).

Korkeamman lähtötaso-osaamisen opiskelijoilla osaaminen sen sijaan yleisesti jatkoi kasvuun ja näin erot osaamisessa opiskelijaryhmien välillä kasvoivat entisestään kolmantena opiskeluvuonna. Opiskelijat, joiden lähtötaso-osaaminen on heikompa, ovat riskissä jäädä osaamisessaan jälkeen myös opintojen edetessä. Yksi ilmiön taustalla vaikuttava tekijä voi löytyä kurseilla opetettavan tiedon, ei niinkään opetuksen laadusta. Yhdysvalloissa suoritettu laaja katsaus kandidaattivaiheen perusopinnojen arviointiin osoitti, että opiskelijoiden ajattelua ja osaamista arvioidaan enimmäkseen Bloomin taksonomian alempien tasojen mukaisesti (Momsen ym., 2010). Niin opiskelijat kuin opettajat pitävät korkeamman ajattelun tason taitoja yliopisto-opinnoissa tärkeänä, mutta biologian perusopinnoissa niiden varsinainen opetus ja arviointi on kuitenkin vähäistä (Cammies ym., 2022).

Mikäli perusopinnoissa opiskelijaa ei kannusteta soveltamaan käsitteellistä tietoaan ja luomaan laajempia yhteyksiä evolutiivisten perusilmiöiden välillä, voi ymmärrys jäädä aivan liian pinnalliseksi. Tällainen opetus ja arviointi ei myöskään tue opiskelijaa naiivien käsitysten kriittisessä tarkastelussa, jolloin ne jäävät aktiivisiksi tieteellisten oppikirjaselitysten ja käsitteiden rinnalle (Potvin & Cyr, 2017). Viitteitä ilmiöstä on nähtävissä tuloksistamme. Osa vakaan ja rikastuvan tiedon profileihin kuuluvista opiskelijoista tukeutuivat teologisiin selitysmalleihin jommassakummassa seurantamittauksessa, vaikka samaan aikaan kerryttivät pisteitään käyttämällä aiemmista vastauksista

puuttuvia tieteellisesti oikein määriteltyjä käsitteitä. Nämä opiskelijat voisivat hyötyä formatiivisemmasta arvioinnista ja korkeamman tason ajattelun taitoja kehittävistä opetuksesta sisältötietoa korostavan opetuksen lisäksi (Ronfard ym., 2021).

Tässä tutkimuksessa emme yksityiskohtaisesti eritelleet opiskelijoilla esiintyneitä virhekäsityksiä. Käsitteellisen muutoksen tutkimustraditiossa onkin alettu ajatella, että kun aikaisemmin keskeinen opetuksellinen tavoite oli päästä eroon oppijoiden virhekäsityksistä, se ei nykykäsityksen mukaan mahdottomuudessaan ole mielekäs tavoite. Sen sijaan oppimisprosessin tulisi tavoitella päämäärää, jossa oppijalla on tieteellisen ymmärryksensä perusteella toimivia keinoja tulla tietoiseksi ja vastustaa (inhiboida) intuitiiviseen ajatteluun nojavia, petollisen tehokkailta näennäisesti vaikuttavia ajatusuomia (Shtulman & Legare, 2020). Evoluution tapauksessa tämä tarkoittaisi, että opiskelijan taipumusta nojata sitkeisiin teleologisiin selitysmalleihin tulisi opetuksen avulla vähentää (Trommler & Hammann, 2020). Tämä onkin empiiristä jatkotutkimusta ansaitseva aihealue.

Saadut tulokset ovat kiinnostavia myös yliopisto-opetuksen näkökulmasta, sillä opetuksen laadun tiedetään olevan ratkaisevan tärkeä tekijä opiskelijoiden osaamisen kehittämisessä (Burroughs ym., 2019). Aikaisempien tutkimusten perusteella on havaittu, että perusasteiden opettajien on usein hankalaa tunnistaa oppijoiden epätieteellisiä ennakkokäsityksiä (Hartelt ym., 2022; Morrison & Lederman, 2003). Voidaan arvela, että myös yliopistossa opettajilla saattaa olla epärealistisen korkea oletus opiskelijoiden lähtötaso-osaamisesta. Kuten tuloksemme osoittavat, yliopisto-opiskelijat ovat hyvin heterogeeninen ryhmä lähtötaso-osaamisensa osalta. Erot näyttävät ennustavan yliopisto-opintojen myöhempää sujuvuutta, kuten opintojen etenemistä ja ongelmanratkaisutaitojen kehittymistä (Södervik ym., 2019, 2020). Nämä havainnot haastavat opettajia etsimään keinoja tunnistaa ja tukea heikommasta lähtötasosta opintonsa aloittavia opiskelijoita.

Tutkimuksen luotettavuuden tarkastelu

Otoskokomme pienuus on syytä huomioida tulosten yleistettävyyttä pohdittaessa. Otoksemme (N = 50) edustaa vähän alle puolta kaikista 120 opiskelijasta, jotka aloittivat opintonsa Helsingin yliopiston biologian tai ympäristötieteiden kandiohjelmassa. Seurantamittausten järjestämistä hankaloitti COVID-19 –pandemian aiheuttama poikkeustila yliopistolla. Tähän nähden osallistujamäärä pysyi ilahduttavan korkeana. Evoluutioilmion ymmärtämisestä on julkaistu paljon tutkimustietoa ja -instrumenttejakin, mutta sensitiivisenä oppisisältönä sen oppimiseen liittyy paljon kulttuurikohtaisia erityispiirteitä (vrt. esim. kreationististen uskomusten yleisyys Yhdysvalloissa), mistä syystä päädyimme laatimaan oman mittarin tarkoitukseemme. Esitesitasimme mittariamme, mutta sitä ei oltu käytetty tutkimusaineiston keräämisessä aikaisemmin. Tutkimuksessamme emme tarkastelleet tai vertailleet opiskelijoiden suorittamia opintojaksoja suhteessa heidän osaamisensa kehittymiseen, joten emme tiedä, oliko esimerkiksi jokin yksittäinen kurssi erityisen tehokas tukemaan opiskelijoiden oppimista. Emme myöskään vertailleet eri koulutusohjelmien opiskelijoiden vastauksia keskenään, sillä kuten johdannossa kuvasimme, evoluutioilmion ymmärtäminen on keskeistä lähes kaikkien elämäntieteiden koulutusohjelmien opinnoissa. Tästä huolimatta tutkimuksemme osoittaa, etteivät kaikki opiskelijat saavuta ilmiöstä tieteellistä ymmärrystä ensimmäisen vuoden perusopintojen jälkeen.

Johtopäätökset

Nopeasti muuttuvat olosuhteet ekosysteemeissä ajavat lajeja ahdinkoon sopeutumisen kannalta. Evoluutioilmion perusteiden ymmärtäminen onkin edellytys monien ajankohtaisten ilmiöiden, kuten meneillään olevan ilmastomuutoksen ja kuudennen massasukupuuttoaallon syiden ja seurausten hahmottamiselle. Tämän tutkimuksen tulokset kuitenkin osoittavat, että biotieteiden yliopisto-opiskelijoiden käsitteellisessä ymmärryksessä aiheesta on hajontaa. Erot heikompien ja paremmin menestyneiden välillä säilyivät seurantamittauksen läpi ja erityisen huomionarvoista on, että toisen ja kolmannen opintovuoden välillä paremmista lähtötiedoista lähteneiden opiskelijoiden osaaminen jatkoi kasvamistaan, kun taas heikommat lähtötiedot omanneilla osaamisen karttumisen lähes seisahtui. Biologian yliopisto-opetusta kehitet-

täessä olisikin pohdittava, tulisiko tällaisten tieteenalan läpäisevien ilmiöiden tarkasteluun keskittyä enemmän. On oletettavaa, että yliopisto-opiskelijoiden lähtötaso-osaamisen hajonta kasvaa tulevaisuudessa entisestään opiskelijamäärien kasvaessa ja opiskelijavalintojen uudistuessa, joten ilmiön tunnistaminen ja siihen puuttuminen ovat keskeisiä opetuksellisia tavoitteita nyt ja tulevaisuudessa.

Lähteet

- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. Holt, Rinehart & Winston.
- Binder, T., Sandmann, A., Sures, B., Friege, G., Theyssen, H., & Schmiemann, P. (2019). Assessing prior knowledge types as predictors of academic achievement in the introductory phase of biology and physics study programmes using logistic regression. *International Journal of STEM Education*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40594-019-0189-9>
- Binder, T., Schmiemann, P., & Theyssen, H. (2019). Knowledge acquisition of biology and physics university students — The role of prior knowledge. *Education Sciences*, 9(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/educsci9040281>
- Bishop, B. A., & Anderson, C. W. (1990). Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(5), 415–427. <https://doi.org/10.1002/tea.3660270503>
- Burroughs, N., Gardner, J., Lee, Y., Guo, S., Touitou, I., Jansen, K., & Schmidt, W. (2019). A review of the literature on teacher effectiveness and student outcomes. Teoksessa N. Burroughs, J. Gardner, Y. Lee, S. Guo, I. Touitou, K. Jansen, & W. Schmidt (toim.), *Teaching for Excellence and Equity: Analyzing Teacher Characteristics, Behaviors and Student Outcomes with TIMSS* (s. 7–17). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16151-4_2
- Cammies, C., Cunningham, J. A., & Pike, R. K. (2022). Not all Bloom and gloom: Assessing constructive alignment, higher order cognitive skills, and their influence on students' perceived learning within the practical components of an undergraduate biology course. *Journal of Biological Education*, 58(3), 588–608. <https://doi.org/10.1080/00219266.2022.2092191>

- Carey, S. (1991). Knowledge acquisition: Enrichment or conceptual change? Teoksessa S. Carey & R. Gelman (toim.), *The epigenesis of mind: Essays on biology and cognition* (s. 257–291). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Chi, M. T. H. (2008). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. Teoksessa S. Vosniadou (toim.), *International handbook of research on conceptual change* (s. 61–82). Taylor & Francis.
- Coletta, V. P., & Steinert, J. J. (2020). Why normalized gain should continue to be used in analyzing preinstruction and postinstruction scores on concept inventories. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010108>
- Dempster, E. R. (2023). What is ‘powerful knowledge’ in school biology? *Journal of Biological Education*, 57(2), 245–247. <https://doi.org/10.1080/00219266.2023.2190269>
- Dochy, F., & Alexander, P. A. (1995). Mapping prior knowledge: A framework for discussion among researchers. *European Journal of Psychology of Education*, 10(3), 225–242. <https://doi.org/10.1007/BF03172918>
- Dochy, F., Segers, M., & Buehl, M. M. (1999). The relation between assessment practices and outcomes of studies: The case of research on prior knowledge. *Review of Educational Research*, 69(2), 145–186. <https://doi.org/10.3102/00346543069002145>
- Edelsbrunner, P. A., Schalk, L., Schumacher, R., & Stern, E. (2018). Variable control and conceptual change: A large-scale quantitative study in elementary school. *Learning and Individual Differences*, 66, 38–53. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2018.02.003>
- Evans, M. E. (2013). Evolutionary biology and conceptual change: A developmental perspective. Teoksessa S. Vosniadou (toim.), *International handbook of research on conceptual change* (s. 220–239). Taylor & Francis.
- Flaig, M., Simonsmeier, B. A., Mayer, A. K., Rosman, T., Gorges, J., & Schneider, M. (2018). Conceptual change and knowledge integration as learning processes in higher education: A latent transition analysis. *Learning and Individual Differences*, 62, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2017.12.008>

- Gregory, T. R. (2009). Understanding natural selection: Essential concepts and common misconceptions. *Evolution: Education & Outreach*, 2(2), 156–175. <https://doi.org/10.1007/s12052-009-0128-1>
- Hailikari, T., Nevgi, A., & Lindblom-Ylänne, S. (2007). Exploring alternative ways of assessing prior knowledge, its components and their relation to student achievement: A mathematics based case study. *Studies in Educational Evaluation*, 33(3–4), 320–337. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2007.07.007>
- Hartelt, T., Martens, H., & Minkley, N. (2022). Teachers' ability to diagnose and deal with alternative student conceptions of evolution. *Science Education*, 106(3), 706–738. <https://doi.org/10.1002/sce.21705>
- Inagaki, K., & Hatano, G. (2013). Conceptual change in naïve biology. Teoksessa S. Vosniadou (toim.), *International handbook of research on conceptual change* (s. 195–219). Taylor & Francis.
- Lennox, J. G., & Kampourakis, K. (2013). Biological teleology: The need for history. Teoksessa K. Kampourakis (toim.), *The Philosophy of Biology: A Companion for Educators* (s. 421–454). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6537-5_20
- Mason, L., & Zaccoletti, S. (2020). Inhibition and conceptual learning in science: A review of studies. *Educational Psychology Review*, 33, 181–212. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09529-x>
- McCarthy, K. S., & McNamara, D. S. (2021). The multidimensional knowledge in text comprehension framework. *Educational Psychologist*, 56(3), 196–214. <https://doi.org/10.1080/00461520.2021.1872379>
- McLure, F., Won, M., & Treagust, D. F. (2020). Students' understanding of the emergent processes of natural selection: The need for ontological conceptual change. *International Journal of Science Education*, 42(9), 1485–1502. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1767315>
- Momsen, J. L., Long, T. M., Wyse, S. A., & Ebert-May, D. (2010). Just the facts? Introductory undergraduate biology courses focus on low-level cognitive skills. *CBE—Life Sciences Education*, 9(4), 435–440. <https://doi.org/10.1187/cbe.10-01-0001>
- Morrison, J. A., & Lederman, N. G. (2003). Science teachers' diagnosis and understanding of students' preconceptions. *Science Education*, 87(6), 849–867. <https://doi.org/10.1002/sce.10092>

- Muller, J., & Young, M. (2019). Knowledge, power and powerful knowledge re-visited. *The Curriculum Journal*, 30(2), 196–214. <https://doi.org/10.1080/09585176.2019.1570292>
- Nehm, R. H., & Reilly, L. (2007). Biology majors' knowledge and misconceptions of natural selection. *BioScience*, 57(3), 263–272. <https://doi.org/10.1641/B570311>
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of scientific conception towards conceptual change theory. *Science Education*, 66(2), 211–227.
- Potvin, P., & Cyr, G. (2017). Toward a durable prevalence of scientific conceptions: Tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(9), 1121–1142. <https://doi.org/10.1002/tea.21396>
- Ronfard, S., Brown, S., Doncaster, E., & Kelemen, D. (2021). Inhibiting intuition: Scaffolding children's theory construction about species evolution in the face of competing explanations. *Cognition*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104635>
- Shtulman, A., & Legare, C. H. (2020). Competing explanations of competing explanations: Accounting for conflict between scientific and folk explanations. *Topics in Cognitive Science*, 12(4), 1337–1362. <https://doi.org/10.1111/tops.12483>
- Shtulman, A., & Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124(2), 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.04.005>
- Simonsmeier, B. A., Flaig, M., Deiglmayr, A., Schalk, L., & Schneider, M. (2022). Domain-specific prior knowledge and learning: A meta-analysis. *Educational Psychologist*, 57(1), 31–54. <https://doi.org/10.1080/00461520.2021.1939700>
- Södervik, I., Hanski, L., & Katajavuori, N. (2020). First-year pharmacy students' prior knowledge correlates with study progress and reveals different dynamics of misconceptions. *Pharmacy Education*, 20(1), 94–102. <https://doi.org/10.46542/pe.2020.201.94102>
- Södervik, I., Mikkilä-Erdmann, M., & Chi, M. T. H. (2019). Conceptual change challenges in medicine during professional development. *International Journal of Educational Research*, 98, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2019.07.003>

- Taber, K. S. (2017). The nature of student conceptions in science. Teoksessa K. S. Taber & B. Akpan (toim.), *Science Education: An International Course Companion* (ss. 119–131). Sense Publishers.
- Thacker, I., & Sinatra, G. M. (2022). Supporting climate change understanding with novel data, estimation instruction, and epistemic prompts. *Journal of Educational Psychology, 114*(5), 910–927. <https://doi.org/10.1037/edu0000729>
- Trommler, F., & Hammann, M. (2020). The relationship between biological function and teleology: Implications for biology education. *Evolution: Education and Outreach, 13*. <https://doi.org/10.1186/s12052-020-00122-y>
- Vosniadou, S. (2014). Examining cognitive development from a conceptual change point of view: The framework theory approach. *European Journal of Developmental Psychology, 11*(6), 645–661. <https://doi.org/10.1080/17405629.2014.921153>