

**Lukio-opiskelijoiden käsityksiä jäätiköiden sulamisen ja  
ilmaston lämpenemisen yhteydestä**

Elina Aittoniemi & Lena Syrjälä

Kasvatustieteen pro gradu -tutkielma

Monografiamuotoinen

Kevätlukukausi 2023

Kasvatustieteiden laitos

Jyväskylän yliopisto

## TIIVISTELMÄ

**Aittoniemi, Elina & Syrjälä, Lena. 2023. Lukio-opiskelijoiden käsityksiä jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteydestä. Kasvatustieteen pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto. Kasvatustieteiden laitos. 80 sivua.**

Ihmisen toiminta on johtanut ilmaston lämpenemiseen, josta on seurannut merien lämpenemistä, sääilmiöiden muutoksia ja jäätiköiden sulamista. Ilmastonmuutosta käsitellään peruskoulu- ja lukio-opetuksessa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka lukiolaiset ymmärtävät ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen välistä yhteyttä sekä millaisia virhekäsityksiä opiskelijoilla mahdollisesti ilmiöiden ymmärtämisessä esiintyy.

Tutkimuksessa analysoitiin kevään 2017 fysiikan ylioppilaskokeen jokeritehtävän 13 d-kohdan vastauksia liittyen jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen väliseen yhteyteen. Aineisto oli 243 vastauksen otos, joka oli noin 5.5 % kaikista tehtävään 13 vastanneista. Otos oli kerätty satunnaisotannalla 19 eri lukiosta ympäri Suomea. Tieteellistä ymmärtämistä analysoitiin teoriaohjaavalla analyysimenetelmällä ja virhekäsityksiä aineistopohjaisesti.

Tulosten mukaan alle puolet ylioppilaskokelaista osasi liittää jäätiköiden sulamisen maapallon säteilytasapainon muutoksiin. Säteilityyypeistä yleisin maininta oli auringonsäteily, mutta useassa vastauksessa oli eritelty lämpösäteily tai auringonvalo. Yli viidennes kokelaista yhdisti kasvihuonekaasut oikein jäätiköiden sulamiseen. Palauteilmiön ymmärtämiseen luokiteltiin reilu kolmannes vastauksista. Virheellisiä käsityksiä ilmiöiden ymmärtämisessä esiintyi paljon. Merkittävimmat virhekäsitykset liittyivät lämmön sitoutumiseen, mutta paljon mainintoja saivat myös merivirtojen ja ympäristön sekä vesihöyryn ja sääilmiöiden muutokset. Tulosten perusteella lukio-opiskelijoiden käsitykset jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen välisestä yhteydestä ovat puutteellisia.

Asiasanat: ilmaston lämpeneminen, jäätiköiden sulaminen, säteilytasapaino, virhekäsitykset, ilmiöiden ymmärtäminen

## SISÄLTÖ

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>2</b>
<b>SISÄLTÖ</b> .....	<b>3</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>5</b>
<b>2 ILMASTON LÄMPENEMINEN JA JÄÄTIKÖT</b> .....	<b>8</b>
2.1 Kasvihuoneilmiö ja säteilytasapaino.....	8
2.2 Ilmastonmuutos.....	11
2.3 Ilmastonmuutoksen seuraukset.....	13
2.4 Jäätiköt ja ilmasto.....	15
<b>3 ILMASTON LÄMPENEMISEN JA JÄÄTIKÖIDEN SULAMISEN YMMÄRTÄMINEN</b> .....	<b>19</b>
3.1 Ilmaston lämpenemisen ymmärtäminen ja opetuksen suunnittelu.....	19
3.2 Jäätiköiden sulamiseen liittyvien ilmiöiden ymmärtäminen.....	22
3.2.1 Säteilytasapainon ymmärtäminen.....	23
3.2.2 Kasvihuonekaasuihin ja niiden vapautumiseen, meri- ja ilmavirtoihin sekä merenpinnan nousuun liittyvät käsitykset.....	26
<b>4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN..</b>	<b>29</b>
4.1 Tutkimustehtävä ja tutkimuskysymykset.....	29
4.2 Tutkimusaineisto.....	29
4.3 Aineiston analyysi ja varhainen luokittelu.....	31
4.3.1 Ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen yhteyden ymmärtämisen analysointi.....	33
4.3.2 Ilmaston lämpenemiseen ja jäätiköiden sulamiseen liittyvien virhekäsitysten analysointi.....	37

4.4 Eettiset ratkaisut.....	38
<b>5 TULOKSET .....</b>	<b>40</b>
5.1 Jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyden ymmärtäminen.....	40
5.1.1 Säteilytasapainon ymmärtäminen.....	41
5.1.2 Säteilytyyppien ymmärtäminen.....	44
5.1.3 Ymmärrys sulamisen ja kasvihuonekaasujen yhteydestä.....	47
5.2 Yhteyden ymmärtämiseen liittyvät virhekäsitykset.....	50
5.2.1 Käsitykset lämmön varastoitumisesta meriin ja jäätiköihin ilmaston lämpenemistä voimistavana mekanismina .....	51
5.2.2 Käsitykset jäätiköiden vaikutuksista lähiympäristöön ja sääilmiöihin.....	53
5.2.3 Käsitykset jäätiköiden vaikutuksista merivirtoihin.....	56
5.2.4 Muut käsitykset.....	58
<b>6 POHDINTA.....</b>	<b>60</b>
6.1 Opiskelijoiden tieteellinen ymmärtäminen .....	60
6.2 Opiskelijoiden virhekäsitykset .....	64
6.3 Tutkimuksen arviointi ja jatkotutkimus .....	68
<b>LÄHTEET.....</b>	<b>71</b>
<b>LIITTEET.....</b>	<b>78</b>

# 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on maailmanlaajuinen ympäristöuhka, jolla on laajoja vaikutuksia niin ympäristössä kuin yhteiskunnallisesti ja taloudellisesti (Ratinen, 2016, s. 11). Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2021, s. 320) mukaan ilmasto on lämmennyt noin 1 °C verrattuna 1850–1900-lukuihin. Ilmastonmuutoksesta on lämpötilojen nousun lisäksi havaintoja sääilmiöiden muutoksina, merten lämpenemisenä ja merenpinnan nousuna sekä jäätiköiden sulamisena (IPCC, 2021). Ilmastonmuutoksen aiheuttamat muutokset ympäristössä puolestaan muuttavat maapallon elinympäristöjä, mikä haastaa ihmisten ja muiden lajien selviytymistä muuttuvissa olosuhteissa.

Tänä päivänä ilmastonmuutoksella tarkoitetaan yleisesti ihmisen toiminnan voimistamaa ilmaston lämpenemistä. Ilmaston lämpeneminen on seuraus maapallon kasvihuoneilmiön voimistumisesta, jota aiheuttaa erityisesti kasvihuonekaasupitoisuuksien lisääntyminen ilmakehässä ihmisen toiminnan seurauksena (Virtanen, 2011, s. 22). Ilmaston lämpötilan muutoksiin vaikuttavat myös ilmastolliset takaisinkytkennät eli ilmastojärjestelmän palauteilmiöt, joita ovat esimerkiksi vesihöyrypitoisuuden muutokset ilmakehässä, jää- ja lumipeitteen sekä pilvisyyden muutokset ja hiilinielujen heikkeneminen (Open ilmastopas, 2016). Nimenomaan ilmastojärjestelmän osien kytkeytyneisyys voi tehdä ilmaston lämpenemisen voimakkuuden arvioinnista haastavaa.

Ilmaston lämpenemisen aiheuttama jäätiköiden sulaminen voi olla tulevaisuudessa yksi merkittävimmistä syistä ilmaston lämpenemisen kiihtymiseen, sillä jäätiköiden sulamisvesien vapautuessa meriin vesihöyryn ja siten myös pilvisyyden määrä voivat muuttua ja hiilinielut voivat peittyä nousevan veden alle. Kansainvälisen ilmastopaneelin (vrt. IPCC, 2019, s. 78–80) mukaan jäätiköiden sulamisen merkittävin ilmaston lämpenemistä kiihdyttävä mekanismi tällä hetkellä on kuitenkin jää- ja lumipeitteen sulamisesta aiheutuva säteilytasapainon muutos. Jää- ja lumipeite heijastaa suurimman osan säteilystä takaisin avaruuteen, kun taas sulaneiden jäätiköiden alta paljastuneet maa ja meri absorboivat

enemmän auringonsäteilyä, jolloin ilmaston lämpeneminen voimistuu (Open ilmasto-opas, 2016). Lisäksi ikiroudan sulaminen voi vapauttaa metaania ja muita kasvihuonekaasuja ilmakehään edelleen voimistaen ilmaston lämpenemistä (IPCC, 2021, s. 705, 1283).

Jäätiköiden sulamisella on seurauksia myös ihmiskunnalle ja muille eliölajeille sekä ekosysteemeille. Esimerkiksi arktisen merijään sulaminen haastaisi jääkarhujen selviytymistä ja sulamisvesien aiheuttama merenpinnan nousu uhkaisi rannikoiden ainutlaatuisia ekosysteemejä. Merenpinnan nousu olisi uhka myös ihmisten asuttamille alaville rannikkoalueille ja pienille valtamerten saarille. (IPCC, 2019, s. 228, 367–385). Toisin sanoen jäätiköiden sulaminen voi entisestään kiihdyttää ilmaston lämpenemistä ja siten myös lisätä sulamista sekä uhata ihmisen ja muiden lajien selviytymistä alueellisesti. Ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen yhteyden ymmärtäminen on siis tärkeää.

Ilmastonmuutokseen perehtyminen aloitetaan jo varhaiskasvatuksessa jatkaen ilmiön ymmärtämisen syventämistä aina peruskoulun läpi vähintään toisen asteen koulutukseen (ks. Opetushallitus, 2016; 2019; 2022). Varhaiskasvatuksen puolella ilmastonmuutosta ei käsitteenä käydä vielä läpi, mutta lapsia kannustetaan kestävien elämäntapojen oppimisen kautta hillitsemään myös ilmastonmuutosta. Peruskoulussa ilmastonmuutosta käsitellään erityisesti ympäristöopin, maantiedon ja biologian oppiaineissa (Opetushallitus, 2016). Lukion oppiaineista ilmastonmuutosta käsitellään erityisesti maantieteessä, biologiassa ja fyysikassa (Opetushallitus, 2019). Ilmastonmuutoksen käsittely koulutuksessa ei kuitenkaan aina ole ollut yhtä suurta, vaan sen määrä on uusimmissa opetussuunnitelmissa kasvanut ja sisällöt laajentuneet monipuolisimmaksi (ks. esim. Opetushallitus, 2003; 2019).

Ilmastojärjestelmän takaisinkytkennät ovat monimutkaisia ilmiöitä, joiden oppiminen vaatii jo kehittyneempiä ajattelun taitoja. Käsitteitä takaisinkytkentä tai palauteilmiö ei mainita edes lukion opetussuunnitelmassa (Opetushallitus, 2019), vaikkakin ilmastonmuutoksen luonnontieteellistä perustaa käsitellään opetuksessa. Opiskelijoiden käsityksiä ilmastonmuutoksesta on tutkittu jonkin verran, ja yleensä he osaavat nimetä ilmastonmuutokseen johtavia syitä ja sen

seurauksia (Mutlu & Nacarğlu, 2019). Esimerkiksi jäätiköiden sulaminen ja merenpinnan nousu ovat tyypillisiä opiskelijoiden mainitsemissa ilmaston lämpenemisen seurauksia (Groves & Pugh, 1999; Shepardson, Niyogi, Choi & Charusombat, 2011). Opiskelijoiden ymmärrystä ilmastojärjestelmän osien kytkeytyneisyydestä, kuten esimerkiksi ilmakehän ja jääpeitteen välillä, ei kuitenkaan ole juuri tutkittu.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan lukion päättävien käsityksiä ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen välisestä yhteydestä fysiikan ylioppilaskokeessa. Opiskelijoiden käsityksiä on perusteltua tutkia nimenomaan fysiikassa, sillä jäätiköiden sulaminen aiheuttaa muutoksia Maan energiatasapainossa vähentämällä Auringosta peräisin olevan sähkömagneettisen säteilyn poistumista maapallolta. Säteilyn ja aineen vuorovaikutus sekä energia ovat keskeisiä fysiikan sisältöjä niin tässä tutkimuksessa voimassa olevassa (Opetushallitus, 2003) kuin nykyisessä opetussuunnitelmassa (Opetushallitus, 2019). Lisäksi toisen asteen opiskelijat ovat ajattelun taidoiltaan kehittyneempiä ymmärtämään ilmastojärjestelmän osien kahdensuuntaista kytkeytyneisyyttä kuin iältään nuoremmat peruskoululaiset. Tässä tutkimuksessa pyritään siis selvittämään, kuinka lukiolaiset ymmärtävät jäätiköiden sulamisen ilmaston lämpenemistä kiihdyttäviä mekanismeja ja millaisia virhekäsityksiä opiskelijoilla ilmiöiden ymmärtämisessä mahdollisesti esiintyy.

## 2 ILMASTON LÄMPENEMINEN JA JÄÄTIKÖT

### 2.1 Kasvihuoneilmiö ja säteilytasapaino

Kasvihuoneilmiö on maapallon elämän syntymiselle ja säilymiselle välttämätön ilmiö. Sen seurauksena maapallon keskilämpötila on +15 °C, joka ilman kasvihuoneilmiön lämmittävää vaikutusta olisi -18 °C. Kasvihuoneilmiö syntyy, kun ilmakehän kasvihuonekaasut – erityisesti vesihöyry ja hiilidioksidi –, päästävät auringonsäteilyn ilmakehään ja maanpinnalle, mutta samalla hidastavat maanpinnan lähettämän lämpösäteilyn karkaamista takaisin avaruuteen. (Ruosteenoja, 2011, s. 69–70.) Kasvihuoneilmiö siis lämmittää maapallon pintaa ja ilmakehää, ja siten mahdollistaa elämän Maassa.

Maapalloa lämmittävän kasvihuoneilmiön saa aikaan Maahan saapuva auringonsäteily. Auringonsäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka säteilyspektri sisältää 49 % infrapunasäteilyä, 42 % näkyvää valoa ja 8 % ultraviolettia eli UV-säteilyä (Fondriest Environmental, 2023). Sähkömagneettinen säteily muodostuu säteilyn etenemissuuntaa vastaan kohtisuorasti kaikkiin suuntiin tapahtuvasta värähtelystä sähkö- ja magneettikentissä. Säteilyn lähde – tässä tapauksessa Aurinko – lähettää eli emittoi säteilyenergiaa fotoneina eli sähkömagneettinen säteily etenee fotonivirtana. (Aalto yliopisto). Säteilyspektrillä voidaan kuvata säteilyn intensiteetin jakaumaa aallonpituuksittain (Kotimaisten kieltenkeskus, 2012b).

Säteilyn aallonpituus on kääntäen verrannollinen säteilyn taajuuteen, jota mitataan hertseinä. Hertsi ilmoittaa värähdysten lukumäärän yhden sekunnin aikana. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus  $\lambda$  tyhjiössä voidaan laskea aaltoliikkeen perusyhtälöstä jakamalla aallon nopeus  $v$  säteilyn taajuudella  $f$  eli  $\lambda=v/f$ . (Valtanen, 2007, s. 97, 52.) Säteilyn energia, joka on yhtä suuri kuin fotonin energia, on suoraan verrannollinen sen taajuuteen ja kääntäen verrannollinen aallonpituuteen (ks. Valtanen, 2007, s. 71). Toisin sanoen lyhytaaltainen säteily



sisältää enemmän energiaa kuin pitkäaaltoinen säteily. Auringon sähkömagneettisen säteilyn tyypit suurimmasta pienimpään aallonpituuteen ovat infrapunasäteily, näkyvä valo ja UV-säteily (ks. Fondriest Environmental, 2023).

Kun sähkömagneettinen säteily osuu johonkin väliaineeseen, säteilyn fotonit voivat absorboitua, heijastua, sirota tai taittua (Aalto yliopisto). Kasvihuoneilmion hahmottamisen kannalta on tärkeintä ymmärtää säteilyn absorptio ja heijastuminen. Absorptiossa fotonin energia siirtyy kokonaisuudessaan väliaineeseen, jolloin absorboitunut energia muuttuu väliaineen sisäenergiaksi ja se lämpenee. Absorboitunut energia voi vapautua uudelleen säteilyenergiana eli tapahtuu uudelleen emittoituminen. (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio, 2005, s. 205.) Maapallolle absorboitunut energia nostaa maanpinnan lämpötilaa, haihduttaa vettä, sulattaa ja sublimoi jäätä sekä lisää lämmön vaihtoa maan ja ilmakehän alimpien kerrosten kanssa (Coakley, 2003). Kasvihuoneilmion näkökulmasta auringonsäteilyn absorboituminen maapallolle siis nostaa sen lämpötilaa.

Säteily heijastuu aineiden rajapinnassa, kun saapuvan säteen tulokulma ja heijastuneen säteen heijastuskulma ovat väliaineiden rajapinnan normaaliin nähden yhtä suuret (Kurki-Suonio & Kurki-Suonio, 2005, s. 184). Erilaiset pinnat heijastavat siis säteilyä eri määriä. Säteilyn heijastuskyky eli albedo kuvaa kappaleeseen osuneen ja siitä heijastuneen säteilyn suhdetta. Albedon arvo vaihtelee välillä 0–1 eli 0–100 % sen ollessa suurimmillaan, kun säteily heijastuu pinnalta täysin. Täysin heijastava pinta on valkoinen, jolloin albedo on 1 eli 100 %. Vastaavasti täysin musta pinta absorboi kaiken säteilyn, jolloin albedo on 0 eli 0 %. (My Nasa Data; Open ilmasto-opas, 2016.) Albedon avulla voidaan siis selvittää, kuinka paljon auringonsäteilyä heijastuu maapalloilta ja ilmakehästä sekä vastaavasti kuinka paljon säteilyä absorboituu maapallon pintaan ja ilmakehään.

Auringosta saapuvasta säteilyä absorboituu 47 % maanpintaan ja 24 % ilmakehään. Auringosta saapuvasta säteilyä heijastuu suoraan 22 % ilmakehästä ja 7 % maanpinnalta eli yhteensä 29 %. (vrt. Wild ym., 2015, s. 3394.) Auringonsäteily heijastuu ilmakehässä pilvistä ja aerosoleista. Maan pinnalta säteily heijastuu maan, vesistöjen ja jäätiköiden pinnoilta. (IPCC, 2021.) Kun Auringosta Maahan saapuva säteily absorboituu maanpintaan, se lämpenee. Lämmennyt

maanpinta emittoi lämpöä infrapun säteilyä, joka absorboituu tehokkaasti ilmakehän kasvihuonekaasuihin (Open ilmasto-opas, 2016). Maanpinnan emittoiman infrapun säteilyn seurauksena ilmakehään absorboituu siis enemmän säteilyä kuin pelkästään Auringosta. Tämä nostaa ilmakehän lämpötilaa, ja ilmiö tunnetaan siis kasvihuoneilmiona.

Maanpintaan absorboituva säteily poistuu 25 % haihtumisen, 5 % konvektion ja 17 % nettolämpösäteilyn kautta. Nettolämpösäteilystä avaruuteen karkaa 12 % ja loput 5 % absorboituu ilmakehän kasvihuonekaasumolekyyleihin. Lämpösäteilyn absorboituminen kasvihuonekaasumolekyyleihin nostaa niiden lämpötilaa, jolloin ne lähettävät lämpösäteilyä joka suuntaan. Osa tästä lämpösäteilystä siis suuntautuu takaisin kohti maanpintaa, jolloin se uudelleen absorboituu maahan. (Lindsey, 2009.) Tästä syystä maanpinnan lämpötila on suurempi kuin pelkän auringonsäteilyn absorboitumisen vaikutuksesta.

Kasvihuoneilmiötä voidaan selittää myös mustan kappaleen mallilla. Musta kappale on ideaali kappale, joka absorboi kaiken siihen osuneen säteilyn eikä siis heijasta lainkaan säteilyä. (Open ilmasto-opas, 2016). Mikäli maapallo olisi musta kappale, jonka albedo olisi 0.306 ja ilmakehän vaikutusta ei huomioitaisi, maapallon pintalämpötila olisi  $-18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jos maapallo absorboisi kaiken tulevan säteilyn, niin pintalämpötila olisi  $5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (Open ilmasto-opas, 2016). Maapallon nykyinen lämpötila on kuitenkin  $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Scotese, 2021), mikä tarkoittaa kasvihuoneilmiön nostavan lämpötilaa merkittävästi.

Kasvihuoneilmiö ja sen lämmittävä vaikutus syntyy siis muutoksesta Maan säteilytasapainossa. Maan säteilytasapaino tarkoittaa tasapainoa Auringosta Maahan tulevan ja Maasta avaruuteen poistuvan säteilyn välillä. Säteilypakote kuvaa saapuvan ja poistuvan säteilyn välistä eroa. Toisin sanoen Auringosta peräisin olevan absorboidun ja heijastuneen säteilyenergian välinen tasapaino määrittää keskimääräisen lämpötilan maan pinnalla. (Open ilmasto-opas, 2016.) Edellä kuvattu kasvihuonekaasujen aiheuttama lisääntynyt lämpösäteilyn absorboituminen ilmakehään ja maanpintaan muuttaa Maan säteilytasapainoa, jolloin säteilypakote on positiivinen. Tämä aiheuttaa luonnollisen kasvihuoneilmiön.

Ihmisen toiminta on lisännyt ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksia, joista erityisesti hiilidioksidipitoisuus on kasvanut. Ihminen on toiminnallaan lisännyt myös muiden kasvihuonekaasujen, kuten metaanin, dityppioksidin ja F-kaasujen, pitoisuuksia ilmakehässä. (Ruosteenoja, 2011, s. 70–73.) Ilmakehän suurentuneet kasvihuonekaasupitoisuudet lisäävät maanpinnan emittoiman lämpösäteilyn absorboitumista kasvihuonekaasumolekyyleihin, mistä syystä kasvihuoneilmiö voimistuu. Kasvihuoneilmiön voimistuminen kiihdyttää lämpötilojen nousua, jolloin ilmasto lämpenee. Ihmisen toiminnan aiheuttama kasvihuoneilmiön voimistuminen tunnetaan ilmastonmuutoksena.

## 2.2 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutos tarkoittaa pitkän aikavälin muutoksia ilmaston ominaisuuksien, kuten lämpötilan, sadannan ja tuuliolojen, keskiarvoissa (IPCC, 2021). Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2021) arvion mukaan ihmisen toiminta on nostanut ilmakehän lämpötilaa noin 1 °C teollistumisen aikakauden jälkeen. Lisäksi edelliset neljä vuosikymmentä ovat olleet lämpimämpiä kuin koskaan aiemmin 1850-luvulta alkaneen mittaushistorian aikana. (IPCC, 2021, s. 316). Tänä päivänä ilmastonmuutoksella viitataan yleisesti ihmisen toiminnan aiheuttamaan ilmaston lämpenemiseen.

Ilmaston lämpeneminen ei ole ainutkertainen ilmiö, sillä ilmaston lämpötila on vaihdellut maapallon historiassa useita kertoja (ks. esim. Lunkka, 2008). Ilmaston lämpötilan vaihteluun on monia luonnollisia syitä, kuten ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutokset, mannerliikunnot, maapallon akselin kaltevuuden vaihtelu ja muutokset maapallon kiertoradassa Aurinkoon nähden (Ruosteenoja, 2011, s. 69). Luonnollista ilmaston lämpötilan vaihtelua aiheuttavat myös auringonsäteily ja tulivuorenpurkaukset (IPCC, 2021, s. 962). Historian korkeimmat ilmaston lämpötilat ovat tyypillisesti olleet yhteydessä suuriin laavapurkauksiin, jolloin ilmakehään on vapautunut runsaasti hiilidioksidia (Scotese,

2021). Myös nykyisen ilmaston lämpenemisen merkittävimpanä syynä on ilmakehän kohonnut hiilidioksidipitoisuus, tosin ihmisen toiminnan seurauksena (Ruosteenoja, 2011, s. 70; Virtanen, 2011, s. 22).

Viimeisen 540 miljoonan vuoden aikana ilmasto on ollut lämpimimmillään pitkäaikaisen keskilämpötilan ollessa noin 25 °C. Maapallon keskilämpötila on nyt 14.5 °C eli vähemmän kuin historiassa. (Scotese, 2021.) Ainutlaatuisen nykyisestä ilmastomuutoksesta tekee ihmistoiminnan vaikutukset ilmaston lämpenemiseen ja lämpenemisen nopeus. Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2021, s. 43–46) mukaan ilmasto on lämmennyt nopeammin verrattuna moneen edelliseen vuosituuhanteen. Lisäksi raportin mukaan nykyinen ilmaston lämpeneminen on tutkitusti seurausta ihmisen toiminnasta syntyneistä hiilidioksidipäästöistä, kun aiemmat ilmastomuutokset ovat olleet yhteydessä luonnollisiin ilmastojärjestelmään vaikuttaviin tekijöihin.

Ilmaston lämpenemisen suuruuden arviointiin on kehitetty viisi SSP-skenaariota (Shared Socioeconomic Pathways). Skenaarioiden mukaan ilmaston keskilämpötila 1850–1900-ajanjaksoon verrattuna nousisi 1.4–4.4 °C vuoteen 2100 mennessä. (IPCC, 2021, s. 14.) Ilmaston lämpeneminen pyritään rajoittamaan 1.5 °C vuosisadan loppuun mennessä (IPCC, 2018). Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi on luotu kansainvälinen Pariisin ilmastosopimus, jonka tavoitteena on rajoittaa ilmaston lämpeneminen selvästi alle kahden celsiusasteen esiteolliseen aikaan verrattuna. Pariisin sopimuksen tavoitteena on vähentää maailmanlaajuisesti kasvihuonekaasupäästöjä pyrkimällä toimiin, jotka rajaavat ilmaston lämpenemisen alle 1.5 °C. (Valtioneuvoston asetus Pariisin sopimuksen voimaansaattamisesta ja sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten voimaansaattamisesta annetun lain voimaantulosta, 2016.) Ilmastomuutoksen hillintä on tärkeää, sillä mitä suurempi lämpötilan nousu on, sitä vakavammat seuraukset ympäristölle ja ihmiskunnalle ovat.

## 2.3 Ilmastonmuutoksen seuraukset

Ilmastonmuutos aiheuttaa muutoksia maapallon lähes kaikissa järjestelmissä eli ilmakehässä, vesi- ja jääkehässä sekä elonkehässä (IPCC, 2021, s. 158). Lisäksi ilmastonmuutos vaikuttaa välillisesti myös kivikehään esimerkiksi rapautumisen kautta. Nämä viisi ”kehää” ovat fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten prosessien kautta kytkeytyneet toisiinsa ja muodostavat yhdessä ilmastojärjestelmän (ks. Ilmastojärjestelmä mukautuu pakotteisiin). Ilmakehässä ilmastonmuutos aiheuttaa lämpötilojen nousua. Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2021, s. 1550) mukaan on lähes varmaa, että lämpimien päivien ja öiden määrä on kasvanut sekä kylmien päivien ja öiden määrä vähentynyt globaalisti 1950-luvulta. Maailmanlaajuisesti myös helleaaltojen määrä, voimakkuus ja pituus ovat arvion mukaan lisääntyneet. Lisäksi IPCC:n arvion mukaan vuotuinen maan minimilämpötila on noussut kolme kertaa enemmän kuin maanpinnan keskilämpötila keskimäärin 1960-luvulta.

Ilmaston lämpeneminen voi muuttaa myös maapallon tuuliolosuhteita. Kansainvälinen ilmastopaneeli (IPCC, 2021, s. 132) raportoi keskimääräisen tuulennopeuden laskeneen useimmilla maa-alueilla. On myös todennäköistä, että voimakkaiden trooppisten syklonien määrä on lisääntynyt viimeisen neljän vuosikymmenen aikana. Tulevaisuudessa ilmaston lämpenemisen seurauksena voimakkaiden trooppisten syklonien määrä ja niiden keskimääräiset tuulennopeudet sekä voimakkaimpien syklonien huipputuulennopeudet kasvavat globaalisti kansainvälisen ilmastopaneelin mukaan.

Ilmakehän lämpötilojen kasvu vaikuttaa vesikehässä veden kiertokulkuun, sillä lämpimämpi ilma lisää haihduntaa ja sitoo enemmän kosteutta. Lisääntynyt haihdunta ja ilmankosteus vaikuttavat maapallon pilvisyyteen ja sadantaan. Sadanta tarkoittaa ilmankosteudesta tiivistynyttä, sateena pudonnutta vettä eri olomuodoissa (Kotimaistenkielten keskus, 2012b). Ilmaston lämpeneminen todennäköisesti lisää sään ääri-ilmiöitä paikallisesti, kuten rankkasateita, myrskyjä ja tulvia sekä toisaalla kuivuutta (IPCC, 2021, s. 1518–1520). Pilvipiteitten muutokset vaikuttavat auringonsäteilyn absorboitumiseen ja heijastumiseen ilmake-

hässä ja maanpinnalla (Wild ym., 2019). Nämä säteilytasapainon muutokset puolestaan vaikuttavat kasvihuoneilmion voimakkuuteen ja siten Maan pintalämpötiloihin.

Vesikehä sisältää kaiken maapallolla esiintyvän veden eli järvet, joet, meret, pohjaveden, jäätiköt (jääkehä) sekä ilmakehään ja kasvillisuuteen sitoutuneen veden. Valtaosa maapallolla esiintyvistä vedestä on merissä, jotka sisältävät 97 % maapallon vesivaroista, ja jotka peittävät 71 % Maan pinnasta (IPCC, 2019, s. 78). Ilmaston lämpeneminen aiheuttaa merissä lukuisia muutoksia, joista todennäköisimpiä ovat meriveden lämpeneminen, merten happamoituminen ja merenpinnan nousu (Allison & Basset, 2015). Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2021, s. 1221–1223) mukaan on varsin todennäköistä, että meren pintaveden keskilämpötila on noussut 0.88 °C aikaväliltä 1850–1900 aikavälille 2011–2020 ja 0.60 °C aikavälillä 1980–2020. Merten lämpötilan nousun ennustetaan myös jatkuvan 2000-luvulla. Merenpinta on mittausten mukaan noussut keskimäärin 3.58 mm/vuosi aikavälillä 2006–2015, ja nousun ennustetaan jatkuvan ja jopa kiihtyvän 2100-luvulle mennessä (IPCC, 2019, s. 336, 352). Lisäksi epäorgaanisen hiilen määrä merissä on kasvanut johtaen merten happamoitumiseen, ja pH:n arvelaankin laskevan 0.036–0.291 yksikköä vuoteen 2100 mennessä (IPCC, 2019, s. 469–470).

Ilmaston lämpeneminen aiheuttaa muutoksia myös elonkehässä, ja täten on uhka myös ihmiskunnalle. Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2018, s. 7–10) mukaan jo 1.5 °C lämpeneminen lisää riskejä ihmisten terveyden, elinympäristöjen ja taloudellisen kasvun heikentymiseen sekä vaarantaa ruokaturvaa ja puh-taan veden saatavuutta. Esimerkiksi merenpinnan nousu on uhka pienten saarien ja alavien ranta-alueiden ekologialle sekä niiden asutukselle ja infrastruktuurille. Raportin mukaan ilmaston lämpeneminen myös vähentää ekosysteemien monimuotoisuutta ja lisää lajien sukupuuttoriskiä niin maalla kuin merellä.

Muutos yhdessä ilmastojärjestelmän ”kehässä” välittyy myös muihin ilmastojärjestelmän osiin, mikä voi käynnistää erilaisia palauteilmiöitä (Ilmastojärjestelmä mukautuu pakotteisiin). Palauteilmiö tarkoittaa yhden muutoksen ai-

heuttamia muissa ilmastojärjestelmän osissa tapahtuvia muutoksia, jotka voivat vahvistaa tai heikentää alkuperäisen tapahtuman vaikutuksia (Open ilmastopas, 2016). Ilmasto ei kuitenkaan muutu samankaltaisesti kaikkialla maapallolla (Virtanen 2011, s. 30). Tästä syystä maapallon alueet ovat ilmastomuutoksen suhteen eriarvoisessa asemassa, ja seuraavaksi tarkastellaankin ilmaston lämpenemiselle herkkiä jäätiköitä.

## 2.4 Jäätiköt ja ilmasto

Veden kiinteää olomuotoa kutsutaan jääksi. Makeasta vedestä muodostuu jäätä jäätymispisteessä, joka on 0 °C normaalissa ilmanpaineessa. Paineen kasvaminen ja veteen liuenneet yhdisteet, kuten suolat, alentavat sen jäätymispistettä. (Myrberg & Leppäranta, 2014, s. 63–64). Pysyvä jääpeite peittää 12.5 % maapallon pinnasta ja 70 % makeasta vedestä on sitoutuneena jäätiköihin (Bamber ym., 2018). Maassa jäätä löytyy manner- ja vuoristojäätiköistä, merijäästä, ilmakehästä sekä maankuoren, järvien ja jokien pinnoilta. Jäätikkö on laajahko monivuotinen jääalue, joka on muodostunut lumen pakkautuessa ja joka pienenee ablaation eli sulamisen ja haihtumisen seurauksena. Mannerjäätiköksi kutsutaan yli 50 000 km<sup>2</sup> jääaluetta. (IPCC, 2019, s. 686.) Maapallolla on nykyisin kaksi mannerjäätikköä, joita ovat Etelämanner eli Antarktis ja Grönlannin mannerjäätikkö. Maapallon suurin merijäätikkö on Pohjoisen jäämeren merijääalue. (ks. Windnagel, 2022.)

Maapallon jäätiköillä on ilmaston lämpötilan säätelyssä tärkeä rooli. Lumen ja jään albedo vaihtelee välillä 0.2–0.9 puhtaan lumen heijastaessa jopa lähes 90 % auringonsäteilyä takaisin avaruuteen (Gardner & Sharp, 2010, kuva 9a). Maaperän albedo on 0.1–0.2 ja meren 0.02–0.1 (Plumb & Marshall, 2007, 11) eli ne heijastavat jäätiköitä huomattavasti vähemmän säteilyä. Napa-alueiden jäätiköt eli napajäätiköt ovat verrattain laajoja jäätikköalueita, jotka vaalean pintansa ansiosta heijastavat suurimman osan niihin osuvasta auringonsäteilyä takaisin avaruuteen. Tämä vaikuttaa maapallon säteilytasapainoon erityisesti napa-alueilla. Ilmaston lämpenemisen aiheuttama jäätiköiden sulaminen korvaa jäätiköt

vähemmän heijastavalla maaperällä ja merivedellä, jolloin auringonsäteilyä absorboituu maanpintaan enemmän (IPCC, 2019, s. 80).

Sulamisen seurauksena lisääntynyt auringonsäteilyn absorboituminen maahan ja mereen kiihdyttää ilmaston lämpenemistä, joka edelleen kiihdyttää jäätiköiden sulamista. Kyseessä on ilmastojärjestelmän palauteilmiö, jossa ilmasto muuttaa ilmastoon vaikuttavaa tekijää, joka vastaavasti muuttaa edelleen ilmastoa (ks. IPCC, 2019, s. 82). Tämä jäätiköiden sulamiseen liittyvä palauteilmiö on kylmillä ilmastovyöhykkeillä paikallisesti varsin merkittävä (Open ilmasto-opas, 2016). Lisäksi lumen ja jään sulaessa niiden väri tummenee, mikä lisää auringonsäteilyn absorboitumista siihen ja näin nopeuttaa sulamista. Jäätiköille on voinut tuulten mukana kulkeutua myös nokea ja muita epäpuhtauksia, jotka sulamisen myötä paljastuvat ja tumman värinsä vuoksi edelleen nopeuttavat sulamista. (ks. Myrberg & Leppäranta, 2014, s. 69).

Napajäätiköt ovat erityisen haavoittuvassa asemassa ilmaston lämpenemisen suhteen. Syynä tähän on polaarinen amplifikaatio, jonka mukaan muutos Maan säteilytasapainossa aiheuttaa keskimäärin suuremman lämpötilamuutoksen napa-alueilla kuin muualla maapallolla (IPCC, 2021, s. 982). Toisin sanoen ilmaston lämpeneminen nostaa lämpötiloja keskimäärin enemmän napa-alueilla kuin muualla maapallolla. Aikavälillä 1979–2021 on havaittu, että arktinen alue eli Arktis on lämmennyt  $0.73\text{ °C}$  vuosikymmenessä ja muu maailma  $0.19\text{ °C}$  eli Arktis on lämmennyt lähes neljä kertaa nopeammin kuin muu maailma (Rantanen ym., 2022). Myös Antarktis on kolmen viimeisen vuosikymmen aikana lämmennyt keskimäärin  $0.61\pm 0.34\text{ °C}$  vuosikymmenessä, mikä on kolme kertaa enemmän kuin muualla maailmassa keskimäärin (Klem ym., 2020).

Ilmastonmuutoksen aiheuttama keskilämpötilan nousu ja polaarisen amplifikaation vahvistama lämpeneminen napa-alueilla vaikuttaa napajäätiköiden laajuuteen. On mitattu, että pohjoisen pallonpuoliskon merijää on sulanut  $2.0 \times 10^6\text{ km}^2$  aikavälillä 1979–2016 (Onarheim ym. 2018, s. 4919–4920). Myös Grönlandin jäätiköt ovat sulaneet  $278 \pm 11$  gigatonnia vuosittain aikavälillä 2006–2015 (IPCC, 2019, s. 6, 236). Vastaavasti Antarktiksien mannerjäätikkö on sulanut  $109 \pm 56$  gigatonnia vuosittain aikavälillä 1992–2017 (Shepherd ym. 2018). Jäätiköiden



sulamisen on haitallista, sillä jäätiköiden ainutlaatuiset ekosysteemit ovat vaarassa kadota ja sulamisen aiheuttama merenpinnan nousu sekä meriveden muutokset lisäävät rannikoiden ekosysteemien, kuten koralliriuttojen ja mangrove-metsien, uhanalaisuutta (IPCC, 2019, luku 3.4.3.2; luku 5.3).

Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2019, s. 52) mukaan on myös erittäin todennäköistä, että Arktisen ja Antarktiksien ikirouta-alueen lämpötilat ovat nousseet lähes 0.4 °C aikavälillä 2007–2016. Ikiroudaksi kutsutaan maaperää, joka pysyy yhtämittaisesti jäässä vähintään kaksi vuotta (Arktinen keskus). Ilmastopaneelin raportin (IPCC, 2019, s. 18, 6) mukaan on todennäköistä, että ikirouta sulaa tiukimmankin ilmastoskenaarionkin mukaan  $24 \pm 16$  % vuoteen 2100 mennessä. Arktisen ja boreaalisen vyöhykkeen ikirouta on sitonut itseensä 1460–1600 gigatonnia orgaanista hiiltä, jolloin kansainvälisen ilmastopaneelin mukaan ikiroudasta voi sulamisen seurauksena vapautua metaania ja hiilidioksidia ilma-kehään. Tämä kasvihuonekaasujen vapautuminen lämmittäisi entisestään ilma-kehää.

Veden ominaislämpökapasiteetti on 4.186 J/(K·kg), mikä on verrattain suuri (Myrberg & Leppäranta, 2014, s. 86). Ominaislämpökapasiteetti on suure, joka kuvaa lämpömäärää, joka tarvitaan kohottamaan massayksikön suuruisen ainemäärän lämpötilaa (Kotimaisten kielten keskus, 2012a). Suuren ominaislämpökapasiteetin vuoksi meret kykenevät sitomaan paljon lämpöenergiaa ja ilmaston lämpeneminen onkin johtanut meriveden lämpenemiseen. Veden olomuodon muutoslämmöt ovat myös korkeita, mistä syystä olomuodon muutokset ovat hitaita ja esimerkiksi napamerien jääpeite ei sula tai vahvistu muutamaa senttimetriä enempää vuorokaudessa (Myrberg & Leppäranta, 2014, s. 86). Jään sulaminen sitoo energiaa, joka on peräisin Auringosta. Veden jäätyminen puolestaan vapauttaa energiaa ympäristöönsä.

Ilmastomuutoksen aiheuttama meriveden lämpeneminen voi entisestään kiihdyttää merijäätiköiden sulamista kesäisin ja keväisin sekä hidastaa jäätiköiden muodostumista syksyisin ja talvisin (National oceanic and Atmospheric Administration, 2023). Merijäätiköiden väheneminen myös lisää meriveden pinta-alaa, mikä lisää auringonsäteilyn absorboitumista meriin edelleen lämmittäen

niitä ja kiihdyttäen sulamista. Kyseessä on positiivinen takaisinkytkentä, jota kutsutaan albedo-efektiksi. Lisäksi merijäätiköt toimivat eristeen tavoin kylmän ilman ja lämpimämmän meriveden välillä, jolloin merijään sulaessa tämä eristevaikutus poistuu (Myrberg & Leppäranta, 2014, s. 93, 63.) Toisaalta lämmön sitoutuminen meriin toimii myös ilmaston lämpenemistä hidastavana mekanismina. Se johtuu siitä, että vesi kykenee korkean ominaislämpökapasiteettinsa ansiosta sitomaan ilmaa huomattavasti enemmän lämpöä (ks. Valtanen, 2007, s. 182).

Meret ovat kerrostuneet veden tiheyden mukaan, mihin vaikuttavat veden lämpötila ja suolapitoisuus. Veden tiheys kasvaa sen jäähtyessä tai suolapitoisuuden kasvaessa, jolloin raskas vesi vajoaa pohjaa kohti ja uutta pintavettä virtaa alueelle. Poikkeuksena makea vesi on 4 °C raskaimmillaan, ja jään tiheys on nestemäistä vettä pienempi. Raskaampi vesi virtaa pohjan suuntaisesti ja aiheuttaa tiheydeltään kevyemmän veden kumpuamista ylöspäin. Tällaista veden kiertoliikettä merten pinta- ja syvävesien välillä kutsutaan termohaliinikiirroksi. Valtamerien pintavesissä esiintyy myös pinnansuuntaisia merivirtoja, joita synnyttävät erityisesti tuulet ja maapallon pyöriminen. (Myrberg & Leppäranta, 2014, s. 29, 40–45.) Ilmastonmuutoksen aiheuttama jäätiköiden sulamisesta vapautuva kylmä makeavesi muuttaa paikallisesti meriveden lämpötiloja ja suolapitoisuutta, ja siten voi muuttaa merten vedenkiertoa. Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC, 2021, s. 1236–1241) mukaan on hyvin todennäköistä, että Pohjois-Atlantin merivirrat heikkenevät 2000-luvun aikana sekä eteläiset merivirrat voivat heikentyä Antarktiksien sulamisen seurauksena. Raportin mukaan erityisesti muutokset tuuliolosuhteissa ja merten lämpötiloissa vaikuttavat merivirtoihin.

### 3 ILMASTON LÄMPENEMISEN JA JÄÄTIKÖIDEN SULAMISEN YMMÄRTÄMINEN

#### 3.1 Ilmaston lämpenemisen ymmärtäminen ja opetuksen suunnittelu

Huoli ilmaston lämpenemisestä on julkisissa tiedotusvälineissä ollut varsinkin viime vuosina paljon keskustelua herättävä aihe sen ajankohtaisuuden vuoksi (Boyes, Chuckran & Stanisstreet, 1993; Boyes, Stanisstreet & Yongling, 2008). Kasvihuoneilmiö koostuu kuitenkin abstraktia ymmärrystä vaativista monimutkaisista käsitteistä (Niebert & Gropengießer, 2014) ja monista eri ilmiöiden välisistä yhteyksistä (Shepardson, Roychoudhury, Hirsch, Niyogi & Top, 2014), jolloin myös tieto ilmaston lämpenemisestä erityisesti mediassa on hajanaista (Hayhoe, Bullock & Hayhoe, 2011) ja kyseisen ilmiön ymmärtäminen haastavaa (Groves & Pugh, 1999; Shepardson ym., 2014). On siis mahdollista, että oppilaille ikäryhmästä ja kansalaisuudesta riippumatta (Boyes ym., 2008; Niebert & Gropengießer, 2014) muodostuu virhekäsityksiä, jotka voivat pohjautua mediasta saantaan epämääräiseen tietoon (Boyes ym., 2008; Groves & Pugh, 1999) ja toisaalta pohjautua arkipäiväisiin kokemuksiin (Niebert & Gropengießer, 2014).

Näitä virheellisiä ajatuksia kasvihuoneilmiön voimistumisesta on vaikea muuttaa tehokkaasta opetuksesta huolimatta (Ratinen, Viiri & Lehesvuori, 2013), ja usein osa virhekäsityksiin liittyvistä ajatuksista saattaa säilyä pitkälle aikuisuuteen saakka (Boyes ym., 1993; Boyes ym., 2008). Kuitenkin jo nuoret oppilaat vaikuttavat ymmärtävän ilmaston lämpenemisen ja keskilämpötilan nousun seurauksia (Mutlu & Nacarglu, 2019), joista napajään sulaminen tunnistetaan hyvin (Groves & Pugh, 1999). Harva oppilas kuitenkaan ymmärtää mekanismeja näiden seurausten takana, vaikka koulun on mainittu olevan yksi oppilaiden suurimmista tiedonlähteistä ilmaston lämpenemisessä (Nevanpää, 2005, s. 126). Ilmastonmuutosta käsitellään perus- ja lukio-opetuksessa (Opetushallitus 2016, 2019).

Ilmastonmuutokseen liittyvät aiheet ovat ajan myötä lisääntyneet perusopetuksessa ja lukiokoulutuksessa tutkimustiedon ja yhteiskunnallisen keskustelun kasvaessa ilmiöstä sekä sen mekanismeista ja seurauksista. Jo vuoden 2004 perusopetuksen opetussuunnitelmassa maantieteessä käsitellään esimerkiksi kasvihuoneilmiön voimistumista, otsonikatoa ja elinympäristöjen saastumista. Päätöarvioinnissa tavoitteena on, että oppilas ymmärtää kasvihuoneilmiön lisäksi hiilen kiertokulun mekanismin. Vastaavasti myös edellisessä lukio-opetuksen opetussuunnitelmassa (Opetushallitus, 2015) opetuksen arvoperustana on ymmärrys oppilaan globaalista vastuusta ja ilmastonmuutoksen hillinnästä. Jälkimmäisessä lisäksi ilmastonmuutosta, siihen vaikuttavia tekijöitä ja sen seurauksia käsitellään laaja-alaisesti kestävän elämäntavan aihekokonaisuudessa sekä biologian ja maantieteen pakollisilla kursseilla.

Lukion kursseista ilmiötä käsittelevät ekologisten vaikutusten kannalta biologian 2. kurssi (BI2: Ekologia ja ympäristö) ja globaalisten ympäristöriskien osalta maantieteen 1. kurssi (GE1: Maailma muutoksessa). Lisäksi esimerkiksi sähkömagneettisen säteilyn spektrin, valon heijastumisen ja taittumisen aihealueita käsitellään fysiikan valinnaisella kurssilla FY6: Sähkömagnetismi sekä säteilyn sovelluksia ja fotoneja valinnaisella kurssilla FY7: Aine ja säteily. Vuoden 2003 lukion opetussuunnitelman perusteissa – jonka mukaan tässä tutkimuksessa käytetyn aineiston opiskelijat ovat opiskelleet – ilmastonmuutosta käsitellään vain maantieteen pakollisella kurssilla GE1: Sininen planeetta ja syventävällä kurssilla GE3: Riskien maailma, jossa lisäksi aiheena on biodiversiteettikato. Fysiikan syventävillä kursseilla FY3: Aallot ja FY8: Aine ja säteily edeltävässä käsitellään heijastumista ja taittumista sekä jälkimmäisessä käydään läpi sähkömagneettista säteilyä.

Nykyisin voimassa olevissa peruskoulun ja lukion opetussuunnitelmissa (Opetushallitus 2016, 2019) ilmastonmuutokseen liittyviä aiheita käydään läpi laajemmin esimerkiksi kielten oppimisessa, eettisestä näkökulmasta (yleisesti ja esim. uskonto ja elämäntietä) ja luonnontieteissä (biologia, maantiede, fysiikka ja kemia). Fysiikan valinnaisella kurssilla FY8: Aine, säteily ja kvantittu-

minen ilmastonmuutosta ja kasvihuoneilmiötä käydään läpi (sähkömagneettisen) säteilyn ja energian näkökulmista, kun taas esimerkiksi kurssilla FY3: Energia ja lämpö -aihetta käsitellään energiatasapainon ja lämmönsiirtymisen merkityksistä. Kurssilla FY5: Jaksollinen liike ja aallot käsitellään jo aallon heijastumista ja taittumista, mutta nämä aihealueet palaavat valon, säteilyn spektrin sekä muiden säteilytyyppien (UV- ja infrapunasäteily) merkeissä kurssilla FY7: Sähkömagnetismi ja valo. Tietenkin se, kuinka syvällisesti aiheita käydään läpi sekä kuinka paljon ilmaston lämpenemistä ja kasvihuoneilmiötä painotetaan opetuksessa, vaihtelee kouluista ja opettajista riippuen (vrt. Groves & Pugh, 1999).

Oppilaiden virhekäsitykset saattavat toisinaan muodostua opettajien virhekäsityksistä (Groves & Pugh, 1999), ja onkin havaittu, että opettajien ymmärrys ilmastonmuutoksen prosesseista on heikkoa (Ratinen ym., 2013). Ilmiön monimutkaisuuden vuoksi opettajan on myös vaikea luoda oppimista tukevia opiskelustrategioita, ja tutkimusten mukaan perinteinen luokkahuoneopetus vaikuttaa opiskelijoiden tieteelliseen ymmärrykseen vain vähän (Jakobsson ym., 2009). Opetuksen ja opetusmateriaalien on todettu toimivan parhaiten, kun niiden sisältämä tieto kohdistuu ensisijaisesti opiskelijoiden jo olemassa olevien virhekäsitysten kumoamiseen (Boyes ym., 1993) ja ennakkotietoihin (Ratinen, 2016, s. 62). Opiskelijoiden virhekäsitykset ja ennakkotiedot huomioivan sekä osallistavan opetuksen on todettu toimivan tehokkaammin mitä perinteisen luokkahuoneopetuksen, vaikka jälkimmäisessä käytäisiinkin läpi tieteellisesti oikeita käsitteitä (McCuin, Hayhoe & Hayhoe, 2014).

Ilmaston lämpenemiseen liittyvien käsitysten muodostuminen alkaa pinnallisesti, jolloin joukkotiedotusvälineistä ja koulusta peräisin oleva hajanainen tieto liitetään helposti arkiseen ajatteluun (Nevanpää, 2005, s. 127). Tärkeintä on auttaa oppilaita kehittämään heidän ymmärrystään ilmastojärjestelmän osista sekä niiden välisistä vuorovaikutuksista ja toiminnasta (Shepardson ym., 2014). Tämä vaatisi kuitenkin pidemmän jakson, kuten usean viikon tai kokonaisen lukukauden, aikaista syvällistä opetusta (McCuin ym., 2014; Mutlu & Nacaroglu, 2019). Virhekäsitysten ehkäisemiseksi on todettu myös auttavan konkreettiset harjoitukset, joiden avulla mallinnetaan ilmaston lämpenemistä konkreettisesti

(Mutlu & Nacaroglu, 2019). Lisäksi oppimisen tukena suositellaan osallistavaa vuoropuhelua, sillä kirjallisissa vastauksissa on huomattu ilmenevän enemmän heikkoa ymmärrystä (Jakobsson ym., 2009). Tiivis yhtäjaksoinen opetus, joka keskittyy ilmiöön eri oppiaineiden näkökulmasta, muuttaa opiskelijoiden näkemykset ilmastonmuutoksesta rikkaimmiksi (Ratinen ym., 2013). Tämän avulla voidaan kumota virhekäsityksiä tehokkaasti ja auttaa opiskelijoita selittämään ilmiötä monipuolisemmin.

Kasvihuoneilmiö on ilmiönä kuitenkin hyvin monimutkainen, joten tehokkaasta opetuksesta huolimatta opiskelijoilla saattaa ilmetä vaikeuksia ymmärtää sen mekanismeja sekä sen yhteyttä ilmaston lämpenemiseen (Jakobsson, Mäkitalo & Säljö, 2009). Ilmastonmuutokseen johtavat syyt ja sen mekanismit eivät ole suurimmilta osalta koettavissa fyysisesti ihmisen jokapäiväisessä elämässä, koska ilmiön seuraukset ilmenevät pitkällä aikavälillä (Shepardson ym., 2011). Siksi tieteellinen ymmärrys ilmiöstä pohjautuu paljolti mielikuvitukseen ja abstraktiin ajatteluun (Niebert & Gropengießer, 2014). Luonnontieteellinen ajattelu kehittyy iän myötä, ja siksi nuoremmilla oppilailta on havaittu olevan vanhempia opiskelijoita enemmän virhekäsityksiä sekä arkikielisiä ilmauksia ja perusteluja ilmaston lämpenemiselle (Nevanpää, 2005, s. 147). Myöhemmin tarkat termit yleistyvät ja ilmiön selityksiin sisällytetään laajemmin luonnontieteellisiin tapahtumiin koskevia aiheita. Toisaalta jotkin virhekäsitykset säilyvät vahvana aikuisuuteen saakka (Boyes ym., 1993; vrt. Nevanpää, 2005, s. 112), joka osoittaa käsitteellisen muutoksen olevan haastavaa (Ratinen, 2016, s. 60). Toisinaan luonnollista kasvihuoneilmiötä ei eroteta ihmisen aiheuttamasta voimistuneesta kasvihuoneilmiöstä, jolloin ilmiön ajatellaan kokonaisuudessaan olevan ympäristöhaitta eikä elämisen edellytys (Niebert & Gropengießer, 2014).

### **3.2 Jäätiköiden sulamiseen liittyvien ilmiöiden ymmärtäminen**

Jäätiköiden sulamisen ja kasvihuoneilmiön välisen kahdensuuntaisen yhteyden ymmärtämisestä on tehty vain vähän tutkimusta. Seurauksista usein tunnustetaan manner- ja merijäätiköiden sulaminen (Groves & Pugh, 1999; Shepardson

ym., 2011), mutta sulamisesta aiheutuvien vaikutusten kasvihuoneilmiön kiihtymiseen – esimerkiksi hiilinielujen vähenemisen näkökulmasta – on vähän tutkittu aihealue. Tutkimuksista ei myöskään selvinnyt, kuinka hyvin esimerkiksi merivirtojen ja säteilytasapainon muutokset tunnistetaan ilmaston lämpenemisen seurauksina. Ilmastojärjestelmän ajatellaan usein muodostuvan lineaarisesti vain yhteen suuntaan syiden ja seurausten pohjalta siten, ettei näiden seurausten ymmärretä vaikuttavan alkuperäiseen ilmiöön. (Shepardson ym., 2014.) On mahdollista, että tämän seurauksena myös jäätiköiden sulamisen ja kasvihuoneilmiön voimistumisen välisen palauteilmiön ymmärtäminen on opiskelijoilla heikkoa.

### 3.2.1 Säteilytasapainon ymmärtäminen

Niebertin ja Gropengießerin (2014) tutkimuksessa tieteilijät jakoivat kasvihuoneilmiön abstraktin käsitteen ymmärtämisen säiliöskeemaan ja tasapainoskeemaan. Säiliöskeemassa kyseessä olevan säiliön avulla selitetään ilmakehässä tapahtuvaa säteilyn saapumista ja poistumista. Säiliö koostuu kaasuista, ja sen ulkopuoli selittää energiavirran toimintaa ilmakehän ja avaruuden välillä. Sen sijaan tasapainoskeemassa ilmaston lämpenemistä selitetään saapuvan ja poistuvan säteilyenergian tasapainolla (tarkastellen yläilmakehää). Näistä selityksistä huolimatta opiskelijoilla on vaikeuksia ymmärtää säteilytasapainoon liittyvät ilmiöt.

Usein ilmaston lämpenemistä selitetään niin sanotulla suljetun rasian ajattelulla (Niebert & Gropengießer, 2014; Ratinen ym. 2013). Tässä ideana on, että ilmakehä muodostaa kannen säiliöskeemassa mainitun säiliön ylle ja näin jättää Auringosta peräisin olevan säteilyn ansaan maan päälle, jolloin tämä säteily ei enää pääse pois. Nousiaisen (2019, s. 70) pro gradu -tutkielman mukaan myös tässä tutkimuksessa käsitellyssä jokeritehtävässä opiskelijat ajattelivat säteilyn heijastuvan maanpinnasta kohti ilmakehää ja uudelleen ilmakehästä takaisin kohti maanpintaa, jolloin säteilyn ajateltiin jäävän Maahan lämmittämään ilmastoa.

Säiliöskeemaan liittyen esiintyy paljon myös käsityksiä, joissa kasvihuonekaasuista muodostuneiden otsoniaukkojen ajatellaan päästävän lisää Auringon säteilyenergiaa maanpinnalle, jäävän ansaan otsonikerroksen alle ja aiheuttaen näin lämpenemistä (McCuin ym., 2014; Mutlu & Nacarğlu, 2019; Niebert & Gropengießer, 2014). Opiskelijoilla on usein vaikeuksia pitää otsonikadon ongelmat erillään kasvihuoneilmiön ongelmista (Jakobsson ym., 2009). Moni opiskelijoista ei myöskään ymmärrä tasapainoskeemaa ja energiatasapainoa (Jarrett & Takacs, 2020). Maan ajatellaan emittoivan vähemmän energiaa kuin mitä se saa Aurinolta, jolloin ilmaston katsotaan lämpenevän. Toisin sanoen opiskelijat ymmärtävät, että auringonsäteilyä pääsee enemmän Maahan mitä Maasta lähtee pois (Ratinen ym., 2013). Otsonikerroksen heikentyminen yhdistetään herkästi ilmaston lämpenemiseen (esim. Boyes ym., 1993; Hayhoe ym., 2011; Mutlu & Nacarğlu, 2019; Ratinen ym. 2013). Otsonikato saatetaan sekoittaa kasvihuoneilmiöön, jolloin kasvihuonekaasujen ajatellaan ohentavan otsonikerrosta ja päästävän maapallolle aiempaa enemmän säteilyä (Jarrett & Takacs, 2020). Säteilyn määrän kasvua koskevan ajattelun takana saattaa olla se, että otsonikerroksen ajatellaan normaalisti heijastavan auringonsäteitä pois ennen kuin ne ehtivät Maahan (Niebert & Gropengießer, 2014). Niebertin ja Gropengießerin (2014) mukaan ajatus säteilymäärän kasvun vaikutuksesta ilmaston lämpenemiseen ei ole yllättävä, sillä auringonvalo koetaan kirkkaana ja lämpimänä konkreettisesti, ja tällöin ilmiö on helposti yhdistettävissä kasvihuoneilmiön voimistumiseen.

Otsonikadon heikentymisen ajatellaan päästävän lisää UV-säteilyä maanpinnalle ja tämän taas lisäävän ihosyöpäriskiä, Auringon energiaa ja lämpötilan nousua (Boyes ym., 1993; Jarrett & Takacs, 2020; Ratinen ym. 2013). Riski ihosyvän kasvusta auringonsäteiden määrän kasvun seurauksena ajatellaan johtuvan siitä, ettei Auringon säteilytyyppejä eroteta toisistaan (McCuin ym., 2014), ja UV-säteilyn rooli kasvihuoneilmiössä sekoitetaan helposti lämpösäteilyyn (Ratinen, 2016, s. 40). Infrapunasäteilyä ei sen sijaan usein mainita osana kasvihuoneilmiötä. Kuitenkin on myös havaintoja siitä, ettei otsoniaukkoja sekoiteta enää aikaisempien tutkimusten lailla ilmaston lämpenemiseen, mikä puolestaan saattaa olla seurausta lisääntyneestä tiedosta ilmaston lämpenemisen ja otsonikadon



eroista (ks. Shepardson ym., 2011). Tämä näkyy myös perus- ja lukio-opetuksen opetussuunnitelmien uusimmissa versioissa, joissa kasvihuoneilmiötä ja ilmaston lämpenemistä käsitellään aiempaa laajemmin ja useammassa oppiaineessa (vrt. Opetushallitus 2004; 2015; 2016; 2019). Nousiaisen (2019, s. 70) tutkimuksessa ilmeni kuitenkin, että melkein neljännes opiskelijoista yhdisti otsonikadon ilmaston lämpenemiseen tai kasvihuoneilmiöön. Ratisen (2016, s. 61) mukaan säteilytyyppien erottamisen vähäisyys on tarkoittaa, etteivät opiskelijat esimerkiksi tunnista ilmastojärjestelmän osia eivätkä sen tapahtumien välisiä suhteita.

Energian siirtymisen tai absorption ymmärtäminen eri ilmastojärjestelmän osien välillä on lisäksi todettu olevan haastavaa opiskelijoilla (Shepardson ym., 2014). Nousiaisen (2019, s. 66) tutkimuksessa opiskelijoista hieman yli kymmenes tiesi säteilyn absorboituvan ilmakehässä. Näistä opiskelijoista hän kuitenkin epäilee harvemman ymmärtävän syvällisemmin sitä, mihin absorboituminen perustuu. Ratisen, Viirin ja Lehesvuoren (2013) tutkimuksessa kuitenkin havaittiin, että intensiivisen opetusjakson jälkeen luokanopettajaopiskelijat osasivat yhdistää säteilyn entistä paremmin absorptioon. Shepardsonin ym. (2011) tutkimuksessa oppilaat selittävät säteilypakotetta auringonsäteilynä eivätkä säteilyenergiana.

Opiskelijoilla aiheuttaa hankaluuksia Auringon lähettämän sähkömagneettisen säteilytyyppien erottaminen toisistaan. Opiskelijat eivät välttämättä erittele ultraviolett(UV-)säteilyä tai lämpösäteilyä auringonsäteilystä ollenkaan, vaan kasvihuoneilmiön voimistumisen yhteydessä viittaavat vain yleisesti esimerkiksi auringonsäteilystä aiheutuvaan lämpöön (McCuin ym., 2014; Niebert & Gropengießer, 2014). Nousiaisen (2019, s. 66) tutkimuksessa selvisi, että opiskelijoista enemmistö selitti ilmiötä "auringonsäteilyn" tai pelkän "säteilyn" kautta. Energian, jota kasvihuonekaasut absorboivat, ajatellaan helposti tulevan Auringosta suoraan tai maanpinnasta heijastuneena (Jarrett & Takacs, 2020). Toisaalta on havaintoja siitä, että moni opiskelijoista ymmärtää Auringon säteilytyyppien olevan yhteydessä toisiinsa, vaikkakin moni yliarvioi UV-säteilyn roolin kasvihuoneilmiössä (Jarrett & Takacs, 2020; Nevanpää, 2005, s. 93). Nevanpää (2005, s. 127)

toteaa ilmastonmuutokseen liittyvien soveltavien käsitysten muodostamisen olevan haastavaa juuri siksi, ettei luonnontieteellinen perustietämys esimerkiksi säteilyyn liittyvistä sekoista tai hiilen kierrosta ole riittävää. Tehokkaan oppimiskurssin jälkeen oppilaiden selitysten ilmastonmuutokselle havaittiin pohjautuvan säteilyyn ja kasvihuoneilmiön voimistumiseen. Kurssin jälkeen vallitsevaksi käsitykseksi muodostui kasvihuonekaasujen ja niiden lisäämistä kuvaileva luokka oppilaiden keskuudessa.

### **3.2.2 Kasvihuonekaasuihin ja niiden vapautumiseen, meri- ja ilmavirtoihin sekä merenpinnan nousuun liittyvät käsitykset**

Säiliöskeemaan liittyen lisääntyneiden kasvihuonekaasujen ajatellaan muodostavan mielikuvitukselliseen säiliöön paksun kannen, joka estää auringonsäteiden poistumisen takaisin avaruuteen (Niebert & Gropengießer, 2014; Shepardson ym., 2011). Hiilidioksidi tunnustetaan melko helposti näkymättömäksi kasvihuonekaasuksi (Hayhoe ym., 2011; Jakobsson ym., 2009; Jarrett & Takacs, 2020), kun taas vain pieni osa tunnistaa metaanin kasvihuonekaasuksi (Nousiainen, 2019, s. 70; Shepardson ym., 2011). Myös vesihöyryn rooli kasvihuoneilmiössä on opiskelijoille usein epäselvä (McCuin ym., 2014; Stanisstreet & Boyes, 2004). Vesihöyryn roolia kasvihuonekaasuna ei tunnusteta (Nousiainen, 2019, s. 65). Siksi hiilidioksidin ajatellaan olevan yleisin kasvihuonekaasu vesihöyryn sijaan (Hayhoe ym., 2011), mikä on myös tämän tutkimuksen kokeilijoiden kasvihuonekaasuja käsittelevän tehtävän vastauksissa havaittavissa (Nousiainen, 2019, s. 71). Hiilidioksidin vapautumisen ymmärretään usein olevan yhteydessä ihmisen aiheuttamien fossiilisten polttoaineiden käyttöön ja tämän nostavan lämpötilaa (Hayhoe ym., 2011; Shepardson ym., 2011). Shepardsonin ym. (2011) tutkimuksessa osa opiskelijoista kuitenkin ajattelee lämpötilan nousevan hiilidioksidipäästöistä huolimatta, ja yhdistävät kasvaneiden ilmansaasteiden ja muiden ilmakehän kaasujen nostattavan lämpötilaa. Metsien hakkuun tunnustetaan kasvattavan hiilidioksidipitoisuutta, ja hiilen ajatellaan tulevan ilmasta, maaperästä tai vedestä (Jarrett & Takacs, 2020).

Opiskelijoille on tyypillistä yhdistää saasteet, kuten esimerkiksi pöly ja rikidioksidi, Maan keskilämpötilan nousuun (Hayhoe ym., 2011). Niiden ajatellaan helposti olevan suurin tekijä kasvihuonekaasujen, erityisesti hiilidioksidin, lisääntymisessä ilmakehässä (Shepardson ym., 2011), jolloin säiliöskeeman ”kannen” ajatellaan virheellisesti paksuuntuvan ja jättävän säteilyn ansaan (McCuin ym., 2014). Opiskelijat määrittelevät lisääntyneet saasteet usein ilmansaasteina, likaisena vetenä ja lyijybensiininä (Niebert & Gropengießer, 2014). Fossiilisten polttoaineista, ydinvoimasta ja haposateista aiheutuneet saasteet nähdään usein pääsyyinä ilmaston lämpenemiselle (Hayhoe ym., 2011; Jarrett & Takacs, 2020; Niebert & Gropengießer, 2014). Toisaalta tämä kertoo ilmaston lämpenemisen kokemuksellisesta ymmärryksestä, sillä usein konkreettisesti kaupunkien, tehtaiden ja ajoneuvojen koetaan tuottavan lämpöä, joka on ”koettavissa” (vrt. Felzmann, 2017; Niebert & Gropengießer, 2014; Shepardson ym., 2011). Tällöin koetun lämmön ajatellaan myös lämmittävän ilmastoja. Tämän ymmärryksen ohella opiskelijoilla on hankaluuksia erotella kasvihuonekaasut (esimerkiksi CFC-kaasut) muista kaasuista, jolloin ajatellaan yleisellä tasolla saasteiden vaikuttavan keskilämpötilan nousuun (Boyes ym., 2008; Jakobsson ym., 2009). Nouisainen (2019, s. 67) epäilee osan opiskelijoista tarkoittavan kasvihuonekaasuja, mutta käyttävän virheellisesti termiä ”saasteet”.

Vaikka suuri osa opiskelijoista ymmärtää, ettei sää ja ilmasto ole keskenään synonyymejä, usein ilmaston lämpeneminen yhdistetään helposti sääilmiöiden muutokseen (Hayhoe ym., 2011; Mutlu & Nacarğlu, 2019). On myös havaintoja siitä, että muutamat oppilaat ajattelevat sateiden aiheuttavan ilmastonmuutosta (Ratinen ym. 2013). Opiskelijoista suuren osan on havaittu yhdistävän ilmaston lämpeneminen sateen määrään joko vesihöyryn lisääntymisenä suoraan tai merenpinnan nousun seurauksena ja ilmavirtojen lisääntymiseen tai pysähtymiseen. (Shepardson ym., 2011) Suurin osa opiskelijoista ei myöskään tiedosta, että meret sitovat suuren osan ihmisen aikaansaamasta hiilidioksidista (Hayhoe ym., 2011) siten, että hiilidioksidi liukenee veteen sekä levät ja kasviplankton hyödynävät tätä epäorgaanista hiiltä yhteyttämisessä. Kuitenkin meren ymmärretään usein lämpenevän ilmaston lämpenemisen seurauksena (Shepardson ym., 2011).

Merenpinnan nousu on usein tunnistettava seuraus ilmaston lämpenemiselle ja mannerjäätiköiden sulamiselle opiskelijoiden keskuudessa (Shepardson ym., 2011), vaikka merijäätiköiden sulamisen ajatellaan myöskin nostattavan merenpintaa (Hayhoe ym., 2011). Toisaalta opiskelijat yhdistävät myös sademäärän kasvun merenpinnan huomattavaan nousuun (Hayhoe ym., 2011; Shepardson ym., 2011). Luonnollisesti tällöin myös tulvien ymmärretään olevan seurausta ilmaston lämpenemiselle (Hayhoe ym., 2011), ja näiden peittävän alleen kasvillisuutta ja elinympäristöjä. Opiskelijat yhdistävät merenpinnan nousun muun muassa biodiversiteettikatoon (Boyes ym., 1993) ja sukupuuttoon kuolemiseen (Groves & Pugh, 1999). Metsien ymmärretään olevan maapallon suuri hiilinielu, jolloin niiden peittymisen seurauksena opiskelijat käsittävät niiden häviämisen voimistavan kasvihuoneilmiötä (Hayhoe ym., 2011). Toisaalta on myös muutamia havaintoja siitä, kuinka osa opiskelijoista ajattelee lämpimämmän sään ja siten pidempien kasvukausien auttavan kasveja kasvamaan (Shepardson ym., 2011). Shepardsonin ym. (2011) tutkimuksessa opiskelijat eivät myöskään yhdistäneet merenpinnan nousua maatalouteen esimerkiksi viljelymaiden peittymisen näkökulmasta.

## 4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN

### 4.1 Tutkimustehtävä ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka lukio-opinnot päättävät opiskelijat ymmärtävät jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyttä. Lisäksi tarkasteltiin, millaisia mahdollisia virhekäsityksiä ilmiöiden ymmärtämisessä esiintyy. Tutkimuksessa analysoitiin fysiikan ylioppilaskokeiden esseevastauksia liittyen jäätiköiden sulamista koskevaan tehtävään. Näiden pohjalta muodostettiin kaksi tutkimuskysymystä:

1. Miten lukion päättävät fysiikan opiskelijat ymmärtävät jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyttä?
2. Millaisia virhekäsityksiä jäätiköiden sulamisesta ja ilmaston lämpenemisestä lukion päättävillä fysiikan opiskelijoilla esiintyy?

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kuvailla opiskelijoiden ymmärrystä ilmaston lämpenemisestä jäätiköiden sulamisen näkökulmasta lukio-opetuksen päättyessä.

### 4.2 Tutkimusaineisto

Tutkimuksen aineistona on otos kevään 2017 fysiikan ylioppilaskokeen ilmastonmuutosta käsittelevän jokeritehtävän 13 vastauksista. Suomessa lukiokoulutuksen päätteeksi suoritetaan ylioppilastutkinto, jossa suoritetaan lukiokoulutuksen oppimäärän tai siihen rinnastettavan koulutuksen lisäksi vähintään viisi ylioppilastutkinnon koetta eli ylioppilaskoetta (Laki ylioppilas tutkinnosta, 2019). Vuonna 2017 ylioppilastutkinnon suorittamiseen riitti viiden ylioppilaskokeen sijasta neljä (vrt. Laki ylioppilastutkinnon järjestämisestä (kumottu)). Fysiikka kuuluu reaaliaineisiin (Valtioneuvoston asetus ylioppilastutkinnosta, 2006),

mistä suoritettava ylioppilaskoe on kokelaalle vapaaehtoinen. Kevään 2017 fysiikan ylioppilaskokeeseen osallistui 5991 kokelasta (YTL, 2022).

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka lukion päättävät opiskelijat ymmärtävät jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyttä. Opiskelijoiden ymmärrystä tutkittiin analysoimalla kevään 2017 fysiikan ylioppilaskokeen vastauksia jokeritehtävään 13d, joissa käsiteltiin jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyttä seuraavalla kysymyksellä:

Ilmastonmuutoksessa keskilämpötilan ennustetaan nousevan erityisesti napa-alueilla. Miten mannerjäätiköiden ja napa-alueiden merijäätiköiden sulaminen voi kiihdyttää lämpötilan nousua? (YTL)

Kevään 2017 fysiikan ylioppilaskoe sisälsi yhteensä 13 tehtävää, joista kokelaan tuli vastata kahdeksaan tehtävään. Yksitoista ensimmäistä tehtävää arvosteltiin pistein 0–6, ja kaksi viimeistä tehtävää olivat vaativampia jokeritehtäviä, jotka arvosteltiin pistein 0–9. Jokeritehtävän 13 d-kohdasta oli maksimissaan saatavilla kaksi pistettä. (Abitreenit, 2017). Fysiikan ylioppilaskokeen jokeritehtävään 13 vastasi yhteensä 74 % kokelaista. Tehtäväkohtainen pistekeskisarvo oli 2.4, pistettä, vaikka saatavilla oli 9 pistettä. (YTL.) Otoksesta lasketut yleisimmät annetut pisteet olivat 1 tai 2 pistettä ja yli viiden pisteen vastauksia oli erittäin vähän. Tehtävän 13 d-kohdan pistekeskisarvo otoksessa oli 0.5, pistettä. Ylioppilaskoesuoritukset alustavasti tarkastaa ja arvostelee lukiokoulutuksen järjestäjän osoittama asianomaisen aineen opettaja ja lopullisen arvostelun suorittaa Ylioppilastutkintolautakunta eli YTL (Laki ylioppilastutkinnosta, 2019).

Tässä tutkimuksessa käytetyn otoksen ylioppilaskokeen vastaukset oli kerätty 19 eri lukiosta ympäri Suomen. Tutkimukseen valikoituneet lukiot olivat eri kokoisia, ja fysiikan kirjoittaneiden määrä vaihteli pienimmän määrän ollessa 4 opiskelijaa ja suurimman ollessa 52 opiskelijaa. Lukiot oli valittu satunnaisesti ympäri Suomen yhteensä kymmenestä eri maakunnasta. Eniten aineistoa on Etelä-Suomesta Uudenmaan ja Varsinais-Suomen alueelta ja muualta Suomesta hieman vähemmän. Otoksessa vastauksia tehtävään 13 on yhteensä 243 kappaletta, mikä on 72 % kyseisten lukioiden fysiikan kirjoittajien määrästä ja 5.5 % kaikista tehtävään vastanneista. Tämä luku on varsin lähellä valtakunnallista

vastausprosenttia. Otoksessa tehtävän 13 d-kohtaan oli vastannut yhteensä 236 kokelasta.

Tutkimuslupa (YTL) tutkimusaineistoon on myönnetty Jyväskylän yliopiston apulaisprofessorille, graduohjaajallemme, Terhi Mäntylälle. Vuonna 2017 fyysikan ylioppilaskokeet järjestettiin vielä paperisina kokeina, mistä syystä aineiston vastaukset ovat käsinkirjoitettuja. Tutkimusta varten vastaukset oli ennakkoon skannattu digitaaliseen muotoon, ja tässä vaiheessa poistettiin tutkittavien henkilötiedot. Vastaukset oli ryhmitelty koulukohtaisesti omiin pdf-tiedostoihinsa, jotka oli nimetty koulun numeron mukaan ja suuret tiedostot oli jaettu tarvittaessa useampaan pdf-tiedostoon. Muutama tiedosto oli nimetty myös koulun numeron lisäksi vastausten lukumäärään viitaten (esim. koulua 1 koskevat vastaukset ovat tiedostossa K001-v19). Lisäksi kokelaiden vastaukset oli ennakkoon numeroitu siten, että ensimmäinen numero vastaa koulun numeroa, ja jälkimmäinen kokelaan numeroa (esim. 1/2 = koulu nro 1, kyseisen koulun kokelas nro 2). Tässä tutkimuksessa aineiston vastauksiin viitataan hieman täydenneityillä merkinnöillä eli esimerkiksi vastaus 1/2 on K1/V2.

### **4.3 Aineiston analyysi ja varhainen luokittelu**

Aineiston analyysi toteutettiin ensimmäisen tutkimuskysymyksen osalta teoriaohjaavalla sisällönanalyysimenetelmällä ja toinen tutkimuskysymys aineistopohjaisella sisällönanalyysimenetelmällä. Sisällönanalyysi on laadullinen analyysimenetelmä, joka toimii niin sanottuna teoreettisena kehyksenä esimerkiksi kirjoitettujen sisältöjen analyysissa. Lisäksi sisällönanalyysin avulla voidaan tarkastella suurta aineistoa lukumäärien ja taulukoiden avulla. (Tuomi & Sarajärvi 2018, s. 79, 93.) Teoriaohjaava sisällönanalyysi sopi tämän tutkimuksen ensimmäisen tutkimuskysymyksen tarkasteluun ja aineistoon hyvin, sillä sen avulla käytiin ikään kuin vuoropuhelua kirjallisten vastausten ja teoreettisen viitekehysten kanssa. Teoreettinen viitekehys ei toisaalta pakota vastauksia tiettyyn malliin (Tuomi & Sarajärvi, 2018, s. 82), vaan teoriaohjaavan sisällönanalyysin

avulla voimme luokitella aineistoa viitekehysten ulkopuolellekin, mahdollisesti luoden uusia käsittelyluokkia.

Aineistolähtöinen sisällönanalyysi taas soveltui virhekäsityksiä koskevan tutkimuskysymyksen käsittelyyn hyvin, sillä aiempaa tutkimusta jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyden ymmärtämisestä ei juurikaan ole. Aineistolähtöisessä sisällönanalyysissä tutkimusaineistosta pyritään muodostamaan teoreettinen kokonaisuus siten, että teoria, joka tutkimukseen liittyy, koskee vain analyysin toteuttamista eikä aineiston luokittelua. Aineistopohjaisessa analyysissä edettiin Tuomen ja Sarajärven (2018, s. 93–94) sisällönanalyysin ohjeiden mukaisesti ensiksi pelkistämällä, sitten ryhmittelemällä ja lopuksi käsitteellistämällä aineistoa.

Aineiston analyysi aloitettiin lukemalla koevastaukset yksitellen ja kunkin vastauksen sisällöt tiivistettiin virkemäisiin muotoihin siten, että tutkimuksen kannalta oleellinen tieto säilyi. Pelkistetyt vastaukset ryhmiteltiin niiden sisältöjen samankaltaisuuksien perusteella. Yksi tiivistetty virke sisälsi siis yhden teeman asioita, eli yhdestä vastauksesta saattoi muodostua useita pelkistettyjä virkeitä. Jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyden ymmärtämisen sekä virhekäsityksiä koskevat sisällöt yhdistettiin alaluokkiin, jotka puolestaan koottiin suurempiin yläluokkiin yhdistävien tekijöiden mukaisesti.

Luokittelussa vastauksen sisällöt jaettiin aluksi joko tieteellisen ymmärtämisen tai virhekäsitysten pääluokkaan. Tämä ensimmäinen jaottelu tehtiin YTL:n hyvän vastauksen piirteiden (liite 1) pohjalta. Mikäli vastauksen sisältö sisälsi YTL:n mallivastauksen piirteitä, se luokiteltiin tieteellisen ymmärtämisen pääluokkaan. Vastaavasti niiden vastausten sisällöt, jotka eivät sisältäneet YTL:n mallivastauksen piirteitä, luokiteltiin virhekäsitysten pääluokkaan. Yhden vastauksen sisällä saattoi siis olla sekä tieteelliseen ymmärtämiseen että virhekäsityksiin luokiteltavia sisältöjä. Aineiston suuruudesta johtuen luokittelun ensimmäisessä vaiheessa muodostettiin aineiston pohjalta tieteellisen ymmärtämisen ja virhekäsitysten pääluokkien sisälle pienemmät yläluokat. Näin yhdestä vastauksesta saatettiin siis luokitella sisältöjä useisiin eri yläluokkiin. Esimerkki erään vastauksen luokittelusta löytyy liitteestä 2.



Tieteellisen ymmärtämisen pääluokkaan muodostettiin neljä yläluokkaa, joita olivat i) säteilyn heijastuminen, ii) säteilyn absorptio, iii) kasvihuonekaasujen lisääntyminen ja iv) palauteilmion ymmärtäminen. Virhekäsitysten pääluokkaan muodostettiin yhdeksän yläluokkaa, joita olivat i) veden ja jään ominaislämpökapasiteetti sekä energia, ii) lämmön varastoituminen mereen, iii) jäätiköt sitovat itseensä lämpösäteilyä, iv) veden tilavuuden ja pinta-alan kasvu, v) meren-/vedenpinnan nousu vi) vaikutukset meri-/vesivirtoihin, vii) vesihöyry ja haihtuminen, viii) jäätiköt kylmentävät ympäröivää ilmaa/merta sekä ix) muut.

#### **4.3.1 Ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen yhteyden ymmärtämisen analysointi**

Seuraavassa vaiheessa tieteellisen ymmärtämisen pääluokkaan luokitellut vastausten sisällöt edelleen luokiteltiin yksityiskohtaisempiin luokkiin. Luokkien muodostamisessa käytettiin apuna Open ilmasto-oppaan (2016) fysiikan sisältöjä sekä YTL:n mallivastausta. Näiden pohjalta muodostettiin kolme yläluokkaa, joita olivat säteilytasapainon ymmärtäminen, sulaminen ja kasvihuonekaasut sekä palauteilmion ymmärtäminen. Säteilytasapainon yhteydessä tarkasteltiin myös kokelaiden ymmärrystä säteilytyypeistä. Näistä kahteen edellä mainittuun yläluokkaan muodostettiin seuraavanlaiset alaluokat:

##### *Säteilytasapainon ymmärtäminen*

1. Säteilyn heijastuminen
  - a. Mainittu vain veden kiinteä olomuoto
  - b. Viitattu (niiden) vaaleaan/valkeaan pintaan
  - c. Heijastumisen vähentyminen sulamisen seurauksena
2. Säteilyn absorptio/imeytyminen
  - a. Mainittu vain Maan pinta
  - b. Viitattu (niiden) tummaan/mustaan pintaan
  - c. Absorption/imeytymisen kasvu sulamisen seurauksena
  - d. Sulamisesta aiheutuva jäätiköiden tummeneminen

*Sulamminen ja kasvihuonekaasut*

3. Jäätiköiden sulamisesta vapautuvat kasvihuonekaasut
4. Vesihöyryn lisääntyminen
5. Kasvihuonekaasujen lisääntyminen sulamisen seurauksista

Säteilytasapainon yläluokkaan luokiteltiin vastaukset, joissa käsiteltiin Maahan saapuvan ja sieltä poistuvan säteilyn määrän muutoksia. Vastauksissa ei kuitenkaan vaadittu säteilytasapaino-termin käyttöä. Säteilyn heijastumisen a-alakohtaan luokiteltiin vastaukset, jossa heijastumisen yhteydessä mainittiin yksi tai useampi veden kiinteä olomuoto eli manner-, meri- tai jäätikkö/jää tai lumi viittaamatta laisinkaan niiden väriin. Säteilyn heijastumisen alakohtaan b luokiteltiin puolestaan vastaukset, joissa heijastumisen yhteydessä mainittiin jäätiköiden olevan valkoisia, vaaleita tai kirkkaita sekä vastaukset, joissa epäsuorasti kuvattiin jäätiköiden olevan muuta ympäristöä vaaleampia. Tällaisissa epäsuorissa vastauksissa ympäristöä siis verrattiin jäätiköitä tummemmaksi. Heijastumisen vähenemistä kuvaavaan c-alakohtaan luokiteltiin vastaukset, joissa kuvailtiin jäätiköiden sulamisen takia säteilyn, lämmön tai valon heijastumisen vähenevän jäätiköiden pienentyessä, heijastavan pinta-alan pienentyessä tai albedon huonontuessa.

Vastaavasti säteilyn absorptioon alakohtaan a luokiteltiin vastaukset, jossa absorptioon yhteydessä mainittiin maa, maaperä, manner, meri, vesi tai maanpinta - myöhemmin yleistetty käsitteellä Maan pinta - viittaamatta laisinkaan niiden väriin. Absorptioksi hyväksyttiin käsitteet absorboituminen ja imeytyminen sekä tapauskohtaisesti sitoutuminen ja varautuminen, mikäli niillä viitattiin nimenomaan säteilytasapainoon. Toisin sanoen aineistossa olevia vastauksia, jossa säteilyn tai lämmön absorboitumista ei ole liitetty säteilytasapainoon tai sen mekanismi on perusteltu väärin, ei luokiteltu tähän alakohtaan.

Absorptioon alaluokkaan b luokiteltiin taas vastaukset, jossa kuvailtiin Maan pinnan olevan tumma, musta, sininen tai ruskea sekä vastaukset, joissa epäsuorasti kuvailtiin Maan pinnan olevan tumma. Tällaisissa epäsuorissa vastauksissa

kuvailtiin, ettei Maan pinta ole valkoinen. Säteilyn absorptio alaluokkaan c luokiteltiin vastaukset, jossa kuvailtiin säteilyn, lämmön tai valon absorptio kasvavan jäätiköiden sulassa ja (tumman) Maan pinnan lisääntyessä. Lisäksi säteilyn absorptio alakohtaan d luokiteltiin vastaukset, joissa kuvailtiin sulavan jään olevan pakkassään jäätä tummempaa tai sulavan jään paljastavan siihen aiemmin kulkeutuneita tummia epäpuhtauksia.

Säteilytasapainon ymmärtämiseen luokitellut vastausten sisällöt alaluokissa 1 ja 2 luokiteltiin a ja b-alakohdissa aina vain jompaankumpaan. Lopuksi a- ja b-alakohdat laskettiin yhteen, josta saatiin vastausten lukumäärät kyseisiin alaluokkiin. B- alakohta edustaa syvällisempää ymmärrystä, jonka mukaan niminomaan pinnan väri on yhteydessä säteilyn heijastumiseen ja absorboitumiseen. Luokittelun c-alakohta edustaa myös syvällisempää ymmärrystä, jonka mukaan jäätiköiden sulaminen vähentää auringonsäteilyä heijastavaa pintaa ja vastaavasti lisää säteilyä absorboivaa pintaa. Molemmissa alaluokissa c-alakohtaan luokitellut vastaukset sisältyvät siis aina myös kyseisen alaluokan alakohdiiin a tai b.

Säteilytasapainoon luokitelluista vastauksista tarkasteltiin lisäksi kokelaiden ymmärrystä säteilytyypeistä. Analyysiä varten muodostettiin Open ilmastooppaan (2016) fysiikan sisältöjen sekä aineiston pohjalta neljä alaluokkaa, joita olivat Auringosta saapuva säteily, säteilyn heijastuminen, säteilyn absorptio ja säteilyn emissio. Säteilyn emissiota lukuun ottamatta kuhunkin alaluokkaan muodostettiin alakohdat Auringon sähkömagneettisen säteilyn tyypeistä, ja joihin vastaukset sisältöjen perusteella luokiteltiin. Saapuvaksi auringonsäteilyksi luokiteltiin myös vastaukset, joissa epäsuorasti kuvailtiin jäätiköihin kohdistuvan säteilyä. Heijastuvan säteilyn alaluokkaan luokiteltiin heijastumisen lisäksi vastaukset, jossa kuvailtiin säteilyn kimpoavan tai siroavan jäätiköistä. Säteilyn absorptio -alaluokkaan hyväksyttiin absorboitumisen ohella vastaukset, joissa säteilyn kerrottiin imeytyvän tai sitoutuvan Maan pintaan. Säteilyn emissio -alaluokka käsitti vain lämpö- eli infrapunasäteilyn emittoitumiseen luokiteltavia vastauksia.

Yläluokkaan sulaminen ja kasvihuonekaasut ensimmäinen alaluokka on muodostettu suoraan YTL:n mallivastauksen pohjalta. Tähän alaluokkaan luokiteltiin vastaukset, joissa kokelas kuvaa kasvihuonekaasujen vapautuvan jäätiköistä tai jäätiköiden alta suoraan niiden sulamisen seurauksena. Nämä vastaukset luokiteltiin edelleen alaluokkiin niissä mainittujen kasvihuonekaasujen perusteella tai alaluokkaan ”kasvihuonekaasut”, mikäli niitä ei vastauksessa eritelty. Kuitenkin ne vastaukset, jossa metaania verrataan hiilidioksidia voimakkaammaksi kasvihuonekaasuksi, luokiteltiin vain alaluokkaan metaani.

Sulamien ja kasvihuonekaasut -yläluokkaan muodostettiin aineiston pohjalta myös alaluokat vesihöyryn lisääntyminen ja sulamisen seurauksista lisääntyvät kasvihuonekaasut. Näistä edellä mainittuun luokiteltiin ne vastaukset, joissa vesihöyryn kuvailtiin lisääntyvän meriveden lämpenemisen, sulamisen seurauksena tapahtuvan meren pinta-alan kasvun, jäätiköistä sublimoitumisen tai yleisesti ilmaston lämpenemisen myötä. Yleisesti ilmaston lämpenemiseen luokiteltiin sellaiset vesihöyryvastaukset, joissa ei eritelty syitä vesihöyryn kasvulle vaan se yhdistettiin yleisellä tasolla ilmaston lämpenemiseen. Sulamisen seurauksista lisääntyvät kasvihuonekaasut -alaluokkaan luokiteltiin vastaukset, joissa kuvailtiin jäätiköiden sulamisen välillisten seurausten lisäävän ilmakehän kasvihuonekaasuja.

Palauteilmiön, tai toisin sanoen palautekytkennän, ymmärtämisen yläluokkaan luokiteltiin ne vastaukset, joissa tieteellisesti oikein tai lähes oikein perustellen tuotiin esille ilmaston lämpenemisen aiheuttavan jäätiköiden sulamista, ja joka edelleen kiihdyttää ilmaston lämpenemistä. Tähän yläluokkaan luokitellut vastaukset sisälsivät palauteilmiötä vastaavia käsitteitä, kuten noidankehä tai itseään ruokkiva ilmiö, tai vastauksessa muutoin tuotiin selkeästi esille ilmastonmuutoksen aiheuttaman jäätiköiden sulamisen entisestään kiihdyttävän ilmaston lämpenemistä.

Ensiksi virhekäsityksiin luokitelluista veden tilavuudesta, pinta-alan kasvusta ja merenpinnan noususta muodostettiin aineistopohjaisesti vedenmäärän kasvua kuvaava yläluokka, johon ilmiötä käsittelevät vastaukset luokiteltiin. Tämä yläluokka sisälsi sekä oikein että väärin perusteltuja vastauksia, mistä

syystä vedenmäärän kasvua kuvaavia tuloksia raportoitiin sekä yhteyden ymmärtämistä että virhekäsityksiä käsittelevissä tulosluvuissa.

#### **4.3.2 Ilmaston lämpenemiseen ja jäätiköiden sulamiseen liittyvien virhekäsitysten analysointi**

Virhekäsityksien luokittelua varten vastauksista etsittiin sellaisia yhteneviä mainintoja, jotka olivat virheellisiä tai ilmiön ymmärtämisen kannalta epäoleellisia. Luokittelu tehtiin aineistopohjaisesti. Aineiston ensimmäisen luokittelun perusteella muodostettiin viisi yläluokkaa, joita olivat i) lämmön varastoituminen meriin ja jäätiköihin, ii) jäätiköiden sulamisen vaikutukset merivirtoihin, iii) jäätiköiden vaikutukset niiden välittömään ympäristöön, iv) jäätiköiden sulamisen vaikutukset sääilmiöihin sekä v) ”muut”, johon luokiteltiin lukumäärällisesti vähän mainintoja saaneet muihin yläluokkiin sopimattomat vastaukset.

Lämmön varastoituminen meriin ja jäätiköihin -yläluokkaan luokiteltiin vastaukset, joissa lämmön varastoitumista perusteltiin veden tai jään ominaisuuksilla. Tällaisia ominaisuuksia olivat veden ja jään ominaislämpökapasiteetti tai yleisesti niiden kyky sitoa lämpöä tai energiaa. Huolimatta veden ja jään kyvystä sitoa lämpöenergiaa, tämä yläluokka yhdistettiin virhekäsityksiin, sillä lämmön sitoutumisen jäähän ja erityisesti veteen katsottiin olevan ilmaston lämpenemistä voimistavan sijaan hillitsevä mekanismi. Tähän yläluokkaan ei lisätty uudestaan säteilytasapainon absorptio-alaluokkaan jo aiemmin luokiteltuja vastauksia. Lisäksi tähän yläluokkaan luokiteltiin vastaukset, joissa kuvailtiin virheellisesti sulamisen vapauttavan energiaa ja sulamiseen aiemmin kuluneen energian lämmittävän ympäristöä.

Jäätiköiden sulamisen vaikutukset merivirtoihin -yläluokkaan luokiteltiin kaikki vastaukset, joissa nimensä mukaisesti jäätiköiden sulamisen kuvailtiin jollain tavoin muuttavan merivirtoja. Vaikkakin tutkimusten mukaan (ks. esim. IPCC, 2012, s. 1236–1241) jäätiköiden sulaminen voi muuttaa merivirtoja, niin sen vaikutus ilmaston lämpenemiseen on vielä epäselvä. Jäätiköiden vaikutukset niiden välittömään ympäristöön -yläluokkaan luokiteltiin puolestaan vastaukset,

joissa jäätiköiden ilmaistiin viilentävän niiden ympäristöä tai tarkemmin ympäröivää merta tai ilmaa, ja joka jäätiköiden sulamisen myötä päättyisi ja lämmitäisi ilmastoa. Neljäs yläluokka sisälsi vastauksia jäätiköiden sulamisen vaikutuksista sääilmiöihin, johon luokitellut vastaukset kuvailivat jäätiköiden sulamisen vaikuttavan sateisiin, tuuliin tai ilmavirtauksiin ilmastoa lämmittäen. Tähän yläluokkaan luokiteltiin myös vesihöyryn lisääntyminen, joka perusteltiin virheellisesti jäätiköiden sulamisella tai veden tilavuuden kasvulla. Esimerkki aineiston luokittelusta on liitteessä 2.

#### 4.4 Eettiset ratkaisut

Tutkimuksen teon kaikissa vaiheissa pyrittiin noudattamaan Jyväskylän yliopiston ja tutkimuseettisen neuvottelukunnan (Tutkimuseettinen neuvottelukunta TENK, 2023) hyvää tieteellistä käytäntöä, johon kuuluvat rehellisyys, huolellisuus, tarkkuus ja avoimuus. Tutkimuksessa tarkasteltiin ylioppilaskoevastauksia, joiden käyttöön on tutkimuslupa. Koesuoritukset ovat salassa pidettäviä viranomaisen asiakirjoja, jolloin koesuorituksia tai niiden kopioita ei saa näyttää tai luovuttaa sivulliselle viranomaisten toiminnan julkisuudesta annetun lain 24 §:n kohdan 30 perusteella (Laki viranomaisten toiminnan julkisuudesta, 1999). Ylioppilastutkintolautakunta on myöntänyt aineiston käyttöön tutkimusluvan, jonka ehtona on, ettei opiskelijoiden tai opettajien henkilöllisyys paljastu. Tutkielman hyväksymisen jälkeen pääsy alkuperäiseen aineistoon ja aineiston luokittelua koskevat tiedostot poistettiin.

Aineiston luokittelu tehtiin Google Sheets -ohjelmalla, ja tämä säilytettiin Google Drive -pilvipalvelussa. Sheets-ohjelmaan kirjoitetut tekstit olivat pelkistettyjä alkuperäisestä aineistosta siten, ettei kirjoitusasusta tai tekstin luonteesta selviäisi kokelaan henkilökohtaisia piirteitä kuten murretta. Säilytys Googlen palveluissa ei lisännyt tietoturvariskiä opiskelijoiden henkilöllisyyksien tunnistamiseen, koska vastaukset olivat jo ennakoon anonymisoitu. Alkuperäiset käsinkirjoitetut vastaukset säilytettiin Jyväskylän yliopiston tietoturvallisessa pilvipalvelussa, jonne sisäänkirjaututtiin kaksivaiheisen tunnistautumisen jälkeen.

Lisäksi se, että vastaukset oli kerätty useista eri lukioista ympäri Suomen vaikeuttaa yksittäisten vastausten yhdistämistä tutkittaviin. Aineiston anonymisointi, pelkistäminen ja otantamenetelmä, eli tässä poiminta maantieteellisesti eri alueilta, vaikeuttavat tutkittavien tunnistamista (vrt. Tuomi & Sarajärvi 2018, s. 22).

Ilmaston lämpenemisen ja kasvihuoneilmiön ymmärtäminen on tutkimustiedon valossa ajankohtainen ilmiö. Näkökulmaa jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteydestä opiskelijoiden ymmärryksessä on tutkittu erittäin vähän sekä suomalaisessa että kansainvälisessä tutkimuksessa. Aiheen ajankohtauuden ja vähäisen tutkimuksen perusteella tutkielman aiheen voidaan todeta olevan merkitsevä (ks. Tuomi & Sarajärvi, 2018, s. 140). Ilmastonmuutokseen ja jäätiköiden sulamiseen liittyvää tietoa pyrittiin poimimaan mahdollisimman relevanteista lähteistä luotettavuuden lisäämiseksi (vrt. Tuomi & Sarajärven, 2018, s. 138–139). Ilmiötä on tutkittu vähän, jolloin muutamia poimintoja kirjallisuudesta saattoi olla myös 2000-luvulta tai sitä ennen. Koska tutkimuksen aihe on vähän tutkittu ja ilmastonmuutoksen ilmiöiden ymmärtämisen on muilla alueilla todettu olevan heikkoa, on tämä tutkimus tärkeä erityisesti luonnontieteiden opetuksen kehittämisen näkökulmasta.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyden ymmärtäminen

Lukion päättävien opiskelijoiden ymmärrystä ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen välisestä yhteydestä tarkasteltiin säteilytasapainon, kasvihuonekaasujen vapautumisen ja palauteilmiön näkökulmista. Säteilytasapainon ymmärtämisen yhteydessä tarkasteltiin lisäksi opiskelijoiden ymmärrystä säteilytyypeistä. Taulukkoon 1 on koottu näiden lisäksi vesimäärän kasvua koskevien vastausten lukumäärä.

#### Taulukko 1

*Jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteyden ymmärtämiseen luokiteltujen vastausten jakauma ylioppilaskokeessa. (N=243)*

	Vastausten lukumäärä	Prosenttiosuus (%)
<b>Säteilytasapainon ymmärtäminen</b>	<b>102</b>	<b>42.0</b>
<b>Jäätiköiden sulamiseen liittyvä kasvihuonekaasujen lisääntyminen</b>	<b>57</b>	<b>23.5</b>
<b>Palauteilmiön ymmärtäminen</b>	<b>89</b>	<b>36.6</b>
<b>Sulamisen aiheuttama vesimäärän kasvu</b>	<b>86</b>	<b>35.4</b>
Merenpinnan nousu	45	18.5
Veden tilavuuden kasvu	43	17.7
Veden pinta-alan kasvu	14	5.8

Säteilytasapainon ja siihen liittyvä säteilytyyppien ymmärtäminen sekä jäätiköiden sulamisen aiheuttama kasvihuonekaasujen lisääntyminen ovat ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen yhteyden ymmärtämisen kannalta merkittävimmät ilmiöt, joten näitä tarkastellaan yksityiskohtaisesti kolmessa seuraavassa alaluvussa.



**Palauteilmiön ymmärtäminen.** Tähän alaluokkaan luokiteltiin yhteensä 89 vastausta eli reilu kolmasosa koko aineistosta. Käsitettä palauteilmiö ei kuitenkaan mainittu yhdessäkään vastauksessa sellaisenaan, vaikkakin joitakin mainintoja ilmiöiden yhteydestä olivat esimerkiksi ”oravanpyörä”, ”itseään ruokkiva systeemi” ja ”noidankehä”. Alla kaksi otetta palauteilmiöön luokitelluista vastauksista:

Jäätiköt ovat avaruudesta katsottuna valkoisia ja valkoinen väri heijastaa hyvin auringon säteilyä takaisin avaruuteen. Kun jäätikkö sulaa ja sen pinta-ala pienenee, se pystyy heijastamaan takaisin vähemmän säteilyä ja näin maapallolle pääsee enemmän lämpösäteilyä. Tästä seuraa oravanpyörä, joka itse ruokkii itseään lämpötilan noustessa. (K13/V12)

-- Säteilyn lämmittävä vaikutus on siis suurempi kuin jäätikön tapauksessa, joten lämpötilan nousu kiihtyy, kun jäätiköt sulavat. Tämän seurauksena jäätiköt sulavat yhä nopeammin, mikä taas kiihdyttää lämpötilan nousua. (K12/V16)

**Vesimäärän kasvu.** Vesimäärän kasvua käsiteltiin yhteensä 86 vastauksessa, joista *merenpinnan nousu* on selvästi yleisin. Vesimäärän kasvua koskevista vastauksista 33 kokelasta oli liittännyt ilmiön oikeaoppisesti säteilytasapainon tai kasvihuonekaasujen kautta ilmaston lämpenemiseen, ja näitä käsitellään tarkemmin alaluvuissa 5.1.1. ja 5.1.3. Osassa vastauksista käsiteltiin vedenmäärän kasvua muista näkökulmista, joita olivat rantarajan siirtyminen (11), tulvariskien kasvu (3) ja uhka ekosysteemeille (2). Toisaalta 7 vastauksessa vain mainittiin merenpinnan nousu ja yhdessä vastauksessa *veden tilavuuden kasvu*. Koko aineistosta vain yhdessä vastauksessa kuvailtiin jäätiköiden sulamisen lisäksi merten lämpölaajenemisen lisäävän merten vesimäärää. Yhteensä 64 vastauksessa (26 %) vedenmäärän kasvulla selitettiin ilmaston lämpenemistä virheellisesti tai ilmiön ymmärtämisen kannalta puutteellisesti, ja näitä vastauksia käsitellään tarkemmin luvussa 5.2.

### 5.1.1 Säteilytasapainon ymmärtäminen

Säteilytasapainon ymmärtämiseen luokiteltuja vastauksia, joissa oli mainittu vähintään säteilyn heijastuminen tai säteilyn absorptio, on aineistossa yhteensä 102 eli noin 42 % kaikista vastauksista. Tulosten mukaan siis alle puolet opiskelijoista liitti jäätiköiden sulamisen säteilytasapainossa tapahtuviin muutoksiin. Näistä

yhteensä 56 (55 %) vastauksessa mainittiin sekä säteilyn heijastuminen että absorptio. Säteilytysapainon ymmärtämiseen luokiteltujen vastausten tarkempi analyysi esitetään taulukossa 2.

## Taulukko 2

*Opiskelijoiden vastaukset, jotka viittaavat säteilytysapainon ymmärtämiseen. (n=102)*

	Vastausten luku- määrä	Prosenttiosuus (%)
<b>Säteilyn heijastuminen</b>	<b>97</b>	<b>95.1</b>
Mainittu vain jään pinta	53	52.0
Viitattu vaaleaan pintaan	44	43.1
Viitattu heijastumisen vähenemiseen	60*	58.8
<b>Säteilyn absorptio</b>	<b>62</b>	<b>60.8</b>
Mainittu vain Maan pinta	35	34.3
Viitattu tummaan pintaan	27	26.5
Viitattu absorptioon kasvuun	48**	47.1

\*= säteilyn heijastumiseen liittyvistä edellä olevista vastauksista

\*\*= säteilyn absorptioon liittyvistä edellä olevista vastauksista

**Säteilyn heijastuminen.** Tähän alaluokkaan luokiteltiin 97 vastausta, mikä on yli 95 % kaikista luokan vastauksista. Säteilyn heijastumiseen luokitelluista vastauksista hieman yli puolessa viitattiin *jäätiköiden vaaleaan pintaan*. Lisäksi lähes 62 % säteilyn heijastumisen alaluokan vastauksista viitattiin jäätiköiden sulamisen aiheuttavan *heijastumisen vähenemistä*. Säteilyn heijastumisen alaluokkaan oli laskettu mukaan viisi vastausta, joista kolmessa oli heijastumisen sijasta käytetty termiä "kimpoaminen", yhdessä termiä "säteileminen" sekä yhdessä termiä "siroaminen". Termit kimpoaminen ja säteileminen olivat vastauksissa fysiikan osaamisen kannalta väärin, mutta niissä oli ilmiönä viitattu jäätiköiden heijastuskykyyn. Alla on kolme otetta tämän alaluokan vastauksista:

Mannerjäätiköt ja napa-alueet heijastavat suuren osan Auringon säteilystä takaisin avaruuteen. Jäätiköiden ja napa-alueiden sulassa ne heijastavat vähemmän säteilyä takaisin avaruuteen." (K1/V12)

Mannerjäätiköiden valkoinen pinta heijastaa suurimman osan säteilystä takaisin avaruuteen. (K4/V2)

Napajäätiköt toimivat loistavasti ilmaston viilentäjinä, sillä suuri osa Auringon säteilystä, mikä osuu jäätikköihin kimpoaa niiden pinnalta takaisin avaruuteen ehkäistäen näin lämpenemistä. (K17/V4)

Säteilyn heijastumisen alaluokkaan oli laskettu mukaan myös kaksi vastausta, joissa puhuttiin jäätiköiden pinnassa tapahtuvasta tiheyteen perustuvasta kokonaisheijastumisesta. Vastauksissa kuitenkin mainittiin myös jäätiköiden kyky heijastaa hyvin säteilyä.

**Säteilyn absorptio.** Säteilyn heijastuminen-alaluokkaa vastaavasti myös säteilyn absorptiota käsittelevissä vastauksissa hieman alle puolet opiskelijoista vastaa, että *Maan tumma pinta absorboi säteilyä*. Absorptio-alaluokkaan hyväksyttiin myös yksi vastaus, jossa viitattiin veden kykyyn absorboida säteilyä sen jäätä pienemmän tiheyden vuoksi. Absorptiota käsittelevistä vastauksista suurimmassa osassa (77 %) viitattiin samalla *absorption kasvuun*. Näistä kahdeksassa vastauksessa eriteltiin veden pinta-alan tai tilavuuden kasvun tai merenpinnan nousun lisäävän absorptiota. Yhdessäkään alaluokkaan luokitelluista vastauksista ei puhuttu jäätiköiden sulamisen aikana tapahtuvasta jään tummenemisestä. Alla kaksi otetta tämän alaluokan vastauksista:

Jos mannerjäätiköt ja napa-alueiden merijäätiköt sulavat, absorboi kallioperä enemmän ja siksi lämpötila myös nousee. (K1/V2)

Jos jäätiköt sulavat, alta paljastuu tumma meri, joka absorboi tummasta väristä johtuen valoa itseensä, minkä oletetaan nostavan meriveden lämpötilaa. (K10/V12)

**Vertailua.** Taulukossa 2 esitettyjen tulosten mukaan vastauksissa mainittiin selvästi useammin säteilyn heijastuminen kuin sen absorptio. Aineistossa on vain viisi vastausta, joissa mainittiin ainoastaan säteilyn absorptio eikä lainkaan säteilyn heijastumista. Sen sijaan vastauksia, joissa mainittiin vain säteilyn heijastuminen, on aineistossa 41. Säteilyn absorptio -alaluokka sisältää kuitenkin kolme vastausta, joissa vertailtiin jäätiköiden absorboivan vähemmän säteilyä kuin maa tai meri. Kahdessa näistä vastauksista viitattiin maan ja meren tumman pintaan, ja joista toisessa viitattiin vain epäsuorasti veden tummaan väriin:

Vesi myös imee itseensä enemmän lämpösäteilyä kuin valkoiset jäätiköt, jolloin aurinko lämmittää entistä enemmän. (K11/V21)

Vastaavasti säteilyn heijastuminen -alaluokka sisältää kymmenen vastausta, joissa vertailtiin jäätiköiden heijastavan paremmin säteilyä kuin maa tai meri. Kahdesta näistä vastauksista eriteltiin maan ja meren tumma väri. Lisäksi koko aineistossa mainitaan sana "albedo" vain neljässä vastauksessa, jotka ovat kaikki samasta lukiosta.

### 5.1.2 Säteilytyyppien ymmärtäminen

**Saapuva säteily.** Säteilytasapainoa käsittelevistä 102 vastauksesta 31 vastauksessa mainittiin Auringosta saapuva säteily. Näistä vastauksista 8 vastauksessa mainittiin saapuvaksi säteilyksi yleisesti *säteily* ja 9 vastauksessa *auringonsäteily* erittelemättä kuitenkaan säteilytyyppejä tarkemmin. Vain yhdessä vastauksessa kuvailtiin saapuvan auringonsäteilyn olevan sähkömagneettista säteilyä. Lähes kolmannes (30 %) alaluokan kokelaista eritteli auringosta saapuvaksi säteilyksi *lämpösäteilyn* ja 13 % saapuvan auringonsäteilyn vastauksissa eriteltiin Auringosta saapuvan säteilyn olevan *auringonvaloa*.

**Säteilyn heijastuminen.** Säteilytasapainoa käsittelevästä 102 vastauksesta yhteensä 97 (95 %) opiskelijaa eli lähes kaikki käsitteli säteilyn heijastumista, mikä käsiteltiin edellisessä alaluvussa ja taulukossa 2. Tämä alaluokka sisältää siis myös heijastamiseen rinnastetut vastaukset, joissa mainittiin säteilyn kimpoaminen, siroaminen ja "säteily". Vastaukset erosivat siinä, oliko säteilyä tarkasteltu yleisesti, auringonsäteilynä, lämpösäteilynä, UV-säteilynä vai auringonvalona (taulukko 3). Alaluokan vastauksista 19 mainittiin yleisesti *säteily* ja 34 vastauksessa eriteltiin *auringonsäteily*. Auringonsäteilyn heijastumista koskevassa alaluokassa on vastauksia, joissa oli säteilyn tai auringonsäteilyn lisäksi mainittu muitakin säteilytyyppejä. Neljässä vastauksessa oli maininta myös *lämpösäteilystä*, ja näistä yhdessä oli eritelty vain lämmön heijastuminen. Kuusi kokelasta oli maininnut auringonsäteilyn tai säteilyn lisäksi *valon* heijastumisen.

**Taulukko 3**

*Säteilytasapainoon liitettyjen vastausten säteilytyyppien osuudet. (n=102)*

	<b>Vastausten lukumäärä</b>	<b>Prosenttiosuus (%)</b>
<b>Saapuva säteily</b>		
(Auringon)säteily	17	16.7
Lämpösäteily	9	8.8
Auringonvalo	5	4.9
<b>Säteilyn heijastuminen</b>		
(Auringon)säteily	53	52.0
Lämpösäteily	31	30.4
Auringonvalo	24	23.5
UV-säteily	1	1.0
<b>Säteilyn absorptio</b>		
(Auringon)säteily	28	27.5
Lämpösäteily	28	27.5
Auringonvalo	5	4.9
Auringon energia	6	5.9
<b>Säteilyn emissio</b>		
Lämpösäteily	1	1.0

*Lämpösäteilyä* koskevaan alakohtaan on yhteenlaskettu ne vastaukset, joissa kokelaat olivat suoraan maininneet heijastuvan lämpösäteilyn tai infrapunasäteilyn, tai he olivat pelkästään viitanneet lämmön heijastumiseen erittelemättä lämpösäteilyä. Lämpösäteilyn heijastumiseen viitattiin 32 % alaluokan vastauksissa, mikä on säteilyn heijastumiseen luokitelluista vastauksista siis yleisin eritelty säteilytyyppi. Alakohdan yhdessä vastauksessa kuvailtiin ensisijaisesti lämmön heijastumista, mutta vastauksessa viitattiin myös "säteisiin", jotka tulkittiin tarkoittavan lämpösäteilyä, vaikka varmuutta ei ole siitä, tarkoittiko kokelas auringsäteilyä yleisesti vai lämpösäteilyä. Kahdessa vastauksessa mainittiin läm-

pösäteilyn heijastumisen lisäksi valon heijastuminen. Pelkästään lämpöön viitanneita vastauksia oli alakohdassa viisi. Näistä yksi vastaus ei maininnut vastauksessaan lämmön heijastumista, mutta sen voidaan tulkita tarkoittavan sitä:

Jään alta paljastuva maa absorboi paremmin lämpöä kuin hyvin heijastava lumi ja jää.  
(K17/V1)

**Säteilyn heijastuminen** –alaluokassa toiseksi eniten eritelty säteilytyyppi on *auringonvalo*, joka mainittiin joka neljännessä alaluokan vastauksessa (25 %). Joissakin valon heijastumista käsittelevissä vastauksissa sen heijastumisen kuvailtiin ”häikäiseväksi”. Lisäksi auringonvalo eriteltiin heijastumisen yhteydessä huomattavasti useammin kuin saapuvan tai absorboituvan säteilyn yhteydessä. Kaikista vastauksista, joissa käsiteltiin säteilyn heijastumista, vain yhdessä eriteltiin *UV-säteilyn* heijastuminen.

**Säteilyn absorptio.** Säteilytasapainoa käsittelevistä vastauksista yhteensä 62 kokelasta käsitteli säteilyn absorptiota, mikä käsiteltiin edellisessä alaluvussa ja taulukossa 2. Absorptiota käsittelevistä kokelaiden vastauksista yleisesti *säteily* mainittiin 17 vastauksessa ja *auringonsäteily* 11 vastauksessa eli yhteensä 45 % alaluokan vastauksista. Auringonsäteilyksi hyväksyttiin myös vastaus, jossa merten suolan kuvailtiin absorboivan niihin osuvia fotoneita. Säteilyn tai auringonsäteilyn absorption yhteydessä kaksi kokelasta oli maininnut lisäksi *valon*, kaksi *lämmön* tai *lämpösäteilyn* ja yksi *energian* imeytymisen.

Alle puolessa säteilyn absorptio –alaluokan vastauksista (42 %) eriteltiin *lämpösäteilyn* absorboituvan Maan pintaan, jolloin se on siis eniten eritelty säteilytyyppi kyseisessä alaluokassa. *Auringonvalon* absorptio eriteltiin viidessä ja *Auringon energian* absorptio kuudessa vastauksessa. Auringon energia –luokkaan luokiteltiin myös kaksi vastausta, joissa kuvailtiin veden tai mantereen sitovan osan säteilyn energiasta.

**Säteilyn emissio.** Tähän alaluokkaan luokiteltiin vain yksi vastaus, jossa kuvailtiin säteilyn heijastumisen vähentävän (maapallon) aineiden lämpenemistä, jolloin myös niiden säteilemän infrapunasäteilyn eli *lämpösäteilyn* määrä vähenee. Termiä ”emissio/emittoituminen” vastauksessa ei kuitenkaan käytetty.

### 5.1.3 Ymmärrys sulamisen ja kasvihuonekaasujen yhteydestä

Yhteensä 57 opiskelijaa eli 23 % kaikista vastaajista viittasi vastauksissaan jäätiköiden sulamisen seurauksena vapautuviin kasvihuonekaasuihin, joita mahdollisesti eriteltiin opiskelijoiden vastauksissa hiilidioksidin, metaanin ja vesihöyryn osalta (taulukko 4). Joissakin vastauksissa ymmärrettiin suoraan jäätiköistä tai niiden alta vapautuvan kasvihuonekaasuja, kuten metaania tai hiilidioksidia. Osassa vastauksissa sen sijaan ajateltiin kasvihuonekaasujen lisääntyvän välillisesti jonkin jäätiköiden sulamisesta aiheutuvan ilmiön seurauksena. Nämä alaluokat ilmenevät taulukosta 4. Yhteensä 26 vastauksessa kasvihuonekaasujen lisääntymistä perusteltiin lisäksi vedenmäärän kasvulla. Alla kaksi otetta vastauksista, joissa edeltävä viittaa suoraan jäätiköistä vapautuviin ja jälkimmäinen sulamisen aiheuttaman vesimäärän kasvusta aiheutuviin kasvihuonekaasuihin:

Mannerjäätiköiden ja napa-alueiden merijäätiköiden sisällä on valtavat määrät metaania ja muita kasvihuonekaasua, joita on ilmakehässä runsaasti kyseisten jäätiköiden muodostuksessa. Jäätiköiden sulaminen vapauttaa kaasuja ilmakehään. (K10/V13)

Toisaalta mannerjäätiköiden sulamisen aiheuttama merenpinnan nousu voi haudata alleen hiilidioksidia sitovaa kasvillisuutta, mikä osaltaan kohottaa kasvihuoneilmiötä aiheuttavan hiilidioksidin määrää ilmakehässä. (K9/V30)

**Jäätiköiden sulamisesta vapautuvat kasvihuonekaasut.** Suoraan jäätiköiden sulamiseen yhdistetyistä kasvihuonekaasuista yleisimpänä oli eritelty *metaani*. Metaania koskeviin mainintoihin on sisällytetty myös kaksi vastausta, joista toisessa oli mainittu vapautuva maakaasu jäätiköiden alta ja toisessa maakaasutaskut sekä jäätiköiden alla olevat hiililähteet. Nämä vastaukset luokiteltiin oikeiksi, sillä maakaasu on pääasiassa metaania. Yhdeksässä (47 %) metaania koskevista vastauksista vapautuminen oli lisäksi yhdistetty ikiroudan sulamiseen, kun taas yhdessä (5 %) vastauksessa ikiroudan sulamiseen liitettiin vain *hiilidioksidin* vapautuminen.

#### Taulukko 4

Opiskelijoiden vastaukset, joissa viitataan kasvihuonekaasujen lisääntymiseen jäätiköiden sulamisen seurauksena (joko suoraan tai välillisesti). (n=57)

	Vastausten lukumäärä	Prosenttiosuus (%)
<b>Jäätiköiden sulamisesta vapautuvat kasvihuonekaasut</b>		
Mainittu metaani	23	40.4
Mainittu hiilidioksidi	7	12.3
Mainittu "kasvihuonekaasut"	11	19.3
<b>Vesihöyryn lisääntyminen</b>		
Yhdistetty yleisesti ilmaston lämpenemiseen	11	19.3
Yhdistetty meriveden lämpenemiseen	3	5.3
Yhdistetty veden pinta-alan kasvuun	7	12.3
Jäätiköistä sublimoituminen	1	1.8
<b>Kasvihuonekaasujen lisääntyminen sulamisen välillisistä seurauksista</b>		
Mainittu "kasvihuonekaasut"	2	3.5
Mainittu hiilidioksidi	3	5.3
Hiilen sitoutumisen väheneminen	8	14.0

Opiskelijoiden vastauksista, joissa käsiteltiin kasvihuonekaasujen vapautumista suoraan jäätiköiden sulamisen seurauksena, oli osassa yleisen "kasvihuonekaasu" maininnan lisäksi eriteltyinä metaani ja hiilidioksidi (2, 18 %), vain metaani (4, 36 %) tai vain hiilidioksidi (1, 9 %), kun taas osa kokelaista eivät olleet eritelleet kasvihuonekaasuja tarkemmin (4, 36 %). Taulukossa 4 maininnat on summattu alakohdittain.

**Vesihöyryn lisääntyminen.** Tämän alaluokan vastauksista suurin osa perusteli kasvua *yleisesti ilmaston lämpenemisellä* ilman tarkempaa selitystä tai osana jäätiköiden sulamisen prosessia *veden (haihtumis)pinta-alan kasvuna* (taulukko 4).



Alaluokan vastauksista pienessä osassa eriteltiin *meriveden lämpenemisen* ja vain yhdessä vastauksessa eriteltiin *jäätiköistä sublimoitumisen* lisäävän vesihöyryä ilmakehässä. Vesihöyryyn lisääntymistä tieteellisesti oikein käsiteltiin yhteensä 21 vastauksessa, joista yhdessä mainittiin sekä ilmaston lämpenemisen että jäätiköistä sublimoitumisen vaikutus. Alla kaksi otetta alaluokan vastauksista:

Merenpinta maapallolla nousee keskimäärin jäätiköiden sulaessa ja haihdutuspinta-ala kasvaa, mikä lisää vesihöyryyn määrää ja lämpötilan nousua. (K9/V13)

Jäätiköiden sulaminen lisää vesihöyryyn määrää maan ilmakehässä. Jäätiköiden sulamisvedet voivat haihtua ilmakehään tai jäätiköistä voi suoraan sublimoitua vesihöyryä ilmakehään. (K15/V5)

**Kasvihuonekaasujen lisääntyminen sulamisen välillisistä seurauksista.** Vastaukset, joissa mainittiin kasvihuonekaasujen lisääntymisen olevan seurausta jollekin jäätiköiden sulamisesta aiheutuvalla ilmiöllä, yleisin maininta oli *hiilen sitoutumisen väheneminen*. Niistä yhtä lukuun ottamatta kaikki selittivät hiilinielujen katoamista metsien tai kasvillisuuden peittymisellä merenpinnan nousun seurauksena. Yhdessä vastauksessa hiilen sitoutumisen vähentymistä perusteltiin metsien hakkuulla rannikolta poismuuttavan asutuksen tieltä.

Neljässä sulamisen seurauksista nousevaa hiilidioksidipitoisuutta koskevassa vastauksessa kaikissa merenpinnan nousun oli mainittu vähentävän hiilinieluja, ja kahdessa niistä se selitettiin syyksi *hiilidioksidin* määrän kasvuun ilmakehässä. Näiden sijaan yhdessä vastauksista käsiteltiin hiilidioksidin määrän kasvua merivirtojen muutoksesta aiheutuvan ilmaston viilenemisen ja siihen tarvittavan lisääntyneen lämmitystarpeen seurauksena. Vaikka hiilidioksidipitoisuuden kasvun mekanismi on tässä vastauksessa kuvailtu osittain väärin, luokiteltiin se ilmiön ymmärtämiseen, sillä ilmaston lämpeneminen voi paikallisesti viilentää ilmastoja ja lisätä kasvihuonekaasuja tuottavaa energiantarvetta.

Kahdessa vastauksessa, joissa *kasvihuonekaasujen* määrän mainittiin kasvavan jäätiköiden sulamisen välillisistä seurauksista, toisessa vastauksessa käsiteltiin merenpinnan nousua välillisenä tekijänä aiheuttaen kasvihuonekaasupäästöjä ranta-asutuksen siirtämisestä sisämaahan. Toisessa näistä vastauksista mainittiin jäätiköiden alta paljastuvien öljyesiintymien hyödyntämisen lisäävän ilmakehän kasvihuonekaasuja.

## 5.2 Yhteyden ymmärtämiseen liittyvät virhekäsitykset

Lukion päättävien opiskelijoiden virhekäsityksiä ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen välisestä yhteydestä tarkasteltiin veden ja jään lämmön varastoitumisen, jäätiköiden ja niiden ympäristön vuorovaikutusten sekä sääilmiöiden ja vesihöyryn näkökulmista (taulukko 5).

### Taulukko 5

*Jäätiköiden sulamiseen ja ilmaston lämpenemiseen liittyviin virhekäsityksiin luokiteltujen vastausten jakauma ylioppilaskokeessa. (N=243)*

	Vastausten lukumäärä	Prosenttiosuus (%)
<b>Lämmön varastoituminen meriin ja jäätiköihin</b>	86	35.4
<b>Jäätiköt ja ympäristö</b>		
Välitön ympäristö	44	18.1
Merivirrat	40	16.5
<b>Vesihöyry ja sääilmiöt</b>		
Liitetty vesihöyryyn	31	12.8
Liitetty sääilmiöihin	17	7.0

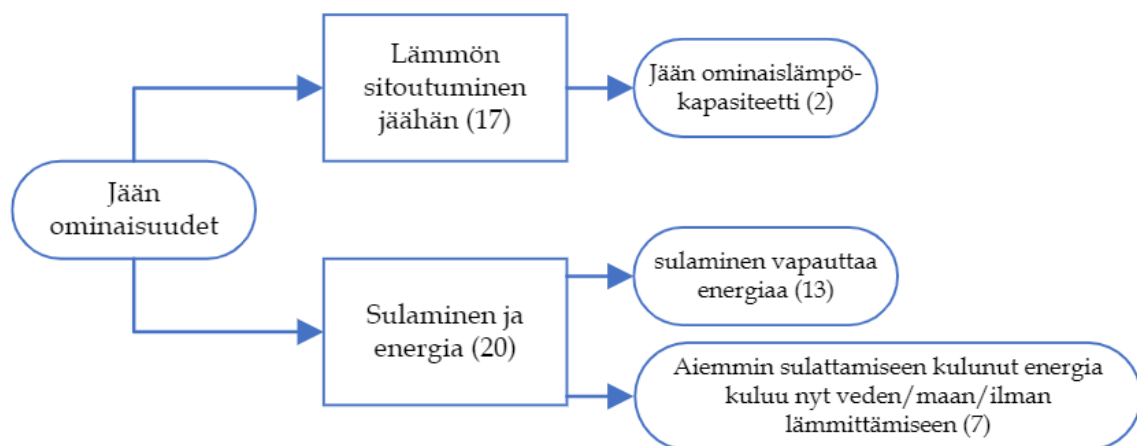
Yleisin opiskelijoiden virhekäsitys jäätiköiden sulamisen ilmaston lämpenemistä kiihdyttävästä vaikutuksesta oli ilmakehän lämmön varastoituminen meriin ja/tai jäätiköihin. Seuraavaksi yleisimmät virheelliset käsitykset vastauksissa olivat jäätiköiden vaikutukset niiden välittömään ympäristöön eli niitä ympäröivään meriveteen ja ilmaan sekä merivirtojen muutokset, mitkä saivat noin puolet vähemmän mainintoja. Vesihöyryn lisääntyminen sai hieman vähemmän mainintoja kuin edellä mainitut yläluokat. Vähiten mainintoja saivat jäätiköiden sulamisesta aiheutuvat sääilmiöiden muutokset, mutta joka oli kuitenkin 7 % koko aineistosta.

### 5.2.1 Käsitykset lämmön varastoitumisesta meriin ja jäätiköihin ilmaston lämpenemistä voimistavana mekanismina

Kokelaat perustelivat ilmaston lämpenemistä veden ja jään ominaisuuksilla, mikä oli säteilytasapainon ymmärtämisen ohella vastauksissa suurin selittävä teema. Kyseisissä vastauksissa ilmaston lämpenemistä perusteltiin suoraan veden tai jään kyvyllä sitoa lämpöä tai kuvailtiin yleisesti meriveden lämpenevän. Tällaisia vastauksia aineistossa oli 86 kappaletta eli noin 35 % koko aineistosta. Vastaukset on jaoteltu luokkiinsa jään ja veden ominaisuuksien perusteella (kuvat 1 ja 2), ja vastauksissa mainittujen tekijöiden lukumäärät ilmenevät kuviosta 2.

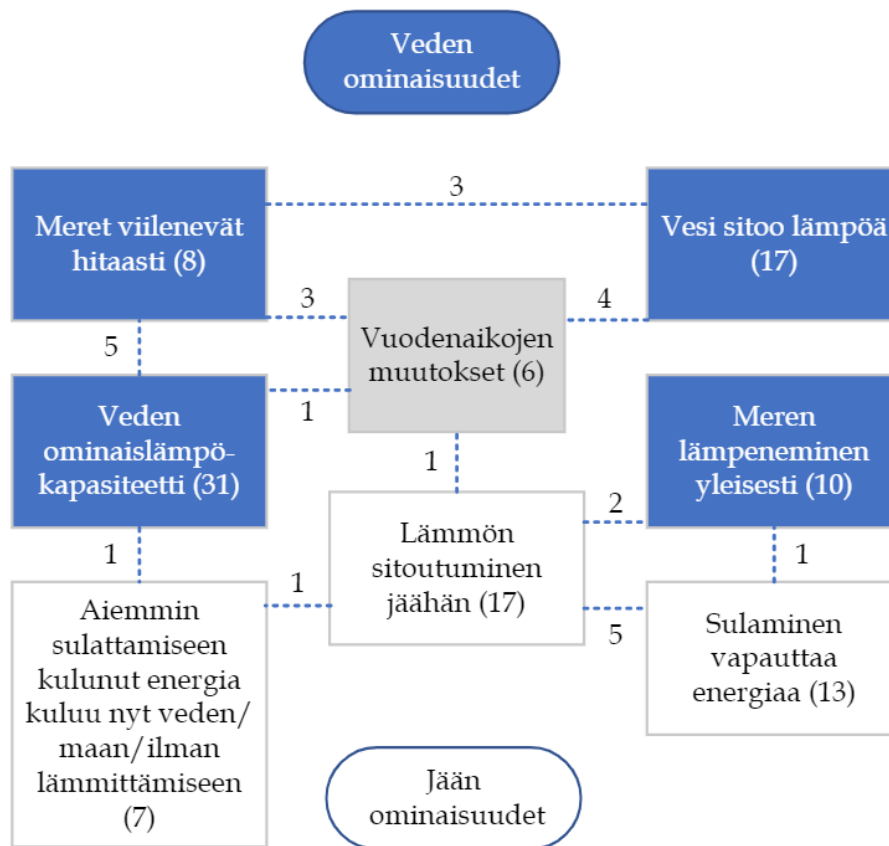
#### Kuvio 1

*Jään ominaisuuksia koskeva jaottelu. (n=31)*



## Kuvio 2

Veden ja jään ominaisuuksien maininnat vastauksissa. Ominaisuuksien kokonaislukumäärät ja vastauksissa ilmenevien eri mainintojen lukumäärät. (n=86)



**Merен lämmittävä vaikutus.** 58 vastausta luokiteltiin luokkaan, jossa meriveden lämpeneminen selitettiin ilmastoa lämmittävänä tekijänä. Näistä 23 vastauksessa perusteltiin veden varastoivan lämpöä sen *ominaislämpökapasiteetin* ansiosta. Lisäksi 7 vastauksessa veden ominaislämpökapasiteetin kerrottiin olevan jään ominaislämpökapasiteettia tai sulamislämpöä suurempi ja yhdessä vastauksessa kuvailtiin jään sulavan paremman lämmön sitomiskyvyn omaavaksi vedeksi, jolloin jään sulaminen vedeksi sitoisi enemmän lämpöä kuin jäätiköiden olemassa ollessa. Alla ote vastauksesta, jossa kokelas on maininnut vesimassan lisääntyminen sulamisen seurauksena ja veden ominaislämpökapasiteetti syiksi ilmaston lämpenemiselle:

Napajäätiköiden sulaminen lisää valtamerten vesimäärää. Vedellä on suuri ominaislämpökapasiteetti, minkä ansiosta se lämmentyään pysyy lämpimänä pitkään. Veden määrän lisääntyessä valtameret alkavat lämmittää ilmastoa yhä enemmän. (K5/V18)

Näiden sijaan 17 vastauksessa kuvailtiin yleisellä tasolla *veden sitovan (paljon) lämpöä tai energiaa* ja 10 vastauksessa kuvailtiin *merten lämpenevän/lämpötilan nousevan*. Yhdestä näistä vastauksista veden kuvailtiin sitovan valoenergiaa, joka vapautuisi lämpönä ympäristöön. Edellä luokitelluista 34 vastauksessa kuvailtiin merten vesimäärän kasvavan, mikä voimistaisi merten lämmittävää vaikutusta, kun lämpöä sitovaa vettä olisi enemmän. Lisäksi 8 vastauksessa eriteltiin *meriveden viilenevän hitaasti*.

**Jään lämmittävä vaikutus.** 17 vastausta luokiteltiin *lämmön sitoutuminen jäähän* -alakohtaan (kuvio 1). Vastauksissa kuvailtiin jäätiköiden sitovan lämpöä itseensä, mitä ei jäätiköiden sulamisen seurauksena enää tapahtuisi, ja joka johtaisi ilmaston lämpenemiseen. Jään kykyä sitoa lämpöä perusteltiin jään ominaislämpökapasiteetilla näistä kahdessa vastauksessa, joista toisessa jään ominaislämpökapasiteetin verrattiin olevan veden ominaislämpökapasiteettia pienempi. Kyseinen vastaus oli lisäksi liitetty meren vesimäärän kasvuun. Kuudessa vastauksessa, joissa käsiteltiin lämmön varastoitumisella meriin tai jäätiköihin, eriteltiin lisäksi muutoksia vuodenaajoissa.

20 vastausta luokiteltiin alakohtaan *sulamisen ja energia* (kuvio 1). Näistä 13 vastauksessa selitettiin jäätiköiden sulamisen vapauttavan energiaa tai lämpöä, mikä johtaisi ympäristön eli ilmaston, veden ja/tai maan lämpötilan nousuun. Näistä yhdessä vastauksessa eriteltiin jään sulamisessa vapautuvan energian nostavan ilmaston lämpötilaa, koska ilmaseoksen ominaislämpökapasiteetti on suhteellisen pieni. Sulaminen ja energia -alakohtaan luokitelluista vastauksista seitsemässä kuvailtiin aiemmin sulattamiseen kuluneen energian lämmittävän suoraan vettä, maata ja/tai ilmaa.

### 5.2.2 Käsitteet jäätiköiden vaikutuksista lähiympäristöön ja sääilmiöihin

Huomattava osa kokelaista (79) liitti jäätiköiden sulamisen seuraukset sen välittömän ympäristön muutoksiin, vesihöyryn kasvuun tai muutoksiin sääilmiöissä

(taulukko 6). Muutokset välittömässä ympäristössä tai sääilmiöissä liittyivät pääasiassa lämpenemiseen ja viilenemiseen tai viilentävien vaikutusten vähenemiseen. Vesihöyryn kasvua perusteltiin tässä kategoriassa virheellisesti.

### Taulukko 6

*Jäätiköiden välittömään ympäristöön, vesihöyryyn ja sääilmiöihin yhdistettyjen mainintojen kokonaislukumäärät. (n=79)*

	Vastausten lukumäärä	Prosenttiosuus (%)
<b>Jäätiköiden välitön ympäristö</b>		
Vaikutukset ilmaan	22	27.8
Vaikutukset mereen	15	19.0
<b>Vesihöyryn lisääntyminen</b>		
Yhdistetty suoraan sulamiseen	20	25.3
Yhdistetty veden tilavuuden kasvuun	9	11.4
<b>Sääilmiöt</b>		
Sateet	7	8.9
Tuulet ja ilmavirrat	12	15.2

**Jäätiköiden välitön ympäristö.** Tehtävään vastanneista 44 kokelasta oli yhdistänyt jäätiköiden sulamisen niiden välittömän ympäristön muutoksiin, joita on eritelty taulukossa 6. Puolet (22) mainitsi jäätiköiden viilentävän niitä *ympäröivää ilmaa* ja lisäksi neljä kokelasta mainitsi niiden vaikuttavan yleisesti ympäristöön. Yhdeksässä vastauksessa sulaminen oli yhdistetty *meren lämpenemiseen*, ja näistä lisäksi yhdessä oli maininta jäätiköiden viilentävästä vaikutuksesta ympäröivään ilmaan. Edellä kaksi esimerkkiä jäätiköiden vaikutuksista ilmaan tai mereen ja perustelut vaikutuksista ilmaston lämpenemiseen:

Manner- ja merijäätiköiden sulaminen vain kiihdyttää lämpötilan nousua. Tämä johtuu siitä, että manner- ja merijäätiköt viilentävät ilmastoa. - - Jäätiköiden sulaminen vähentää niiden viilentävää vaikutusta lämpötilaan ja kiihdyttää entisestään niiden sulamista ja ilmaston lämpeämistä. (K8/V5)

Jäätiköiden sulaminen saisi aikaan nousun merien keskimääräisissä lämpötiloissa, jolloin niiden kyky viilentää erityisesti maapallon lämpimiä alueita heikkenisi. (K2/V5)

Osassa vastauksista merten lämpeneminen oli perusteltu jäätiköiden energian vapautumisena. Kuudessa vastauksessa mainittiin yleisesti manner- tai merijää- tiköiden viilentävän ympäröivää vettä tai merta. Kuudessa vastauksessa oli ala- luokkaan liittyen mainittu ainoastaan jäätiköiden tasapainottava vaikutus Maa- pallon lämpötilaan.

**Vesihöyryn lisääntyminen.** Osa vesihöyryä koskevista vastauksista luoki- teltiin virhekäsityksiin, jos niissä ei ollut yhdistetty vesihöyryn muodostumista jäätiköiden sulamiseen haihtumispinta-alan kasvuna tai jos vesihöyryn määrän tai veden höyrystymisen kasvu oli yhdistetty jään sulamisen seuraukseksi. Näitä vastauksia oli yhteensä 31, joissa suurimmassa osassa vesihöyryn määrän kasvu liitettiin *suoraan jään sulamiseen*:

Sulaessaan niistä [jäätiköistä] haihtuu ilmaan vesihöyryä. Vesihöyry yhtenä kasvihuone- kaasusta voimistaa kasvihuoneilmiötä, jonka takia ilmaston lämpötila nousee. (K18/V5)

Noin kolmasosa vesihöyryä virheellisesti käsitellyistä vastauksista kohdistui ve- den määrän kasvuun sulamisesta aiheutuvan vesimassan lisääntymisenä. Vas- tauksen konteksti huomioiden ne luokiteltiin *veden tilavuuden kasvuun*, jos vas- tauksesta ei selvinnyt, että kokelas tarkoittaa pinta-alan kasvua. Alla esimerkki eräästä vastauksesta, jossa selitys oli pinta-alan kasvun näkökulmasta jäänyt va- jaaksi, ja siksi se tulkittiin veden tilavuuden kasvuun:

Kun vettä on enemmän nesteinä sitä myös höyrystyy enemmän, jolloin vesihöyryn kon- sentraatio ilmassa kasvaa, jonka seurauksena lämpötila nousee. (K2/V10)

Kahdessa vastauksessa vesihöyryn määrän kasvua ei liitetty suoraan jäätiköiden sulamiseen eikä veden tilavuuden kasvuun, joten niitä ei sisällytetty taulukkoon 6. Näistä yksi vastaus oli yhdistänyt vesihöyryn määrän kasvun meren pinnan korkeuden nousuun, ja toinen taas lämpimillä alueilla haihtumiseen. Jälkimmäi- sessä vastauksessa merivirtojen ajateltiin kuljettavan vedet lämpimille alueille, missä vesi pääsee höyrystymään. Vastauksessa kuvailtiin tämän vaikuttavan lämpimien sateiden määrään, mitkä puolestaan sulattavat jäätiköitä entisestään. Myös 18 muuta kokelasta liitti jäätiköiden sulamisen seuraukset sääilmiöihin sa- teiden, tuulten tai ilmavirtojen muutoksina (taulukko 6). Näistä kaksi kokelasta

selitti merivirtojen aiheuttavan sään ääri-ilmiöiden tai luonnonkatastrofien todennäköisyyden kasvua.

**Sääilmiöt.** Vastaukset, joissa kuvailtiin jäätiköiden sulamisen aiheuttavan sateiden, tuulten tai ilmavirtojen muutoksia, yhdistettiin sääilmiöitä kuvaavaan luokkaan. Seitsemän kokelasta mainitsi *sateiden* lisääntyvän jäätiköiden sulamisen seurauksena, ja näistä kaksi perusteli sateiden kiihdyttävän sulamista. 10 vastauksessa sulamisen seuraukseksi mainittiin *tuulten tai ilmavirtojen muutokset*, joista kuudessa vastauksessa viitattiin lämpimien tuulten tai ilmavirtojen lisääntymiseen esimerkiksi seurauksena siitä, etteivät ne jäätiköiden puuttuessa enää jäähdy. Näistä kolmessa ja lisäksi neljässä muussa vastauksessa mainittiin kylmien tuulten tai ilmavirtausten ja mahdollisesti niiden vaikutusten vähenevän tai pysähtyvän. Yhdessä vastauksessa ilmavirtojen mainittiin pysähtyvän kokonaan. Lisäksi yhdessä vastauksessa napa-alueiden (jää-)vuoristojen mainittiin vaikuttavan merituuliin ja ilmavirtauksiin.

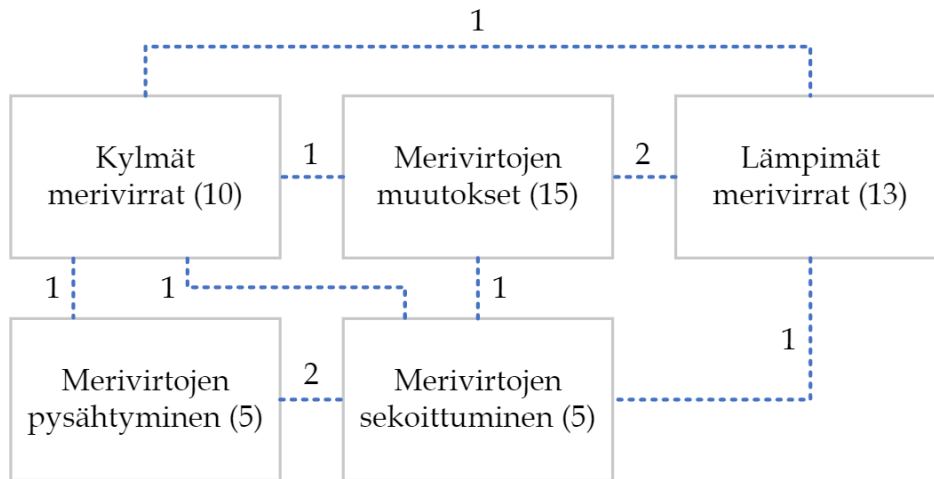
### 5.2.3 Käsitteet jäätiköiden vaikutuksista merivirtoihin

Aineistossa 40 vastauksessa (16 %) jäätiköiden sulaminen yhdistettiin merivirtoihin. Näistä vastauksista reilussa kolmannessa (38 %) kuvailtiin yleisellä tasolla jäätiköiden sulamisen *muuttavan merivirtoja*, ja joista neljässä vastauksessa eriteltiin lisäksi tarkemmin merivirtojen muutoksia (kuvio 3). Merivirtoja käsittelevien vastausten kokonaislukumäärään on laskettu mukaan kaksi vastausta, joissa puhuttiin yleisesti veden sitoman lämmön kulkeutuvan virtojen mukana uusille alueille, mutta näitä vastauksia ei ole kuviossa 3.



### Kuvio 3

Jäätiköiden sulamisen ja merivirtojen yhteyttä käsittelevien vastausten maininnat. Mainintojen kokonaismäärät ja vastauksissa ilmenevien eri mainintojen lukumäärät. (n=40)



Kolmessatoista vastauksessa kuvailtiin *lämpimien merivirtojen muutoksia*, joita olivat lämpimien virtausten lisääntyminen (6), merivirrat kuljettavat lämpöä (4), lämpimien merivirtojen voimistuminen (2) tai kylmien merivirtojen muuttuminen lämpimiksi (1). Kymmenessä vastauksessa käsiteltiin jäätiköiden sulamisen vaikutuksia *kylmiin merivirtoihin*. Näistä kahdeksassa vastauksessa kuvailtiin jäätiköiltä saapuvan viilentäviä vesivirtauksia ja viidessä vastauksessa kerrottiin kylmien merivirtojen vähenevän eli kolmessa vastauksessa mainittiin nämä molemmat. Alla lainaus vastauksesta, jonka sisällöt yhdistettiin lämpimien virtausten lisääntymiseen ja kylmien vähenemiseen:

Jäätiköiltä veden ja ilman kautta tulevien kylmien virtausten puuttuessa pohjoisessa ja etelässä olisi kuumempaa. Myös merenpinta nousisi ja lämpimillä virtauksilla olisi enemmän tilaa. (K10/V14)

*Merivirtojen sekoittuminen* oli mainittu viidessä vastauksessa, joissa kuvailtiin kylmien ja lämpimien merivirtojen sekoittuvan tai merivirtojen reittien muuttuvan. Myös *merivirtojen pysähtyminen* mainittiin viidessä vastauksessa, joista kahdessa vastauksessa käsiteltiin myös merivirtojen sekoittumista. Vastausten sisältöjen väliset kytkennät on esitetty kuviossa 3. Merivirtojen muutosta perusteltiin veden määrän kasvulla yhteensä kymmenessä vastauksessa. Lisäksi yhdessä vastauksessa ei eritelty merten syvyysuuntaista vedenkiertoa, joka oli ainoa

maininta YTL:n hyvän vastauksen piirteissä merivirtoihin liittyen. Myös huomionarvoista merivirtoja käsittelevissä vastauksissa on, että mikäli kokelas oli nimenmennyt jonkin merivirran, oli kyseessä aina Golf-virta. Se oli mainittu yhteensä kuudessa vastauksessa.

#### 5.2.4 Muut käsitykset

Kokelaiden vastauksissa esiintyi jonkin verran virheellisiä ilmauksia, jotka eivät sopineet edellä oleviin yläluokkiin. Näitä ilmauksia oli yhteensä 28, eli noin 12 prosenttia aineiston vastauksista. Vastausten sisältämät ilmaisut liittyivät säteilytasapainon väärinymmärrykseen, saasteiden tai yhdisteiden lisääntymiseen, tai niiden kategoriat olivat pieniä tai sisällöt luokittelun kannalta puutteellisia.

**Säteilytasapainon väärinymmärrys.** Yleisin virhekäsitys tässä pääluokassa liittyi säteilytasapainon väärinymmärtämiseen, johon luokiteltiin 11 vastausta. Tämän alaluokan vastaukset sisälsivät mainintoja, joiden mukaan vesi heijastaa runsaasti säteilyä, jää absorboi merta enemmän säteilyä, ilmaston lämpeneminen lisää auringonsäteiden määrää, säteilyn taittuminen lämmittää Maata tai jäätiköistä meriin vapautunut suola vähentää valon heijastumista. Tähän alaluokkaan luokiteltiin myös vajaa vastaus, jossa kerrottiin jäätiköihin varastoituneen veden valuvan pois, jolloin Auringon lämpösäteet pääsevät lämmittämään maanpintaa. Säteilytasapainon väärinymmärtämiseen luokitellusta vastauksista kahdessa vastauksessa kuvailtiin säteilyn heijastuvan edestakaisin maapallolla johtaen ilmaston lämpenemiseen, mistä alla ote:

Merijäätiköiden sulaessa muodostunut vesi heijastaa auringonsäteitä yhä voimakkaammin pois Maanpinnalta ilmakehään ja sieltä yhä takaisin maahan. Tällöin säteet ovat ilmassa lämmittämässä ilmastoa, eivätkä pääse absorboitumaan maanpinnan sisään. Tämä säteiden laaja-alueinen säteily edestakaisin voi kiihdyttää lämpötilan nousua hyvinkin voimakkaasti. (K1/V19)

**Saasteet ja yhdisteet.** Yhdeksässä vastauksessa mainittiin sulamisen yhteyteen erilaisten saasteiden tai yhdisteiden lisääntyminen joko suoraan jäätiköiden sulamisen tai välillisesti merenpinnan nousun seurauksena. Näistä neljässä vastauksessa jäätiköiden sulamisen mainittiin lisäävän päästöjä, joista kahdessa vastauksessa aiemmin jäätiköihin sitoutuneiden saasteiden mainittiin vapautuvan,

yhdessä jäätiköiden alta paljastuvan radioaktiivista jätettä ja maankuoren yhdisteitä, ja yhdessä jäätiköiden sisällä olevien kaasuaukkojen vapauttavan ilmaan haitallisia kaasuja. Kolmessa vastauksessa merenpinnan nousun mainittiin lisäävän päästöjä välillisesti, joista kahdessa saasteiden mainittiin kasvavan asutuksen siirtämisen seurauksena ja yhdessä tehtaiden tuhoutumisen vapauttavan kaasukehää voimistavia vaarallisia aineita. Yhdessä vastauksessa sulaneisiin vesimassoihin mainittiin liukenevan mineraaleja ja yhdisteitä, jotka höyrystyvät ilmakehään kasvihuonekaasuiksi. Yhdessä vastauksessa mainittiin yleisesti saasteiden ja kosteuden nopeuttavan ilmaston lämpenemistä.

**Pienet kategoriat ja puutteelliset vastaukset.** Tämän luokan kategorioista kaksi luokkaa olivat sellaisia, ettei niitä voinut yhdistää suurimpien virhekäsitysten pääluokkiin. Yhdessä pienten kategorioiden luokassa oli kolme mainintaa *otsonikerroksesta*. Näistä kahdessa vastauksessa sen kuvailtiin ohenevan joko hiilidioksidin takia tai ilmakehän reaktioiden nopeutuessa sekä yhdessä vastauksessa sen vain mainittiin olevan ohut napa-alueilla. Toiseen pienten kategorioiden luokkaan sisältyi neljän kokelaan maininnat *sulamisveden sulattavasta vaikutuksesta alla olevaan jäähän*. Näiden lisäksi kymmenessä vastauksessa oli ilmaisuja, joista *ei voitu muodostaa kategorioita tai niiden sisällöt olivat puutteellisia*. Neljä näistä vastauksista liittyi jäätiköihin, joiden kuvailtiin erittävän happea, absorboivan hiilidioksidia itseensä tai niiden sulamisen kuvailtiin helpottuvan massan pientyessä ja nostavan maan keskilämpötilaa, kun kylmiä keskilämpötilaa nostattavia alueita ei ole. Kolmessa muussa vastauksessa kuvailtiin maasta/vedestä nousevan lämmintä ilmaa tai veden varastoivan lämpöä jäätä paremman lämmönjohtavuuden takia. Lisäksi kahdessa vastauksessa kuvailtiin sulamisen lisäävän makean veden määrää merissä, joka sekoittuessaan suolaisen meriveden kanssa aiheuttaisi meriveden lämpenemistä tai vähentäisi hiilidioksidin sitoutumista meriveteen. Yksi näistä vastauksista oli sisällöllisesti vajaa, minkä mukaan vähemmän kylmää on enemmän lämmintä.

## 6 POHDINTA

### 6.1 Opiskelijoiden tieteellinen ymmärtäminen

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin lukion päättävien opiskelijoiden tieteellistä ymmärrystä jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen yhteydestä säteilytasapainon, säteilytyyppien, kasvihuonekaasujen lisääntymisen ja palauteilmion näkökulmista. Opiskelijoiden ymmärrystä tutkittiin fysiikan ylioppilaskokeen (k2017) jokeritehtävän avulla. Jokeritehtävät sisältävät tyypillisesti eri tieteenaloja yhdistäviä jopa oppiaineen opetussuunnitelman ulkopuolisia teemoja (Partanen, 2017), mikä selittänee myös tämän tutkimuksen tuloksissa fysiikan sisältöjen lisäksi toistuvia biologian ja maantieteen sisältöjä. Tässä tutkimuksessa aineistona käytetyn ylioppilaskokeen aikana on ollut voimassa vuoden 2003 lukion opetussuunnitelma (Opetushallitus, 2003), jossa ilmastonmuutosta ei käsitellä fysiikan sisällöissä. Tehtävään vastaamisessa opiskelijalta on vaadittu siis kykyä soveltaa tietoja sähkömagneettisen säteilyn ja aineen vuorovaikutuksista.

Jäätiköiden sulamisesta aiheutuvat muutokset maapallon säteilytasapainossa tunnisti alle puolet kokelaista. Tämä lukumäärä on melko pieni, sillä jäätiköiden sulamisen aiheuttama säteilyn heijastumisen väheneminen ja absorboituvan säteilyn kasvu voidaan katsoa olevan tärkein napa-alueita lämmittävä mekanismi. Lisäksi tulosten mukaan säteilyn heijastuminen mainittiin absorptiota selvästi useammin. Kirjallisuuden perusteella vaikuttaisi siltä, että säteilyn absorptioon ymmärrys on melko pinnallista. Usein ilmaston lämpenemistä perustellaan sillä, ettei auringonsäteilyä pääse Maasta pois yhtä paljon mitä Maahan saapuu (Ratinen ym., 2013). Ilmiö siis tunnistetaan, mutta sen mekanismin ymmärtäminen on haastavaa, kuten ilmastosysteemin tapahtumissa yleensä (Jakobsson ym., 2009; Nevanpää, 2005, s. 124). Jäätiköiden sulamisen yhteyttä säteilytasapainoon on siis mahdollisesti helpompi selittää säteilyn heijastumisen vähenemisellä kuin

absorption kasvulla, vaikka vain heijastumista koskevissa vastauksissa olisikin ollut taustalla myös säteilyn absorptio.

Säteilyn heijastumista ja absorptiota käsitelleistä opiskelijoista vain hieman alle puolet viittasi pinnan värin olevan yhteydessä säteilyn heijastumiseen tai absorptioon. Toisaalta niissä vastauksissa, jossa puhuttiin vain jäätiköiden heijastumiskyvystä, voi opiskelijoilla olla itsestään selvä oletus jäätiköiden olevan vaaleita. Vastaavasti niissä absorptiota käsittelevissä vastauksissa, joissa mainittiin ainoastaan Maan pinta, yleensä manner tai meri, voi opiskelijoilla kuitenkin olla itsestään selvä oletus niiden olevan tummia. Tästä syystä tuloksista on vaikea päätellä, kuinka moni opiskelijoista todellisuudessa ymmärtää säteilyn heijastuvuuden ja pinnan värin yhteyden. Aiemmissa tutkimuksissa (Haslag & Concanon, 2012; Anderson & Smith, 1986) on kuitenkin viitteitä siitä, että opiskelijat ajattelevat virheellisesti pinnan värin olevan tulosta säteilyn absorboitumisesta eikä heijastumisesta sekä pinnan värin ajatellaan olevan aineen ominaisuus eikä tulosta valon heijastumisesta. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkasteltu opiskelijoiden ymmärrystä värien muodostumisesta vaan opiskelijoiden kykyä päätellä, tapahtuuko säteilyn heijastumista tai absorptiota jäätiköiden ja maanpinnan värin perusteella.

Huomionarvoista on myös se, että yksikään opiskelijoista ei maininnut jäätiköiden sulamisen paljastavan niihin kulkeutuneita saasteita tai muuta kiinteää ainesta. Tämä on yllättävää, sillä aiemmissa tutkimuksissa huomattava osa opiskelijoista on yhdistänyt saasteet yhdeksi pääsyyksi ilmaston lämpenemiseen (Hayhoe ym., 2011; Jarrett & Takacs, 2020). Lisäksi on kiinnostavaa, että albedo-käsite mainittiin vain neljässä vastauksessa, jotka olivat peräisin vieläpä samasta lukiosta. Tulos voisi olla seurausta siitä, että käsitettä ei ilmene fysiikan oppikirjoissa sekä aiheen käsittelyn syvällisyys on riippuvainen koulusta ja opettajasta, joista jälkimmäinen selitys ilmenee esimerkiksi Grovesin ja Pughin (1999) tutkimuksessa. Fysiikan oppikirjojen sisällöt painottuen säteilyn heijastumiseen liittyen voisi selittää myös heijastumisen ja absorption mainintojen suuren eron koululaiden vastauksissa.

Säteilytyyppien ymmärtämistä tarkasteltiin säteilytasapainoon viitanneiden opiskelijoiden osalta. Saapuva säteily mainittiin vastauksissa suhteellisen harvoin, mutta opiskelijoilla voi tässäkin tapauksessa olla itsestään selvä oletus säteilyn olevan Auringosta saapuvaa säteilyä. Vaikkakin tulosten mukaan saapuvaksi säteilyksi yleisimmin ilmaistiin auringonsäteily tai "säteily", silti lähes puolet opiskelijoista eritteli saapuvan säteilyn olevan lämpösäteilyä tai auringonvaloa. Tulosten mukaan vaikuttaa siltä, että monilla opiskelijoilla on haasteita ymmärtää Auringon sähkömagneettisen säteilyn koostuvan useista säteilytyypeistä. Tämä tulos on linjassa useiden aiempien tutkimusten kanssa (McCuin ym., 2014; Niebert & Gropengießer, 2014), joissa esimerkiksi UV-säteilyä, lämpösäteilyä ja auringonvaloa ei eroteta toisistaan.

Myös heijastuvan ja absorboituvan säteilyn kuvattiin useimmiten olevan auringonsäteilyä tai "säteilyä". Kuitenkin reilu kolmannes opiskelijoista eritteli lämpösäteilyn, joista suhteellisesti hieman useampi viittasi sen absorptioon. Monet opiskelijat saattavat siis yksinkertaistetusti ajatella, että auringonsäteilyn sisältämän lämpösäteilyn absorboituminen Maan pintaan suoraan lämmittäisi ilmastoa. Tuloksista vain yhdessä vastauksessa viitattiin infrapunasäteilyn emissioon. Opiskelijoilla vaikuttaisi siis olevan haasteita ymmärtää maanpinnan absorboivan lämpösäteilyn lisäksi muita sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksia sekä maanpinnan emittoivan absorboimaansa energiaa lämpösäteilynä, mikä ilmakehän kasvihuonekaasuihin absorboituessa johtaa ilmaston lämpenemiseen. Myös aiemmissa tutkimuksissa (Ratinen ym., 2013; Shepardson ym., 2014) opiskelijoiden on ollut vaikeaa ymmärtää energian siirtymistä ilmastojärjestelmän osien välillä sekä yhdistää sähkömagneettisen säteilyn spektrin, eri aallonpituuksien sekä säteilyn absorption ja uudelleen emittoitumisen abstrakteja mekanismeja ilmaston lämpenemiseen.

Tulosten mukaan myös auringonvalo eriteltiin noin kolmanneksessa kokeilaiden vastauksissa, joista suurimmassa osassa käsiteltiin valon heijastumista. Aiemman tutkimuksen mukaan opiskelijoilla on esiintynyt käsityksiä, joiden mukaan nimenomaan auringonvalo heijastuu maanpinnasta johtaen kasvihuone-

neilmiön voimistumiseen (Niebert & Gropengießer, 2014) sekä toisaalta saapuvan auringonvalon on ymmärretty lämmittävän maapalloa (vrt. Ratinen ym., 2013). Joissakin vastauksissa esiintyi myös opiskelijoiden konkreettinen ajattelu lumen ja jään häikäisevyydestä, mikä on voinut johtaa opiskelijoita käsittelemään vain valon heijastumista näkymättömän lämpö- ja UV-säteilyn sijaan.

Jäätiköiden sulamisen ja ilmaston lämpenemisen välistä palauteilmiötä käsiteltiin reilussa kolmanneksessa tämän tutkimuksen vastauksista. Ylioppilaskokeen kysymyksenasettelu toisaalta ohjasi kokelaita tarkastelemaan vastauksissa napa-alueiden keskilämpötilan nousua ja jäätiköiden sulamisen kiihdyttävää vaikutusta lämpötilan nousuun. Yhdessä vastauksessa ei mainittu käsitteitä palauteilmiö tai takaisinkytkentä, mikä voi tarkoittaa, etteivät opiskelijat yleensä tunnista lumi- ja jääpeitteen ja ilmaston välistä palauteilmiötä. Tutkimus opiskelijoiden ymmärryksestä ilmaston palauteilmiöistä on vähäistä, ja vain yhdessä tutkimuksessa mainittiin, etteivät opiskelijat tunnista muutoksen yhdessä ilmastojärjestelmän osassa vaikuttavan muihin ilmastojärjestelmän osiin (vrt. Shephardson ym. 2014). Aiempaan tietoon verrattuna tämän tutkimuksen tulos vaikuttaa ristiriitaiselta, mitä selittänee edellä kuvailtu kokeen kysymyksenasettelu.

Tässä tutkimuksessa yleisimmäksi kasvihuonekaasuksi mainittiin metaani, jonka tunnistaminen kasvihuonekaasuksi on ollut vähäistä aiemman tutkimuksen perusteella (Shephardson ym., 2011). Noin puolet metaanin maininneista vastauksista sen vapautuminen liitettiin ikiroudan sulamiseen, mitä voisi selittää aiheen käsittelyllä mediassa. Toinen suuri luokka kasvihuonekaasujen vapautumisessa oli maininnat vesihöyryn lisääntymisestä, mikä myös on melko yllättävää, sillä aikaisemmassa tutkimuksessa vesihöyryä ei helposti edes tunnisteta kasvihuonekaasuksi (McCuin ym., 2014; Stanisstreet & Boyes, 2004). Jokeritehtävän kohta on toisaalta voinut antaa kokelaille vinkkiä vesihöyryn käsittelyyn, sillä tehtävässä kokelaiden tuli selittää ilmakehän vesihöyryn vaikutuksia ilmastoon. Vähäiset maininnat hiilidioksidin lisääntymisestä verrattuna vesihöyryn määrän kasvuun on myös melko yllättävää, sillä Nousiaisen (2019) tutkimuksessa jokeritehtävän a-kohdassa hiilidioksidi yhdistettiin yleisimmin kasvihuonekaasuksi

kuin vesihöyry. Moni mainitsi metaanin lisäksi hiilidioksidin vapautuvan jäätiköistä niiden sulamisen yhteydessä, mutta hiilidioksidin tai yleisesti kasvihuonekaasujen lisääntyminen liitettiin useissa vastauksissa kasvillisuuden peittymiseen ja rantarajan siirtymisestä aiheutuviin päästöihin merenpinnan nousun seurauksena.

Vesimäärän kasvu ja merenpinnan nousu tunnistetaan jo varhaisessa vaiheessa opiskelijoiden keskuudessa jäätiköiden sulamisen seuraukseksi (Shepardson ym., 2011). Myös tässä tutkimuksessa melkein viidesosa kokelaista mainitsi sen yhdeksi ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen seuraukseksi, ja suurin osa myös pyrki perustelemaan ilmaston lämpenemistä merenpinnan nousun seurauksena. Yleisimmät maininnat liittyivät merten lämpenemiseen ja kasvihuonekaasujen lisääntymiseen. Kuitenkin muutamat kokelaat selittivät merenpinnan nousun aiheuttavan hiilinielujen, kuten kasvillisuuden ja metsien, vähenemistä rantarajan tai tulvien seurauksena, joista jälkimmäinen ilmenee myös aikaisemmasta tutkimuksesta (Hayhoe ym., 2011). Toisin kuin Shepardsonin ym. (2011) tutkimuksessa, yksi tämän tutkimuksen kokelaista mainitsi merenpinnan nousun peittävän myös viljelysmaita. On kuitenkin yllättävää, että vain yksi kokelas oli maininnut vesimäärän kasvun syyksi veden lämpölaajenemisen, joka on kuitenkin tärkeä mekanismi merten vesimäärän kasvussa.

## 6.2 Opiskelijoiden virhekäsitykset

Tässä tutkimuksessa suurin virhekäsitys on lämmön varastoituminen meriin tai jäätiköihin ilmaston lämpenemistä voimistavana mekanisminä, jota hieman yli kolmannes kokelaista vastauksissaan käsitteli. On tieteellisesti oikein, että vesi sitoo paljon lämpöä suuren ominaislämpökapasiteettinsa vuoksi ja luovuttaa lämpöä hitaasti ilmakehään sitä lämmittäen (ks. Myrberg & Leppäranta, 2019, s. 92-93). Veden lämmönsitomiskyky kuitenkin hidastaa ilmaston lämpenemistä, ja ilman lämmön varastoitumista veteen ilmasto olisi nykyistä lämpimämpi, mitä virhekäsityksiin luokitelluista vastauksista ei siis käy ilmi. Vastaavasti kuten



Shepardsonin ym. (2011) tutkimuksessa, myös suurimmassa osassa näistä vastauksista lämmön varastoituminen liitettiin meriveden lämpenemiseen, vaikka lämpenemistä mahdollisesti selitettiin veden ominaislämpökapasiteetilla tai yleisesti veden kyvyllä sitoa lämpöä. Usein sulamisesta lisääntyvä vesimäärä liitettiin meriveden lämmittävien vaikutusten lisääntymiseen, mikä näkyy esimerkiksi käsityksenä siitä, että meriveden hidas viileneminen lämmittää yhä enemmän ilmastoa.

Pieni osa kokelaista mainitsi myös jään sitovan lämpöä, jolloin sulamisen seurauksena lämpöä varastoivaa jäätikköä ei enää olisi. Tämä päättelyketju on ristiriitainen, sillä veden – joksi myös jäätiköt sulavat – kyky sitoa lämpöä on kuitenkin jäätiköitä huomattavasti parempi. Mielenkiintoinen huomio on myös, että jopa 5 % kokelaista mainitsi sulamisen vapauttavan energiaa, vaikka todellisuudessa sulamisreaktio sitoo energiaa. Energian siirtymisen heikko ymmärrys ilmenee myös aikaisemmassa tutkimuksessa (Shepardson ym., 2014), minkä Nousiainen (2019, s. 66) selittää opiskelijoiden heikosta taidosta ymmärtää syvällisesti absorptioon perustuvaa ilmiötä.

Suurena teemana opiskelijoiden virheellisissä käsityksissä on myös ajatukset jäätiköiden vaikutuksista niiden välittömään ympäristöön. Usein jäätiköiden mainittiin vaikuttavan niitä ympäröivään ilmaan viilentäen sitä, ja näin myös alentaen koko Maan keskilämpötilaa tai tasapainottaen Maan lämpötilaeroja. Muutamassa vastauksessa merijäätiköiden käsitettiin toimivan jääpalojen tavoin viilentäen maailman meriä tai napa-alueilta saapuvia vesivirtauksia, ja siten alentavan Maan keskilämpötilaa. Nämä käsitykset saattavat pohjautua opiskelijoiden arkisiin käsityksiin siitä, että jää hohkaa kylmää, ja siten sen ympäristö tuntuu kylmältä. Koska ilmaston lämpeneminen ilmiönä on haastava, hajanainen tieto liitetään helposti arkiseen ajatteluun (Nevanpää, 2005, s. 127).

Melko moni kokelaista toi esille jäätiköiden sulamisen vaikutukset merivirtoihin. Merivirtojen muutoksia perusteltiin vaihtelevasti esimerkiksi kylmien virtausten vähenemisellä, kylmien ja lämpimien virtojen sekoittumisella tai vesimäärän kasvulla eli toisin sanoen puutteellisesti tai täysin virheellisesti.

Maininnat merivirtojen muutoksista saattavat kytkeytyä mediasta lähtöisin olevaan hajanaiseen tietoon, sillä merivirtojen mainintojen yhteydessä muutamat opiskelijat mainitsivat muutosten vaikuttavan erityisesti meitä maantieteellisesti lähimpään Golf-virtaan. Yhdessäkään vastauksessa ei ollut mainintoja veden syvyysuuntaisen kierron heikentymisestä eli termohaliinisesta kierrosta. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että melko moni opiskelija on tietoinen ilmaston lämpenemisen yhteydestä merivirtojen muutoksiin, mutta merivirtojen ja ilmaston välistä kytkentää ei osata perustella tieteellisesti oikein.

Tutkittavien vastauksissa jäätiköiden sulamisen seurauksena tapahtuvat ilmiöt, kuten vesimassojen lisääntyminen tai vesihöyryn määrän kasvu, yhdistettiin myös vuodenaikojen tai sääilmiöiden muutoksiin. Näistä erityisesti sääilmiöiden muutokset ilmenevät monissa aiemmissä tutkimuksissa (Hayhoe ym., 2011; Mutlu & Nacarğlu, 2019) esimerkiksi sateiden määrän kasvun, merenpinnan nousun tai ilmapirtojen muutosten yhteydessä (Shepardson ym., 2011), mitkä ilmenivät myös muutamissa tämän tutkimuksen vastauksissa. Kuten Ratisen ym. (2013) tutkimuksessa, myös muutama tämän tutkimuksen opiskelijoista ajatteli sateiden aiheuttavan ilmastonmuutosta, tässä lämpimien sateiden kiihdyttävänä vaikutuksena jäätiköiden sulamiseen. Vain pari opiskelijaa yhdisti jäätiköiden sulamisesta aiheutuvat sään muutokset ääri-ilmiöihin tai luonnonkatastrofeihin, mikä taas on ollut esillä aiemmissä tutkimuksissa (esim. Shepardson ym., 2011).

Maininnat vesihöyrystä poikkeaa aiemmasta tutkimuksesta melko suuren lukumääränsä perusteella, sillä usein hiilidioksidi mielletään kasvihuonekaasuksi helpommin kuin vesihöyry (Hayhoe ym., 2011). Mainintojen yleisyys on mitä todennäköisimmin seurausta jokeritehtävän b-kohdan tehtävänasettelusta, sillä jo siinä opiskelijoiden on tullut selittää vesihöyryn roolia kasvihuoneilmiössä. Toisaalta Nousiaisen (2019, s. 65) tutkimuksessa selvisi, että kokelaat eivät usein tunnista vesihöyryn roolia kasvihuonekaasuna. Tässä tutkimuksessa olennaisempaa oli tarkastella, miten vesihöyrypitoisuuden on perusteltu kasvavan jäätiköiden sulamisen seurauksena, jos sen pitoisuuden kasvu oli vastauksessa mainittu. Enemmistö

yhdisti vesihöyryn lisääntymisen virheellisesti veden haihtumiseen suoraan jäätiköiden sulamisen tai vesimassan määrän kasvun seurauksena, vaikka myös oikein veden pinta-alan kasvuun liittyviä vastauksia oli melko paljon.

Säteilytasapainoon liittyviä virhekäsityksiä ilmeni muutamia. Näitä aiemman kirjallisuuden näkökulmasta ovat säteilyn säiliöskeeman virheellinen ymmärrys (vrt. Niebert & Gropengießer, 2014) ja otsonikadon rooli ilmaston lämpenemisessä. Parissa vastauksessa ilmaistiin selkeästi säteilyn edestakainen liike siten, että ”kannellinen säiliö” estää säteilyn poistumisen maapallolta. Myös otsonikerroksen heikentymiseen liittyviä vastauksia oli muutama, jolloin tutkimustiedon valossa otsoniaukkoja ei sekoiteta enää yhtä helposti ilmaston lämpenemiseen kuin aiemmin (ks. myös Sheparson ym. 2011). Tulosten perusteella tätä ajattelua kuitenkin ilmenee vielä, vaikka otsonikadon vähäisempi painotus aiempaan verrattuna esiintyy myös uudemmissa perus- ja lukio-opetuksen opetussuunnitelmissa (ks. Opetushallitus 2016, 2019). Säteilytasapainon väärinymmärrykseen luokitelluista vastauksista yleisin virhekäsitys liittyi kuitenkin veden kykyyn heijastaa jäätiköitä paremmin säteilyä.

Muutamissa vastauksissa ilmeni saasteiden vaikutusten sekoittaminen ilmaston lämpenemisen prosessiin. Näissä vastauksissa ei kuitenkaan viitattu saasteiden lisäävän auringonsäteilyn absorptiota, vaan saasteiden ajateltiin vapautuvan ilmakehään jäätiköiden sulamisesta tai sen seurauksista. Kirjallisuudessa saasteiden, kuten ilmaosaasteiden tai ydinvoiman päästöjen, ajatellaan vaikuttavan vahvasti ilmaston lämpenemiseen (Hayhoe ym., 2011; Jarrett & Takacs, 2020), eikä niitä usein eroteta kasvihuonekaasuista (Niebert & Gropengießer, 2014). Nousiainen (2019) mukaan kokelaat vaikuttivat sekoittavan kasvihuonekaasut saasteisiin käyttäen väärää termiä. Tämän tutkimuksen vastauksista voisi tulkita, että termin sekoittamisen lisäksi pieni osa opiskelijoista ymmärtää saasteiden toimivan kasvihuonekaasujen tavoin ilmakehässä, sillä niiden vapautumisen yhteydessä usein mainittiin ilmaston lämpenevän.

### 6.3 Tutkimuksen arviointi ja jatkotutkimus

Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan yleistää melko laajasti kuvaamaan Suomen lukiolaisten fysiikan kirjoittaneiden osaamista, sillä tutkimuksessa käsitellyn tehtävän vastausprosentti oli melko suuri kaikista fysiikan kirjoittaneista (74 %). Toisaalta tutkimuksen tuloksia ei voida yleistää kuvaamaan kaikkien Suomen lukio-opiskelijoiden osaamista, koska fysiikan kirjoittajia suhteessa kaikkiin kevään kirjoittaneisiin oli melko vähän (5991, 15 % kaikista kevään kirjoittaneista: YTL, 2022). Fysiikkaa opiskelleet ovat melko varmasti käsitelleet ilmaston lämpenemiseen liittyviä tieteellisiä mekanismeja perusteellisemmin kuin muissa oppiaineissa, joten tulokset saattaisivat vaihdella kaikkia lukio-opiskelijoita tarkastellessa. Kuitenkin eri maakunnista satunnaisesti poimittu aineisto mahdollistaa yleistettävyyden fysiikan kirjoittaneisiin valtakunnallisesti.

Laadullisen tutkimuksen ja sisällönanalyysin tavoitteena on tarkastella tutkittavien ymmärrystä tutkittavasta aiheesta (Tuomi & Sarajärvi, 2018, s. 26), joten tämän tutkimuksen lähes 250 vastauksen aineisto on riittävän suuri ilmiön ymmärtämisen kuvailemiseksi. Tutkimuksessa käyttämässämme sisällönanalyysissä vastausten analysointiin luotiin tietynlainen luokittelu, jolloin osa vastausten sisällöistä voi jäädä tarkastelun ulkopuolelle. Lisäksi avoimien vastausten tulkinta on aina jossain määrin subjektiivista (Tuomi & Sarajärvi, 2018, s. 20). Aineiston analyysi tehtiin kuitenkin kahden tutkijan toimesta, mikä vahvistaa tulosten objektiivisuutta ja luotettavuutta. Kokelaiden alkuperäiset vastaukset luettiin analyysivaiheessa kokonaisuudessaan kolme kertaa läpi, joista toisessa analyysivaiheessa yksi vastaus luettiin useita kertoja eri sisältöjä luokitellessa. Kolmannella analyysikerralla luokittelu vielä tarkistettiin. Aineiston lukeminen useita kertoja lisää tulosten luotettavuutta. Lisäksi analyysivaiheen mahdolliset näppäilyvirheet pyrittiin minimoimaan varmuuskopioita hyödyntämällä. Inhimilliset virheet ovat kuitenkin mahdollisia isossa aineistossa.

Opiskelijoiden tieteellistä ymmärrystä analysoitiin tieteellisen tutkimuksen sijaan YTL:n mallivastauksen ja oppimateriaalin pohjalta. Oppimateriaalien käyttö on kuitenkin perusteltua, sillä ne toimivat pohjana opiskelijoiden

ymmärryksen kehittymiselle. Tulosten pohdinnassa käyimme pelkkien lukiolaisten sijaan eri ikäryhmistä tehtyjä kansainvälisiä ja suomalaisia tutkimuksia, sillä esimerkiksi Boyesin ym. (2008) mukaan erityisesti virhekäsitysten on todettu olevan melko samankaltaista iästä ja kansalaisuudesta riippumatta. Virhekäsitysten luokittelusta ja lukumäärien laskemisesta teki kuitenkin haastavaa niiden kytkeytyneisyys toisiinsa.

Aineston suuresta koosta ja näkökulman rajauksesta johtuen tarkastelua esimerkiksi opiskelijoiden virhekäsityksistä Auringon sähkömagneettisen spektrin koostumuksesta ei ollut. Säteilytyyppejä käsittelevissä vastauksissa vaikutti olevan viitteitä siihen, ettei sähkömagneettisen spektrin ymmärretä koostuvan muustakin kuin esimerkiksi valosta tai lämpösäteilystä. Aiheen syvällisempi käsittely voisi tässä aineistossa olla jatkossa mahdollista ja toisaalta myös tärkeää, sillä aiemman kirjallisuuden perusteella on havaintoja siitä, että opiskelijat kuitenkin ymmärtävät säteilytyyppien olevan yhteydessä toisiinsa (Jarrett & Takacs, 2020). Aineistossa ilmeni myös muutamia havaintoja opiskelijoiden ymmärryksen samankaltaisuudesta koulukohtaisesti. Kiinnostavaa olisikin tutkia, miten ilmaston lämpenemisen mekanismien ymmärtäminen on riippuvaista opettajasta.

Tämän tutkimuksen perusteella on siis selvää, että ilmaston lämpenemisen ja jäätiköiden sulamisen aiheiden yleisyydestä huolimatta opiskelijoilla on yhä vaikeuksia ymmärtää, kuinka ilmiöt ovat yhteydessä toisiinsa. Sulamisesta aiheutuvia seurauksia tunnistetaan, mutta näiden seurauksien vaikutuksia ilmaston lämpenemiseen perustellaan hajanaisesti ja pinnallisesti tai jopa virheellisesti. Huomiota tulisi kiinnittää opetukseen, jossa perinteisen luokkahuoneopetuksen sijaan opetus suunniteltaisiin opiskelijoiden ennakkotiedot (Rätinen, 2016, s. 61) ja virhekäsitykset (Boyes ym., 1993) huomioiden, ja jossa hyödynnettäisiin vuoropuhelua sekä tutkivaa oppimista (Jakobsson ym., 2009) pitkällä ja tiiviillä ajanjaksolla (Mutlu & Nacaroglu, 2019; Rätinen ym., 2013). Jatkon kannalta olisi mielenkiintoista tietää, tukisiko tämän tutkimuksen perusteella muodostuneiden virhekäsitysten pohjalta suunniteltu opetus lukio-opiskelijoiden ymmärrystä jäätiköiden sulamisen roolista ilmaston

lämpenemisessä. Ilmaston lämpeneminen on kuitenkin monimutkainen ilmiö, jonka ymmärtäminen vaatii pitkäkestoista käsittelyä eri oppiaineiden ja koulutusasteiden sisällä.

## LÄHTEET

- Aalto yliopisto. Sähkömagneettinen säteily. Viitattu 10.02.2023.  
<https://foto.aalto.fi/opetus/350/k01/luento1/sms.html>
- Abitreenit. (2017). 2017 kevät: fysiikka. Viitattu 11.1.2023.  
<https://yle.fi/aihe/artikkeli/2017/02/24/2017-kevat-fysiikka>
- Allison, E., & Bassett, H. (2015). Climate change in the oceans: Human impacts and responses. *Science* 350 (6262), 778–782.
- Anderso, C., & Smith, E. (1986) Children’s conceptions of light and color: understanding the role of unseen rays. *Research series no. 166*. Sci Educ Res, ED270318.
- Arktinen keskus. Perustietoja arktisesta alueesta. Lapin yliopisto. Viitattu 16.2.2023. <https://www.arcticcentre.org/FI/arktinenalue#perus>
- Bamber, J. L., Westaway, R. M., Marzeion, B. & Wouters, B. (2018). The land ice contribution to sea level during the satellite era. *Environmental research letters*, 13(6), 63008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac2f0>
- Boyes, E., Chuckran, D., & Stanisstreet, M. (1993). How do high school students perceive global climatic change: What are its manifestations? What are its origins? What corrective action can be taken? *Journal of Science Education and Technology* 2(4), 541–557. <https://doi.org/10.1007/BF00695323>
- Boyes, E., Stanisstreet, M., & Yongling, Z. (2008). Combating global warming: The ideas of high school students in the growing economy of South East China. *International Journal of Environmental Studies*, 65(2), 233–245.  
<https://doi.org/10.1080/00207230701284543>
- Clem, K. R., Fogt, R. L., Turner, J., Lintner, B. R., Marshall, G. J., Miller, J. R., & Renwick, J. A. (2020). Record warming at the South Pole during the past three decades. *Nature climate change*, 10(8), 762–770.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0815-z>
- Felzmann, D. (2017). Students’ Conceptions of Glaciers and Ice Ages: Applying the Model of Educational Reconstruction to Improve Learning. *Journal of geoscience education*, 65(3), 322–335. <https://doi.org/10.5408/16-158.1>

- Fondriest Environmental. (2023). Solar Radiation & Photosynthetically Active Radiation. Viitattu 28.1.2023. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/>
- Gardner, A. S., & Sharp, M. J. (2010). A review of snow and ice albedo and the development of a new physically based broadband albedo parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 115(F01009). <https://doi.org/10.1029/2009JF001444>
- Groves, F. H., & Pugh, A. F. (1999). Elementary Pre-Service Teacher Perceptions of the Greenhouse Effect. *Journal of Science Education and Technology*, 8(1), 75–81. <https://doi.org/10.1023/A:1009433705790>
- Haslag, A., & Concannon, J. P. (2012). Reflecting on students' misconceptions about light: Using research to guide assessment and instruction. *Science scope (Washington, D.C.)*, 35(6), 64–69.
- Hayhoe, D., Bullock, S., & Hayhoe, K. (2011). A Kaleidoscope of Understanding: Comparing Real with Random Data, Using Binary-Choice Items, to Study Preservice Elementary Teachers' Knowledge of Climate Change. *Weather, Climate, and Society*, 3(4), 254–260. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-11-00021.1>
- Ilmastojärjestelmä mukautuu pakotteisiin. Ilmasto-opas. Viitattu 25.3.2023. Saatavilla: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/ilmastojarjestelma-mukautuu-pakotteisiin>
- IPCC. (2018) *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* In Press.
- IPCC. (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.* In Press.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Cambridge University Press.



- Jakobsson, A., Mäkitalo, Å., & Säljö, R. (2009). Conceptions of knowledge in research on students' understanding of the greenhouse effect: Methodological positions and their consequences for representations of knowing. *Science Education*, 93(6), 978–995.  
<https://doi.org/10.1002/sce.20341>
- Jarrett, L., & Takacs, G. (2020). Secondary Students' ideas about scientific concepts underlying climate change. *Environmental Education Research*, 26(3), 400–420. <https://doi.org/10.1080/13504622.2019.1679092>
- Kotimaisten kieltenkeskus. (2012a). *Kielitoimiston sanakirja: 2. osa L-R*. (3. uudistettu painos).
- Kotimaisten kieltenkeskus. (2012b). *Kielitoimiston sanakirja: 3. osa S-Ö*. (3. uudistettu painos).
- Kurkisuonio K., & Kurkisuonio, R. (2005) *Aaltoliikkeestä dualismiin*. (5. Korjattu painos.) Limes Ry.
- Laki viranomaisen toiminnan julkisuudesta, 21.5.1999/621 (1999), Annettu Helsingissä 21. päivänä toukokuuta 1999.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990621>
- Laki ylioppilastutkinnon järjestämisestä (kumottu), 26.8.2005/672 (2005), Annettu Helsingissä 26. päivänä elokuuta 2005.  
<https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/kumotut/2005/20050672#P1b>
- Laki ylioppilastutkinnosta, 12.4.2019/502 (2019), Annettu Helsingissä 12. päivänä huhtikuuta 2019.  
<https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2019/20190502#P26>
- Lindsey, R. (2009). Climate and Earth's Energy Budget. NASA Earth Observatory.
- McCuin, J. L., Hayhoe, K., & Hayhoe, D. (2014). Comparing the Effects of Traditional vs. Misconceptions-Based Instruction on Student Understanding of the Greenhouse Effect. *Journal of Geoscience Education*, 62(3), 445–459. <https://doi.org/10.5408/13-068.1>

- Mutlu, F., & Nacaroglu, O. (2019). Examination of Perceptions of Gifted Students About Climate Change and Global Warming. *Journal of Baltic Science Education*, 18(5), 780–792. <https://doi.org/10.33225/jbse/19.18.780>
- My Nasa Data. Changing Albedo Values. Viitattu 11.1.2023. <https://mynasadata.larc.nasa.gov/basic-page/changing-albedo-values>
- Myrberg, K., & Leppäranta, M. (2014). *Meret: Maapallon siniset kasvot*. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa.
- National oceanic and Atmospheric Administration. (2023). *How does sea ice affect global climate?* <https://oceanservice.noaa.gov/facts/sea-ice-climate.html>
- Nevanpää, T. (2005). "Sillä vois olla jotain tekemistä näitten kasvihuonekaasujen kanssa": Ilmastonlämpeneminen yläluokkalaisten käsityksissä. [Väitöskirja, Jyväskylän yliopisto].
- Niebert, K., & Gropengießer, H. (2014). Understanding the Greenhouse Effect by Embodiment - Analysing and Using Students' and Scientists' Conceptual Resources. *International journal of science education*, 36(2), 277–303. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.763298>
- Nousiainen, V. (2019). *Lukiolaisten käsityksiä kasvihuoneilmiöstä ja ilmaston lämpenemisestä*. [Diplomityö, Tampereen yliopisto]. <https://trepo.tuni.fi//handle/10024/116310>
- Lunkka, J. P. (2008). *Maapallon ilmastohistoria: Kasvihuoneista jääkausiin*. Gaudeamus.
- Onarheim, I. H., Eldevik, T., Smedsrud, L. H., & Stroeve, J. C. (2018). Seasonal and Regional Manifestation of Arctic Sea Ice Loss. *Journal of climate*, 31(12), 4917–4932. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0427.1>
- Open ilmasto-opas. (2016). Ilmastonmuutos fysiikan opetuksessa. Sipari, P. Maj ja Tor Nesslingin säätiö. <https://openilmasto-opas.fi/fysiikka/>
- Opetushallitus (2003). *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003*. Opetushallitus.
- Opetushallitus. (2004). *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2004*. Opetushallitus.
- Opetushallitus (2015). *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2015*. Määräykset ja ohjeet 2015:48. Opetushallitus.

- Opetushallitus (2016). *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014*.  
Määräykset ja ohjeet 2014:96. Opetushallitus.
- Opetushallitus (2019). *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019*. Määräykset ja ohjeet 2019:2a. Opetushallitus.
- Opetushallitus (2022). *Varhaiskasvatussuunnitelman perusteet 2022*. Määräykset ja ohjeet 2022:2a. Opetushallitus.
- Partanen, L. [Abitreenien yo-koelähetys: Ylioppilaslautakunnan asiantuntija]. (24.02.2017) *Abitreenit: Reaali I, yo-koelähetys, kevät 2017*. [video]. Yleareena. <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2017/02/24/2017-kevat-fysiikka>
- Plumb, R. A., & Marshall, J. (2007). *Atmosphere, ocean and climate dynamics*. Elsevier Academic Press.
- Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihmo, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications earth & environment*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Ratinen, I. (2016). *Primary student teachers' climate change conceptualization and implementation on inquiry-based and communicative science teaching: A design research*. [Väitöskirja, Jyväskylän yliopisto].
- Ratinen, I., Viiri, J., & Lehesvuori, S. (2013). Primary School Student Teachers' Understanding of Climate Change: Comparing the Results Given by Concept Maps and Communication Analysis. *Research in Science Education (Australasian Science Education Research Association)*, 43(5), 1801–1823. <https://doi.org/10.1007/s11165-012-9329-7>
- Ruosteenoja, K. (2011). Miten ja miksi ilmasto muuttuu? Teoksessa A. Virtanen, & L. Rohweder (toim.), *Ilmastonmuutos käytännössä: hillinnän ja sopeutumisen keinoja* (s. 69–108). Gaudeamus.
- Scotese, C. R., Song, H., Mills, B. J., & van der Meer, D. G. (2021). Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years. *Earth-science reviews*, 215, 103503. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103503>

- Shepardson, D. P., Niyogi, D., Choi, S., & Charusombat, U. (2011). Students' conceptions about the greenhouse effect, global warming, and climate change. *Climatic Change*, 104(3–4), 481–507.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-009-9786-9>
- Shepardson, D. P., Roychoudhury, A., Hirsch, A., Niyogi, D., & Top, S. M. (2014). When the atmosphere warms it rains and ice melts: Seventh grade students' conceptions of a climate system. *Environmental education research*, 20(3), 333–353. <https://doi.org/10.1080/13504622.2013.803037>
- Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., Smith, B., van den Broeke, M., Velicogna, I., . . . Meteorology, S. D. The IMBIE team. (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature (London)*, 558(7709), 219–222.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>
- Stanisstreet, D. B., & Boyes, E. (2004). How can we best reduce global warming? School students' ideas and misconceptions. *International journal of environmental studies*, 61(2), 211–222.  
<https://doi.org/10.1080/0020723032000087907>
- Tutkimuseettinen neuvottelukunta TENK (2023). *Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitleminen Suomessa*. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan julkaisuja 2/2023.
- Valtanen, E. (2007). *Fysiikan taulukkirja*. (2. Painos 5/2007). Gummerus Kirjapaino Oy.
- Valtioneuvoston asetus Pariisin sopimuksen voimaansaattamisesta ja sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten voimaansaattamisesta annetun lain voimaantulosta, 76/2016 (2016), Annettu Helsingissä 8. päivänä joulukuuta 2016. <https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sops-teksti/2016/20160076#idm45053758795120>
- Valtioneuvoston asetus ylioppilastutkinnosta, 915/2005 (2005), Annettu Helsingissä 17. päivänä marraskuuta 2005. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2005/20050915#Pidm45053758381968>

- Virtanen, A. (2011). Mitä ilmastonmuutos merkitsee ja mitä tulisi tehdä? Teoksessa A. Virtanen, & L. Rohweder (toim.), *Ilmastonmuutos käytännössä: hilynän ja sopeutumisen keinoja* (s. 19–42). Gaudeamus.
- Wild, M., Folini, D., Hakuba, M. Z., Schär, C., Seneviratne, S. I., Kato, S., Rutan, D., Ammann, C., Wood, E.F., & König-Langlo, G. (2015). The energy balance over land and oceans: An assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. *Climate dynamics*, 44(11–12), 3393–3429. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2430-z>
- Wild, M., Hakuba, M. Z., Folini, D., Dörig-Ott, P., Schär, C., Kato, S., & Long, C. N. (2019). The cloud-free global energy balance and inferred cloud radiative effects: An assessment based on direct observations and climate models. *Climate dynamics*, 52(7–8), 4787–4812. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4413-y>
- Windnagel, A., Hock, R., Maussion, F., Paul, F., Rastner, P., Raup, B., & Zemp, M. (2022). Which glaciers are the largest in the world? *Journal of glaciology*, 1–10. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.61>
- YTL eli ylioppilastutkintolautakunta. (2022). Tilastotaulukot. <https://www.ylioppilastutkinto.fi/tietopalvelut/tilastot/tilastotaulukot>
- YTL. Ylioppilastutkintolautakunnan sensorit.

## LIITTEET

### Liite 1. YTL:n hyvän vastauksen piirteet jokeritehtävässä 13d.



YLIOPILASTUTKINTOLAUTAKUNTA  
STUDENTEXAMENSÄMÄNDEN

#### FYSIIKAN KOE 15.3.2017 HYVÄN VASTAUKSEN PIIRTEITÄ

Tutkintoaineen sensorikokous on hyväksynyt seuraavat hyvän vastauksen piirteet.

#### Tehtävä +13

- d) Jäätiköiden tapauksessa on kyse ns. palauteilmiöistä, joissa pientä lämpötilan nousua seuraa tapahtuma, joka vahvistaa lämpötilan nousua.

Jäänpinta heijastaa auringon säteilyä paljon paremmin kuin maanpinta tai sula vesi. Kun lämpötila nousee kasvihuoneilmiön voimistuessa, jää alkaa sulaa. Jään sulaessa paljastuu maanpintaa tai sulaa vettä, jotka absorboivat säteilyä enemmän kuin heijastavat. Lämpötila nousee entisestään, ja jäätiköt alkavat sulaa nopeammin. Merijää toimii myös hyvänä eristeenä kylmän ilman ja lämpimämmän meriveden välillä. Jos meri on suuremman osan vuodesta ilman jääpeitettä, sen eristävyysvaikutus pienenee.

Jäätiköt tummuvat, kun jäätiköiden sulaessa niiden sisällä oleva tuhka ja muu tummempi maa-aines tulee näkyviin. Saasteita kulkeutuu myös koko ajan muualta jään pintaan tuulien mukana.

Tumma pinta absorboi hyvin säteilyä, millä on samanlainen lämpötilaa nostava ja sulamista edistävä vaikutus.

Jään sulaessa jäähän, maahan ja meriin sitoutuneet kasvihuonekaasut, erityisesti hiilidioksidi ja metaani, vapautuvat ilmakehään, mikä voimistaa kasvihuoneilmiötä. Meret toimivat hiilen varastoina, ja kylmä vesi sitoo enemmän hiilidioksidia kuin lämmin vesi. Merissä tapahtuu vedenkiertoa syvyysuunnassa, jolloin hiilidioksidipitoista vettä kulkeutuu merien pohjaan. Tämä vedenkierto voi häiriintyä, jos merien lämpötila nousee. (2 p.)

## Liite 2. Esimerkki luokittelusta.

### VASTAUS

“Napa-alueiden manner- ja merijäätiköiden sulaminen kiihdyttää lämpötilan nousua, koska valkoisen jääpinnan väistyessä napa-alueet absorboivat enemmän auringon säteilyä. (Valkoinen pinta heijastaa voimakkaasti säteilyä takaisin avaruuteen.)”

Jäiden sulaessa myös meren pinta nousee, jolloin maata peittävän veden pinta-ala kasvaa. Tällöin vettä pääsee höyrystymään ilmaan helpommin, mikä kiihdyttää lämpenemistä.

Napa-alueiden mannerjäätiköiden sulaminen paljastaa myös maan pinnan. Esimerkiksi Siperian ja Alaskan ikirouta-alueiden sulaessa pelätään, että maasta pääsee vapautumaan ilmaan metaania. Metaanin kasvihuoneilmiötä voimistava vaikutus on kymmeniä kertoja voimakkaampi kuin saman hiilidioksidimäärän aiheuttama vaikutus.

Jäätiköiden sulaminen vapauttaa myös valtavia määriä makeaa vettä valtameriin. Tämän on pelätty aiheuttavan esim. Golf-virran pysähtymisen, minkä seurauksena maapallon keskialueet lämpenisivät.

\* Valkoinen pinta heijastaa esimerkiksi kaikkia näkyvän valoalueen taajuuksia.” (K9/V15)

### LUOKITELTU YMMÄRRYKSEEN

Lainaus vastauksesta	pääloukka	alaluokka	alakohta
	<b>Säteilytasapainon ymmärtäminen</b>		
“Valkoinen pinta heijastaa voimakkaasti--.”		Säteilyn heijastuminen	<i>Viitattu vaaleaan pintaan</i>
“--napa-alueet absorboivat--.”		Säteilyn absorptio	<i>Mainittu vain Maan pinta</i>
“--jääpinnan väistyessä napa-alueet absorboivat enemmän--.”			<i>Viitattu absorption kasvuun</i>
	<b>Säteilytyypit</b>		
“--heijastaa voimakkaasti säteilyä--.”		Säteilyn heijastuminen	<i>(Auringon)säteily</i>
“--heijastaa esimerkiksi kaikkia näkyvän valoalueen taajuuksia--.”			<i>Auringonvalo</i>
“--absorboivat enemmän auringon säteilyä.”		Säteilyn absorboituminen	<i>(Auringon)säteily</i>

## LUOKITELTU YMMÄRRYKSEEN

Lainaus vastauksesta	päälukka	alaluokka	alakohta
	<b>Jäätiköiden sulamiseen liittyvä kasvihuonekaasujen lisääntyminen</b>		
"--Siperian ja Alaskan ikirouta-alueiden sulaessa pelätään, että maasta pääsee vapautumaan ilmaan metaania."		Jäätiköiden sulamisesta vapautuvat kasvihuonekaasut	Mainittu metaani
"--vettä pääsee höyrystymään ilmaan helpommin--."		Vesihöyryn lisääntyminen	Yhdistetty veden pinta-alan kasvuun
	<b>Sulamisen aiheuttama vesimäärän kasvu</b>		
"Jäiden sulaessa myös meren pinta nousee--."		Merenpinnan nousu	-
"--maata peittävän veden pinta-ala kasvaa."		Veden pinta-alan kasvu	-

## LUOKITELTU VIRHEKÄSITYKSIIN

Lainaus vastauksesta	päälukka	alaluokka	alakohta
	<b>Jäätiköt ja ympäristö</b>		
"Tämän on pelätty aiheuttavan esim. Golf-virran pysähtymisen--."		Merivirrat	Merivirtojen pysähtyminen
	<b>Sulamisen aiheuttama vesimäärän kasvu**</b>		
"Jäätiköiden sulaminen vapauttaa myös valtavia määriä makeaa vettä valtameriin."		Veden tilavuuden kasvu	-

\*\* = luokka on raportoitu ymmärrys-osion alussa.