

**KEMIAN FILOSOFIA POHJOISMAIDEN
VALTAKUNNALLISISSA OPETUSSUUNNITELMISSA**

Veli-Matti Vesterinen
Pro gradu -tutkielma
13.10.2006
Kemian opettajan suuntautumisvaihtoehto
Kemian koulutusohjelma
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Helsingin yliopisto
Ohjaajat: Maija Aksela ja Markku Sundberg



Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Laitos – Institution – Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Kemian laitos	
Tekijä – Författare – Author			
Veli-Matti Vesterinen			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
Kemian filosofia Pohjoismaiden valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa			
Oppiaine – Läroämne – Subject			
Kemian opettajan suuntautumisvaihtoehto			
Työn laji – Arbetets art – Level		Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages
Pro gradu -tutkielma		13.10.2006	98 + 7
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Kemian filosofia tutkii kemian luonnetta määrittelemällä ja kuvaamalla sille ominaisia käsitteitä, malleja ja selityksiä. Lisäksi kemian filosofiassa pohditaan esimerkiksi kemiaan ja sen tutkimukseen liittyviä metodologisia, eettisiä ja esteettisiä kysymyksiä. Tyypillisesti tieteenfilosofiassa on mallitieteenä käytetty fysiikkaa. Kemian filosofia on kuitenkin 1990-luvun loppupuolelta alkaen vahvistanut asemaansa itsenäisenä tieteenfilosofian osa-alueena. Kemian filosofian vaikutusta opetukseen on tutkittu vielä varsin vähän.</p> <p>Tavoitteet ohjaavat kaikkea opetusta. Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa perusopetuksen ja lukiotasoisien opetuksen tavoitteita ohjataan valtakunnallisilla opetussuunnitelmillä. Sekä Suomi, Ruotsi että Norja ovat vastikään uudistaneet valtakunnallisia opetussuunnitelmiaan. Koska valtakunnalliset opetussuunnitelmat ovat merkittävimmät pohjoismaista opetusta ohjaavat dokumentit, on tärkeää vertailla niitä keskenään.</p> <p>Pelkän sisällön viestiminen ei anna totuudenmukaista kuvaa kemiasta tai mistään muustakaan tieteestä. Sisällön lisäksi tapa, jolla tieto saavutetaan, on oleellinen osa tiedettä. Tämän tutkielman teoreettisessa viitekehyksessä on esitelty opetuksen kannalta keskeisiä kemian filosofian teemoja (kuten reduktiota, kemian mallien luonnetta ja kemian etiikkaa) sekä niiden vaikutusta kemian opetukseen ja sen tavoitteisiin.</p> <p>Tässä tutkielmassa on tutkittu sisällönanalyysin menetelmällä millaisia kemian filosofiaan liittyviä tavoitteita sisältyy Suomen, Ruotsin ja Norjan valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian opetuksen tavoitteisiin. Sisällönanalyysin tulosten ja teoreettisesta viitekehyksestä nousseiden ajatusten pohjalta on myös pohdittu, miten Suomen perus- ja lukio-opetuksen opetussuunnitelmien perusteissa tulisi huomioida kemian filosofiassa esitettyjä näkökantoja.</p> <p>Tämä tutkielma osoittaa, että Suomen opetussuunnitelmien perusteissa tulisi Ruotsin ja Norjan valtakunnallisten opetussuunnitelmien tavoin nostaa eksplisiittisemmin esille kemian luonteeseen kuuluvia piirteitä, kuten kemiallisen tiedon alustavuutta sekä teorioiden ja mallien vaikutusta kokeelliseen tutkimukseen, käyttämällä kemian opetuksessa historiallista lähestymistapaa. Opetussuunnitelmien perusteiden kemian tavoitteissa tulisi nykyistä selvemmin huomioida myös kemian tutkimuksen sosiaalinen ja eettinen luonne sekä luonnontieteelliseen tutkimukseen liittyvää luovuus.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Kemian filosofia, tieteenfilosofia, reduktio, kemian etiikka, kemian opetus, opetuksen tavoitteet, opetussuunnitelma			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Kemian laitos			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			
Ohjaajat: Maija Aksela ja Markku Sundberg			

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	1
2 KEMIAN FILOSOFIA	3
2.1 Kemian tieteenfilosofiset sitoumukset	6
2.1.1 Tieteellisten tiedon kehityksen mallit	7
2.1.2 Realismi ja anti-realismi	13
2.2 Reduktio.....	16
2.2.1 Kvantitatiivinen reduktio	18
2.2.2 Käsitteellinen reduktio	21
2.2.3 Päättäminen	23
2.3 Kemiaiset selitykset ja mallit.....	24
2.3.1 Mallien yhteys selittämiseen	24
2.3.2 Mallien luokittelu	25
2.3.3 Kemian kieli ja sen ilmiöiden kaksi maailmaa.....	27
2.3.4 Mallintaminen	29
2.4 Kemian etiikka	30
2.4.1 Yleinen moraalijärjestelmä ja vastuu.....	30
2.4.2 Kemian tutkimukseen liittyvät riskit	32
2.4.3 Tutkijan ja yhteiskunnan välinen suhde.....	35
3 KEMIAN OPETUKSEN TAVOITTEET	38
3.1 Opetuksen päämäärät.....	38
3.2 Kemian filosofia ja opetuksen tavoitteet	43
3.2.1 Luonnontieteiden luonne	44
3.2.2 Reduktiokysymyksen merkitys	49
3.2.3 Kemiaisten mallien asema opetuksessa	49
3.2.3 Tieteenhistorian merkitys.....	52
3.2.4 Tieteenfilosofia ja kokeellisuus.....	54
3.2.5 Kemian etiikka ja opetus.....	56
3.3 Miten kemian filosofian tulisi näkyä opetussuunnitelmissa?	57

4 TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN	60
4.1 Tutkimustavoite ja tutkimuskysymykset	60
4.2 Tutkimusmenetelmä	60
4.3 Tutkimuskohde.....	62
5 TULOKSET	65
5.1 Kemian tutkimuskohde ja mallit	65
5.2 Kokeellisuus ja kemian tutkimus	69
5.3 Kemian yhteiskunnallinen merkitys ja eettiset ulottuvuudet.....	72
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	77
6.1 Mallit ja historiallinen lähestymistapa.....	78
6.2 Kokeellisuus ja kemian tutkimus	81
6.3 Kemian yhteiskunnallisen merkityksen ja etiikan näkökulma.....	84
6.4 Yhteenveto	85
LÄHTEET	89
LIITTEET	99

1 JOHDANTO

Kemian tieteenfilosofisia kysymyksiä pohdiskeleva kemian filosofia on viime vuosina jatkuvasti vahvistanut asemaansa tieteenfilosofian tutkimusalana. Kemian filosofiassa tutkitaan kemian luonnetta määrittelemällä ja kuvaamalla sille ominaisia käsitteitä, selityksiä ja tutkimusmenetelmiä sekä kemian tutkimukseen liittyviä eettisiä ja esteettisiä kysymyksiä. Kemian filosofiassa tutkitaan esimerkiksi, miten kemia kuvaa erilaisten luokkakäsitteiden, kuten emäs, happo tai alkuaine, avulla aineen kvalitatiivisia ominaisuuksia.

Pelkän sisällön viestiminen ei anna totuudenmukaista kuvaa kemiasta tai mistään muustakaan tieteestä. Sisällön lisäksi tapa, jolla tieto saavutetaan, on oleellinen osa tiedettä (Monk & Osborne 1997, 407; Niiniluoto 2002, 13), joka tulisi huomioida myös opetuksessa. Lisäksi opetettavaa tietoa tulisi opetuksessa arvioida myös maailmankatsomuksellisessa viitekehyksessä (Puolimatka 1995, 139–141). Kemian filosofian tutkimuksessa on pyritty vastaamaan kemiallisen tiedon olemusta sekä sen maailmankatsomuksellista ja eettistä viitekehystä pohtiviin kysymyksiin. Kemian filosofian vaikutusta opetukseen on kuitenkin tutkittu vielä varsin vähän.

Jotta voimme arvioida ja ymmärtää opetusta, meillä täytyy olla selkeä kuva sen tavoitteista. Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa perusopetuksen ja lukiotasoisien opetuksen tavoitteita ohjataan valtakunnallisilla opetussuunnitelmilla. Vaikka opettaja on opetuksen toteuttajana se henkilö, joka tulkitsee opetussuunnitelman tavoitteet ja muodostaa viimekädessä oman opetuksensa tavoitteet, valtakunnallisilla opetussuunnitelmilla on suuri vaikutus pohjoismaiseen opetukseen. Suomen perusopetuksen ja lukion valtakunnallisina opetussuunnitelmina toimivat opetussuunnitelmien perusteet (Opetushallitus 2003 ja 2004), joissa kuvataan opetuksen tavoitteet ja sisällöt sekä opetusjärjestelyjen ja arvioinnin perusteet. Opetussuunnitelmien perusteet laatii Opetusministeriön alainen opetuksen kehittämisvirasto Opetushallitus (Opetushallitus 2006). Opetussuunnitelmien perusteiden kemian tavoitteiden kehittämiseksi on tärkeää saada tutkittua ja luotettavaa tietoa kemiallisen tutkimuksen ja tiedon luonteesta sekä kemian yhteiskunnallisesta ja eettisestä merkityksestä.

Tässä tutkielmassa on tutkittu miten Suomen, Ruotsin ja Norjan valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian opetuksen tavoitteet huomioivat kemian filosofisia näkemyksiä. Ensisijaisena tutkimuskohteena ovat olleet Suomen perus- ja lukio-opetuksen opetussuunnitelmien perusteet, joiden kehittämiseksi on lisäksi pyritty tekemään ehdotuksia sisältöanalyysin sekä teoreettisesta viitekehyksestä nousseiden ideoiden pohjalta.

Luvut 2 ja 3 muodostavat tutkimuksen teoreettisen viitekehyksen. Luvussa 2 esitellään tutkimuskysymysten kannalta keskeisiä kemian filosofian teemoja. Kemian yleisten tieteenfilosofisten sitoumusten, selitysten ja mallien aseman sekä kemian etiikan lisäksi luvussa käsitellään kemian sekä kemian filosofian itsenäisyyden kannalta keskeistä reduktiokysymystä. Luvussa 3 esitetään aikaisempien tutkimusten valossa, miten tieteenfilosofiset kysymyksen liittyvät kemian opetukseen ja erityisesti sen tavoitteisiin. Luvussa 4 kuvataan tutkimuksen suorittaminen. Tutkimuskysymyksiin vastataan luvuissa 5 ja 6. Luvussa 5 esitellään sisällönanalyysin tulokset sanallisesti ja taulukoissa. Luvussa 6 sisällönanalyysin tuloksista tehdään johtopäätöksiä luvuissa 2 ja 3 esitellyn teoreettisen viitekehyksen valossa.

2 KEMIAN FILOSOFIA

Kemia on tiede, joka tutkii aineiden ominaisuuksia ja käyttäytymistä. Tieteellä tarkoitetaan sekä tiedonalaa koskevaa tiedon systemaattista kokonaisuutta että tietojen tarkoituksellista ja järjestelmällistä tavoittelua (Niiniluoto 2002, 13). Tieteenä kemia ei ole ainoastaan kokoelma teorioita ja käsitteitä, koska myös tutkimus on osa kemiaa.

Tieteellisten julkaisujen ja tieteeseen käytettyjen resurssien määrällinen kehitys on 1700-luvulta lähtien ollut eksponentiaalista. Tiedemiesten suhteellinen osuus väestöstä on kasvanut ja tiede on ottanut yhä keskeisemmän roolin yhteiskunnassa. (Niiniluoto 2002, 18–19.) Kemia ja muut luonnontieteet ovat olleet keskeisessä asemassa ihmisten elinolojen parantamisessa. Kemian tutkimuksen osuus kaikesta tieteellisestä tutkimuksesta on huomattavan suuri. Itse asiassa kemiaan liittyviä tutkimuksia julkaistaan enemmän kuin muihin tieteisiin liittyviä tutkimuksia yhteensä (Schummer 2006, 19–20).

Tieteentieteeksi kutsutaan tiedettä tutkivaa tutkimusta, ja siinä on useita eri lohkoja (Niiniluoto 2002, 19–22):

- *Tieteenhistoria* tutkii tieteen kehittymistä sekä tieteen sisäisten tekijöiden että ulkoisten tekijöiden, kuten yhteiskunnallisten tilanteen, suhteen (Niiniluoto 1983, 200).
- *Tieteensosiologia* tutkii tieteen yhteiskunnallisia tehtäviä ja vaikutuksia, tiedettä instituutiona sekä tutkijoita ammattikuntana.
- *Tieteenpsykologia* tutkii esimerkiksi tieteellistä luovuutta ja tutkijan ammattikuvaa.
- *Tieteen organisaation ja talouden tutkimus* tutkii tieteellisiä instituutioita hallinto- ja taloustieteellisestä näkökulmasta.
- *Tieteenfilosofiassa* sovelletaan filosofista metodologiaa tutkimustoimintaan ja sen tuloksiin. Tieteenfilosofia pyrkii eksplikoimaan ja problematisoimaan erilaisia tieteenkäsityksiä. Tieteenfilosofisessa argumentaatiossa pyritään perustelemaan millaista tieteen tulisi olla tai millaista se ei saisi olla. Tieteenfilosofiaan kuuluvat myös tieteen metodiikka eli tutkimusmenetelmien tutkimus sekä tieteen etiikka.

Kaikille tieteille yhteisten tieteenfilosofisten kysymysten lisäksi on filosofisia kysymyksiä, jotka ovat tyypillisiä vain tietyille tieteenaloille. Nämä kysymykset liittyvät esimerkiksi tieteenalojen peruskäsitteisiin ja metodeihin sekä tieteiden luokitteluun. Tieteenfilosofia voidaan jakaa tieteenaloittain osa-alueisiin, joita ovat esimerkiksi matematiikan filosofia, historiatieteen filosofia ja yhteiskuntatieteiden filosofia. (Niiniluoto 2002, 31–34.) Kemian filosofia tutkii kemian luonnetta määrittelemällä ja kuvaamalla sille ominaisia käsitteitä ja selityksiä. Kemian filosofiassa tutkitaan esimerkiksi, miten kemia kuvaa erilaisten luokkakäsitteiden, kuten emäs, happo tai alkuaine, avulla aineen kvalitatiivisia ominaisuuksia tai millainen rooli kemialle tyypillisillä käsitteillä, kuten orbitaali, kemiallinen rakenne tai sidos, on kemiassa (Erduran & Scerri 2002, 11).

Kemian filosofia ei ole ollut luonnontieteiden filosofian tutkimuksen keskiössä. Tyypillisesti tieteenfilosofiassa on mallitieteenä käytetty fysiikkaa, josta poimitaan yleensä myös tieteenfilosofian esimerkit. 1970-luvulla biologian tutkijat kyseenalaistivat fysiikan asemaa mallitieteenä ja laajensivat luonnontieteiden filosofian alaa luoden biologian filosofian tutkimusta (Schummer 2006, 23). Biologian filosofiaa on julkaistu myös suomeksi, esimerkiksi Matti Sintosen toimittamassa teoksessa *Biologian filosofian näkökulmia* (Sintonen 1998). Viime vuosina kemian filosofia on kuitenkin nostanut profiiliaan fyysikkojen ja biologian hallitsemassa tieteenfilosofian tutkimuksen kentässä. 90-luvun lopulla perustettiin kaksi kemian filosofiaan keskittyvää julkaisua *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* sekä *Foundations of Chemistry*. Kemian filosofian profiilin nousun myötä vuonna 2000 julkaistiin kaksi aihetta kattavasti käsittelevää kirjaa: Jaap van Brakelin yleisesitys *Philosophy of Chemistry* (van Brakel 2000a) sekä Nalini Bhushanin ja Stuart Rosenfeldin toimittama artikkelikokoelma *Of Minds and Molecules* (Bushman & Rosenfeld toim. 2000). Suomenkielinen yleisesitys aiheesta puuttuu yhä.

Kemian filosofiassa kuten biologian filosofiassakin reduktio on yksi keskeisistä tutkimusaiheista. Kemian itsenäisen aseman perustelemiseen sekä kemian ja fysiikan suhteen kuvaamiseen keskittyntä tutkimusta on runsaasti (esimerkiksi Hunger 2006; Ostrovsky 2005a; Psarros 2001; Scerri 1994; Scerri & McIntyre 1997 sekä Vemulapalli 2006). Reduktiokysymystä on pohdiskeltu sekä kemian käsitteiden että

kemian metodologisen luonteen kannalta. Reduktiokysymystä käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.2, jossa ongelmaa lähestytään kvanttifysiikan laskennallisten sovellutusten kemiallisista käsitteistä antamien tulkintojen valossa.

Toinen kemian filosofian keskeinen kysymys on kemiallisten yhdisteiden ontologinen luonne. Kemialliset yhdisteet nähdään usein luonnollisina lajeina (*natural kinds*), jotka ovat realistisen määritelmän mukaan itsenäisiä luokitteluita, eli luokitteluita jotka eivät johdu ihmisten tavasta luokitella. Toinen tapa nähdä luonnolliset lajit on nähdä ne vastakohtana ihmisen luomille artefakteille. Jälkimmäistä jakoa on hyvin vaikea nähdä kemian valossa, sillä esimerkiksi kemiallisessa synteesissä luonnosta löytyneellä ja synteesin kautta valmistetulla kemiallisesti yhtenevällä aineella ei nähdä mitään eroa. (Bhushan 2006, 327–328.) Kemiallisen yhdisteen luonnetta luonnollisina lajeina ovat tutkineet esimerkiksi Nalini Bhushan (2006), Fritz Paneth (2003), Eric Scerri (2005) ja Michael Weisberg (2006). Kemiallisten yhdisteiden luonteella on läheinen yhteys sekä reduktiokysymykseen (katso esimerkiksi van Brakel 2000b) että jaksolliseen järjestelmään, jonka luonnetta käsittelevät tutkimuksissaan esimerkiksi Valentin Ostrovsky (2001) ja Ray Hefferlin (2006). Reduktiokysymykseen liittyvää keskustelua jaksollisen järjestelmän kvanttikemiallisista perusteista on käyty esimerkiksi *Foundations of Chemistry* lehden sivuilla (katso Friedrich 2004; Ostrovsky 2005b ja Scerri 2004).

Kemiallisessa tutkimuksessa instrumentaatiolla ja mittaustulosten tarkkuudella on suuri merkitys. Peter Plesch (1999) on osoittanut, kuinka pienillä kokeellisen asetelman muutoksilla voi olla huomattavia vaikutuksia kokeen tuloksiin ja miten tämä vaikuttaa esimerkiksi kemiallisten eksperimenttien toistettavuuteen. Instrumentaation ja tekniikan kehityksen vaikutusta tutkimuksen objektiivisuuteen on käsitelty myös Davis Baird (2000).

Kemian filosofisessa tutkimuksessa on oltu kiinnostuneita kemian ja filosofian historiasta sekä niiden merkityksestä kemiaan tieteenä. Filosofian historian keskeisten ajattelijoiden ajatuksia kemiasta ja kemiallisesta tiedosta ovat tutkineet esimerkiksi Paul Needham (2006) tutkimuksessaan Aristoteleen kemiallisista näkemyksistä, Jaap van Brakel (2006), joka on tutkinut esimerkiksi Kantin suhdetta kemiaan ja hänen varsin vaikutusvaltaista kriittistä arviotaan kemian tieteellisyydestä, sekä Ulrich

Ruschig (2001), joka on esitellyt ja kritisoinut Hegelin tieteellisen logiikan näkemyksiä kemiallisista käsitteistä.

Sekä estetiikka että etiikka ovat olleet kemian filosofien kiinnostuksen kohteena. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* on julkaissut kaksi teemanumeroa kemian estetiikasta sekä visualisoinnista (Spector & Schummer 2003a ja 2003b). Myös kemian etiikka on saanut julkaisussa omat teemanumeronsa (Schummer 2001a ja 2002). Kemian etiikkaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.4.

2.1 Kemian tieteenfilosofiset sitoumukset

Tieteellisen maailmankuvan mukaan tiede on paras tapa tuottaa luotettavaa tietoa maailmasta. Tiede tuottaa kontrolloidun havainnoinnin ja kokeiden avulla teorioita ja hypoteeseja. Tieteen ei tarvitse tuottaa lopullisia tuloksia. Aikaisempien teorioiden ja hypoteesien rajojen testaaminen sekä uusien teorioiden muodostaminen on oleellinen osa tiedettä.

Ontologisen realismin mukaan on olemassa ihmismielistä riippumaton todellisuus. Sitä pidetään minimioletuksena useimmille tieteenfilosofisille traditioille. Karl Popper jakaa ontologisen todellisuuden kolmeen maailmaan. Maailma 1 on materiaallinen maailma, joka sisältää kaikki materiaaliset oliot ja prosessit. Siihen kuuluvat esimerkiksi kaikki materiaaliset objektit elektroneista ihmisiin ja galakseihin saakka. Maailma 2 on ihmisten (ja eläinten) tietoisuuden maailma. Mentaaliset tilat ja prosessit kuuluvat tähän maailmaan. Maailma 3 sisältää sosiaalisen toiminnan tuotokset eli ihmisen tuottamat abstraktit, kulttuuriset ja sosiaaliset oliot. Kieli ja muut kulttuurin tuotteet kuten tieteelliset teoriat ovat osa Maailma 3:a. (Niiniluoto 1999, 4–25.) Maailma 3:n kemiallisilla käsitteillä kuten atomeilla tai elektroneilla on todennäköisesti vastineensa Maailma 1:ssä. Maailma 3:n käsitteet ja teoriat eivät kuvaa niitä kuitenkaan täydellisesti.

Käsitystämme tiedosta eli Maailma 1:n ja sitä kuvaavien Maailma 3:n käsitteiden suhdetta tutkii tieteenfilosofia. Tiedon käsitettä sekä tiedon saavuttamisen mahdollisuuksia ja rajoja pohditaan tieto-opiksi eli epistemologiaksi kutsutussa filosofian osa-alueessa. Tieteenfilosofialla on läheinen yhteys tieteenhistoriaan ja

-sosiologiaan. (Niiniluoto 2002, 18–37.) Se on myös kehittynyt vuorovaikutuksessa tieteenteon kanssa. Yksi tieteenfilosofian keskeisimpiä kysymyksiä on ollut, mikä erottaa tieteellisen tiedon muusta tiedosta ja uskomuksista. Lisäksi tieteenfilosofia on pyrkinyt vastaamaan normatiiviseen kysymykseen, mikä on suotuisaa kehitystä tieteessä. (Niiniluoto 1983, 200.)

2.1.1 Tieteellisten tiedon kehityksen mallit

Tieteenfilosofiassa on muodostettu useita tieteen kehityksen malleja, jotka pyrkivät antamaan kokonaisvaltaisen näkemyksen tieteellisen tiedon kasvuun vaikuttavista tekijöistä. Keskustelua on käyty esimerkiksi siitä, mitkä tekijät vaikuttavat tieteen kehitykseen. Tekijät jaetaan yleensä tieteenulkoiisiin eli eksternalistisiin ja tieteensisäisiin eli internalistisiin tekijöihin. Tieteenulkoiset tekijät ovat esimerkiksi yhteiskunnallisia, taloudellisia, ideologisia tai sosiologisia. Niitä tutkitaan erityisesti tieteensosiologiassa sekä tieteen organisaatioiden ja rakenteiden tutkimuksessa. Tieteensisäisiin tekijöihin keskittynyt tutkimus tutkii puolestaan tieteen historiaa tiedonmuodostuksen oman logiikan näkökulmasta. (Niiniluoto 1983, 200–202.)

1600- ja 1700-lukujen empiristit, kuten John Locke, George Berkeley ja David Hume, sekä 1800- ja 1900-lukujen positivistit olettivat, että tieteelliseen tietoon voidaan päästä tekemällä tosia havaintoja. Näiden näkemysten mukaan luonnontieteiden tutkimuskohteena olevasta Maailma 1:stä voidaan tehdä sitä huolellisesti ja ennakkoluulottomasti havainnoimalla objektiivisia havaintoja, jotka ovat luotettava pohja tieteellisille teorioille. Näkemystä, jonka mukaan objektiivisesti havaituista tosiasioista voidaan johtaa yleinen teoria tai laki, kutsutaan induktivismiksi. Näkemys on monella tapaa ongelmallinen. Induktiivisten yleistysten pohjaksi tarvittavaa käsitejärjestelmästä ja ennakkotiedoista riippumatonta havainnointia pidetään mahdottomana. Ihminen rakentaa havainnoilleen jatkuvasti merkitystä aikaisempien kokemustensa perusteella. Vaikka objektiivinen havainnointi onnistuisikin, ei induktivistinen näkemys havaintojen määrän myötä kasvavasta varmuudesta anna hyvää kuvaa tieteellisen tiedon ja teorioiden varmuudesta ja kumoutuvuudesta. Ongelman tiedosti Karl Popper (1992), joka esitteli saksaksi 1939 julkaistussa ja englanniksi vuonna 1959 käännettyssä kirjassaan *Logik der Forschung (The logic of*

scientific discovery) falsifikatismiksi kutsutun näkemyksen. (Chalmers 1999, 1–73.)

Popperin (1992, 27–145) mukaan ei ole olemassa päättelymuotoa, joka liittyisi hypoteesien keksimiseen. Uuden tieteellisen idean tai hypoteesin muotoileminen vaatii aina luovuutta. Tieteellisen teorian rakentamisessa onkin kaksi toisistaan selvästi poikkeavaa vaihetta: luova käsitteenluomisvaihe sekä loogiseen päättelyyn ja teorian kokeelliseen koettelemiseen perustuva testausvaihe. Popper järjelti myös, että hypoteeseja tai teorioita ei koskaan voi osoittaa lopullisesti todeksi. Tieteellinen teoria on kuitenkin osoitettavissa vääräksi eli falsifioitavissa empiirisiin menetelmin. Teoriasta voi tulla hyväksytty, kun se on esitetty sitä kriittisesti arvioivalle tiedeyhteisölle. Tiedeyhteisössä on luotu monenlaisia järjestelmiä, kuten julkaisuiden referee-toiminta, joilla pyritään estämään selvästi perusteettomat väitteet ja teoriat.

Popperin (1992, 27–145) demarkaatioperiaatteen mukaan teoria on tieteellinen vain, jos se on osoitettavissa vääräksi eli falsifioitavissa empiirisiin menetelmin. Väite ”Täällä sataa tai on satamatta huomenna” ei siis ole empiirinen, koska sitä ei voi osoittaa vääräksi, kun taas falsifioitavissa oleva väite ”Täällä sataa huomenna” on empiirisesti koeteltavissa. Lisäksi tieteellistä teoriaa tukevien lisähypoteesien tulisi aina lisätä teorian falsifioitavuutta eikä vähentää sitä. *Ad hoc* eli tarkoitusta varten luodun lisähypoteesin teoriaa pystyisi muuten suojelemaan falsifioinnilta lähes loputtomiin. Kemian historiasta löydetään esimerkki Popperin esittämällä tavalla vahingollisesta *ad hoc* -lisäyksestä, jonka oli tarkoitus suojella teoriaa sen kumoavilta havainnoilta. Ennen Lavoisierin teoriaa palamisesta palaminen selitettiin flogistonin irtautumisella palavasta aineesta. Kun huomattiin, että moni aineista lisäsi massaansa palaessaan, ehdotettiin *ad hoc* -lisäyksenä flogistonin massalle negatiivista arvoa. (Chalmers 1999, 77.)

Popperin demarkaatiokriteeri on kuitenkin niin tiukka, että se tekee kaikista eksistenssilauseista, kuten ”On olemassa alkuaineita”, epätieteellisiä, koska niitä ei voi falsifioida. Testattavuus täytyykin määritellä väljemmin vaikkapa seurausten koeteltavuudeksi. (Niiniluoto 2002, 246.) Keskeinen filosofinen ongelma falsifikaatiossa on osoittaa, johtuuko mahdollinen teorian falsifioiva havainto lisäoletuksista kuten koejärjestelyistä vai itse teoriasta. Väitettä, että teorioita ei

koskaan voida testata yksittäisten hypoteesien tasolla, koska teoria voidaan aina pelastaa tekemällä tulosten mukaisia muutoksia, kutsutaan Duhem–Quine -teesiksi (Niiniluoto 1983, 191–192). Esimerkiksi moderni kemia perustuu havaintoihin, jotka tehdään mittalaittein eikä suorina aistihavaintoina. Kemian teoriat ovat kemistien mielestä huomattavasti paljon varmempia kuin useimmat koejärjestelyt, ja syitä poikkeamille etsitään yleensä koejärjestelyistä. Riittävän falsifikaation määrittelemisen on todella vaikeaa. Tätä tukee havainto, että tiedeyhteisön hyväksymät teoriat eivät ole kovin nopeasti vaihtuneet, vaikka niitä kumoavia havaintoja olisikin kertynyt. Lisäksi uusi kumoava teoria on saattanut alkuun olla kumottavaa teoriaa huomattavasti huonommin havaintoja vastaava. (Chalmers 1999, 74–103.)

Tieteen historian ja edistyvyyden kuvaajana Popperin falsifikationismi ei ole kovin vakuuttava. Tieteen historiaa falsifikationismia paremmin kuvaavan teorian pyrki luomaan fyysikko ja tieteenhistorioitsija Thomas Kuhn (1970) kirjassaan *The structure of scientific revolutions*. Kuhnin näkemyksessä teoriat ovat käsite rakenteita, joissa kukin käsite määrittelee toistaan. Koska käsitteet määritellään suhteilla toisiin käsitteisiin, yhden käsitteen muuttaminen voi muuttaa myös muiden käsitteiden määritelmää ja näin koko käsitejärjestelmää. Kuhnin tutkimuksen lähtökohtana oli, että tiede on tutkijayhteisön ryhmätoimintaa, joka vaatii toimiakseen toimintaa yhtenäistäviä tekijöitä (Niiniluoto 1983, 208). Kuhn käytti näistä tekijöistä käsitettä paradigma, jolla hän tarkoitti sekä tieteeseen liittyvää käsitejärjestelmää että siihen liittyvää tutkimustraditiota. Kuhn kuvasi tieteen kehittymistä esiparadigmaattisen hajanaisuuden jälkeen normaalitieteen, kriisien, vallankumousten ja uusien normaalitieteiden jatkumona. Tietyn paradigman ollessa tiedeyhteisössä vallalla eletään normaalitieteen kautta. Normaalitieteessä pyritään tekemään paradigman ohjaamaa tutkimusta, jossa paradigmaa sovelletaan yhä uusiin tutkimusongelmiin. Koska mikään paradigma ei ole lopullinen ja oikea, ajan myötä tulee yhä enemmän ongelmia sovittaa kaikki havainnot teoriaan ja ajaudutaan kriisiin. Kriisi ratkeaa tieteellisessä vallankumouksessa, kun esiin astuu uusi paradigma, joka korvaa aikaisemman paradigman määrittelemällä uudet lait sekä metafysiset ja metodologiset periaatteet. Koska paradigmojen käsitteistöt eivät ole yhteensopivia, on niitä mahdoton vertailla keskenään. Vaikka Kuhn ei mielestään ollut relativisti, Kuhnin kuvauksen perusteella on vaikea määrittellä, miten uusi paradigma on parempi kuin entinen. Jos paradigmojen paremmuutta ei voi määrittellä tai kuvata, Kuhnin kuva

tieteen edistyvyydestä on käyttökelpoisempi tieteensosiologeille ja -historioitsijoille kuin tieteenfilosofeille. (Chalmers 1999, 104–128.)

Unkarilainen Imre Lakatos pyrki sovittamaan konfliktin popperilaisen falsifikationismin ja kuhnilaisen tieteellisten vallankumousten mallin välillä esittelemällä oman metodologisen mallinsa tieteen edistymisestä. Hän näki Kuhnin tavoin tieteellisen tutkimuksen tapahtuvan tieteentekijöiden käsiterakennelmien varassa. Lakatos kutsuu käsiterakennelmaa tutkimusohjelmaksi (*research program*). Hänen mukaansa tutkimusohjelmassa on ydinoletukset (*hard core*), jotka ovat tutkimusohjelmien muuttumaton pohja ja joiden valossa tutkimusta tehdään, sekä suojavyö (*protective belt*), joka rakentuu ydinoletusten ympärille ja jota muutetaan havaintojen mukaan. Tieteelliset tutkimusohjelmat tarjoavat myös heuristisia neuvoja tai sääntöjä tutkimuksen tekemiseen. Tutkimusohjelmat voivat paradigmojen tavoin korvautua uusilla. Välttääkseen Kuhnin tieteelliseen vallankumoukseen liittyvän relativismin Lakatos pyrki määrittelemään, miten uuden teorian paremmuutta voidaan arvioida. Lakatosin mukaan tutkimusohjelman paremmuuden mittari on edistyvyys (*progressiveness*), joka voidaan arvioida sen mukaan, tuottaako tutkimusohjelma uutta empiiristä sisältöä ja pystyykö se ennustamaan odottamattomia faktoja. Tutkimusohjelma, joka joutuu turvautumaan väkinäisiin tai *ad hoc* -perusteluihin, on taantuva (*degenerating*) ja sellaisena vaarassa korvautua toisella. Lakatosin teoriaa ei välttämättä voi pitää yksittäisen tieteentekijän normatiivisena ohjeena tutkimusohjelman valinnassa, sillä hetkellisesti taantuva ohjelma voi vielä muuttua edistyväksi. (Chalmers 1999, 130–148.)

Tieteellisen tiedon erityisluonteen ja kehittymisen kuvaamisen sekä tieteen menetelmien arvioiminen on varsin vaikeaa. Yksi kiistanalaisimmista näkemyksistä on Paul Feyerabendin anarkistinen teoria tieteen luonteesta ja edistyvyydestä. Feyerabendin mukaan ei ole objektiivista tapaa arvioida tieteen menetelmiä ja tieteentekijöillä tulisi olla menetelmällinen vapaus tehdä tiedettä parhaaksi näkemällään tavalla (Chalmers 1999, 150–157). Feyerabend (1975, 299) vertaakin tieteellistä vapautta uskonnonvapauteen. Feyerabendin näkemys, jonka mukaan tiedon oikeellisuutta ei voida arvioida, johtaa relativistiseen näkemykseen, että kaikki tieto on yhtä arvokasta. Feyerabend myönsi myös itse, että hänen näkemystään tiedon anarkistisesta luonteesta ei tulisi ottaa täysin vakavasti. (Scerri 2003, 471.)

Oman tutkimusohjelmamallinsa esitti Larry Laudan (1977) kirjassaan *Progress and its problems*. Laudan lähestyy kirjassaan tiedettä ongelmanratkaisuprosessina, jossa edistyminen liittyy rationaalisuuteen. Hän näkee edistyksen ongelmanratkaisukyvyyn kasvuna, ja rationaalisia ovat sellaiset ratkaisut, jotka kasvattavat ongelmanratkaisukykyä. Ongelmat Laudan jakaa empiirisiin (*empirical*) ja käsitteellisiin (*conceptual*). Empiiriset ongelmat kunkin teorian kannalta Laudan jakaa kolmeen luokkaan: ratkaisemattomiin ongelmiin (*unsolved problems*), joita mikään teoria ei ole vielä ratkaissut, ratkaistuihin ongelmiin (*solved problems*), jotka kyseisen teorian valossa ovat ratkaistavissa riittävän tarkasti, sekä anomaalisiin ongelmiin (*anomalous problems*), jotka ovat ratkaistavissa jotakin muuta kuin kyseistä teoriaa käyttämällä. Empiiriset ongelmat ovat teorian sisäisiä käsitteellisiä ongelmia (*internal conceptual problems*), kuten teorian käsitteiden epäselvyys, tai teorian ulkopuolisia käsitteellisiä ongelmia (*external conceptual problems*), kuten yhteensopimattomuus muihin teorioihin, metodologisiin käsityksiin tai vallitsevaan maailmankuvaan. Kaikki ongelmat eivät Laudanin mukaan ole yhtä tärkeitä. Koska teorioiden arviointi on aina vertailevaa, erityisen tärkeitä ovat anomaaliset ja käsitteelliset ongelmat. Tieteellisen toiminnan päämääränä on maksimoida ratkaistujen ongelmien määrä minimoimalla käsitteellisten anomaalisten ja käsitteellisten ongelmien määrä. (Laudan 1977, 1–69.)

Laudan (1977, 70–120) esittelee myös oman tutkimustradition (*research tradition*) käsitteensä, jolla on yhtymäkohtia Kuhnin paradigman ja Lakatosin tutkimusohjelman käsitteisiin. Tutkimustraditio asettaa tiettyjä yleisiä oletuksia tutkimusalan luonteelle, kuten esimerkiksi tutkittavien olioiden tai prosessien ontologiselle olemukselle, sekä määrittelee tutkimuksessa käytettävät menetelmät. Tutkimustraditioiden hyväksyttävyyttä on mahdollista arvioida rationaalisesti niiden perusteella luotujen teorioiden tuottamalla ongelmanratkaisukyvyllä. Tutkimustraditioiden arviointi tapahtuu aina vertailevasti. Laudan ei kerro sitä, miten yhteismitallisesti mitattaisiin käsitteellisesti toisistaan poikkeavien teorioiden ja tutkimustraditioiden tehokkuus (Giare 1988, 41).

Laudanin mukaan tutkimustraditiot voivat vaihtua ilman Kuhnin vallankumousvaiheen irrationaalisuutta. Laudan (1977, 126–127) ei kuitenkaan esittänyt tieteen kehittyvän tieteellisen realismin näkemyksen mukaisesti kohti totuutta, koska näki, että emme voi ikinä tietää, saavutammeko todellista tietoa.

Hänen mukaansa tieteen erotti muista uskomuksista sen rationaalinen tapa tuottaa tietoa, joka eroaa muista maailmanselityksen malleista. Laudanin (1977, 201–203) esittämä demarkaatiokriteeri perustuu arationaalisuus-argumenttiin, jonka mukaan sosiologialla kannattaa selittää tiedon olemusta vain, jos tietoa ei voi selittää rationaalisesti. Jos tiedemiehen toiminnalle tai tulkinnalle ei löydy tieteenkäsityksemme valossa rationaalista selitystä, täytyy etsiä selitystä sosiologisista tai psykologisista tekijöistä. Vaikka Laudan ei hyväksynyt tieteellisen realismin käsitystä totuutta lähenevästä tieteellisestä tiedosta, hän ei kiellä mahdollisuutta, että teoriat voisivat viitata todellisiin olioihin ja prosesseihin (Gieryn 1988, 45). Laudan pyrkii välttämään relativismin sudenkuoppaa metodologisin perustein. Niiniluoto (1999, 11) kutsuukin Laudanin näkemystä metodologiseksi anti-realismiksi.

Muiden muassa Kuhnin, Lakatoksen ja Laudanin teorioiden myötä tapahtui muutos tieteen filosofiassa. Tieteenfilosofiassa ryhdyttiin normatiivisen tieteenmallin sijaan kuvaamaan tieteen metodologiaa tieteenhistorian näkökulmasta. 1800-luvun lopulta vallalla ollut normatiivinen käsitys, joka asetti filosofisen päättelyn ensisijaiseen asemaan ja filosofian oikeaksi työväliseksi, alkoi tieteenfilosofien keskuudessa väistyä. Naturalistisen näkemyksen mukaan ymmärrystä tieteestä lisää todellisen tieteen ja sen historian tutkimus pelkän filosofisen pohdinnan sijaan. (Scerri 2006, 119–121.) Tämä johti erillistieteisiin erikoistuneiden tieteenfilosofien tutkimusalojen, kuten kemian filosofian, syntyyn. Tieteenfilosofinen tutkimus onkin siirtynyt käytännöllisemmälle tasolle tieteenfilosofian pystyessä käsittelemään tieteiden itsensä kannalta keskeisiä asioita, kuten esimerkiksi tieteen etiikkaan liittyviä kysymyksiä. (Machamer 2002, 6–12.) Luonnontieteiden tieteenfilosofiassa naturalistisen tieteenfilosofian johtavia hahmoja ovat olleet esimerkiksi Larry Laudan ja Ronald Gieryn (Scerri 2006, 120).

Kemiassa kokeellisuudella on aina ollut todella keskeinen sija. Kemian kannalta erityisen hedelmällinen on tieteenfilosofinen näkemys, jota Deborah Mayo (1996, 58) kutsuu uudeksi kokeellisuudeksi (*new experimentalism*). Uuden kokeellisuuden edustajia ovat Mayon mielestä esimerkiksi Robert Ackermann, Nancy Cartwright, Ian Hacking ja Ronald Gieryn. Uuden kokeellisuuden näkemyksen mukaan kokeellisuudella on itsenäinen rooli luonnontieteissä, jonka teorioihin keskittyneet tieteenfilosofit ovat unohtaneet (Hacking 1983, 149–150). Teorioihin keskittyminen

kokeellisuuden sijaan voi olla yksi syy, miksi tieteenfilosofit ovat perinteisesti kiinnittäneet niin vähän huomiota kemiaan (Scerri 2000b, 522). Uusi kokeellisuus pyrkii tutkimaan kokeellista prosessia ja päättelyä palauttaakseen empiiriselle tiedolle aseman tieteellisten teorioiden ja mallien tuomarina. Tiede voidaan nähdä teoriasta riippumattoman kokeellisin strategioiden saadun tiedon kasautumisena sen hankintaan ja tulkintaan käytettävän teknologian ja taidon lisääntyessä. Tieteelliset väitteet ovat perusteltuja, jos kokeellisesti on koeteltu sen mahdollisia puutteita. Kokeiden eli eksperimenttien tulisi olla sellaisia, että todennäköisesti ne eivät antaisi haluttua tulosta, jos väite ei pitäisi paikkaansa. Uuden kokeellisuuden keskeinen teema on ollut määrittellä, millä tavoin kokeellisten tulosten hankinnassa ja tulkinnassa vältytään virheiltä. (Mayo 1996, 60–63.) Tieteellinen kehitys liittyy myös tutkimusvälineiden teknologiseen kehitykseen. Käsitys, jossa teknologia nähdään vain luonnontieteiden käytännön sovelluksena, ei sovi etenkään kemiaan, jossa mittauslaitteiden kehitys on muuttanut merkittävästi tutkimusta esimerkiksi analyttisessä kemiassa (Baird 2000, 90).

2.1.2 Realismi ja anti-realismi

Naturalististen tieteenteorioiden myötä tieteen sosiologiassa mielenkiinto kohdistui paikoin vain tieteen kehityksen yhteiskunnallisiin sekä psykologisiin tekijöihin. Tämä johti jopa relativistisiin tulkintoihin tieteellisen tiedon luonteesta. (Scerri 2006, 120.) Tiedeopetuksen kannalta merkittävimpiä relativistisia näkemyksiä lienee ollut Emile Durkheimin ajatuksista noussut sosiologinen konstruktivismi (Matthews 1994, 138). Konstruktivismi on vaikuttanut kemiassa erityisesti sen opetukseen (Scerri 2003). Relativismissa kyseenalaistetaan realismi, joka nähdään hyvin usein luonnontieteiden tutkimuksen filosofisena perustana.

Realismia on ainakin kahdenlaista. Olioita koskeva realismi (*realism about entities*) pitää teoreettisia olentoja kuten atomeita todellisina. Anti-realistisen näkemyksen mukaan oliot voivat olla olemassa, mutta meillä ei ole mitään perusteita pitää niitä todellisina. Teorioita koskevan realismin (*realism about theories*) mukaan teoriat ovat tosia tai epätosia. Realismin mukaan tiede aina tavoittelee totuutta eli todellisuuden kanssa yhdenmukaisia teorioita. (Hacking 1983, 27–28.) Koska kemia tutkii vain välillisesti havainnoitavia olioita, kemian kannalta keskeinen näkemys on olioita

koskevasta realismi, jonka mukaan kemian oliot kuten atomit ja elektronit ovat oikeasti olemassa.

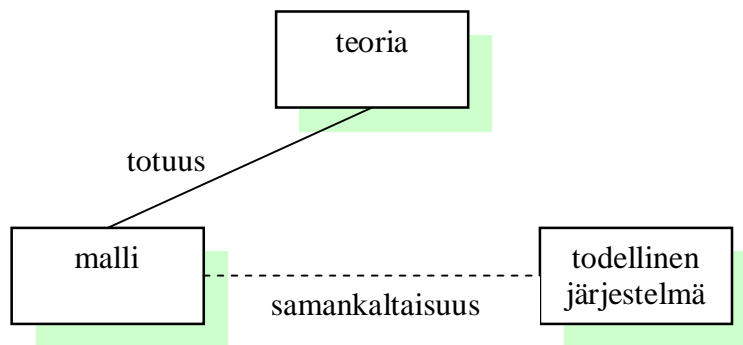
Yksi keskeisimpiä realistisen teoriantulkinnan vaihtoehtoja on instrumentalismi. Instrumentalismiin mukaan teorioita ja käsitteitä on arvioitava sen valossa, kuinka hyvin ne onnistuvat selittämään ja ennustamaan ilmiöitä. Instrumentalismiin mukaan teorioiden totuudellisuutta ei edes kannata arvioida. Moderneja anti-realisteja luonnontieteiden tieteenfilosofiassa edustaa esimerkiksi Bastiaan van Fraassen (1980), joka määrittelee näkemyksensä konstruktivistiseksi empirismiksi. Useimpien muiden empiristien tavoin van Fraassen on jollakin tasolla ontologinen realisti, sillä hän olettaa, että suoraan havaittavat kohteet ovat olemassa. Anti-realistien kenties vahvin argumentti on se, että tieteen historiassa tiede on hylännyt useita teoreettisia olentoja, esimerkiksi flogistonin ja eetterin. Toisaalta moni teoreettinen olio, kuten atomi, elektroni tai vaikkapa geeni, on myöhemmin tarkentunut ja konkretisoitunut havainnoitavaksi olioksi, jota voidaan esimerkiksi käyttää tutkimuksen työkaluna. (Matthews 1994, 163–178.)

Mallikeskeisen ajattelutavan tieteellisiin teorioihin on esittänyt Ronald Giere (1988, 62–91). Giere lähestyy mallin käsitettä kognitiivisen psykologian viitekehyksestä ja määrittelee teoreettisen mallin esitykseksi eli representaatioksi maailmasta. Mallilla on tietynyyppistä ja asteista samankaltaisuutta (*similarity*) kuvaamansa todellisen kohteen kanssa. Gieren mukaan samankaltaisuus ei edellytä totuudenmukaisuutta. Teorian Giere määrittelee teoreettisten mallien ja niitä todellisuuteen yhdistävien hypoteesien joukoksi. Teorian määrittely on varsin avoin, koska ei voida määrittellä tarkkoja ehtoja sille, mitkä mallit ja hypoteesit kuuluvat teoriaan. Gieren mukaan mallien ja teorioiden johtaminen aksiomaattisesti peruseriaatteista ei anna hyvää kuvaa tieteellisen tiedon esittämisestä ja kehittymisestä. Kemiassa kvanttimekaniikka voidaan nähdä aksiomaattisena pohjana kemiallisille malleille. Teoriat tai mallit eivät kuitenkaan välttämättä tarvitse tätä pohjaa itselleen, ja monet kemian malleista ovatkin syntyneet ennen kvanttikemian peruseriaatteita.

Giere (1988, 111–140) määrittelee itsensä konstruktivistiseksi realistiksi. Hänen mukaansa konstruktivistien näkemys, että teoreettiset oliot, kuten protonit, ovat vain teoreettisia olioita eivätkä itsenäisiä todellisia olioita, ei pidä kaikissa tapauksissa

paikkaansa. Ydinfyysikot tekevät protoneilla kokeita ja käyttävät niitä tutkimustyökaluina etsiessään esimerkiksi kvarkkeja. Teoreettisista olioista on tullut hiukkaslaboratoriossa selvästi todellisia. Nykyinen tutkimus ei olisi edes mahdollista, jos tiedemiehet eivät pitäisi kemiallisia ja fysikaalisia olioita kuten protoneita todellisina. Jotkin mallit, kuten palaminen flogistonin irtautumisena, korvautuvat paremmin todellisuutta kuvaavilla. Monet mallit kuitenkin säilyvät ja muuttuvat vain tarkemmin rajatuiksi. Gieren mukaan tieteellinen kehitys voidaan nähdä mallien tarkentumisena.

Kaavio 1. Gieren konstruktivistisen realismin malli teoriasta, mallista ja todellisuudesta Niiniluodon (1999, 140) mukaan:

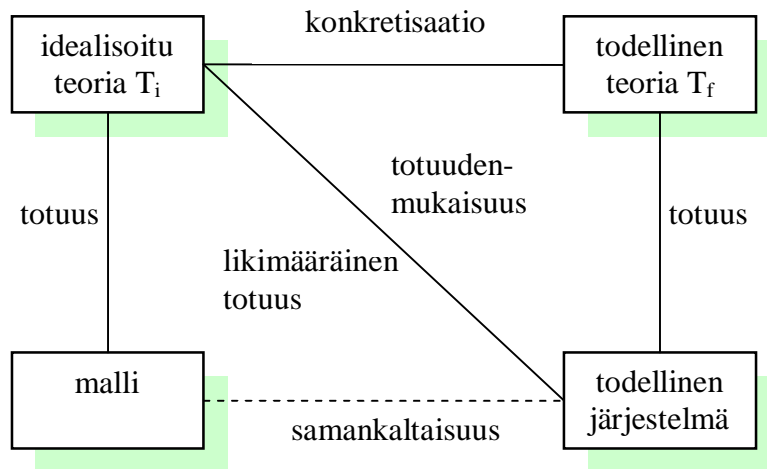


Tieteellinen realismi eroaa Gieren konstruktivistisesta realismista väittämällä tieteellisen tiedon lähestyvän totuutta. Tieteellistä realismia kannattava Ilkka Niiniluoto (1999, 139–141) kuvaa Gieren konstruktivistista realismia kaaviossa 1. Niiniluodon mukaan Giere yrittää kuitenkin vältellä totuudenmukaisuuden ja approksimatiivinen eli likimääräisen totuuden käsitteitä. Niiniluodon mukaan:

$$\text{totuus} + \text{samankaltaisuus} = \text{totuudenkaltaisuus (verisimilitude)}$$

Teoria on likimääräisesti tosi, jos teorian mallien joukko on samankaltainen todellisuuden kanssa. Niiniluodon mukaan Gieren konstruktivistinen realismi on siis esitettävissä kriittisen realismin puitteissa. Kriittinen realismi olettaa, että on olemassa jokin todellinen teoria T_f , jota tieteellinen idealisoitu teoria T_i lähestyy. Todellinen teoria ei välttämättä ole kuvattavissa, ja vaikka kuvaaminen onnistuisikin, ei voida olla varmoja, että kuvaus on onnistunut. Kaaviossa 2 on tieteellisen realismin mukainen kuvaus mallin, teorian ja todellisuuden suhteista.

Kaavio 2. Tieteellisen realismin malli teoriasta, mallista ja todellisuudesta Niiniluodon (1999, 141) mukaan:



Naiivi realismi on käsitys, jonka mukaan todellisuus on aistihavaintojemme kaltainen (Niiniluoto 2002, 141). Käsitystä, että kemiassa käytettävät teoreettiset mallit ovat täydellisiä kuvauksia todellisuudesta, voidaan pitää naiivin realistisena. Fritz Panethin mukaan kemistit ovat naiiveja realisteja, koska kemia tutkii aineiden kvalitatiivisia ja sellaisina myös sekundäärisiä ominaisuuksia (Ruthenberg 1997). Vaikka kemistit puhuisivat kulloinkin käyttämästään mallista naiivin realistin tavoin, käytännön työssä kemistit osaavat valita ja käyttää hyvin tarkoituksenmukaisesti monentasoisia sekä keskenään ristiriitaisia malleja (Grosholz & Hoffman 2000, 230–244). Tämä osoittaa, että kemistit tuntevat käyttämiensä mallien rajoja, vaikka eivät välttämättä osaa kysyttäessä ilmaista niitä tarkkaan.

2.2 Reduktio

Tieteenfilosofiassa reduktiolla tarkoitetaan tieteellisten teorioiden tai ilmiöiden selittymistä tarkemmilla teorioilla tai perustavammanlaatuisilla ilmiöillä. Luonnontieteissä reduktiolla tarkoitetaan muiden yleisempien luonnontieteiden selittymistä fysiikan teorioilla. Taustalla on usein ajatus yhtenäisteoriasta, joka selittäisi kaikki havaittavat ilmiöt. Tieteellä ajatellaan olevan hierarkia, jossa kutakin tiedettä määrittelee perustavanlaatuisempi tiede. Esimerkiksi biologia redusoituu tämän ajattelun mukaan kemiaan ja kemia fysiikkaan. Logiikka perustuu löytämisen metaforaan (*discovery metaphor*). Mitä syvemälle kaivaa, sitä perustavampia

totuuksia löytää. Reduktionistinen logiikka on Nobel-kemisti Roald Hoffmannin ja Vivian Torrencen (1993, 67–78) mukaan vain tieteellisen tutkimuksen kolikon toinen puoli. Tieteellä on myös rakentava ja edistävä roolinsa merkityksiä ja selityksiä antavien mallien luojana.

Kemiassa käytettävät käsitteet eroavat muiden luonnontieteiden käyttämistä käsitteistä. Fysiikan käsitteisiin verrattuna kemian käsitteet, esimerkiksi happo, suola ja emäs, ovat biologisten käsitteiden, kuten laji tai biotyyppejä, tapaan useammin luokittelevia ja kuvailevia. Fysiikka on tieteenä keskittynytkin luokittelun sijaan ilmiöiden kvantitatiiviseen matemaattiseen kuvaamiseen. (Erduran 2001, 583; Erduran & Scerri 2002, 11.) On kuitenkin varsin yleinen uskomus, että kemia on redusoitavissa fysiikkaan (Scerri & McIntyre 1997, 214). Jos reduktio pitäisi paikkansa, ei välttämättä tarvittaisi erillistä kemian filosofiaa, koska kemia olisi vain fysiikan tieteenfilosofian osa-alue. Siksi reduktion tarkastelu on keskeinen osa kemian filosofiaa. Reduktiosta puhuttaessa kemiaa käytetään usein myös reduktiopäätelyn siltana biologian ja fysiikan välillä. Biologian reduktiota pohdittaessa kannattaneet katse kuitenkin kääntää ensin kemiaan ja pohtia, onko reduktio mahdollista edes kemiasta fysiikkaan. (Erduran 2001, 583–584.)

Eric Scerri ja Lee McIntyre (1997, 215) tekevät selvän eron ontologisen ja epistemologisen reduktion välillä. Ontologisella reduktiolla tarkoitetaan redusoituvan tieteen olioiden rakentumista redusoivan tieteen tai teorian olioista (Niiniluoto 1983, 289–290). Epistemologinen reduktio on tieteen tai teorian teorioiden, käsitteiden, mallien ja lainalaisuuksien redusoitumista redusoivan tieteen teorioihin ja käsitteisiin (Silberstein 2002, 82). Nykyisen tietämyksen mukaan kemiassa käytettävät oliot rakentuvat fysikaalisista olioista, joten kemia redusoituu ontologisesti fysiikkaan. Kemian epistemologinen reduktio eli kemian käyttämien teorioiden, käsitteiden ja selitysten redusoiminen fysiikan teorioihin, käsitteisiin ja selityksiin ei ole lainkaan yhtä itsestään selvää. (Scerri & McIntyre 1997, 215–224.)

Kemian filosofiassa reduktiota on kattavasti pohtinut Eric Scerri (esimerkiksi Scerri 1991a, 1991b, 1994, 2000a, 2001 ja 2006 sekä Scerri & McIntyre 1997), joka lähtee määrittelemään reduktion käsitettä Ernst Nagelin kirjan *Structure of science* (Nagel 1961) määritelmästä (Scerri 1994, 160). Nagelin mukaan reduktio on jollakin

tutkimusalalla (*area of inquiry*) teorian tai kokeellisesti syntyneiden lakien selittyminen yleensä jollekin toiselle tiedonalalle (*domain*) muodostetulla teorialla. Jos redusoitava teoria T' sisältää vain termejä, joilla on sama merkitys kuin redusoivan teorian T termeillä, on Nagelin mukaan kyse homogeenisestä reduktiosta. On hyvin vähän teorioita, jotka redusoituvat homogeenisesti. Siksi Nagel pyrki pohtimaan tarkempia ehtoja homogeenisen reduktion ehdot täyttämättömälle heterogeeniselle reduktiolle. Jotta jokin teoria T' on redusoitavissa teoriaan T, sen täytyy Nagelin mukaan täyttää kaksi ehtoa. Redusoituvassa teoriassa T' täytyy olla oletettavissa teoriassa käytettäville termeille kelvolliset yhteydet (*suitable relations*) redusoivassa teoriassa T käytettäviin termeihin. Tätä ehtoa Nagel kutsuu yhdistettävyydeksi (*connectability*). Toisen ehdon eli johdettavuuden (*derivability*) mukaan redusoituvan teorian tai tieteenalan T' kaikkien lakien pitää olla loogisesti johdettavissa redusoivan teorian tai tieteen teoreettisilla premisseillä eli oletuksilla. (Nagel 1961, 338–354.)

Selvittääkseen kemian ja fysiikan suhdetta tulee tutustua kvanttifysiikkaan ja sen laskennallisiin sovellutuksiin, jotka tarjoavat tällä hetkellä perustavimmanlaatuisen fysikaalisen mallin selittää kemiallisia ilmiöitä. *Ab initio* -menetelmin voidaan laskea todella tarkasti esimerkiksi molekyylien sidosenergioita. Siitä huolimatta joitakin kemian käyttämiä käsitteitä, kuten sidosta, ei voida redusoida kvanttimekaniikan kieleen. Kvanttimekaniikassa voidaan laskea sidosenergioita, tietämättä kuitenkaan todella, mikä sidos on. Kemian redusoitumisessa kvanttifysiikaksi on Nagelin termein kyse korkeintaan heterogeenisestä reduktiosta. (Scerri 1994, 160.)

2.2.1 Kvantitatiivinen reduktio

Ajasta riippumaton Schrödingerin yhtälö on:

$$\hat{H}\psi = E\psi \quad (1)$$

Jossa \hat{H} on Hamiltonin operaattori, joka käsittää systeemin potentiaali- ja kineettisen energian. E on systeemin havainnoitavissa oleva energia. ψ on kaikkien systeemin osien koordinaatit sisältävä aaltofunktio. Vedynekaltaiselle yhden elektronin atomille Schrödingerin yhtälö saa muodon:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2 - \frac{Ze^2}{r}\right)\psi = E\psi \quad (2)$$

\hbar on redusoitu Planckin vakio, μ systeemin redusoitu massa, ∇^2 kineettisen energian operaattori, Z ytimen varaus ja e elektronin varaus. Yhtälö on ratkaistavissa ja ratkaisussa keskeisellä sijalla ovat kvanttiluvut n , l ja m :

$$\psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi) = R_{n,l}(r) \cdot \Theta_{l,m}(\theta) \cdot \Phi_m(\varphi) \quad (3)$$

Näiden kvanttilukujen yhdistelmä muodostaa tilan, jota kutsutaan orbitaaliksi. (Scerri 1994, 162–163.)

Useamman elektronin systeemille differentiaaliyhtälö ei ole enää ratkaistavissa, koska se sisältää elektronien välistä vuorovaikutusta kuvaavan termin ja elektronien paikkaa ei voida täsmällisesti määrittää. Tässä kohtaa mukaan astuu likiarvoisuus. Kemia on kiinnostunut yhdisteistä, joissa ytimiä on useampia. Tämä tekee kvanttikemiassa käytettävistä yhtälöistä todella monimutkaisia. Vaikka käyttöön otetaan useita likimääräistyksiä eli approksimaatioita, edellyttää myös yhtälöiden likimääräinen ratkaisu usein varsin paljon laskentatehoa. Useimmat suuret molekyylit kuten vaikkapa proteiinit tai raskaampia alkuaineita sisältävät yhdisteet eivät ole ratkaistavissa *ab initio* -menetelmin (Hunger 2006, 135).

Laskennallisesti tehtävää voidaan helpottaa käyttämällä semi-empiirisiä menetelmiä. Semi-empiirisillä menetelmillä tarkoitetaan menetelmiä, joissa kaikkia aaltofunktio termejä ei käytetä, vaan niitä kuvaamaan otetaan kokeellisin menetelmin saatuja likiarvotekijöitä. Semi-empiirisiä menetelmiä ei voida käyttää reduktion perustelemiseen, koska laskelmien sisältämä kokeellinen tieto on kemiallista tietoa, jonka pitäisi olla reduktion kohteena. Tarkempaan tarkasteluun kannattaa ottaa vain kvanttimekaaniset *ab initio* -menetelmät, jotka eivät sisällä kokeellisesta aineistosta otettuja korjauksia. (Scerri & McIntyre 1997, 216–219.)

Molekyyliden Schrödingerin yhtälöä *ab initio* -menetelmin ratkaistaessa liikkeelle lähdetään yleensä Bornin ja Oppenheimerin approksimaatiosta. Approksimaation mukaan massaltaan elektroneihin verrattuna noin 2000-kertaisten ydinten liike on niin hidasta elektronien liikkeeseen verrattuna, että ydinten paikat voidaan ajatella kiinteiksi. Tässä kiinteiden varausten kentässä lähdetään ratkaisemaan elektronien Schrödingerin yhtälöä. Tälläkin approksimaatiolla ongelma on laskennallisesti varsin

monimutkainen. Eksakti ratkaisu voidaan löytää vain yksinkertaisimman mahdollisen molekyylyityypin H_2^+ -molekyyylille. (Hunger 2006, 132.)

Useamman elektronin aaltofunktiota ratkaistaessa jaetaan seuraavaksi koko funktion aaltofunktio ψ yksittäisten elektronien aaltofunktioiksi ψ_i , joita kutsutaan myös molekyyliorbitaaleiksi. Jokainen molekyyliorbitaali voidaan kuvata kantafunktioiden ϕ_i lineaarikombinaationa:

$$\psi_i = \sum_{\mu=1}^N c_{\mu i} \cdot \phi_i \quad (4)$$

Tätä approksimaatiota kutsutaan LCAO-menetelmäksi (*Linear Combination of Atomic Orbitals*). Kantafunktioina käytetään yleisimmin vedyn atomiorbitaaleja muistuttavia Slater-tyyppin orbitaaleja tai useammasta Gaussin yhtälöstä koostuvia Gaussian-tyyppin orbitaaleja. Myös Hamiltonin operaattori jaetaan yksittäisen elektronin operaattoriksi, jota kutsutaan Hartreen ja Fockin operaattoriksi \hat{h}^{HF} . Kun ε_i on elektronin perustilan energia, Schrödingerin yhtälö saa muodon:

$$\hat{h}^{HF} \cdot \psi_i = \varepsilon_i \cdot \psi_i \quad (5)$$

Hartreen ja Fockin operaattorissa kuvataan ydinten vaikutusta operaattorilla \hat{h}_0 sekä muiden elektronien muodostaman kentän Coulombin vuorovaikutusta ja elektroninvaihdosta aiheutuvaa vuorovaikutusta operaattoreilla \hat{j} ja \hat{k} :

$$\hat{h}^{HF} = \hat{h}_0 + \hat{j} - \hat{k} \quad (6)$$

Voidaan osoittaa, että energia, joka on laskettu approksimoidusta aaltofunktiosta, ei voi koskaan olla alempi kuin systeemin todellinen energia. Tätä periaatetta kutsutaan variaatioperiaatteeksi. Funktion muuttujia muuttamalla pyritään löytämään mahdollisimman pieni energia eli aaltofunktion energian minimi. Kerroin c voidaan siten valita ehdon

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = 0 \quad (7)$$

mukaan, jossa E on perustilan aaltofunktion energia. Ongelmana on kuitenkin, että muiden elektronien muodostaman kentän vaikutukseen käytettyjen operaattoreiden \hat{j} ja \hat{k} laskemiseksi täytyy tietää muiden elektronien aaltofunktiot. Tästä syystä täytyy elektroneille arvata oletetut aaltofunktiot ja ratkaista niistä yhden elektronin

aaltofunktio ja sitten seuraavan ja seuraavan yhä uudelleen. Tätä jatketaan, kunnes viimeksi saatu joukko ei enää merkitsevästi poikkea edellisestä. Tällöin iteratiivinen lasku on konvergoitunut ja kenttä on itseytynyt. Jos halutaan energieettisesti paras rakenne ytimille, täytyy etsiä iteratiivisesti ydinten sijainnin suhteen vähäenergisin ratkaisu. Jokaiselle ratkaisulle elektroninen aaltofunktio täytyy laskea erikseen. (Hunger 2006, 132–134.)

Hartreen ja Fockin menetelmää tarkempia tuloksia saadaan ottamalla laskuissa huomioon esimerkiksi useamman elektronin vuorovaikutuksen aiheuttama repulsiovaikutus (Scerri 1994, 164). Yritystä laskea kemiallisten olioiden eli atomien ja molekyylien energioita, sidoskulmia, dipolimomentteja ja reaktioaikoja kvanttimekaniikan peruseriaateista on kutsuttu kemian filosofian tutkimuksessa kvantitatiiviseksi reduktioksi (Scerri ja McIntyre 1997, 218) tai pragmaattiseksi reduktioksi (Scerri 1994, 161–162). Vaikka *ab initio* -menetelmät antavat varsin tarkkoja likiarvoja tuloksiksi, Scerri (1994, 165–168) on sitä mieltä, että edes approksimatiivinen reduktio ei ole mahdollista, koska tarkkuus jää määrittämättä. *Ab initio* -menetelmillä voidaan määrittää variaatioperiaatteen mukaan yläraja systeemin energialle, mutta ilman alarajan määrittystä ei tarkkuutta voida määrittää.

2.2.2 Käsitteellinen reduktio

Scerrin ja McIntyren (1997, 218–220) mukaan edellä kuvattuun kvantitatiiviseen reduktioon keskittymistä tärkeämpää on keskittyä käsitteelliseen reduktioon (conceptual reduction) eli kemian käyttämien käsitteiden, kuten kemiallisen rakenteen tai sidoksen, redusoitumiseen. Hartreen ja Fockin malli sisältää oletukset, että ydinten ja elektronien liike on eroteltavissa ja aaltofunktio on jaettavissa yksittäisten elektronien aaltofunktioiksi (Hunger 2006, 151). Yksittäiset elektronit eivät kuitenkaan ole monielektronisissa systeemeissä tasapainotilassa, vaan atomi kokonaisuudessa on tasapainotilassa (Scerri 2001, 79). Vetyatomin orbitaaleja lukuun ottamatta orbitaalit eivät ole olemassa itsenäisinä olioina kvanttimekaniikan mukaan, vaan ne ovat pelkästään todella hyviä tuloksia antava malli (Scerri 1991b). Operaattorit, jotka kuvaavat yksittäisten elektronien impulssimomenttia, eivät kommutoi, eli niiden itseisarvo ei ole nolla. Tämä tarkoittaa, että yksittäisen elektronin impulssimomentin muodostavat ominaisfunktiot eivät kuvaa liikettä

tarkasti. Siksi yksittäiselle elektronille ei voida määritellä kvanttilukuja ja orbitaalit eivät ole Scerrin (2000, 419–420) mukaan todella olemassa itsenäisinä olioina. Lisäksi kvanttimekaniikan matemaattisista ilmauksista ei löydy mitään, joka voitaisiin tunnistaa esimerkiksi molekyyliessä ajasta riippuviksi rakenteen muutoksiksi (Scerri & McIntyren 1997, 218–219). Vaikka atomi- ja molekyyliorbitaalit eivät olisi kvanttimekaniikan mukaan itsenäisiä olioita, ne ovat toki käyttökelpoisia kemiassa. Kvanttikemiaa tarjoaa paitsi varsin tarkkoja tuloksia myös teoreettisen kehityksen kemiallisille malleille. Esimerkiksi molekyylin rakenne esiintyy kvanttimekaanisissa malleissa Bornin ja Oppenheimerin approksimaationa. Valtaosa kemiassa käytetyistä selitysmalleista perustuu molekyyliorbitaaleilla olevien elektronien vuorovaikutukseen.

On myös muistettava, että Schrödingerin yhtälö on myös approksimaatio, koska se ei ota huomioon suhteellisuusteoriaa. Vaikka on mahdollista tarkasti ratkaista myös relativistiset ominaisuudet huomioiva vedyn Diracin yhtälö, sekin on lopulta approksimaatio. Valentin Ostrovskyn (2005a) mukaan koko fysiikka on erilaisten approksimaatioiden sarja tai hierarkia, jossa ei ole yhtään todella tarkkaa tulosta tai yhtälöä. Tämä johtuu siitä, että fysiikan lakeja ei ole annettu *a priori*, vaan ne on testattu aina rajallisella tarkkuudella ja rajallisesti eristetyissä olosuhteissa. Koska kaikki teoriat ovat approksimaatioita, kysymys on ainoastaan siitä, mikä on perusteltavissa oleva approksimaation määrä. Tämä johtuu Ostrovskyn mukaan käyttötarkoituksesta. Tieteellä ja erityisesti kemialla on paitsi kvantitatiivinen laskennallinen luonne myös kvalitatiivinen selittävä luonne. Hyvän tieteellisen teorian tai mallin selitysvomaisuus lähtee yleensä approksimaatioista. Ostrovsky käyttää esimerkkinä likimääräisestä ilmiöstä varjoa ja varjon selittymistä geometrisessä optiikassa, joka on teoriana ainoastaan approksimaatio hiukkafysiikasta. Varjon rajat eivät voi koskaan olla täysin terävät valon diffraktion vuoksi. Ihmisen rajallisella erotuskyvyllä on kuitenkin mahdollista havaita varjot helposti, vaikka ne eivät vastaakaan täsmällisesti geometrisen optiikan antamaa mallikuvaa varjosta. Orbitaalien approksimatiivinen luonne ei tee niistä Ostrovskyn mukaan varjoa epätodellisempia. On mahdollista havaita niiden ominaisuuksia, ja niiden selitysvomaisuus kemiassa on valtava, joten ne ovat Ostrovskyn mukaan approksimatiivisesta luonteestaan huolimatta olemassa itsenäisinä olioina.

Fysiikan ja kemian suhdetta on pohtinut myös G. K. Vemulapalli (2006), joka Scerrin ja McIntyren (1997) tavoin ei usko kemian redusoituvan fysiikkaan. Vemulapalli (2006, 191–203) näkee kemian tieteenä osin itsenäisenä ja osin riippuvaisena fysiikasta. Fysiikan perimmäiset lait ovat Vemulapallin mukaan rajoja asettavia negatiivisia postulaatteja, jotka kuvaavat, mitä ei voi tapahtua. Kemiallisten mallien täytyy toimia näiden fysiikan asettamien rajojen sisällä. Kemiassa ei ole varsinaisia perimmäisiä lakeja kuten fysiikassa. Ollaan molekyyliorbitaalien ontologisesta luonteesta mitä mieltä tahansa, kemia edellyttää tietynlaisia sen tasolle tyypillisiä kuvauksia, jotka eivät ole suoraan saatavissa kvanttimekaanisista yhtälöistä (Scerri ja McIntyre 1997, 220–221). Oikean approksimaatiotason valinta edellyttääkin aina harkintaa, joten riittävän tarkkojen mallien muodostaminen ja niiden rajojen ymmärtäminen on tutkimuksessa ensiarvoisen tärkeää (Ostrovsky 2005a). Kemiassa ja erityisesti sen opetuksessa keskeisessä asemassa ovatkin kemistien käyttämät mallit ja niiden rajat.

2.2.3 Päältäminen

Päältämisen (*supevenience*) käsitettä ei ole määritelty kiistattomasti. Yleinen määritelmä on, että päältäminen on asymmetrinen riippuvuussuhde kahden tason välillä. Päältävä on esimerkiksi suhde, jossa kaksi samanlaisista mikroskooppisista rakenneosasista koostuvaa makroskooppista oliota on makroskooppisten ominaisuuksiensa suhteen identtisiä ja kaksi makroskooppisilta ominaisuuksiltaan identtistä oliota ei kuitenkaan välttämättä koostu samanlaisista mikroskooppisista rakenneosasista. (Scerri & McIntyre 1997, 224–226; Erdurran & Scerri 2002, 17.) Vemulapallin (2006) näkemys fysiikasta kemialle rajat asettavana tieteenä kuvaisi oheisen määritelmän mukaan fysiikan suhdetta kemiaan päältävänä. Päältämisen käsite lienee hyödyllinen myös mietittäessä, miten kemian atomi- ja molekyyli-tason ilmiöt ilmenevät makromaailman havainnoissamme. Esimerkiksi hajuaistilla tehtyjen havaintojen suhde kemialliseen rakenteeseen voidaan nähdä päältävänä. (Scerri & McIntyre 1997, 224–226.)

2.3 Kemialliset selitykset ja mallit

Malleilla on keskeinen asema kemian tutkimuksessa. Kemiallisten muutosten kuvaamista sekä ominaisuuksien laskemista erilaisin mallein voidaan pitää jopa kemian keskeisimpänä tuotoksena (Justi & Gilbert 2002, 47–48). Mallin käsitteelle on kemiassa, luonnontieteissä ja tieteenfilosofiassa monia eri määritelmiä. Yleensä malli määritellään idealisoiduksi eli jollain tapaa yksinkertaistetuksi esitykseksi kuvaamastaan kohteesta. Kuvauksen kohde voi olla konkreettinen olento tai jokin abstrakti idea. (Gilbert et al. 2000a, 11.) Malli on linkki havaitun todellisuuden ja siitä luodun kuvan välillä. Se on kuitenkin aina kuvaamaansa kohdetta yksinkertaisempi ja kuvaa siksi kohdettaan vain rajallisesti (Saari 2000, 25).

Malli liittyy läheisesti myös teorian käsitteeseen. Mallin ja teorian käsitteiden suhteesta on monia eri tulkintoja (Gilbert et al. 2000b, 25–35). Sekä malli että teoria voidaan kuitenkin määritellä idealisoiduiksi esityksiksi kuvaamistaan kohteista (Niiniluoto 2002, 205–206) ja siksi, vaikka useimmat kemian mallit eivät missään tapauksessa täytä tieteellisen teorian ehtoja, voidaan kemiassa ja muissa luonnontieteissä käytettäviä teorioita pitää malleina (Carpenter 2000, 213–215).

2.3.1 Mallien yhteys selittämiseen

Malli on todellisuuden kuvaus vain tiettyjen tarkoituksenmukaisten ominaisuuksien suhteen (Wartofsky 1979, 462). Mallit eivät ole täsmällisiä kuvia kuvaamastaan kohteesta eivätkä koskaan huomioi kaikkia todellisen maailman olosuhteita. Mallintamisella onkin yleensä jokin rajattu tavoite. Tavoite kemiassa on yleensä selityksen antaminen jollekin kemialliselle ilmiölle. Selitysten antaminen tutkittaville ilmiöille onkin yksi tieteen tärkeimmistä tehtävistä. Tieteelliset tutkimuksethan lähtevät liikkeelle tutkimuskysymysten asettamisesta.

Luonnontieteelliset selitykset voidaan jakaa vastattavan kysymyksen mukaan viiteen eri luokkaan (Gilbert et al. 1998, 85–87 ja 2000c, 195–197):

i. Intentionaalinen selitys (*intentional explanation*) vastaa kysymyksiin "miksi tutkimuksen kohde on tutkimisen arvoinen" ja "mikä on tutkimuksen päämäärä". Intentionaaliset selitykset ovat inhimillisiä tekoja niiden päämäärillä kuvaavina

luonteeltaan teleologisia ja niitä käytetään paljon humanistisissa ja yhteiskuntatieteissä (Niiniluoto 2002, 54). Kemistit ja kemian opettajat eivät ole tyypillisesti tottuneet käyttämään tämän tyyppin selityksiä ja siitä syystä niihin ei usein kiinnitetä tarpeeksi huomiota.

ii. Kuvaileva selitys (*descriptive explanation*) vastaa kysymykseen "millainen tutkimuskohde on". Kuvaileva selitys pyrkii kuvaamaan tutkimuskohteen ominaisuuksia. Voidaan tietysti kysyä, onko pelkkä kuvaileminen vielä selittämistä. Kun ilmiötä ensimmäistä kertaa lähdetään tutkimaan, on kuvailevalle selitykselle oma paikkansa. Lisäksi luonnontieteiden opiskelussa lähdetään yleensä liikkeelle juuri luonnonilmiöiden kuvailevista selityksistä.

iii. Tulkitseva selitys (*interpretative explanation*) vastaa kysymyksiin ilmiön rakenteesta. Se pyrkii nimeämään ilmiöön osallistuvat oliot ja kertomaan niiden sijoittumisen ajan ja paikan suhteen. Kemiaaliset selitykset alkavat tältä tasolta, koska käytettävät oliot eli atomit, molekyylit ja sidokset ovat suoran havainnoinnin ulkopuolella.

iv. Kausaalinen selitys (*causal explanation*) pyrkii selittämään ilmiön syy-seuraussuhteita vastaamalla kysymykseen "mistä ilmiö koostuu". Luonnontieteissä on yleensä kiinnitetty erityistä huomiota kausaalisiin selityksiin.

v. Prediktiivinen selitys (*predictive explanation*) tehdään tyypillisesti kausaalisen selityksen pohjalta ja se vastaa kysymykseen "miten ilmiö ilmentyy toisenlaisessa tilanteessa". Taas voidaan kysyä, onko kysymyksessä selitys. Jos ajatellaan tieteellisen selityksen ketjua, prediktiivinen selitys on sen lopputuloksena kuitenkin varsin luonnollinen osa sitä.

2.3.2 Mallien luokittelu

Kemiassa käytetyt mallit voidaan luokitella esitystapansa (*mode of representation*) mukaan. Esitystavoista kemiassa käytetään erityisesti symbolisia verbaalista (*verbal*), visuaalista (*visual*) ja matemaattista (*mathematic*) esitystapaa. Myös konkreettisia (*concrete*) esitystapoja, esimerkiksi pallo ja tikku -malleja, ja erilaisten esitystapojen yhdistelmiä käytetään kemiassa ja kemian opetuksessa usein. Vähemmän käytetty tapa on gesturaalinen (*gestural*) eli ilmeisiin ja eleisiin perustuva esitystapa. Esitystavat voidaan jakaa luokkiin myös ominaisuuksiensa mukaan. Esitystavaltaan täsmällinen malli on kvantitatiivinen (*quantitative*) ja kuvaileva kvalitatiivinen

(*qualitative*). Jos malli on ajan suhteen muuttuva, on kyseessä dynaaminen (*dynamic*) malli. Staattiset (*static*) mallit ovat ajasta riippumattomia. Dynaamiset mallit voidaan jakaa aina samalla tavalla käyttäytyviin deterministisiin (*deterministic*) tai todennäköisyyksien mukaan erilaisen lopputuloksen antaviin stokastisiin (*stochastic*). Erilaisten esitystapojen typologia ja esimerkkejä esitystavoista on esitetty taulukossa 1. (Boulter & Buckley 2000, 46–49 ja Gilbert et al. 2000c, 197.)

Taulukko 1. Boulterin ja Buckleyn (2000, 49) esitystapojen typologia esimerkkeineen ilman yhdistelmäesitystapoja:

ominaisuudet		Konkreettinen	Visuaalinen	Verbaalinen	Matemaattinen	Gesturaalinen
Kvalitatiivinen	Staattinen	Kolmiulotteinen malli	Kaavio tai piirros	Analogia tai metafora, sanallinen kuvaus		Paikan osoittaminen
	Dynaaminen	Deterministinen	Liikkuva kolmiulotteinen malli	Kaaviosarja tai animaatio		Ilmiön käyttäytymistä kuvailevia liikesarja
		Stokastinen	Fyysiset simulaatiot			
Kvantitatiivinen	Dynaaminen	Stokastinen		Graafinen esitys		Kaava
		Deterministinen	Mittakaavaan tehdyt toimivat kopiot	Video ilmiöstä		Kaavan tietokonesimulaatio
	Staattinen	Mittakaavaan tehty kopio	Valokuva	Sanallinen kuvaus mitatuista arvoista	Yhtälö tai kemiallinen kaava	Koon näyttäminen

Mallit voidaan jakaa myös ontologisen luonteensa mukaan. Mentaalinen malli (*mental model*) on yksilön ajattelussa esiintyvä malli. Kun malli tuodaan julki jollakin edellä kuvatulla esitystavalla, siitä tulee ilmaistu malli (*expressed model*). Kun jokin ryhmä saavuttaa riittävän yksimielisyyden mallin hyväksyttävyydestä, hyväksytyä mallia kutsutaan konsensusmalliksi (*consensus model*). Kemiallinen tutkimus tuottaa muun

tutkimuksen tapaan valtavan määrän erilaisia ilmaistuja malleja. Ilmaistu malli voi tieteellisen julkaisun ja tiedeyhteisön itsekritiikin kautta saavuttaa tiedeyhteisön hyväksynnän. Tiedeyhteisön hyväksymästä konsensusmallista käytetään nimitystä tieteellinen malli (*scientific model*). Aikaisemmin hyväksytyt konsensusmallit voidaan syrjäyttää paremmin kuvaavilla uusilla malleilla. Syrjäytettyjä malleja kutsutaan historiallisiksi malleiksi (*historical models*). Koska mallien ymmärtäminen voi joskus olla varsin hankalaa, luodaan opetusta varten usein yksinkertaistettuja tai yhdistelmä- eli hybridimalleja (*hybrid models*). Opetuksen yhteydessä puhutaan käyttötarkoituksen mukaisesti esimerkiksi opetusmalleista (*teaching models*) ja opetussuunnitelmallisista malleista (*curricular models*). (Gilbert et al. 2000a, 12.)

2.3.3 Kemian kieli ja sen ilmiöiden kaksi maailmaa

Kieli on työkalu, jolla ilmaisemme ja viestimme käsityksiämme. Merkitystä voidaan ilmaista sanojen lisäksi monin tavoin, kuten elein, kuvin tai symbolein. Luonnontieteillä on oma kielensä ja diskurssinsa, jossa sanojen merkitykset poikkeavat usein niiden arkikielen merkityksistä ja jossa käytetään paljon esimerkiksi erilaisia symbolisia viestintätapoja. Luonnontieteissä käytettävä kieli on muiden kielien tavoin dynaaminen ja muuttuva. Sanojen merkitykset ja kielenkäytön tavat muuttuvat ajan myötä. Luonnontieteiden kieli on syntynyt ja kehittynyt tieteen tarpeiden mukaan. Se ei kuitenkaan kehity muusta kielenkäytöstä irrallaan vaan sen kanssa rinnan. Sutton (1992) näkee tieteen kielellä kaksi tehtävää. Tieteen kielen täytyy viestiä vakiintuneen aseman saavuttanutta informaatiota eli tieteellistä tietoa. Ensimmäinen tehtävä onkin toimia määrittelevänä järjestelmänä (*labelling system*). Toinen tehtävä on toimia tulkinnallisena järjestelmänä (*interpretive system*), joka mahdollistaa tieteellisen edistyksen avaamalla mahdollisuuden tieteelliselle spekulatiolle erilaisten tulkintojen myötä. Koska tieteelliset mallit ovat kuvauksia maailmasta, tieteellinen kieli on metaforista. (Jones 2000, 88–93.)

Kemiallisia ilmiöitä selittäessään kemistit liikkuvat varsin vaivattomasti kahden toisiinsa liittyneen maailman välillä. Ensimmäinen maailma on laboratorioden makroskooppinen maailma varsin helposti mitattavine ja havaittavine liuoksineen, tuoksuineen sekä lämpötiloineen. Toinen puolestaan on näkymätön atomien ja molekyylien submikroskooppinen maailma, jossa ilmeneviä rakenteita, dynamiikkaa

ja vuorovaikutussuhteita voidaan havaita vain makroskooppisen maailman muutoksina. Tutkittaessa kemiallisten yhdisteiden rakennetta ja ominaisuuksia voidaan käyttää hyvin monen tasoisia malleja ja teorioita sekä niitä tukevia tutkimusmenetelmiä ja -instrumentteja. Kvanttimekaanisten mallien ja niihin liittyvien spektroskooppisten menetelmien lisäksi kemistit käyttävät monia karkeampia malleja, kuten termodynaamisia malleja, selittämään submikroskooppisen tason muutosten vaikutusta makroskooppisen maailman tasolla. Termodynaamiset teoriat ovat tilastollisia. Ne ovat kuitenkin vailla merkittäviä tilastollisia poikkeamia, koska makromaailmassa havainnoitava reaktio aiheutuu valtavasta määrästä reagoivia molekyyliä. Grosholz ja Hoffman (2000) ovat tapaustutkimuksessaan tutkineet, miten kemistit pystyvät liikkumaan onnistuneesti erilaisten mallien ja makro- ja mikromaailman välillä.

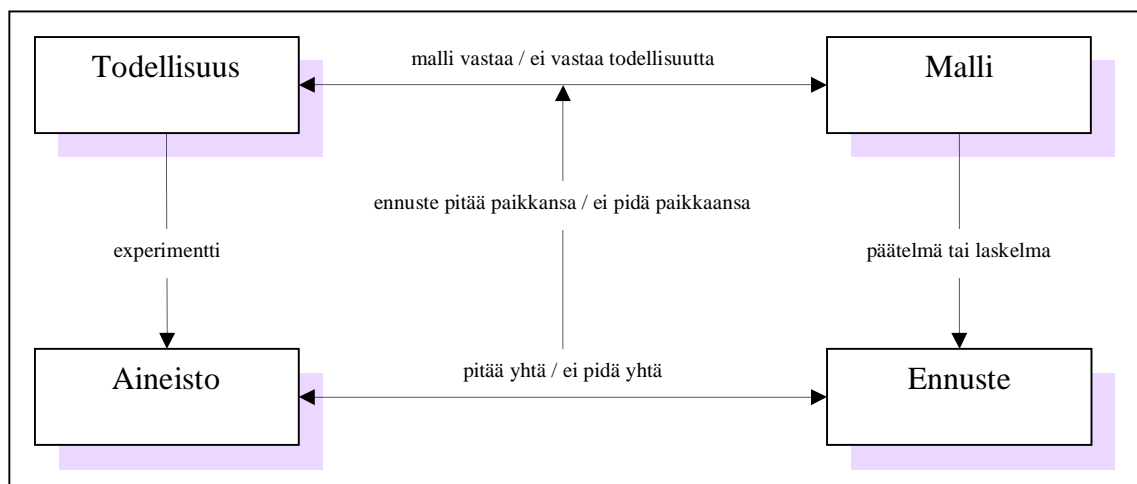
Kemistit käyttävät tutkimuskohteensa kuvaamiseen sekä symbolista että ikonista kieltä. Kemian symbolista kieltä ovat kemialliset kaavat ja yhtälöt, jotka molemmat kuvaavat sekä havaittavaa makromaailmaa että molekyylien ja atomien mikromaailmaa. Symbolista kieltä käytetään etenkin makromaailman työohjeissa. Ne kuvaavat kuitenkin myös mikromaailmassa tapahtuvia ilmiöitä. Tarvittavan selityksen antamiseksi ilmiölle symbolinen esitystapa ei ole kuitenkaan riittävä. Tarkemman molekyyli-tason kuvauksen antamiseksi ja molekyylien sisäisen dynamiikan ymmärtämiseksi kemistit käyttävät ikonisia malleja, kuten erilaisia rakennekaavoja ja molekyyli-malleja. Mallit auttavat kemistejä yhdistelemään ja selittämään havaintojaan. Tutkivat kemistit käyttävätkin symbolista ja ikonista kieltä hyvin tarkoituksenmukaisesti ja he osaavat hyvin intuitiivisen oloisesti valita esimerkiksi oikean yksinkertaistuksen asteen. Grosholzin ja Hoffmanin analysoimassa kemian tutkimuksessa kemistit liikkuvat hyvin vaivatta mikro- ja makromaailman havaintojen ja selitysten välillä. Samat symbolisen ja ikonisen kielen ilmaukset viittasivat vuoroin makro- sekä mikromaailmaan ja usein molempiin. Rakennekaava voi kuvata yhtä molekyyliä tai kaikkia yhtälöön osallistuvia rakenteeltaan samankaltaisia molekyyliä. Ikonisen ja symbolisella kielen ilmaisuilla on makro- ja mikrotasojen siltaava merkitys kemistien ongelmanratkaisussa. (Grosholz & Hoffman 2000, 230–244.)

Orbitaalit ovat yksi keskeisimpiä selitysmalleja kemiassa. Esimerkiksi sidosten muodostumiseen, reaktiivisuuteen ja happo-emäs-kemiaan liittyvät mallit selittävät yleensä ilmiöt elektronien sijoittumisella erilaisille atomi- tai molekyyliorbitaaleille. (Scerri & McIntyre 1997, 220–221.) Monet mallit käyttävät hyvin yksinkertaistettua kuvaa orbitaaleista ja, kuten edellä on todettu (katso luku 2.2.2), orbitaalien ontologisesta luonteesta on monenlaisia näkemyksiä. Nämä mallit eivät siis välttämättä ole suoraan johdettavissa kvanttimekaniikasta, vaan ne ovat jossain määrin itsenäisiä taso-spesifisiä (*level-specific*) malleja. Erduran ja Scerri (2002, 15) näkevät, että on eroteltava orbitaalien kvanttimekaniikan mukainen ontologinen luonne ja niiden kemiallisen selityksen mukainen luonne.

2.3.4 Mallintaminen

Kemia on kokeellinen luonnontiede, jossa käytetään aineiden käyttäytymistä kuvaavia malleja. Mallit eivät synny suoraan havainnoista, vaan niiden rakentaminen on luovaa toimintaa. Jotta voidaan tutkia luodun mallin vastaavuutta maailman kanssa, täytyy kerätä tietoa maailmasta havaitsemalla tai eksperimenteillä. Teorioita tai niihin liittyviä malleja ei voi suoraan testata kokeellisesti todellisuudessa. Niiden pohjalta täytyy ensin tehdä ennusteita siitä, miten malli ilmenee kokeellisessa asetelmassa. Kaavio 3 esittää teoreettisen hypoteesin todentamisen neljää osaa ja niiden suhteita. On huomattava kuitenkin, että todistusvoimaisimmankaan ennusteen paikkansapitävyys ei todista mallia todeksi. (Giere et al. 2006, 25–34.)

Kaavio 3. Kausaalisen mallintamisen rakenne Gieren, Bicklen ja Mauldinin (2006, 29–33) mukaan:



Kemiallin ja muiden tieteiden mallit muuttuvat ja kehittymistä voidaan kuvata esimerkiksi Lakatosin tutkimusohjelman mallilla. Lakatosin tutkimusohjelman ydinoletukset koostuvat tutkimusohjelman teoreettisista taustaoletuksista sekä mallien keskeisistä ominaisuuksista (*primary attributes*). Malleihin liittyy myös paljon keskeisten ominaisuuksien kanssa yhteneviä toissijaisia ominaisuuksia (*secondary attributes*), jotka muodostavat tutkimusohjelman suojavyön. Toissijaisia ominaisuuksia voidaan käsitellä itsenäisenä toisista toissijaisista ominaisuuksista. Ne kuitenkin liittyvät aina keskeisiin ominaisuuksiin. Lakatosin mukaan tutkimusohjelma vaihtuu, kun sen ydinoletukset muuttuvat. Siirtyminen mallista toiseen lähtee liikkeelle entisen mallin selityksellisistä vajavaisuuksista. Osa vanhan mallin ominaisuuksista on kuitenkin mukana uudessakin mallissa. Koska malli korvaantuu yleensä vasta toisella uuden mallin osoittauduttuaan vanhaa mallia edistävämmäksi, uuden mallin pitää pystyä tuottamaan uutta empiiristä sisältöä ja ennustamaan vanhan mallin valossa odottamattomia faktoja. (Justi & Gilbert 1999, 165–166.)

2.4 Kemian etiikka

Etiikka on filosofian osa-alue, jossa pohditaan oikean ja väärän olemusta sekä tapojen oikeutusta. Kemian etiikan ja tieteen etiikan yleisesti voidaan katsoa olevan osa soveltavaa etiikkaa, jossa pyritään löytämään vastauksia käytännön eettisiin ongelmiin. Kun otetaan huomioon, kuinka keskeinen asema kemialla on monissa eettisissä kysymyksissä kuten ympäristökysymyksissä, etiikan ja kemian suhdetta on pohdittu filosofien toimesta varsin vähän. Maallikot näkevät kemian usein vain ongelmien lähteenä. Julkista keskustelua ja kemistien eettistä itsereflektiota varten on nähtävissä tarve kemian etiikan pohdiskelulle. (Schummer 2001b.)

2.4.1 Yleinen moraalijärjestelmä ja vastuu

Jos halutaan tehdä yleisellä tasolla olevia moraalisia ohjeistuksia, täytyy olettaa, että on jokin yleinen moraalijärjestelmä. Yleinen moraalijärjestelmä on teoreettinen rakennelma, joka kuvaa ne säännöt ja velvollisuudet, joita moraalisen toimijan tulisi noudattaa toimiakseen oikein. Eettiset teoreetikot ovat esittäneet hyvin monenlaisia malleja yleiseksi moraalijärjestelmäksi. Teoreetikkojen keskuudessa vallitsee

kuitenkin Joachim Schummerin (2001b) mukaan jonkinlainen yhteisymmärrys siitä, että moraalijärjestelmän täytyy täyttää tiettyjä ehtoja voidakseen olla yleinen moraalijärjestelmä. Kolme keskeisintä ehtoa yksilön toiminnan arvioimisessa ja ohjaamisessa ovat hänen mukaansa:

1. Ihmiskunnan nykyisten ja tulevien sukupolvien hyvinvointi on arvo, jolla päätöksien ja toimien oikeellisuutta mitataan.
2. Kaikkien normien ja velvollisuuksien tulee tukea ensimmäistä ehtoa eli ihmiskunnan hyvinvointia.
3. Normien ja velvollisuuksien tulee soveltua kaikkien yksilöiden toimien ohjeeksi ja mittariksi.

Ehdot toimivat eräänlaisina reunaehtoina yleisille moraalijärjestelmille jättäen auki esimerkiksi hyvinvoinnin määritelmän, moraalijärjestelmän normit ja velvollisuudet sekä sen, millä perusteilla normien ja velvollisuuksien voidaan katsoa edistävän hyvinvoinnin lisääntymistä. (Schummer 2001b.)

Jotta voi pohdiskella vastuun kysymystä kemiassa, täytyy määritellä mitä vastuulla tarkoitetaan. Schummerin (2001b) määrittelyn mukaan toimija x voi olla vastuussa tapahtuma y :stä instituutio z :lle vain, jos toimija x :n toimilla on kausaalinen yhteys tapahtuma y :hyn. Lisäksi toimija x :llä täytyy olla tai on täytynyt olla mahdollisuus toimia toisin tapahtuma y :hyn johtavassa tai johtaneessa teossaan. Instituutio z voi olla mikä tahansa ryhmä, kuten tiedeyhteisö tai toimijan perhe. Kun määritellään vastuuta yleisissä moraalijärjestelmissä, instituutio z on koko ihmiskunta. Vastuun kohde y voi olla tapahtuman sijaan myös esimerkiksi lemmikki tai toinen ihminen, kuten toimijan oma lapsi. Toimijalla voi niin ikään olla vastuuta myös sosiaalisten konstruktoiden, kuten tieteellisen tiedon, kaltaisista abstrakteista olioista. Voidaan ajatella, että esimerkiksi kemisteillä on vastuu kemiallisen tiedon laadusta ja kehittämisestä yhteisen hyvän lisäämiseksi.

Vastuullisuus jostakin kenties vahingollisesta tapahtumasta ei välttämättä tarkoita teon olleen moraalisesti tuomittava. Vastuu tarkoittaa sitä, että toimijan tulisi olla valmis keskustelemaan toimiensa moraalisisista perusteista. Vastuu onkin samaa juurta vastaus sanan kanssa sekä suomessa että englannissa: vastuu on englanniksi *responsibility* ja vastata *to respond*. Siitä, missä määrin hyvät tarkoitukset vaikuttavat teon tuomittavuuteen, voidaan olla montaa mieltä. Näkemys, että hyvät

tarkoituspäätökset ovat ainoa tekijä, joka vaikuttaa tuomittavuuteen, on kuitenkin niin vaikeaa, että sille tuskin löytyy kannattajia. (Schummer 2001b.)

2.4.2 Kemian tutkimukseen liittyvät riskit

Kemiallisella synteetillä on keskeinen asema tieteellisessä tutkimuksessa. Kemiassa on kyse kemiallisten yhdisteiden ja niiden ominaisuuksien tunnistamisesta sekä uusien kemikaalien syntetisoinnista. Kysymys siitä eroaako uuden luonnossa esiintymättömän kemiallisen yhdisteen syntetisoiminen uuden makroskooppisen esineen suunnittelusta ja rakentamisesta on Stuart Rosenfeldin ja Nalini Bhushanin (2000, 187–203) mielestä filosofinen kysymys. Vastaus kysymykseen riippuu siitä, onko kemiallisilla yhdisteillä erityisasema materiaalisen olemassaolon luokkana. Synteettiset kemistit ovat tavallaan molekyyliarkkitehtejä ja insinöörejä, jotka rakentavat uusia yhdisteitä. Michael Davis (2002) on tutkinut synteettisten kemistien ja insinöörien ammattietiikan yhtäläisyyksiä nähdessä eroavaisuuksia suhtautumisessa turvallisuuteen. Arkkitehtien ja insinöörien ammattiin liittyy keskeisesti vastuu tuotosten turvallisuudesta. Synteettiset kemistit eivät näe turvallisuuskysymyksiä yhtä keskeisenä osana työtään. Useimmissa julkaisuissa, joissa raportoidaan uusien kemiallisia yhdisteiden synteeseistä, ei käsitellä juuri lainkaan uusiin yhdisteisiin tai synteeseihin liittyviä riskejä (Jacob & Walters 2005).

Huolimatta siitä eroaako kemiallinen synteesi muusta rakentamisesta, uusia kemiallisia yhdisteitä syntetisoitaessa kemistillä on vastuuta synteetin tuotteesta. Uusia yhdisteitä luotaessa ei ainoastaan tuoteta malleja tulkita maailmaa, vaan luodaan jotain uutta maailmaan. Maailmassa on miljoonia kemistejä, jotka tuottavat satojatuhansia uusia kemiallisia yhdisteitä vuosittain. Jokainen uusi yhdiste vaikeuttaa ympäristön muutosten ennustettavuutta lisäämällä uuden yhdisteen ympäristöön ja on täten mahdollisesti haitallinen ympäristölle. Ensimmäisessä synteetissä yhdistettä tehdään usein hyvin pieniä määriä varsin turvallisessa laboratorioympäristössä. Osa yhdisteistä päätty kuitenkin laajempaan käyttöön. Vaikka ensimmäisen synteetin suunnitellut kemisti ei olisikaan enää osallisena esimerkiksi yhdisteen laajemmassa kaupallisessa käytössä, hänellä on kuitenkin kausaalisen ketjun eräänlaisena alullepanijana vastuuta keksimänsä yhdisteen myöhemmän käytön seurauksista. Vain noin neljänneksessä julkaisuista, joissa raportoitii uusien yhdisteiden

syntetisoinnista, oli taustalla uuden aineen hyödyntäminen teknologiassa. Yli puolet uusista yhdisteistä luodaan ilman pohdintaa mahdollisesta käyttökohteesta. Kun halutaan arvioida tällaisten tieteellisestä mielenkiinnosta luotujen yhdisteiden valmistamisen eettisyyttä, täytyy meidän verrata mahdollisia hyötyjä ennustamattomuuden luomaan haittaan. (Schummer 2001b.)

Toisin kuin muut luonnontieteet, kemia usein luo omat tutkimuskohteensa (Rosenfeld & Bhushan 2000, 188). Uuden aineen syntetisoiminen nähdään joskus tapana kasvattaa ymmärrystämme maailmasta. Jos synteesi ei kuitenkaan paljasta jotain uutta esimerkiksi reaktiomekaniikasta tai tuntemistamme yhdisteistä, voidaan perustella, että uusi yhdiste vain lisää ymmärtämättömyytemme määrää luomalla uuden yhdisteen, jonka ominaisuuksien tutkiminen tulee viemään aikaa sekä vaivaa. Vaikka uuden yhdisteen kemiallisia ominaisuudet olisivatkin tiedossa kun synteesi raportoidaan, yhdisteen ominaisuuksista osa jää aina kuvaamatta. Toisaalta uusien yhdisteiden luominen voidaan nähdä kemiallisen tilan, jota kansoittavat kaikki mahdolliset yhdisteet ja niiden väliset reaktiot, kartoituksena. Uusia yhdisteitä syntetisoivien kemistien tulisi kuitenkin pohtia, onko yhdisteen luomisesta koituva mahdollinen hyöty riittävä peruste mahdollisille riskeille. (Schummer 2001b.)

Monet uudet aineet luodaan johonkin tiettyyn tarkoitukseen. Myös kemistit, jotka eivät mieti syntetisoimansa aineen käyttötarkoitusta, voivat perustella synteesinsä hyödyllisyyttä tulevaisuuden mahdollisilla käyttötarkoituksilla. Mahdollisten hyötyjen ja riskien ennustaminen on kuitenkin hyvin vaikeaa. Eettisesti ongelmallisinta lienee tutkimus, jossa tuotetaan uusia yhdisteitä ihmisiä vahingoittaviin tarkoituksiin esimerkiksi sotateollisuudelle. Yleensä aseiden tuottamisen moraalisisina perusteina nähdään jonkin ryhmän, kuten kansakunnan tai valtion, hyöty. Yleisten moraalijärjestelmien soveltamisalana on kuitenkin koko ihmiskunta, jonka etu ajaa ryhmien etujen ohi. Utilitaristisen etiikan valossa voidaan ajatella, että vahingon tekeminen on hyväksyttävää, jos seurauksena on suurempi yleinen hyöty. Silti esimerkiksi uuden aseiden tai myrkyneiden käytöstä tulevaisuudessa odotettavissa oleva haitta ylittänee yksittäisessä tilanteessa koituvan yleisen hyödyn. Vaikka asetta käytettäisiinkin siis luontihetkellä yleisen ihmisyyden edistämiseksi, tulevaisuudessa sitä varsin todennäköisesti tullaan käyttämään myös moraalittomampiin tarkoituksiin. Uusien yhdisteiden syntetisoiminen vahingoittamistarkoituksiin on siksi yleisten

moraalijärjestelmien valossa aina moraalisesti arveluttavaa toimintaa. (Schummer 2001b.)

Joskus synteesituotteilla tavoitellaan parannuksia inhimillisiin elinolosuhteisiin luomalla esimerkiksi uusia materiaaleja rakennusteollisuuden käyttöön. Tällaisten yhdisteiden syntetisoinnissa tulisi kiinnittää erityistä huomiota yhdisteen epätoivottuihin ominaisuuksiin sekä mahdollisiin valmistuksessa syntyviin epäpuhtauksiin. Hyvin pienikin määrä epäpuhtautta voi aiheuttaa uhkan terveydelle, jos sen myrkyllisyys on esimerkiksi miljoonakertainen syntetisoitavaan yhdisteeseen verrattuna. (Jacob & Walters 2005.) Uuden synteesin eettisyyttä pohdiskeltaessa tulisi aina pohtia myös yhdisteen mahdolliseen käyttöön liittyviä riskejä. Näihin riskeihin on pyritty yhteiskunnan tasolta vaikuttamaan esimerkiksi monenlaisilla laeilla ja säännöksillä sekä ylläpitämällä tietokantoja teollisessa käytössä olevista kemikaaleista. Esimerkkinä työn alla olevista asetuksista voidaan mainita EU:n REACH-asetusluonnos, jolla säädetään lupamenettely uusien kemikaalien käyttöönotolle sekä rekisteröintikäytäntö niiden käyttöön liittyvien riskien kirjaamiseksi. EU:n alueella suuressa määrin tuotetuista kemikaaleista riskien arviointiin tarvittava tieto on valtaosin vähäistä tai puuttuu kokonaan 86 % kemikaaleista (Allanou et al. 2003).

Syntetisoiva kemisti ei tieteenkään ole ainoa, joka kantaa vastuuta uusien yhdisteiden aiheuttamista haitoista. Esimerkiksi tulokset julkaisevalla julkaisulla, aineen tuottajilla ja käyttäjillä sekä yhteiskunnalla lakien ja asetusten asettajana on luonnollisesti vastuu omasta toiminnastaan. (Jacob & Walters 2005.) Etenkin uusien yhdisteiden luontiin liittyy paljon vaikeasti ennustettavia riskejä. Lähes kaikki inhimillinen toiminta sisältää kuitenkin riskejä ja ihmiset näkevät riskit eri tavoin. Jotta tieteenteko olisi ylipäänsä mahdollista, riskejä arvioitaessa on otettava huomioon haitallisten vaikutusten todennäköisyys ja vakavuus sekä oltava valmis ottamaan riskejä, jos todennäköiset hyödyt ylittävät todennäköiset riskit. (Del Re 2001.) Uusia aineita syntetisoiva kemisti ei voi kuitenkaan ulkoistaa vastuuta vaikkapa työnantajalleen tai tiedeyhteisölle, koska lähes jokaisella uusien yhdisteiden luonnin parissa työskentelevällä lienee vapaus tehdä myös jotain muuta tai työskennellä jonkin muun asian parissa. Kemisti on itsenäinen toimija, jolla on henkilökohtaista vastuuta myös työnsä välillisistä seurauksista. (Schummer 2001b.)

Riskien lisäksi uusia aineita syntetisoivien kemistien ja kemistien yleisemminkin olisi huomioitava myös oikeudenmukaisuuden käsite. Jos halutaan lisätä koko ihmiskunnan hyvinvointia, tulisi inhimillisten elinolosuhteiden parantumisen kohdistua erityisesti niille, jotka joutuvat elämään puutteessa. Esimerkiksi pienen etuoikeutettujen ryhmän elämänlaatua nostavien kalliista huipputeknologiaa kehittävien tutkimusten sijaan pitäisi keskittyä yleisempää hyvää tuottaviin tutkimusprojekteihin. Koska yksittäinen toimija voi tehdä vain oman osansa, päävastuun kantaa kuitenkin tieteellinen yhteisö ja yhteiskunta. (Schummer 2001b.)

2.4.3 Tutkijan ja yhteiskunnan välinen suhde

Jeffrey Kovac (2006, 163–165) kuvaa tieteen ja yhteiskunnan suhdetta vaihtokaupan kaltaisena sopimuksena, jossa yhteiskunta takaa tieteentekijöille ammattiryhmänä yksinoikeuden ammatinharjoittamiseen ja edellyttää heiltä vastineeksi tieteellistä tietoa ja mahdollisuuksia sen soveltamiseksi esimerkiksi tekniikassa ja lääketieteessä. Tieteellisen tiedon episteeminen asema liittyy läheisesti tieteen etiikkaan, koska tieteellisen tiedon tuottaminen vaatii tutkijoilta luottamusta toisiinsa ja tieteellisen tiedon hyödynnettävyys tiedon soveltajien luottamusta tuotettuun tietoon. Nykyaikaisessa pitkälle erikoistuneessa tieteessä sivistyneenkin maallikon on hyvin usein luotettava todella sokeasti tutkijoiden tuottamaan tietoon. Tämä asiantuntija-asema tuo tiedemiehille ja tiedeyhteisölle erityistä vastuuta.

Tieteelliseen tiedon luotettavuus syntyy siitä, että tieteellinen yhteisö toimii tiettyjen periaatteiden mukaan, joilla varmistetaan tiedon mahdollisimman suuri paikkansapitävyys. Tieteen tekemisen säännöt ovat kehittyneet ajan myötä. Robert K. Mertonin (1973) mukaan tieteessä on kuitenkin neljä yleistä peruseriaatetta, joiden tulisi ohjata hyvää luonnontieteellistä tutkimusta. Ensimmäinen periaatteista on universalismi (*universalism*), jonka mukaan totuusväitteiden arviointiin tulee käyttää ennalta asetettuja objektiivisiä kriteereitä. Toinen periaate on tulosten julkisuuden vaatimus eli yhteisöllisyys (*communism*). Kolmas periaate on intressittömyys (*disinterestedness*), jonka mukaan tutkijan ei pitäisi antaa intressiensä ja epätieteellisten pyrkimystensä vaikuttaa tieteen kehitykseen. Neljännen periaatteen organisoidun skeptismin (*organized skepticism*) mukaan tieteellisen totuuden tulee olla aina avoin uusille todistusaineistoille ja tieteentekijöiden myöntää tieteen

väliaikainen luonne. Tieteen yleisten normien lisäksi kullakin tieteenalalla voidaan nähdä myös omia kriteereitä hyvälle tutkimukselle. (Kovac 2006, 160–161.)

Kemia on koko olemassaolonsa ajan ollut erityisen kiinnostunut käytännön sovellusten luomisesta (Schummer 2001b). Valtionjohtajat näkevätkin tieteelliseen tutkimukseen käytetyt resurssit usein sijoituksena kansainväliseen kilpailukykyyn (Stokes 1997, 5). Tieteen ja yhteiskunnan suhteen erityinen asema on käyttökelpoisia sovellutuskohteita synnyttävällä soveltavalla tutkimuksella. Donald Stokesin (1997, 70–75) mukaan tieteen jakaminen vain yksin tieteellisestä mielenkiinnosta tehtyyn perustutkimukseen ja käyttökelpoisia sovellutuksia tuottavaan soveltavaan tutkimukseen ei ole järkevää. Stokes esittelee oman nelikenttämallinsa, jossa tutkimus voidaan sijoittaa nelikenttään sen mukaan ollaanko tutkimuksessa kiinnostuneita tulosten käyttökelpoisuudesta ja tavoitellaanko tutkimuksella ilmiön tai tutkimuskohteen perimmäistä ymmärrystä. Stokes nimeää tieteellisen tutkimuksen kannalta keskeisimmät kentät kuuluisien tiedemiesten ja heidän tutkimustensa mukaan. Stokesin nelikenttämallin kentät on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Stokesin (1997) nelikenttämalli tieteellisestä tutkimuksesta:

		Kiinnostus tutkimustulosten käyttökelpoisuudesta?	
		<i>Ei</i>	<i>Kyllä</i>
Tavoitellaanko tutkimuksessa perimmäistä ymmärrystä?	<i>Kyllä</i>	Puhdasta perustutkimusta (Bohr)	Käytön inspiroimaa perustutkimusta (Pasteur)
	<i>Ei</i>		Puhdasta soveltavaa tutkimusta (Edison)

Lääketieteen ja teollisuuden käytännön sovellusten inspiroimaa tieteellisesti perustavanlaatuisista mikrobiologista perustutkimusta tehneen Louis Pasteurin mukaan nimetyssä kentässä sijaitsee suuri osa nykyistä kemian tutkimusta (Kovac 2006, 164–165).

Davis Baird (1997) näkee luonnontieteellisessä tutkimuksessa kahdenlaista taloutta: taiteentutkija Lewis Hyden esittelemää lahjataloutta (*gift economy*) sekä vaihtoon perustuvaa hyödyketaloutta (*commodity economy*). Idealisoiduissa tiedekäsityksissä tutkijat voidaan nähdä lahjatalouden toimijoina, jotka julkaisevat tuotoksensa tiedeyhteisölle odottamatta taloudellista vastinetta. Lahjatalouden periaatteen mukaisesti tieteessä ne toimijat, jotka antavat eniten käyttökelpoisten ideoiden ja mallien muodossa, ovat kaikkein arvostetuimpia. (Kovac 2001.) Tieteen tekeminen vaatii kuitenkin nyky-yhteiskunnassa resursseja, joiden hankkimiseksi puhdasta perustutkimusta tekevienkin tutkijoiden on toimittava myös hyödyketalouden ehdoin (Baird 1997). Taloudellisten etujen ohjausvaikutus tieteeseen voidaan nähdä uhkana esimerkiksi tieteellisen julkisuuden peruseriaatteelle (Merton 1973), jos tutkimuksen rahoittajat eivät kaupallisten etujen menetyksen pelossa halua tutkijan julkaisevan tutkimustuloksia. Erityisen suuri vaikutus lahja- ja hyödyketalouden ristiriidan luomilla jännitteillä on kemiassa, joka on kenties kaikkein käytännönläheisin luonnontiede ja jossa myös perustutkimus on varsin usein käytännön sovellusten inspiroimaa. Tieteellisen tutkimuksen kaupalliselle hyödyntämiselle on etsitty rajoja yhteiskunnallisen päätöksenteon avulla, esimerkiksi patentti-lainsäädännön kautta. Esimerkiksi geenien patentointi on saanut aikaan varsin vilkasta yhteiskunnallista keskustelua. (Kovac 2006, 160–167.)

Taloudelliset seikat vaikuttavat myös tutkimuskohteiden valintaan. Yliopistollisen tutkimuksen riippuvuuden ulkopuolisesta rahoituksesta kasvaessa on yhä vaikeampi saada rahoitusta tutkimukselle, joka ei tuota taloudellista voittoa. Tämä voi estää paitsi puhdasta perustutkimusta myös tutkimuksia, joiden päämääränä olisi kehittää puutteenalaisten elämää. Tutkimuksen suuntautuminen pienen etuoikeutettujen ryhmän elämänlaatua nostavien kalliista huipputeknologiaa kehittäviin tutkimuksiin voidaan nähdä oikeudenmukaisuuden valossa varsin arveluttavana. Vaikka tutkijat uskoisivat toisin, tutkimuskohteen valinta on aina myös eettinen päätös. (Kovac 2001.)

3 KEMIAN OPETUKSEN TAVOITTEET

Tavoitteet ohjaavat kaikkea opetusta. Voidakseen arvioida ja ymmärtää opetusta, täytyy omata selkeä kuva sen tavoitteista. Osborne (2000, 225–226) vertaa tavoitteetonta opetusta laivaan ilman peräsintä, joka ajelehtii ilman päämäärää. Suomessa, kuten muissakin Pohjoismaissa, opetusministeriö on pyrkinyt takaamaan opetuksellista yhtenäisyyttä, laatua ja tasa-arvoa yhteisillä opetussuunnitelmien perusteilla (Opetushallitus 2003 ja 2004), joilla määrätään opetuksen keskeiset tavoitteet. Tutkittaessa eri puolilla maailmaa käytettäviä opetussuunnitelmia voidaan huomata, että perusopetus keskittyy kaikkialla kolmeen perusvalmiuteen: äidinkielen, matematiikkaan ja luonnontieteisiin. Tuntikehyksissä ja opettajankoulutuksessa luonnontieteiden opetukseen käytetään yleensä eniten aikaa äidinkielen ja matematiikan jälkeen. (Sjøberg 2000, 154.)

Koulujen opetussuunnitelmat ovat Suomessa kehittyneet peruskoulu-uudistuksesta lähtien Lehrplan-tyyppisistä sisältöluettelomaisista suunnitelmista tavoitepainotteisemmiksi. Vaikka tavoitteet yhä määritellään opetussuunnitelmissa myös ainekohtaisesti, opetussuunnitelmaa suunniteltaessa on yhä enemmän otettu huomioon myös yleistavoitteet. Tavoitteisto muodostuu kussakin oppiaineessa laajaksi ja moniulotteiseksi kokonaisuudeksi. Erityisen ongelmallinen on taitojen osuus, joka tarkastelun helpottamiseksi voidaan jakaa osa-alueisiin eli tavoiteavaruuden dimensioihin, joita ovat esimerkiksi ajattelu- ja päättelytaidot, laboratorio- ja kenttätyöskentelytaidot, ihmissuhdetaidot sekä itsenäisen persoonallisuuden taidot. (Meisalo & Lavonen 1994, 8–11.)

3.1 Opetuksen päämäärät

Luonnontieteiden opetussuunnitelmissa on läpi historian tunnistettavissa kolme suuntaa: käytännöllinen sovellutuksia painottava, yleistä sivistystä painottava sekä teoreettinen yliopistollisen oppiaineen merkitystä painottava. Eri painotusten merkitys on vaihdellut sen mukaan, mitä pidetään luonnontieteiden opetuksen päämääränä. (Matthews 1994, 11–25.) Esimerkiksi teoreettisen yliopistollisen oppiaineen merkitystä painottavassa opetuksessa perusasteen opetuksessa opettajien voidaan olettaa keskittyvän sisältöihin painottuvaan opetukseen, joka ensisijaisesti antaa

oppilaille valmiuksia jatko-opintoihin. Vaikka yleistä sivistystä ja käytännön sovelluksia painottavan luonnontieteellisen yleissivistyksen (*scientific literacy*) osuutta luonnontieteellisessä osaamisessa on painotettu, esimerkiksi eurooppalaisessa PISA-tutkimushankkeessa (Reinikainen 2002, 57–58), Espanjassa tehdyn tutkimuksen mukaan monet opettajat korostavat yhä valmiuksia jatko-opintoihin (Vilches et al. 2003). Jatko-opintoihin suuntaavassa opetuksessa opettajat voivat toteuttaa opiskelijavalitsijan roolia pitämällä kemiaa tieteenä, jota vain osa oppilaista voi ymmärtää. Ajattelutapa saa opettajat huolestumaan oppilaiden osaamisen lähtötasosta ja suuntaa opetuksen tavoitteita seuraavan kouluasteen vaatimia tietoja korostavaksi hyvään luonnontieteelliseen yleissivistykseen pyrkimisen sijaan. Loogisesti ajateltuna tällaisessa tavoitteenasettelussa opetuksen perimmäisenä kohteena ja päämääränä voidaan nähdä koulutusputken päästä valmistuvat tiedemiehet. (Vilches et al. 2003.)

Klassinen näkökulmaero opetuksen päämääristä on instrumentaalisen hyötynäkökulman (*instrumentell perspektiv*) ja sivistysnäkökulman (*bildningperspektiv*) välinen. Instrumentaalisisissa argumenteissa luonnontieteiden opetusta perustellaan erilaisin yhteiskunnallisin tai henkilökohtaisin hyödyin. Luonnontieteiden opetuksen sivistysnäkökulman mukaisissa perusteluissa luonnontieteellisten tietojen välittämällä nähdään itseisarvoa. (Sjøberg 2000, 161–177.) Luonnontieteiden opetuksen tarkoitusta voidaan perustella ainakin neljällä perustelulla, joista kaksi ensimmäistä korostavat enemmän instrumentaalista hyötynäkökulmaa ja viimeinen on selvästi sivistysnäkökulman mukainen (Millar 1996; Sjøberg 2000, 161–177; Osborne 2000, 226–230):

i) Taloudellisen hyödyn perustelu (*economic argument, ekonomiargument*)

Taloudellisen hyödyn perustelu argumentoi tutkimus- ja teknologiavetoisen yhteiskunnan tarvitsevan tulevaisuudessa tieteen ja teknologian osaajia. Perustelun mukaan perusopetuksessa annettava tiedeopetus luo pohjaa tuleville opinnoille ja innostaa luonnontieteiden tai tekniikan jatko-opiskeluun. Taloudellisen hyödyn perustelua voidaan kritisoida etenkin yleissivistävästä koulutuksesta puhuttaessa. Vain pieni osa opiskelijoista lähtee opiskelemaan teknistä tai luonnontieteellistä alaa. Onko tehokasta panostaa koko ikäluokan kouluttamiseen, jos vain ydinjoukolla on tarvetta opituille tiedolle ja taidoille?

Iso-Britannian Tiede- ja teknologiainstituuttien neuvoston (*Council of Science and Technology Institutes*) tutkimuksen mukaan vain noin 12 % työväestöstä on työssä, jossa pääosa työstä liittyy luonnontieteisiin tai luonnontieteillä on työssä oleellinen osa, kuten laboranteilla ja sairaanhoitajilla. Tutkimustyötä tekevienkin keskuudessa osaamista tarvitaan varsin tarkasti rajatulta alueelta ja haastatteluissa tutkijat korostivat lähinnä menetelmällisten tulkinta- ja ryhmätyötaitojen sekä suullisen ja kirjallisen viestinnän taitojen merkitystä. (Osborne 2000, 227–228.)

ii) Käytännöllisen hyödyn perustelu (*utilitarian argument, nyttoargument*)

Käytännöllisen hyödyn perusteluita ovat argumentit, joiden mukaan tiedeopetus antaa nykymaailmassa toimimiseen tarvittavia taitoja ja tiedeopetuksessa opittuja taitoja voi soveltaa jokapäiväisessä elämässä. Tekniikan pohjalla oleva luonnontieteellinen tieto voidaan nähdä välttämättömäksi teknistyvässä maailmassa toimeen tulemiseksi. Luonnontieteiden osaaminen mahdollistaa teknologian järkevän käytön, hälventää turhia pelkoja ja suojaa ihmistä esimerkiksi erilaisilta pseudotieteellisiltä huijauksilta. Käytännöllisen hyödyn perustelu on myös argumentti, jonka mukaan tiedeopetus on tärkeää, koska se opettaa muillakin elämänaloilla hyödyllisiä järjestelmällisen havainnoinnin ja rationaalisen päättelyn taitoja. Luonnontieteen opettamat taidot auttavat perustelun mukaan tekemään rationaalisia valintoja esimerkiksi erilaisia kulutus päätöksiä tehtäessä.

Argumentit ovat kuitenkin kiistanalaisia. Erilaisten laitteiden teknologinen kehittyminen on mahdollistanut niiden käytön ilman tietämystä niiden toimintaperiaatteista. Suunnittelijat pyrkivät tekemään laitteista mahdollisimman helppokäyttöisiä. Tarvittavaa taitoa ja välineitä useimpien teknisten laitteiden, astianpesukoneista mobiilipäätelaitteisiin, korjaamiseen on enää harvalla. Tieteellisen tiedon hyödyllisyys arkipäivän valinnoissa, kuten oikeanlaisen ruokavalion noudattamisessa, ei sekään välttämättä toteudu ihmisten tehdessä arkielämän valintoja (Merron & Lock 1998). Koska tieteelliset mallit ovat yksinkertaistuksia ja kontekstisidonnaisia, ei tietojen soveltaminen käytännössä ole aina helppoa tai edes järkevää. Voidaan varsin oikeutetusti kysyä, ovatko tiedemiehet maallikkoja parempia havainnoijia tai rationaalisempia toimijoita siviilielämässään. Valtaosa ihmisistä

selittää kohtaamansa käytännölliset ilmiöt arkikäsitystensä valossa, ja tieteellistä selitysmallia käytetään vain kysyttäessä tai luonnontieteen oppituntien kontekstissa. Monet tieteellisen selitysmallin vastaiset arkikäsitukset voivat toimia käytännön elämän kontekstissa täysin riittävästi.

Käytännöllisen hyödyn argumentin valossa tiedeopetuksen tavoitteita ovat lähestyneet Duggan ja Gott (2000), jotka ovat selvittäneet tutkimuksessaan *What sort of science education do we really need*, millaista tieteellistä tietoa ihmiset tarvitsevat koulunsa päätettyään yhteiskunnallisina toimijoina ja jokapäiväisessä elämässään. He jakoivat tiedon kahteen kategoriaan: menetelmälliseen (*procedural*) ja käsitteelliseen (*conceptual*). Tuloksia tulkittiin näiden kategorioiden valossa. Valtaosa tutkittujen käsitteellisen tason tiedoista oli hankittu koulun päätyttyä. Ihmiset oppivat tarpeelliset käsitteelliset tiedot työssään tai yhteisöllisissä ja henkilökohtaisissa asioissa ottivat selvää asiaan liittyvistä käsitteistä esimerkiksi Internetin kautta. Jotkin menetelmälliset tiedot, kuten oikean mittauslaitteen valinta sekä toistettavuuden ja tarkkuuden ymmärtäminen, olivat taitoja, joita erityisesti kaivattiin ja vaadittiin työelämässä. Yhteisöllisissä ja henkilökohtaisissa kysymyksissä erityisesti todennäköisyyden ja epävarmuuden määrittämisen taidot osoittautuivat tärkeiksi. Tutkimuksen tulosten mukaan koulun kannattaisi korostaa menetelmällistä ymmärrystä käsitteellisen tiedon sijaan. Duggan ja Gott ehdottavatkin tiedollisen sisällön vähentämistä, jotta jäisi enemmän aikaa opettaa oppilaat ymmärtämään luotettavuuden, pysyvyyden ja todennäköisyyden käsitteitä. Menetelmällinen osaaminen edellyttää tieteenfilosofista ymmärrystä siitä, kuinka tieteellistä tietoa tuotetaan ja testataan (Matthews 1994, 3).

Käsitteellisen tiedon yksipuolinen korostaminen voi olla ongelma myös kasvatusfilosofiselta kannalta. Jos oppilaat eivät tunne tiedon arviointiperusteita ja heidän valmiuksiaan arvioida tiedon pätevyyttä ei kehitetä, oppilaat eivät opi itsenäisesti arvioimaan erilaisia teorioita ja uskomuksia. Tällöin oppilaat jäävät väärän tiedon ja indoktrinaation armoille. Luonnontieteiden opettajan olisi indoktrinaation välttämiseksi huomioitava opettamansa aineen maailmankatsomukselliset, moraaliset ja poliittiset kytkennät sekä selkeyttää opetettavan järjestelmän sisäinen rakenne ja arviointiperusteet, jotta oppilaat osaisivat arvioida uskomusten pätevyyttä. Jos nämä asiat jätetään opetuksen ulkopuolelle, oppilailta viedään mahdollisuus arvioida

oppimaansa maailmankatsomuksellisessa viitekehyksessä. (Puolimatka 1995, 140–141.) Indoktrinaatiosta seuraava älyllisen itsenäisyyden puute voidaankin nähdä vaarana sekä henkilökohtaisella että yhteiskunnallisella tasolla.

iii) Demokratiaperustelu (*democratic argument, demokratiargument*)

Opetushallituksen asettama Tiede ja yhteiskunta -työryhmä toteaa muistiossaan (Opetusministeriö 2004): ”*EU:n kuudennessa puiteohjelmassa korostetaan muun muassa, että tieteeseen perustuva päätöksenteko on tuotava kansalaisten lähelle ja että tieteen asemasta ja menetelmistä on käytävä avointa keskustelua. Demokraattinen järjestelmämme perustuu kansalaisten aktiivisuudelle ja halulle vaikuttaa oman elämänsä ehtoihin. Järjestelmä itse asiassa jopa edellyttää toimiakseen tietäviä ja kriittisiäkin kansalaisia. Tietävä kansalainen on kykenevämpi osallistumaan yhteiskunnalliseen keskusteluun sekä arvioimaan kehitystä ja tulevaisuuden valintoja.*”

Demokraattisen yhteiskunnan ihanteen mukaan ihmiset ovat itsenäisiä toimijoita, joilla on mahdollisuus vaikuttaa omiin elinolosuhteisiinsa. Monet tärkeät yhteiskunnalliset kysymykset, kuten ympäristö- ja terveydenhuoltokysymykset, liittyvät monin tavoin luonnontieteisiin. Kun tutkimus erikoistuu yhä pidemmälle, ihmiset joutuvat päätöksiä tehdessään luottamaan yhä useammin asiantuntijoihin ja heidän näkemyksiinsä. Demokratiaperustelun mukaan luonnontieteellinen osaaminen on välttämätöntä vastuullisten päätösten tekemiseksi. Vaikka tiedemiehillä on vastuuta tutkimustyöstään ja sen tuloksista, myös yhteiskunnalla ja sen jäsenillä demokraattisina päätöksentekijöinä on vastuuta tieteestä, koska yhteiskunta rahoittaa tiedemiesten työtä.

iv) Kulttuuriperustelu (*culture argument, kulturargument*)

Kulttuuriperustelun mukaan luonnontieteet ovat yksi ihmiskunnan tärkeimpiä kulttuurillisia saavutuksia ja sellaisena tärkeä osa ihmiskunnan kulttuurista perintöä. Luonnontieteillä on valtava merkitys nykypäivän ihmisten maailmankuvaan. Ne ovat uudelleenmääritelleet paikkamme universumissa, muuttaneet käsitystämme ihmisyydestä, määritelleet suhdettamme uskontoihin ja luontoon, vaikuttaneet

taiteeseen ja käyttämiimme kieliin sekä luoneet pohjaa teknologiselle kehitykselle (Sjøberg 2000, 39–54). Luonnontieteiden ymmärtäminen osana kulttuuria vaatii keskittymistä tieteen inhimilliseen dimensioon, esimerkiksi tieteen historiaan, sen synnyttämiin ristiriitoihin ja luonnontieteellisen tutkimuksen periaatteisiin (Osborne 2000, 229). Myös tieteenteon periaatteet, arvot ja eettisyys sekä tieteeseen liittyvä yhteiskunnallinen keskustelu ovat osa kulttuuria. Kulttuuriperustelulla on hyvin läheinen yhteys demokratiaperusteluun.

Voidaan tietenkin kysyä, kuka määrittelee, mikä osa kulttuurillista perintöämme on arvokasta ja säilyttämisen arvoista. Kuuluuko päätöksenteko vanhemmille, kunnille vai valtiolle? Mikä on tieteentekijöiden, tiedeopettajien, kasvatustieteilijöiden ja vaikkapa oppilaiden rooli tässä päätöksenteossa? Nämä ovat tärkeitä kysymyksiä, joihin törmätään usein opetussuunnitelmallisia päätöksiä tehtäessä. (Matthews 1994, 2.)

Neljän erilaisen perustelun lisäksi opetussuunnitelman tavoitteet on yleisellä tasolla nähtävissä joko aine-, oppija- tai yhteiskuntakeskeisinä, sen mukaan missä kontekstissa tavoitteet perustellaan (Walker & Soltis 1997, 53–54). Perusteluista demokratiaperustelu on selvästi yhteiskuntakeskeinen pohtiessaan millaisia arvoja ja taitoja ihmiset tarvitsevat, jotta yhteiskuntaamme voidaan kehittää toivottuun suuntaan, esimerkiksi demokraattisempaan ja onnellisempaan. Esimerkiksi taloudellisen hyödyn perustelu voi olla oppijakeskeinen, jos se perustuu oppijan taloudellista menestykselle ja tarpeille, tai yhteiskuntakeskeinen, jos se perustuu koko yhteiskunnan menestykselle ja tarpeille.

3.2 Kemian filosofia ja opetuksen tavoitteet

Luonnontieteiden opettaja tarvitsee kolmenlaista osaamista (Matthews 1994, xii–xiv):

- § Opettajan tulee tuntea opettamansa tieteen keskeiset sisällöt eli teoriat ja menetelmät.
- § Opettajalla tulee olla pedagoginen näkemys, jonka valossa hän voi tehdä opetusmenetelmälliset päätöksensä.
- § Opettajan tulee ymmärtää opettamansa tieteen historiaa ja tieteenfilosofisia sitoumuksia ymmärtääkseen sitä ja osatakseen arvioida opetuksen tavoitteita.

Tieteenfilosofialla ja kemian filosofialla on keskeinen sija kemiassa – sen tavassa muodostaa ja perustella käyttämiään teorioita ja malleja sekä sen yhteiskunnallisissa ja eettisissä dimensioissa. Sibyl Erduran ja Eric Scerri (2002, 19) haluavat haastaa kapean määritelmän kemian osaamisesta. Käsitteellinen ymmärryksen tulisi sisältää myös kemian tavat luoda, arvioida ja uudistaa tietoa. Syvempi ymmärrys esimerkiksi kemiallisten selitysten luonteesta voisi lisätä opiskelijoiden ymmärrystä kemian keskeisistä käsitteistä.

Vaikka kemian historian merkitystä kemian opetukselle on tutkittu jonkin verran, kemian filosofian merkityksestä kemian opetukselle on kirjoitettu varsin vähän. Tähän on varmasti vaikuttanut se, että kemian filosofia on tutkimusalana aktivoitunut vasta muutama vuosi sitten. Kemian historian tutkimuksella on puolestaan pitkät perinteet. Se on löytänyt tiensä myös kemian opetuksen tavoitteisiin. (Erduran 2001, 581; Erduran & Scerri 2002, 10.) Kemian historiaa on tutkittu ja julkaistu myös Suomessa. Esimerkiksi John Hudsonin (2002) *Suurin tiede* on kattava yleisesitys kemian kehityksestä ja historiallisen lähestymistavan käyttöä kemian opetuksessa on tutkinut pro gradu -tutkielmassaan Terhi Ahonen (2005).

3.2.1 Luonnontieteiden luonne

Oppilaiden kanssa tulisi keskustella kemian ontologisista ja episteemisistä kysymyksistä kuten: ”Ovatko atomit oikeasti olemassa? Mistä voimme tietää, mitä kemiallisessa reaktiossa tapahtuu? Kuinka varmaa on tieteellinen tieto?” Kysymyksen, miten tiedämme, tulisi olla yhtä tärkeä kuin kysymyksen, mitä tiedämme. Luonnontieteiden episteemisen ymmärryksen pyrkivää tavoitetta ilmaistaan yleensä asettamalla tavoitteeksi luonnontieteiden luonteen (*nature of science*) ymmärtäminen. Yksi tiedeopetuksen tiedostettu ongelma on se, että tiedeopettajilla ei tunnu olevan riittävää käsitystä luonnontieteiden luonteesta. Opettajilta puuttuu luonnontieteiden opettamiseen vaadittavat tiedot luonnontieteen filosofiasta ja historiasta. (Collins et al. 2001, 5–6.)

Luonnontieteiden luonteen ymmärtäminen tiedeopetuksen tavoitteena voidaan perustella käytännön hyödyn, yhteiskunnallisin, kulttuurillisin ja moraalisiin perustein

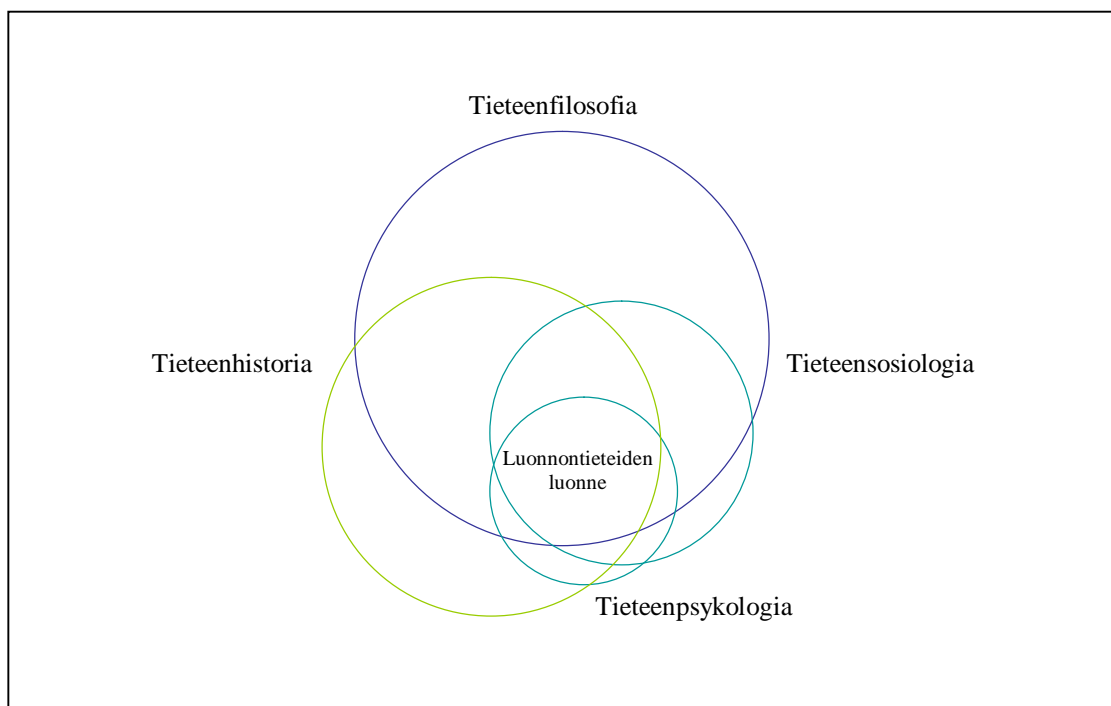
sekä tieteen sisällön oppimista edistävänä tavoitteena (Driver et al. 1996, 16–20). Parempi ymmärrys luonnontieteiden luonteesta on tavoittelemisen arvoinen kaikista neljästä Millarin (1996), Sjøbergin (2000) sekä Osbornen (2000) mainitsemasta eli taloudellisen hyödyn, kaupallisen hyödyn, demokratian ja kulttuurin näkökulmasta. Luonnontieteiden luonteen ymmärryksellä on suuri merkitys myös ihmisen suhtautumiselle tieteelliseen tietoon. Oleellista on ymmärtää, että useimmat tieteen teorioista ovat hyvin luotettavia, vaikka jotkin teorit osoittautuisivat ajan myötä virheellisiksi tai puutteellisiksi. Jos tiede nähdään totuuksien kokoelmana, koko rakennelma ja usko siihen saattaa romahtaa, jos yksi teoria osoittautuu virheelliseksi. Kun ihmiset ymmärtävät tieteellisen tiedon perustelut, he luottavat paremmin tieteeseen ja suhtautuvat realistisemmin sen tuloksiin. (McComas et al. 1998, 11–12.)

Luonnontieteiden luonteen ymmärtäminen nähdään yleisesti yhtenä luonnontieteiden opetuksen keskeisenä tavoitteena. Millainen sitten olisi riittävä ymmärrys luonnontieteiden luonteesta? Kasvatustieteellisissä tutkimuksissa käytettyjä määritelmiä luonnontieteiden luonteesta ovat muodostaneet lähinnä kasvatustieteilijät eivätkä tieteenfilosofit. Brian Alters (1997) tutki lomakekyselyllä 210 tieteenfilosofin näkemyksiä luonnontieteiden luonteesta ja löysi ainakin 11 erilaista tieteenfilosofista asennetta. Konsensusnäkemystä tieteenfilosofiaan ei Altersin mukaan löydy. Tieteenfilosofisia asioita tulisi hänen mukaansa opetuksessa lähestyä ilman käsitystä yhdestä oikeasta mallista. Vaikka tieteenfilosofiassa on monia varsin kiistanalaisia kysymyksiä, kuten kysymys teorioiden realismista, on kuitenkin lukuisia asioita, joista tieteenfilosofit ja luonnontieteen opetuksen tutkijat yksimielisiä. Altersin kuvaamasta näkemysten moninaisuudesta huolimatta, monien tutkimusten mukaan luonnontieteen opetuksen tutkijoiden keskuudessa vallitsee jonkinlainen konsensus siitä, mikä on oleellista luonnontieteiden luonteen ymmärryksessä. (Collins et al. 2001; Lederman 1992; McComas & Olson 1998.)

William McComas ja Joanne Olson (1998) tutkivat luonnontieteiden luonteen asemaa viiden englanninkielisen valtion kahdeksassa perusopetuksen opetussuunnitelmassa. He jakoivat luonnontieteiden luonnetta koskevat väitteet neljään ryhmään sen mukaisesti koskivatko ne tieteenfilosofiaa, -historiaa, -sosiologiaa vai -psykologiaa. He tulkitsevat, että luonnontieteiden luonne sijaitsee näiden tutkimustraditioiden leikkauspisteessä kaavion 4 mukaisesti. Jaottelu ei tietenkään ollut ongelmaton.

Esimerkiksi kysymys, miten tieteelliset teoriat muuttuvat, on sekä tieteensosiologinen että -filosofinen ja muutosta katsotaan usein tieteenhistorian näkökulmasta. Opetussuunnitelmissa ei ollut nähtävissä yhtä ja yhtenäistä näkemystä luonnontieteiden luonteesta. Opetussuunnitelmista löytyi kuitenkin paljon yhtäläisyyksiä. Kaikki opetussuunnitelmat käsittelivät luonnontieteiden luonteeseen liittyviä kysymyksiä ja pitivät niitä merkittävänä kysymyksenä luonnontieteiden opetuksessa.

Kaavio 4. Luonnontieteiden luonne neljän tiedonalan yhtymäkohdassa McComasin ja Olsonin (1998, 50) mukaan:



Norman Ledermanin (1992) mukaan luonnontieteiden luonteen käsitteellä viitataan yleensä tieteen epistemologiaan eli tieteellisen tiedon kehitykseen liittyviin arvoihin, uskomuksiin ja perusteluihin. Luonnontieteiden luonteen käsite liittyy läheisesti tieteenfilosofian, -sosiologian ja -historian käsityksiin luonnontieteellisen tiedon kehityksestä. 1900-luvun alussa luonnontieteiden luonteen ymmärrys nähtiin positivistisessa valossa ”tieteellisen metodin” ymmärtämisenä. Kuhnin, Lakatosin ja Laudanin tieteen käsitejärjestelmien muutoksia kuvaavat mallit muuttivat luonnontieteiden luonteen käsitettä (katso kappale 2.1.1). Luonnontieteellinen tieto nähdään nykyään muuttuvana käsitejärjestelmänä, johon vaikuttavat paitsi havainnot luonnosta myös sosiaaliset ja psykologiset tekijät. (Abd-El-Khalick & Lederman

2000, 667–668.) Keskeinen tekijä luonnontieteiden luonteen ymmärtämisessä on luonnontieteellisen tiedon alustavalla (*tentative*) luonteella. McComasin ja Olsonin (1998) tutkimissa kahdeksassa opetussuunnitelmassa luonnontieteellisen tiedon avoimuus tarkistuksille ja muutoksille oli tieteenfilosofisista näkemyksistä ainoa jokaisessa opetussuunnitelmassa mainittu. Tieteensosiologisista, -historiallisista ja -psykologisista näkemyksistä tieteen sosiaalinen luonne (*science is part of social tradition*) ja tieteenteon eettisyys (*scientists make ethical decisions*) mainittiin jokaisessa tutkitussa opetussuunnitelmassa. Lederman on kollegoineen koonnut kuusi oleellista väittämää luonnontieteiden luonteen ymmärtämisen ja opettamisen kannalta. Heidän mukaansa luonnontieteellinen tieto on (Lederman 2004, 304–308; Bell 2004, 430–431):

- a) alustavaa eli aina avoinna muutoksille ja tarkistuksille
- b) empiiristä eli luonnosta tehdyille havainnoille perustuvaa
- c) ainakin osin inhimilliselle päättelylle perustuvaa
- d) ainakin osin inhimilliselle mielikuvitukselle ja luovuudelle perustuvaa
- e) subjektiivista, koska havainnot tehdään ja tulkitaan aina sen hetken ja tutkimusta tekevän tiedemiehen näkökulmasta
- f) sidoksissa sosiaaliseen ja kulttuuriseen ympäristöön

Iso-Britanniassa järjestetyssä kolmivaiheisessa Delphi-tutkimuksessa (Collins et al. 2001) 25 asiantuntijan ryhmä osallistui ratkaisemaan kysymystä, mitä oppilaille tulisi opettaa luonnontieteiden luonteesta. Asiantuntijaryhmä koostui tiedemiehistä, tieteenfilosofoista ja -sosiologeista, tiedeopetuksen asiantuntijoista, tiedeopettajista sekä tieteen popularisoijista. Ensimmäisessä vaiheessa ryhmä kokosi tieteen kannalta tärkeitä ideoita sekä tieteen luonnetta kuvaavia piirteitä. Seuraavalla kierroksella tulokset koottiin teemoittain, joita selkeytettiin ja perusteltiin sekä lopulta arvioitiin kunkin teeman tärkeyttä. Tuloksista nousi yhdeksän teemaa, joiden sisällyttäminen opetussuunnitelmaan nähtiin tärkeänä. Tärkeimmäksi koetut teemat olivat (Collins et al. 2001.):

- Tieteelliset metodit ja kriittinen testaus (*Scientific methods and critical testing*)

Oppilaiden tulisi oppia miten tieteessä kokeellisesti testataan ideoita ja ymmärtää esimerkiksi muuttujien käyttöä. Tulisi myös ymmärtää, että yksi koe ei ole riittävä osoitus tietoväitteen pohjaksi.

- **Luovuus (*Creativity*)**
Oppilaiden tulisi ymmärtää luovuuden ja mielikuvituksen osuus tieteellisessä tutkimuksessa. Monien muiden ammattien tavoin hyvät tutkijat suhtautuvat työhönsä intohimoisesti ja siinä menestyminen vaatii usein inspiraatiota ja mielikuvitusta.
- **Tieteellisen tiedon historiallinen kehitys (*Historical development of scientific knowledge*)**
Oppilaille tulisi opettaa luonnontieteiden kehityksen historiallista taustaa.
- **Kysymyksenmuodostaminen tieteessä (*Science and questioning*)**
Oppilaiden tulisi ymmärtää tieteen rooli jatkuvasti uusia kysymyksiä asettavana ja niihin ratkaisuja hakevana toimintana.
- **Luonnontieteellisen ajattelun monimuotoisuus (*Diversity of scientific thinking*)**
Oppilaille tulisi opettaa, että ei ole yhtä ainoaa luonnontieteellistä metodia. Tutkijat käyttävät luonnontieteissä useita erilaisia tutkimus- ja lähestymistapoja.
- **Tulosten analysointi ja tulkinta (*Analysis and interpretation of data*)**
Oppilaiden tulisi ymmärtää, että tieteellinen tutkimus edellyttää tutkimustulosten tulkintaa ja analysointia. Tulokset eivät itsestään nouse havainnoista, vaan vaativat tiedemieheltä tulkintojen tekoa. Samoista havainnoista voidaankin päätyä kahteen eri teoriaan.
- **Varmuus tieteessä (*Science and certainty*)**
Valtaosa tiedosta, joka koulussa opetetaan, on perusteltua ja luotettavaa. Oppilaiden tulisi ymmärtää, että kaikki tieteellinen tieto ei ole yhtä varmaa. Se voi myöhemmin osoittautua epätarkaksi tai jopa vääräksi. Tällä hetkellä se on kuitenkin perustelluinta mahdollista.
- **Hypoteesit ja ennusteet (*Hypothesis and prediction*)**
Oppilaiden tulisi oppia kuinka tutkijat laativat hypoteeseja ja ennusteita ilmiöistä sekä ymmärtää niiden merkitys tieteelle.
- **Ryhmä- ja yhteistyön merkitys tieteellisen tiedon kehityksessä (*Cooperation and collaboration in the development of scientific knowledge*)**
Oppilaille tulisi opettaa tieteellisen työn olevan yhteisöllistä, kansainvälistä ja yhteistyöhön perustuvaa toimintaa. Tutkimuksen tulokset jaetaan yleensä tiedeyhteisölle, jossa ne arvioinnin myötä mahdollisesti hyväksytään.

3.2.2 Reduktiokysymyksen merkitys

Kemian redusoituminen fysiikkaan on kaikkea muuta kuin itsestään selvä asia (katso luku 2.2). Kemian opetuksessa kemiassa käytettävät käsitteet, kuten kemiallinen sidos tai yhdisteen rakenne, esitetään yleensä ilman sen syvempää filosofista pohdintaa niiden luonteesta tai suhteesta toisiinsa. Tästä syystä oppilaille jää usein käsitteistä epämääräinen kuva. Keskustelemalla reduktiosta voidaan vahvistaa ymmärrystä kemian käsitteistä. Reduktiokysymyksen pohdinta perustelisi opiskelijoille myös kemiallisen tiedon itsenäistä asemaa. Tieteellisen argumentaation taitojen edistämisen nähdään edistävän luonnontieteellistä ymmärrystä, sillä se on keskeisellä sijalla myös aidossa tieteellisessä keskustelussa (Osborne et al. 2001). Koska kemian redusoituminen fysiikkaan on yhä avoin kysymys, josta voidaan esittää perusteltuja näkemyksiä sekä puolesta että vastaan, aiheen käsitteleminen mahdollistaa myös tieteellisen argumentaation harjoittamista.

Reduktiosta sekä esimerkiksi orbitaalien ontologisesta luonteesta ja sen merkityksestä kemiallisissa selityksissä keskusteleminen tukisi ainakin korkeakoulutasoisessa opiskelussa kemiallisten käsitteiden ja selitysten ymmärrystä. (Erduran & Scerri 2002, 13–15.) Myös perus- ja lukio-opetuksessa olisi syytä ottaa esille kemian tapa kuvata asioita luokittelujen kautta ja sen ero fysiikan tapaan kuvata ilmiöitä lähinnä kvantitatiivisesti. Erityisen hyvin perusopetuksen tasolle soveltuva ontologinen lähestymistapa olisi käsitellä päältämistä (*supervenience*). Oppilaiden tulisi ymmärtää kemian atomien ja molekyylien submikroskooppisen maailman sekä havainnoitavan makromaailman ilmiöiden suhde (Erduran & Scerri 2002, 17–18). Esimerkiksi kemiallisilla yhdisteillä on niille tyypillinen haju, mutta makromaailmassa tietynlaisena havaittavan tuoksun voi aiheuttaa jokin muukin kemiallinen yhdiste.

3.2.3 Kemiallisten mallien asema opetuksessa

Kemian kielessä sanat ja käsitteet määritellään toisin kuin arkikielessä. Konstruktivistisessa tiedeopetuksen tutkimuksessa puhutaan paljon oppilaan arkikäsitteistä sekä siitä, miten ne eroavat tieteellisistä käsityksistä. Käsitteiden erilaiset määritelmät aiheuttavat esteitä oppimiselle. Tehtäessä tutkimusta oppilaiden arkikäsitteistä ja niiden vaikutuksesta opetukseen tulisi

muistaa, että kemian määritelmä käsitteelle on oikea kemian kontekstissa. Arkipäivän tai jonkin muun tieteenalan kontekstissa käsite voidaan määritellä toisin. Käsitteellä voi olla siis useita merkityksiä. Sen sijaan, että pyrittäisiin korvaamaan kaikki arkikäsitusten merkitykset kemian merkityksillä, tulisi opettaa, kuinka käsitteitä käytetään eri tavoin eri konteksteissa. (Matthews 1994, 131.)

Jos opetetaan tieteessä käytettäviä lakeja ja teorioita käsittelemättä sitä, mitä tarkoitetaan lailla ja teoriolla sekä minkälaista todistelua käytetään niiden muodostamisessa, voidaan tuskin puhua todellisen ymmärryksen luontiin pyrkivästä opetuksesta. Kysymykset kemiassa käytettävien mallien luonteesta ovatkin tärkeitä todellisen ymmärtämisen kannalta. Opettajien tulisi pystyä paitsi esittämään malli oppilaiden ymmärtämällä tavalla myös kertomaan, miksi malli on ylipäänsä tarpeen ja miten se on perusteltu. (Erduran 2001, 587; Matthews 1994, 3–4.) Opetuksessa ei yleensä käytetä suoraan nykyisiä konsensusmalleja tai edes historiallisia malleja, vaan opetuskäyttöön tehtyjä opetusmalleja. Hyvältä opetusmallilta vaaditaan kuitenkin varsin paljon. Sen tulisi säilyttää konsensusmallin rakenne, ottaa huomioon oppilaan arkikäsitukset ja -mallit sekä osoittaa mallien ja tieteellisen tiedon dynaaminen ja kehittyvä rakenne. Tieteellisiä malleja on luotu, arvioitu ja muutettu läpi kemian historian. Kun unohdetaan mallien antaman selityksen merkitys historiallisessa kontekstissa, oppilaat eivät ymmärrä, mihin malli on aikanaan luotu ja mitä rajoituksia mallilla on. Opettajien ja oppikirjojen käyttämä historiaton lähestymistapa johtaa oppilaita muodostamaan hybridimalleja, joissa oppilaat selittävät ilmiötä usean mallin yhdistelmällä, käsittämättä näiden mallien rajoituksia. (Justi & Gilbert 1999, 164–174; Erduran 2001, 586.)

Esimerkkinä kemian mallien kehitymisestä voidaan pitää vaikkapa erilaisten kemiallisen reaktiokinetiikan mallien historallista kehitystä. Kemiallisen reaktion luonnetta ja sen nopeutta on selitetty hyvin erilaisin mallein kemian historiassa. Malleissa on kiinnitetty huomiota lähtöaineiden, välivaiheiden ja tuotteiden energiaan, reaktionopeuteen, katalyyysin vaikutukseen sekä molekyytilason reaktiopolkuun. Rosario Justi ja John Gilbert (1999) analysoivat reaktiokinetiikan historiallisia malleja löytäen kahdeksan toisistaan eroavaa mallia. Antropomorfinen (*antropomorphic*) malli kuvasi kemiallista muutosta siihen osallistuvien aineiden valmiudella reagoida toistensa kanssa. Rakenteellisen affiniteetin (*affinity*

corpuscular) malli korosti atomisen affiniteetin roolia reaktioissa. Ensimmäinen kvantitatiivinen (*first quantitative*) malli lähti reaktiokinetiikan matemaattisesta käsittelystä ja esitteli aineiden suhteellisten osuuksien merkityksen kemiallisissa reaktioissa. Mekanistinen (*mechanistic*) malli ryhtyi hahmottelemaan erillisiä vaiheita kemiallisessa reaktiossa. Termodynaaminen (*thermodynamic*) malli kohdisti huomion reagoivien aineiden molekyylien riittävän eli kriittisen energian omaaviin törmäyksiin. Kineettinen (*kinetic*) malli esitteli ajatuksen molekyyleistä liikkuvina kiinteinä ja pallomaisina objekteina, joiden törmäystaajuus määrittää reaktionopeuden. Tilastollisen mekaniikan (*statistical mechanics*) malli pyrki selittämään kemiallista muutosta tilastollisen mekaniikan avulla kuvaamalla molekyylin liikettä vaiheavaruudessa, jonka muuttujat ovat molekyylien välinen etäisyys ja niiden liikemäärä. Siirtymätilamalli (*transition state model*) toimi linkkinä kineettisen ja termodynaamisen mallin välillä yhdistämällä konsentraation ja reaktionopeuden käsitteet.

Myös happo-emäsreaktioita selittäviä historiallisia malleja on ollut useita Arrheniuksen vety- ja hydroksidi-ioneihin perustuvasta teoriasta, Brønstedin ja Lowryn ionien vastaanottoon perustuvaan teoriaan sekä Lewisin elektronien luovuttamiseen ja vastaanottoon perustuvaan teoriaan. Happo-emästeorioiden historiallista kehitystä ja niiden vaikutusta opetukseen on kuvannut esimerkiksi Erduran (2001, 585–586), Ahonen (2005, 50–54) ja Varama (2003).

Erduran (2001, 587–589) määrittelee viisi opetuksen trendiä, jotka estävät oppilaita ymmärtämästä kemiallisten mallien luonnetta:

- i) Mallit tavataan esittää lopullisina ja täydellisinä kuvauksina kuvatuista ilmiöistä tai olennoista. Malleja käytetään opetuksessa yleensä erottelemaan käsitteitä toisistaan, kuten vaikkapa paino tiheydestä. Mallien luonnin, arvioinnin ja uudistamisen takana olevat motiivit, strategiat ja perustelut unohdetaan usein liian helposti.
- ii) Kemian opetuksessa ei tarpeeksi selvästi erotella eri malleja toisistaan tai käytetään harkitsemattomia hybridimalleja. Oppilaat eivät siksi ymmärrä mallien eroja ja rajoituksia.
- iii) Kemialliset mallit samaistetaan liikaa konkreettisiin pallotikkumalleihin. Konkreettisten mallien käyttöä perustellaan esimerkiksi piagetilaisiin

kehityspsykologisin perustein. Niiden mukaan konkreettisten operaatioiden tasolla oleva oppilas tarvitsee konkreettisia malleja ymmärtääkseen kemiallisia muutoksia. Konkreettiset mallit kuvaavat kuitenkin käsitteellistä tietoa, joten niiden koko olemus on selvästi käsitteellisten operaatioiden tasolla. Lisäksi ajatus siitä, että konkreettiset mallit ovat erityisen tärkeitä nimenomaan konkreettisten operaatioiden tasolla oleville nuorille oppilaille, on kyseenalaistettavissa, koska myös kemian tutkijat käyttävät konkreettisia malleja ymmärryksensä tukena ja viestiessään malleja toisilleen. Konkreettisten mallien yksinomainen käyttö ei myöskään ota riittävästi huomioon erilaisten mallien ja niihin liittyvien erilaisten rajoitusten moninaisuutta.

- iv) Teoreettista käsittelyä painotetaan liikaa ja liian aikaisin, esimerkiksi kuvaamalla ongelmat aina perimmiltään kvanttikemiasta laskennallisesti ratkaistavina ymmärtämättä kvanttikemian mallienkin olevan approksimatiivisia.
- v) Kokeellisuutta ei liitetä kemiallisten mallien luontiin, arviointiin ja uudistamiseen, vaan sitä käytetään lähinnä oppitunnilla opetetun mallin todistamiseen.

Oppilaiden käsitykset malleista voidaan jakaa kolmelle tasolle. Ensimmäisellä tasolla oppilas ajattelee malleja leikkikaluna tai todellisuuden kopioina, jotka voivat olla epätäydellisiä, jos ne on tarkoituksella suunniteltu sellaisiksi. Toisella tasolla mallit nähdään tiettyyn tarkoitukseen tuotetuiksi todellisuuden kuvauksiksi, joissa todellisuuden eri osat voivat olla korostetusti esillä toisten jäädessä pois. Kolmannella tasolla ymmärretään, että mallit on rakennettu ideoiden kehittämiseksi eikä todellisuuden kopioiksi ja että mallintajalla on aktiivinen rooli mallintamisen prosessissa. Harvalla oppilaalla on kuitenkin kolmannen tason ymmärrystä malleista. (Erduran 2001, 589.)

3.2.3 Tieteenhistorian merkitys

Opetusmenetelmät, jossa tutkivan opetuksen kautta oppilaat uudelleentuottavat luonnontieteellistä tietoa luonnontieteellisiä prosesseja simuloiden, eivät ole välttämättä paras tapa opettaa luonnontieteitä. Luonnontieteellisten teorioiden

luominen on vienyt tutkijoilta vuosikymmeniä aikaa ja vaatinut tavattoman määrän kärsivällisyyttä, intohimoa, luovuutta, taitoa ja tietoa. Oppilaat ovat kuitenkin vain oppilaita, joille luonnontieteet ovat vain yksi opiskeltava ainekokonaisuus. (Monk & Dillon 2000, 78.) Tieteen-historian esimerkeillä ja klassisilla kysymyksenasetteluilla tulisi kuitenkin olla merkittävä osa tiedeopetuksessa. Emme voi olettaa, että oppilas ajattelisi tieteen suurien nerojen tapaan, mutta tutustumalla heidän perusteluihinsa ja tieteessä käytyihin väittelyihin, oppilaat voivat ymmärtää, kuinka tutkijoiden aikaisemmat tiedot ja oletukset vaikuttavat teorioihin sekä kuinka mallit ja teoriat muuttuvat ajassa. (Elkana 2000, 483–484.)

Tieteen historian opettaminen on perinteisen induktivistisen tieteenfilosofian valossa nähty lähinnä motivoivana tekijänä. Tarinat tieteentekijöistä ja tärkeistä tieteellisistä läpimurroista inhimillistävät tiedettä ja kertovat tieteellisen ajattelun voittokulusta. (Elkana 2000, 466–484.) Gallagher (1992) on tutkinut tulevien ja ammatissa toimivien opettajien suhtautumista tieteen historiaan ja -filosofiaan. Tutkimuksessa selvisi, että opettajilla oli käsitys tieteellisestä tiedosta vakiintuneena ja lähes muuttumattomana tietojen kokoelmana. Tieteen historiaa käytettiin lähinnä parantamaan oppilaiden suhtautumista luonnontieteitä kohtaan inhimillistämällä niitä. Tieteen historian merkitystä tieteellisen tiedon luonteen ymmärtämisessä ei Gallagherin mukaan ole vielä riittävästi ymmärretty opetuksessa.

Kemian historian tutkimus on myös lähestynyt tutkimuskohdettaan nykypäivän tietämyksen, arvojen ja kriteerien valossa. Tällainen osallisen näkökulma (*members account*) poimii kemian opetuksesta nykytutkimuksen näkemykselle edullisia historiallisia kuvauksia. Osattoman näkökulma (*strangers account*) pyrkii puolestaan analysoimaan historiallisia kuvauksia ottamatta nykytietämyksen valossa itsestään selviä asioita itsestäänselvyyksinä. Esimerkiksi Nicolas Lemeryn (1645–1745) happomalli, jonka mukaan happojen kirpeys johtuu atomien piikikkyydestä ja niiden metalleja liuottavat ominaisuudet terävien kärkien kykyyn rikkoa metalliryppäitä (Hudson 2002), ei todennäköisesti ollut myyttinen oman aikansa kriteereillä, vaikka se nykyisin kriteerein on sellainen. Tutkittaessa, mitä kemiallisia malleja on käytetty ja mitä hylätty, ei pidä olettaa, että tietty malli on ollut toista perustellumpi, vain koska se on nykyisen näkemyksen valossa oikeampi. Esimerkiksi emäs-happo-käsityksiä tutkittaessa ei pitäisi unohtaa sosiaalisia, henkilökohtaisia ja

epistemologisia syitä siirtymiselle käsityksestä toiseen. Tämä antaa paremman kuvan kemiallisen tiedon luonteesta ja kehityksestä sekä sopii todennäköisesti paremmin myös oppilaiden näkökulmaan. Oppilaille ei kemian historiaa käsiteltäessä ole opettajan tai tutkijan pohjatietoa, jotta he näkisivät kemian selitykset opettajien ja tutkijoiden tapaan osallisen näkökulmasta. (Erduran 2001, 581–582.) Tieteenhistorian tulisi olla keskeisessä osassa malleille perustuvassa tiedeopetuksessa, sillä historialla on merkittävä osa mallien ymmärtämisessä (Duschl 2006, 328).

3.2.4 Tieteenfilosofia ja kokeellisuus

Kokeellisuuden rooli luonnontieteiden opetuksessa on puhuttanut läpi koko edellisen vuosisadan. Jo 1800-luvulla keskusteltiin siitä, tulisiko luonnontieteitä opettaa kokeellisena tieteenä vai yhtenä matematiikan sovelluksena. Näkemyksellä tieteellisen tiedon luonteesta ja kokeellisuuden merkityksestä on vaikutusta siihen, mikä osa kokeellisuudella annetaan opetuksen tavoitteissa. (Matthews 1994, 11–28.)

Loogisten positivistien mukaan havainnoista voidaan yleistyksen ja deduktiivisen logiikan keinoin luoda tieteellisesti todistettuja lakeja ja teorioita. Kokeellisten luonnontieteiden, kuten kemian, opetuksessa positivistien vaikutus on ollut suuri. Positivistisen tiedenäkemyksen mukaan havainnoin ja kokein voidaan induktiivisesti muodostaa ja todistaa lakeja tai teorioita. Opettajat eivät ole tieteen tekijöitä vaan pikemminkin tieteellisen tiedon välittäjiä. He tuntevat tieteen teorian ja mallit tai ainakin opetuskäyttöön niistä yksinkertaistetut opetusmallit, jotka he pyrkivät viestimään oppilailleen. Demonstraatioiden ja kokeellisten töiden motivaationa on opetuksessa usein jonkin mallin tai teorian todistaminen. Vaikeutena on usein, että oppilas ei ymmärrä tekemänsä kokeen yhteyttä teoriaan ja tästä syystä kokeiden tekeminen voi muuttua koneelliseksi reseptien seuraamiseksi. (Monk & Dillon 2000, 74–76.)

Olettaessaan tieteellisten teorioiden olevan tarkkoja kuvauksia maailmasta, opettaja toteuttaa opetuksessaan naiivin realismin mukaista näkemystä luonnontieteellisestä tiedosta. Naiivin realismin käsitys teorioista muuttumattomina totuuksina sopii varsin huonosti moderniin kuvaan luonnontieteistä. Suhteellisuusteoria ja kvanttimekaniikka sekä 1900-luvun tieteenfilosofia ovat muovanneet newtonilaisen klassisen mekaniikan

kyllästävä kuvaa luonnontieteellisestä ajattelusta. Esimerkiksi 20-luvulla Niels Bohrin ja Werner Heisenbergin luoma positivistisen Kööpenhaminan tulkinta kvanttimekaniikasta pyrki kyseenalaistamaan aaltofunktion realistiset tulkinnat ja korosti, että tieteen tulisi keskittyä ainoastaan kysymyksiin, joihin voidaan saada vastauksia mittauksista. Teorioiden ontologisesta luonteesta käytiin kiivasta keskustelua myös luonnontieteilijöiden, esimerkiksi Bohrin ja Einsteinin, kesken. Einstein ei realistina hyväksynyt Bohrin instruktivistista tulkintaa kvanttimekaniikasta. (Elkana 2000, 465–468.)

Pelkän sisällön viestiminen ei anna totuudenmukaista kuvaa tieteestä. Tieteenfilosofisessa tarkastelussa myös tapa, jolla tieto saavutetaan, on oleellinen osa tiedettä. Usein tiedeopetuksessa keskitytään siihen ”mitä tiedämme” eikä siihen ”miten tiedämme” eli tieteen epistemologisiin perusteluihin. (Monk & Osborne 1997, 407.) Loogisten positivistien mukaan havainnoista voitiin johtaa loogisten sääntöjen avulla teorioita. Luonnontieteellinen tieto ja taidot voidaan jakaa käsitteellisiin ja menetelmällisiin, jotka molemmat tulisi hallita. Positivistisen filosofian ohjaaman tutkivan lähestymistavan mukaisessa opetuksessa oppilas oppii luonnontieteen käsitteitä ja lainalaisuuksia opettajan ohjauksessa tapahtuvan oppilastutkimuksen avulla. Työt suunnitellaan siten, että oppilaat oppivat tieteellisiä menetelmiä lainalaisuuksien etsimiseksi. Kokeellisten töiden tarkoitus on todistaa sekä tieteellisen tiedon että tieteellisen metodin toimivuus. Oppilas ei kuitenkaan välttämättä opi kysymään, miksi juuri tutkitut ominaisuudet on valittu tutkimuksen kohteeksi ja miten tutkimukselle puitteet luovat käsitteet on muodostettu. (Elkana 2000, 469–470.)

Popper (1992, 31–32) erotteli tieteellisen mallin tai teorian muodostamisessa kaksi vaihetta: käsitteenluomisvaiheen sekä testausvaiheen. Käsitteenluomisvaihe vaatii luovuutta, jota voidaan verrata vaikkapa taiteelliseen luovuuteen, kuten laulun säveltämiseen. Tieteellisen luovuuden tulisi näkyä myös opetuksessa. Malli, jossa oppilaat simuloivat luokassa oikeaa tieteellistä tutkimista, on vaikeampi toteuttaa, jos ajatellaan, että induktion sijaan kokeilla on tarkoitus testata tieteellisten teorioiden falsifioitavuutta. Simuloidakseen Popperin mallia, opettajan tulisi esimerkiksi järjestää oppilaat ryhmiin, jotka testaisivat luomiaan malleja ja jotka keskustellen pyrkisivät kriittisesti arvioimaan niitä sekä sopisivat mallien julkaisupolitiikasta (Monk & Dillon 2000, 76). Jos halutaan, että oppilastöissä ei opetella vain

hypoteesien testausta ja kokeellisia työtapoja, tulisi niissä painottaa myös omien mallien ja selitysten luontia. (Schauble et al. 1991.)

Vuonna 1970 (8 vuotta Kuhnin *The structure of scientific revolutions* kirjan julkaisun jälkeen) Yehuda Elkana (2000) vaati artikkelissaan, että tiedeopetuksessa tulisi huomioida Kuhnin esittämä tieteellisten vallankumousten malli. Elkana näki Kuhnin mallissa yhtymäkohtia Joseph Schwabin luonnontieteiden tutkivan opetuksen malliin. Schwab kuvasi kaksi tutkimustapaa, joista vakaa (*stable*) muistutti Kuhnin normaalitieteen työtapaa ja epävakaa (*fluid*) vallankumousvaiheen työtapaa. Kuhnista poiketen Schwab näki, että vakaata ja epävakaata tutkimusta tapahtuu jatkuvasti rinnakkain. Schwab näki myös, että tieteellä ei ollut yhtä metodia, joka on hedelmällinen jokaisella tutkimusalalla ja kaikkina aikoina. Elkana ehdottaa Kuhnin ja Schwabin ajatusten pohjalta jakoa, jossa erotellaan tieteen taktiikat (*tactics of science*) tieteen strategioista (*strategies of science*). Tieteet taktiikat ovat tutkimusmenetelmiä, joilla tutkitaan hypoteesien paikkansapitävyyttä ja tulkitaan kokeellisia tuloksia teorioiden valossa. Tieteen strategiat puolestaan määrittelevät perimmäiset kysymykset ja ontologiset oletukset, joihin tutkimus yrittää vastata. Esimerkiksi kemian tutkimus on perinteisesti keskittynyt luokittelemaan todellisia olioita pidettyjä alkuaineita ja yhdisteitä selittääkseen aineen ominaisuuksia fysiikan tutkimuksen keskittyessä ilmiöiden matemaattiseen kuvaamiseen (Erduran & Scerri 2002, 7). Elkana (2000) ehdottaa uudenlaista tutkivaa lähestymistapaa, jossa väitteiden ontologinen luonne tulisi keskustelun kautta tuoda esille ja osoittaa, kuinka perimmäiset kysymyksenasettelut määrittävät, mitkä ovat niin sanottuja kriittisiä kokeita (*critical experiments*) kunkin teorian valossa. Esimerkiksi Lavoisierin ja Priestleyn happikokeet olivat kriittisiä nimenomaan tiettyjen teorioiden (väistyvän palamisen flogiston-teorian ja Lavoisierin happi-teorian) valossa.

3.2.5 Kemian etiikka ja opetus

Tavanomaisen tulkinnan mukaan indoktrinaatio on ”uskonnollisten, moraalisten, poliittisten ja maailmankatsomuksellisesti sitoutuneiden käsitysten opettamista” (Puolimatka 1995, 139). Sisältökriteeriä olisi Puolimatkan (1995, 139–141) mukaan mielekkäämpää soveltaa toisin. Hänen mielestään indoktrinoitavaa on opetus, joka sivuuttaa opetettavan järjestelmän sisäinen rakenteen, arviointiperusteet sekä

maailmankatsomukselliset ja moraaliset kytkennät, sillä oppilaille ei ole silloin mahdollisuutta arvioida tietoa maailmankatsomuksellisessa viitekehyksessä. Luonnontieteen opettajat saattaisivat olla taipuvaisia pitäytymään tavanomaisessa tulkinnassa, sillä tieteellinen tieto nähdään usein luonteeltaan erilaisena kuin esimerkiksi moraaliset arvostelmat. Nykyisen käsityksen mukaan luonnontieteellinenkin tieto ei välttämättä ole maailmankatsomuksellisesti neutraalia.

Vuoden 2001 tiedebarometrin mukaan suomalaisten usko tieteellisiin instituutioihin on suuri. Tieteessä noudatettavaa hyvää tutkimuskäytäntöä seuraamiseksi ja tutkimuseettisyyttä edistämiseksi Suomessa on perustettu Tutkimuseettinen neuvottelukunta. Erityisen paljon tutkimuseettinen neuvottelukunta on kommentoinut kysymyksiä, jotka liittyvät tutkimuksen ja tutkimuskohteen suhteeseen. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan mukaan tutkimuksen tekemisen pohja luodaan jo koulussa ja eettisten toimintamalleja tulisi olla koulutuksen jokaisella tasolla. Ensisijainen vastuu tutkimuseettisistä opetuksesta annetaan korkeakouluille. (Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2006.)

3.3 Miten kemian filosofian tulisi näkyä opetussuunnitelmissa?

Sekä Matthews (1994, 137–161) että Scerri (2003) näkevät, että tiedeopetuksen tutkimuksessa nykyisin vallalla oleva paradigma konstruktivismi on vaikuttanut myös negatiivisesti kemian ja luonnontieteiden opetukseen ja sen tavoitteisiin. Kasvatustieteellinen konstruktivismi perustuu Jean Piaget'n lasten oppimista kuvaavalle psykologiselle konstruktivismille, jota edustavat myös von Glaserfeldin ja Vygotskyn tutkimukset. Toinen konstruktivismiin pääsuuntaus on sosiaalinen konstruktivismi, jonka alullepanijana pidetään Emile Durkheimia, näkee puolestaan relativistisesti, että ajatuksemme, käsityksemme ja myös tieteellinen tieto on ainoastaan sosiaalinen konstruktio. Vaikka kasvatustieteessä konstruktivistit väittävät usein muuta (katso Scerri 2003, 469–473), näkemys, että tieteellinen tiedon tuottaminen on luovaa historian ja kulttuurin ohjaamaa toimintaa, jossa totuutta rakennetaan sosiaalisesti ja tietoväitteiden lopullista totuudellisuutta ei voida määrittää, on itsestäänselvyys konstruktivismiin lisäksi lähes kaikkien muidenkin modernien tieteenfilosofien näkemysten, kuten vaikkapa tieteellisen realismin,

valossa. Sekä Matthews että Scerri näkevät, että konstruktivismi ei oppimisteorianä onnistu yksinään määrittelemään, mitä luonnontieteistä tulisi opettaa.

Yhtenä eurooppalaisen tiedeopetuksen keskeisenä tavoitteena pidetään luonnontieteellistä yleissivistystä (Reinikainen 2002, 57–58). Sjøbergin (1996) mukaan hyvä luonnontieteellinen yleissivistys edellyttää kolmenlaista tietoa luonnontieteistä:

1. *Tietoa luonnontieteiden tuotteista* eli malleista ja teorioista, joita luonnontiede tuottaa.
2. *Tietoa luonnontieteiden prosesseista* eli luonnontieteiden tavasta tuottaa tietoa.
3. *Tietoa luonnontieteistä yhteiskunnallisena instituutiona* eli tietoa siitä, miten luonnontieteet vaikuttavat yhteiskuntaamme ja miten yhteiskunta puolestaan vaikuttaa luonnontieteisiin.

Kemian filosofia antaa meille tietoa sekä kemian prosesseista että yhteiskunnallisesta ulottuvuudesta. Siksi kemian filosofian on oleellinen osa kemiallista yleissivistystä. Kahden jälkimmäisen luonnontieteellisen yleissivistyksen dimension voidaan katsoa kuvaavan luonnontieteiden luonnetta.

Fouad Abd-El-Khalickin ja Norman Ledgermanin (2000) mukaan luonnontieteiden luonteen opetuksessa on nähtävissä kaksi lähestymistapaa: epäsuora eli implisiittinen (*implicit*) ja suora eli eksplisiittinen (*explicit*). Epäsuorassa lähestymistavassa ymmärrys luonnontieteiden luonteesta kasvaa prosessitaitoja kehittämällä ja tutkimuksellisten tehtävien kautta ilman suoria viittauksia luonnontieteiden luonteeseen. Suorassa lähestymistavassa puolestaan luonnontieteiden luonne otetaan opetuksessa tietoisesti esille. Epäsuoraan lähestymistapaan liittyy usein näkemys luonnontieteiden luonteesta affektiivisena tavoitteena kognitiivisen tavoitteen sijaan. Ymmärryksen luonnontieteellisen tiedon luonteesta oletetaan muodostuvan ikään kuin itsestään kokeellista luonnontieteellistä tutkimusta tehtäessä. Lähestymistapoja tutkittaessa huomataan suoran lähestymistavan tehokkaammin lisäävän ymmärrystä luonnontieteiden luonteesta. Tämä on jopa oletettavaa, koska epäsuorassa lähestymistavassa käsitys tieteellisen tiedon luonteesta voi olla varsin naiivi, jos uskotaan luonnontieteellisen tiedon luonteen selvenevän ilman sen tietoista käsittelyä. Silloin unohdetaan, että nykyinen näkemyksemme tieteellisen tiedon luonteesta on syntynyt tieteenfilosofiasta ja historiasta kiinnostuneiden tiedemiesten sekä

tieteenfilosofien, sosiologien ja historioitsijoiden asettamien kysymysten ja tulkintojen kautta. (Abd-El-Khalick & Lederman 2000.)

4 TUTKIMUKSEN SUORITTAMINEN

4.1 Tutkimustavoite ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen päätavoitteena on tutkia kemian filosofian merkitystä Suomessa nykyisin käytettävien valtakunnallisten opetussuunnitelman perusteiden kemian opetuksen tavoitteissa. Tavoitteeseen on pyritty analysoimalla, kuinka kemian filosofian tutkimuksessa esiintyvät aiheet esiintyvät Suomen perus- ja lukio-opetuksen opetussuunnitelmien perusteissa. Analyysi on tehty vertaamalla opetussuunnitelmien perusteita Ruotsin ja Norjan valtakunnallisten opetussuunnitelmien tavoitteisiin sekä teoriataustasta nouseviin ajatuksiin.

Tutkimuksessa on etsitty vastausta kahteen päätutkimuskysymykseen:

1. Mitä kemian filosofiaan liittyviä ajatuksia esitetään Suomen, Ruotsin ja Norjan perus- ja lukio-opetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian opetuksen tavoitteissa?
2. Miten Ruotsin ja Norjan valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa tai kemian filosofian ja opetuksen tutkimuksessa mainittuja kemian filosofian ajatuksia tulisi huomioida Suomen *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden* (Opetushallitus 2004) sekä *Lukion opetussuunnitelmien perusteiden* (Opetushallitus 2003) kemian opetuksen tavoitteissa?

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastataan luvussa 5 ja toiseen luvussa 6.

4.2 Tutkimusmenetelmä

Tutkimuksessa vertaillaan kolmen Pohjoismaan kemian valtakunnallisia opetussuunnitelmia toisiinsa ja johtopäätöksissä myös teoriaosuudessa esitettyihin näkemyksiin. Kyseessä on ympäristöpohjainen vertailu, jossa eri kulttuuripiirien tuottamien dokumenttien ominaisuuksia vertaillaan toisiinsa, että sisällön vertailu ihanteisiin, jotka nousevat teoriataustasta (Pietilä 1976, 25). Havaintoja opetussuunnitelmien sisällöistä tehdään sisällön erittelyn menetelmällä.

Veikko Pietilän (1976, 53–54) mukaan sisällön erittely on joukko tieteellisiä menettelytapoja havaintojen tekoon ja tietojen keräämiseen tutkittavista teksteistä.

Tutkimuskohteena olevien opetussuunnitelmien kemian filosofiaan liittyvät tavoitteet ja väittämät on luokiteltu induktiivisesti eli aineistolähtöisesti sisältöluokkiin. Ennen aineiston tulkintaa on pyritty laajasti tutustumaan aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin sekä teoreettiseen viitekehykseen. Sisällönanalyysissä on edetty Hubermanin ja Milesin (1994, 429–430) kolmivaiheista prosessia noudattaen. Ensin aineisto on redusoitu eli pelkistetty poimimalla sieltä tutkimuksen aiheeseen liittyvät lausumat. Seuraavassa vaiheessa aineisto on ryhmitelty sisältöluokkiin. Sisältöluokat on pyritty muodostamaan aineistolähtöisesti eli induktiivisesti. Kolmannessa vaiheessa edellisten vaiheiden sisällön erittelystä on pyritty tekemään johtopäätöksiä. Sisällönanalyysi ei ole puhtaasti aineistolähtöinen vaan teoriaohjaava, sillä sisältöluokkia muodostettaessa sekä johtopäätöksiä tehtäessä havainnot liitetään teoriaosassa esitettyihin ajatuksiin. (Tuomi & Sarajärvi 2004, 93–116.) Prosessi ei ole edennyt täysin suoraviivaisesti. Aineistoon on palattu jatkuvasti käymällä vuoropuhelua aineiston ja päätelmien välillä tulkintaa ja luokittelua yhä uudelleen uudistaen.

Lopullinen luokitusrunko, joka sisältää tutkimuksessa käytettävät sisältöluokat määritelmiseen sekä esimerkkilauseeseen (Pietilä 1976, 101), on liitteenä 1. Sisältöluokat on jaettu yläluokkiin eli aihealueisiin ja tulokset on taulukoitu aihealueittain. Koska tutkimuskohteita on ollut vain viisi, ei tulosten tilastolliselle käsittelylle ole ollut tarvetta. Kunkin aihealueen tulokset perusopetuksen ja lukiotasoisien opetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien analyyseista on taulukoitu omiin taulukkoihinsa. Sisältöluokka on merkitty taulukkoon vain, jos tavoite tai väittäminen on huomioitu opetussuunnitelmassa eksplisiittisesti. Kuten Abd-El-Khalick ja Ledgerman (2000) toteavat, luonnontieteiden luonteen voidaan katsoa sisältyvän opetuksen tavoitteisiin myös implisiittisesti. Suoran lähestymistavan tehokkuuden vuoksi ja ylitulkintojen välttämiseksi implisiittisiä eli epäsuoria tavoitteita ja väittämiä ei ole taulukoitu. Tutkijan mielestä ilmeisimmät implisiittiset viittaukset on otettu esille tulosten kirjallisessa esityksessä.

Tutkimustulosten luotettavuus perustuu tulkintojen ja johtopäätösten validiteettiin, jossa tulee ottaa huomioon niin tulosten aitous kuin relevanssi. Aitoutta eli tulkintojen ja johtopäätösten vastaavuutta tutkittavan tekstin kanssa on pyritty varmistamaan käyttämällä suoria lainauksia tutkimuskohteena olevista teksteistä ja esittämällä

kaikki sisältöluokkiin jaetut alkiot liitteessä 2, jotta lukijalla on mahdollisuus tulkita tutkijan tulkintaa. Relevanssi eli vastaavuus teoreettisten lähtökohtien kanssa on pyritty varmistamaan esittelemällä teoreettinen viitekehys sekä liittämällä tuloksien käsittelyssä kategoriat ja johtopäätökset lähdekirjallisuudesta nousseisiin teoreettisiin tutkimuskäsitteistöihin ja tutkimusongelmiin (Syrjälä et al. 1994, 152–155).

4.3 Tutkimuskohde

Tutkimuskohteena on Suomen ja Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien (Opetushallitus 2004 ja Skolverket 2000) sekä Suomen, Ruotsin ja Norjan lukiotasoisien opetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien (Opetushallitus 2003, Skolverket 2006a ja Utdanningsdirektoratet 2006) kemian opetusta käsittelevät osat. Ensisijaisina tutkimuskohteina ovat Suomen opetussuunnitelmien perusteet (Opetushallitus 2003 ja 2004) eli valtakunnalliset opetussuunnitelmat, joiden pohjalta koulut tekevät omat opetussuunnitelmansa. Toissijaisia tutkimuskohteita valittaessa on huomioitu, että Norja ja Ruotsi ovat koulutusjärjestelmiltään Suomen kanssa riittävän samanlaisia, jotta vertailua on ollut järkevä tehdä.

Suomessa ja Ruotsissa on käytössä yhdeksänluokkainen peruskoulu. Molemmissa maissa peruskoulun jälkeen valtaosa ikäluokasta jatkaa opiskelua joko jatko-opintoihin valmistavassa yleissivistävässä lukio-opetuksessa tai ammatillisessa perustutkintokoulutuksessa. Ruotsissa lukio- ja ammatillinen peruskoulutus eivät ole eriytetty kuten Suomessa, vaan lukioissa (*gymnasiet*) on 17 opiskelulinjaa, joista osa vastaa suomalaista ammatillista perustutkintokoulutusta ja osa yleissivistävää sekä jatko-opintoihin valmistavaa lukiokoulutusta. Lukio suoritetaan sekä Suomessa että Ruotsissa yleensä kolmessa vuodessa.

Norjassa peruskoulu on kymmenluokkainen ja se aloitetaan vuotta aikaisemmin kuin Suomessa ja Ruotsissa. Peruskoulun jälkeen Norjassa oppilaat suorittavat yleensä jatko-opinnot, joko suomalaista ammatillista perustutkintokoulutusta vastaavissa ammattiin valmistavissa koulutusohjelmissa (*yrkesfaglige utdanningsprogram*) tai lukiotasoisissa jatko-opintoihin valmistavissa koulutusohjelmissa (*studieforberedende utdanningsprogram*).

Sekä Suomessa, Ruotsissa että Norjassa on käytössä kunkin maan opetusministeriön tai opetushallituksen hyväksymät valtakunnalliset opetussuunnitelmien perusteet, joiden pohjalta kukin kunta tai koulu tekee omat opetussuunnitelmansa. Tutkimusaineiston valintaan on vaikuttanut myös se, että Ruotsin ja Norjan opetussuunnitelmat ovat helposti saatavilla ja analyysi on voitu tehdä alkukielellä.

Perusopetuksen opetussuunnitelmat

Perusopetuksen valtakunnallisista opetussuunnitelmista tutkimuskohteeksi on valittu Suomen *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2004* (Opetushallitus 2004) sekä Ruotsin *Grundskolans kursplaner och betygskriterier* (Skolverket 2000). Molemmat valtakunnalliset opetussuunnitelmat ovat nykyisin käytössä ja niissä on kemialle erikseen määritellyt ainekohtaiset tavoitteet. Suomen opetussuunnitelman perusteissa vuosiluokilla 5–6 kemian ja fysiikan opetukselle on määritelty yhteiset tavoitteet. Tutkimuksessa on keskitytty Suomen opetussuunnitelman perusteiden osalta vuosiluokkien 7–9 tavoitteisiin, jotka on määritelty erikseen ainekohtaisesti kemialle ja fysiikalle. Ruotsin valtakunnallinen opetussuunnitelma määrittelee sekä luonnontieteellisten aineiden yhteiset että aineryhmän aineiden eli biologian, fysiikan ja kemian ainekohtaiset tavoitteet. Opetussuunnitelmassa määritellään myös sekä yhteiset että ainekohtaiset viidennen ja yhdeksännen vuosiluokan arvostelukriteerit. Tutkimuksessa on keskitytty erityisesti kemian ainetavoitteisiin sekä yhdeksännen vuosiluokan arvostelukriteereihin. Norjan perusopetuksen valtakunnallisessa opetussuunnitelmassa ei määritellä erikseen kemian tavoitteita vaan ainoastaan luonnontieteiden opetuksen yhteiset tavoitteet. Tästä syystä Norjan perusopetuksen valtakunnallista opetussuunnitelmaa ei ole otettu tutkimukseen mukaan.

Lukio-opetuksen opetussuunnitelmat

Lukiotasoisista opetussuunnitelmista tutkimuskohteeksi on valittu Suomessa käytössä oleva *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003* (Opetushallitus 2003) sekä Ruotsin että Norjan uusien lukiotasoisien valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian kurssisuunnitelmat *GY-07: Kursplaner för Kemi* (Skolverket 2006a) ja *Fastsatte læreplaner for Kunnskapsløftet: Læreplan i kjemi – programfag i studiespesialiserende utdanningsprogram* (Utdanningsdirektoratet 2006). Ruotsin

lukio-opetuksen uusi valtakunnallinen opetussuunnitelma otetaan käyttöön lukuvuonna 2007–2008 ja Norjan uusi lukiotasoinen valtakunnallinen opetussuunnitelma lukuvuonna 2006–2007.

Suomen *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003* (Opetushallitus 2003) määrittelee tavoitteet yhdelle pakolliselle ja neljälle syventävälle kemian kurssille. Luonnontieteiden luonteeseen liittyviä käsityksiä käsitellään myös esimerkiksi fysiikan tavoitteissa, mutta ne on jätetty tutkimuksen sisällönanalyysin ulkopuolelle.

Ruotsin lukiotasoinen opetuksen 17 mahdollisesta linjasta kemian opinnot ovat pakollisia luonnontieteiden linjalla (*naturvetenskapsprogrammet*) ja tekniikan linjalla (*teknikprogrammet*). Kaikkien linjojen opiskelijoiden tulee opiskella pakollinen luonnontieteen kurssi (*Naturkunskap 1*), jonka tavoitteena on tutustuttaa oppilaat luonnontieteelliseen näkökulmaan, tutkimusmenetelmiin ja tutkimuksen tekemiseen, luonnontieteellisen tiedon viestimiseen, erilaisten tiedonlähteiden käyttöön ja arviointiin sekä luonnontieteiden merkitykseen yksilölle ja yhteiskunnalle (Skolverket 2006b). Kurssilla käsitellään monia tieteenfilosofisia peruskysymyksiä, mutta kurssin opetussuunnitelma ei ole tämän tutkimuksen sisällönanalyysin kohteena.

Tutkimuskohteena oleva Norjan lukiotasoinen kemian opetussuunnitelma kuuluu jatko-opintoihin valmistavan koulutusohjelman (*studieforberedende utdanningsprogram*) reaaliaineiden aihealueeseen (*programområde for realfag*). Muissa koulutusohjelmissa opiskellaan kemiaa vain luonnontieteiden yleisellä kurssilla sekä ammattikoulutukseen liittyvillä kursseilla. Tutkimuksen kohteena on vain reaaliaineiden aihealueen kemian opetussuunnitelma *Fastsatte læreplaner for Kunnskapsløftet: Læreplan i kjemi – programfag i studiespesialiserende utdanningsprogram* (Utdanningsdirektoratet 2006).

5 TULOKSET

Kemian valtakunnallisten opetussuunnitelmien tieteenfilosofisten näkemysten analysointia varten tutkimusaineistosta on koottu kemian filosofiaan liittyvät tavoitteet, sisällöt ja kriteerit. Tutkimusaineistosta on pyritty erottelemaan lausumat eli yhden ajatuksen tai ajatusteeman sisältämät kokonaisuudet (Pietilä 1976, 111). Samantyyppiset lausumat on yhdistelty ryhmiin, joista on teoreettinen viitekehys huomioiden muodostettu sisältöluokkia. Kemian tieteenfilosofisiin sitoumuksiin liittyvät sisältöluokat on jaettu kolmeen teoreettisen viitekehyyksen perusteella oman kokonaisuutensa muodostamaan aihepiiriin, jotka ovat:

- kemian tutkimuskohde ja mallit
- kokeellisuus ja kemian tutkimus
- kemian yhteiskunnallinen merkitys ja eettiset ulottuvuudet

5.1 Kemian tutkimuskohde ja mallit

Kemian tutkimuskohdetta sekä kemiassa käytettäviä malleja ja niiden ominaisuuksia koskevat lausumat on jaoteltu seuraaviin aineistosta nousseisiin sisältöluokkiin:

- kemia aineen ominaisuuksien sekä rakenteen ja sen muutosten tutkimuksena
- kemiallisten ilmiöiden selittäminen mallien avulla
- käsitteiden merkitys kemiassa
- kemian mallien ja teorioiden rajat
- kemiallisen tiedon alustavuus

Sisältöluokat kuvauksineen ja esimerkkialkioineen on esitetty liitteessä 1.

Perusopetuksen tavoitteet

Kemian tutkimuskohteeseen ja malleihin liittyvien sisältöluokkien esiintyminen perusopetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian opetuksen tavoitteissa on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Kemian tutkimuskohteeseen ja malleihin liittyvät näkemykset Suomen ja Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa.

<i>Sisältöluokat</i>	<i>Perusopetuksen opetus-suunnitelmien perusteet</i>	<i>Grundskolans kursplaner och betygskriterier (Ruotsi)</i>
Kemia aineen ominaisuuksien sekä rakenteen ja sen muutosten tutkimuksena	+	+
Kemiallisten ilmiöiden selittäminen mallien avulla	+	+
Käsitteiden merkitys kemiassa	+	+
Kemian mallien ja teorioiden rajat		
Kemiallisen tiedon alustavuus		+

Sekä Suomen *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2004* (Opetushallitus 2004) että Ruotsin *Grundskolans kursplaner och betygskriterier* (Skolverket 2000) kuvaavat kemian opetuksen tavoitteissa kemian tutkimuskohdetta aineen ominaisuuksien, rakenteen ja niiden muutosten tutkimisena (Liite 2, kohta 1).

Molemmat tutkimuksessa mukana olleet perusopetuksen valtakunnalliset opetussuunnitelmat tuovat esille mallien merkityksen kemiallisissa selityksissä. Suomen valtakunnallisen opetussuunnitelman kemian tavoitteissa selittäminen, kuvaaminen ja mallintaminen otetaan esille tutkimusprosessin kuvauksessa osana kokeellista lähestymistapaa. Ruotsin valtakunnallisen opetussuunnitelman kemian opetuksen tavoitteissa puhutaan atomin rakenteesta ja kemiallisesta sidoksesta selitysmalleina (*förklaringsmodell*). (Liite 2, kohta 2.)

Kemiassa käytetään sille ominaisia käsitteitä. Käsitteiden merkitys kemiassa saattaa poiketa selvästi käsitteiden arkimerkityksestä. Suomen perusopetuksen opetussuunnitelman perusteissa asetetaan tavoitteeksi, että oppilaan tulisi osata käyttää kemian käsitteitä. Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisen opetussuunnitelman tavoitteissa määritellään kemian käsitteiden hallinnan tavoite luonnontieteiden yhteisissä arviointikriteereissä. Kriteereissä mainitaan kemia omana kokonaisuutenaan. (Liite 2, kohta 3.)

Kumpikaan tutkituista perusopetuksen valtakunnallisista opetussuunnitelmista ei huomioi eksplisiittisesti kemian mallien ja teorioiden taso-spesifisyyttä sekä niihin sisältyviä oletuksia ja likimääräistyksiä, jotka rajoittavat niiden soveltamisalaa. Ruotsin valtakunnallisen opetussuunnitelman luonnontieteiden yhteisissä arviointikriteereissä huomioidaan kuitenkin luonnontieteiden tapa kuvata maailmaa sekä luonnontieteellisen tiedon rajat arkipäivän ja yhteiskunnallisten ongelmien ratkaisuisissa:

”Eleven identifierar skillnader mellan naturvetenskapliga och andra sätt att skildra verkligheten till exempel i den information som media tillhandahåller.”

”Eleven illustrerar med exempel vetenskapliga undersökningars fördelar och begränsningar när det gäller att lösa vardagliga och samhällliga problem.”
(Skolverket 2000, 64.)

Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisessa opetussuunnitelmassa otetaan esille kemian historia ja historialliset ajattelutavat. Lisäksi luonnontieteellisten aineiden yhteisissä arvosteluperusteissa asetetaan tavoitteeksi ymmärtää, kuinka tieteellinen tieto on muuttunut ja kehittynyt läpi historian. Suomen perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden kemian opetuksen tavoitteisiin ei sisälly vastaavaa tavoitetta. (Liite 2, kohta 5.)

Lukio-opetuksen tavoitteet

Yhteenveto kemian tutkimuskohteeseen ja malleihin liittyvien näkemysten esiintymisestä lukiotasoisissa kemian opetuksen tavoitteissa on koottu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Kemian tutkimuskohteeseen ja malleihin liittyvät näkemykset Suomen, Ruotsin ja Norjan lukiotasoisissa opetussuunnitelmissa.

Sisältöluokat	Lukion opetus-suunnitelman perusteet	GY-07 - Kursplaner för Kemi (Ruotsi)	Programområde for realfag (Norja)
Kemia aineen ominaisuuksien sekä rakenteen ja sen muutosten tutkimuksena	+	+	+
Kemiallisten ilmiöiden selittäminen mallien avulla	+		+
Käsitteiden merkitys kemiassa	+	+	+
Kemian mallien ja teorioiden rajat		+	
Kemiallisen tiedon alustavuus		+	+

Perusopetuksen valtakunnallisten opintosuunnitelmien tavoin kaikkien tutkittujen lukiotasoinen opetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien *Lukion opetussuunnitelman perusteiden 2003* (Opetushallitus 2003), *GY-07: Kursplaner för Kemin* (Skolverket 2006a) ja *Fastsatte læreplaner for Kunnskapsløftet: Læreplan i kjemi – programfag i studiespesialiserende utdanningsprogramin* (Utdanningsdirektoratet 2006) mukaan kemia tutkii aineen ominaisuuksia, sen rakennetta sekä aineiden välisiä reaktioita (liite 2, kohta 1).

Norjan lukiotasoinen opetuksen valtakunnallisen opetussuunnitelman tutkimuskohteen kuvaus sisältää huomion kemian pyrkimyksestä tutkimiensa ilmiöiden selittämiseen mikrotason mallein. Myös Suomen lukio-opetuksen opetussuunnitelman perusteissa huomioidaan, että kemian mallit liittyvät ilmiöiden selittämiseen. Tutkituista valtakunnallisista opetussuunnitelmista ainoastaan Ruotsin lukio-opetuksen kemian opetussuunnitelma ei mainitse eksplisiittisesti selittämistä kemian malleista puhuessaan. (Liite 2, kohta 2.)

Kaikki lukiotasoiset valtakunnalliset opetussuunnitelmat asettivat tavoitteeksi kemian käsitteiden ymmärtämisen ja käytön oppimisen (Liite 2, kohta 3).

Kemian mallit ja teoriat ovat tasospesifisiä ja sisältävät usein monenlaisia oletuksia tai likimääräistyksiä, jotka aiheuttavat rajoituksia niiden soveltamisalassa. Ruotsin lukio-opetuksen kemian opetussuunnitelma ottaa huomioon kemiallisen tiedon rajat

arvosteluperusteissaan (liite 2, kohta 4). Suomen ja Norjan valtakunnalliset opetussuunnitelmien eivät eksplisiittisesti mainitse kemian teorioiden ja mallien rajoja. Norjan kemian opetussuunnitelmassa asetetaan kuitenkin tavoitteeksi kemiallisten selitysten ymmärtäminen huomioiden, että kemian tieteelliset selitysmallit saattavat erota muissa konteksteissa käytetyistä selitysmalleista.

”Mål for opplæringen er at eleven skal kunne – – gjøre rede for trekk ved vitenskapelig metode i kjemi, og gi eksempler på forklaringsmodeller som ikke er forenlige med kjemiens forklaringer.” (Utdanningsdirektoratet 2006, 1.)

Muista selitysmalleista keskusteleminen voi mahdollistaa myös kemiallisen selitysten rajojen pohtimisen.

Suomen lukio-opetuksen opetussuunnitelman perusteissa ei tuoda esille kemiallisen tiedon alustavuutta eli sitä, että kemian mallit ja teoriat ovat muuttuneet ajan myötä. Ruotsin ja Norjan valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian opetuksen tavoitteissa nostetaan kemiallisen tiedon kehityksen historiallisen näkökohta selvästi esille (liite 2, kohta 5).

5.2 Kokeellisuus ja kemian tutkimus

Kokeellisuutta ja kemian tutkimusta käsittelevät lausumat on jaoteltu seuraaviin kahdeksaan sisältöluokkaan, joista seitsemän ensimmäistä kuvaavat kokeelliset tutkimuksen vaihteita tai osa-alueita. Aineistosta löytyneet kokeellisen tutkimuksen vaiheet ovat:

- kysymyksenasettelun muodostaminen
- hypoteesien tekeminen
- eksperimenttien suorittaminen
- havainnointi ja mittaus
- tulosten tulkinta
- johtopäätösten tekeminen
- luotettavuuden arviointi

Kahdeksas aihepiirin sisältöluokka on "teorioiden ja mallien vaikutus kokeelliseen tutkimukseen". Sisältöluokat kuvauksineen ja esimerkkialkioineen on esitetty liitteessä 1.

Perusopetuksen tavoitteet

Tutkimuksen vaiheiden sekä teorioiden ja mallien vaikutuksen huomioimisen esiintyminen opetussuunnitelmien perusteissa on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Tutkimuksen vaiheiden sekä teorioiden ja mallien vaikutuksen huomioiminen Suomen ja Ruotsin valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa.

Sisältöluokat	Perusopetuksen opetussuunnitelmien perusteet	Grundskolans kursplaner och betygskriterier (Ruotsi)
Tutkimuksen vaiheet: – kysymyksenasettelun muodostaminen		
– hypoteesien asettaminen		+
– eksperimenttien tekeminen	+	+
– havainnointi ja mittaus	+	+
– tulosten tulkinta	+	+
– johtopäätösten tekeminen		
– luotettavuuden arviointi	+	
Teorioiden ja mallien vaikutus kokeelliseen tutkimukseen		+

Kokeellinen tutkimus on keskeisessä asemassa sekä Suomen että Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian tavoitteissa. Molempien maiden tavoitteet nostavat esille havaintojen ja eksperimenttien teon sekä tulosten esittämisen ja tulkinnan osana kemiallista tutkimusta. Johtopäätösten tekemistä tai kysymyksenasettelun muodostamista ei kuitenkaan mainita erikseen ja vain Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisen opetussuunnitelman kemian tavoitteissa mainitaan hypoteesien merkitys kokeellisissa tutkimuksissa. Suomen perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet mainitsee kemian tutkimusta kuvatessaan myös kemiallisen tiedon luotettavuuden ja merkityksen arvioinnin. (Liite 2, kohta 6.)

Hypoteesit ja tutkimuskysymykset asetetaan teorioiden pohjalta ja kokeellisen tutkimuksen tavoitteena on usein testata uusia teorioita. Teoriat ja mallit muodostavat

pohjan, jonka varaan kokeelliset asetelmat luodaan ja tuloksia tulkitaan. Ruotsin valtakunnallinen opetussuunnitelma nostaa esille teorioiden ja mallien vaikutuksen kemian tutkimuksen kysymyksenasetteluun ja tulkintaan (liite 2, kohta 7).

Lukio-opetuksen tavoitteet

Tutkimuksen vaiheiden sekä teorioiden ja mallien vaikutuksen huomioimisen esiintyminen lukiotasoisissa opetussuunnitelmissa on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Tutkimuksen vaiheiden sekä teorioiden ja mallien vaikutuksen huomioiminen Suomen, Ruotsin ja Norjan lukiotasoisessa opetuksen valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa.

Sisältöluokat	Lukion opetus-suunnitelman perusteet	GY-07 - Kursplaner för Kemi (Ruotsi)	Programområde for realfag (Norja)
Tutkimuksen vaiheet: – kysymyksenasettelun muodostaminen		+	
– hypoteesien asettaminen		+	+
– eksperimenttien tekeminen	+	+	+
– havainnointi ja mittaus	+	+	+
– tulosten tulkinta	+	+	+
– johtopäätösten tekeminen	+	+	+
– luotettavuuden arviointi	+	+	+
Teorioiden ja mallien vaikutus kokeelliseen tutkimukseen		+	+

Sekä Suomen, Ruotsin että Norjan lukiotasoisessa opetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian arviointikriteerit huomioivat kemiallisen tiedon perustuvan empiriselle tutkimukselle. Kaikki kemian lukiotasoiset arviointikriteerit huomioivat havainnoinnin, kokeiden, tulosten tulkinnan ja arvioinnin sekä johtopäätösten tekemisen merkityksen kemian tutkimuksessa. Suomen opetussuunnitelman perusteiden kemian tavoitteiden mukaan kokeelliseen

tiedonhankintaan ja tiedonkäsittelytaitoihin kuuluu:

- ”• *havaintojen tekeminen, mittausten ja kokeiden suunnittelu ja toteutus*
- *työvälineiden ja reagenssien turvallinen käyttö*
- *tulosten esittäminen sekä suullisesti että kirjallisesti*
- *tulosten tulkitseminen, mallintaminen ja arviointi*
- *johtopäätösten tekeminen ja soveltaminen.*” (Opetushallitus 2003, 152.)

Hypoteesien teon voidaan katsoa implisiittisesti sisältyvän "mittausten ja kokeiden suunnitteluun ja testaukseen". Norjan ja Ruotsin valtakunnallisten opetussuunnitelmien kemian arviointikriteerit nostavat kuitenkin eksplisiittisemmin esille myös hypoteesien merkityksen kokeellisessa tutkimusprosessissa. Kaikki tutkitut lukiotasoiset opetussuunnitelmat ottavat esille tutkimustulosten luotettavuuden tarkastelun. Norjan ja Suomen valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa luotettavuuden arviointi mainitaan kuitenkin kokeellisen tutkimuksen kuvauksen ulkopuolella. Suomen opetussuunnitelman perusteissa kokeellisen työskentelyn ja muun aktiivisen tiedonhankinnan avulla tuotetun tiedon luotettavuuden arviointi mainitaan kemian opetuksen yleisissä tavoitteissa. Norjan valtakunnallisen opetussuunnitelman kemian toisen kurssin tavoitteiden mukaan luotettavuudelle asetettuja vaatimuksia pitäisi käsitellä tutustumalla autenttiseen kemian tutkimukseen. Tutkituista kemian opetussuunnitelmista ainoastaan Ruotsin lukiotasoisessa valtakunnallisessa opetussuunnitelmassa tutkimuksen kuvataan lähtevän liikkeelle kysymyksenasettelun muodostamisesta. (Liite 2, kohta 6.)

Hypoteesit ja kysymyksenasettelut tehdään yleensä teorioiden pohjalta ja niillä testataan uusia teorioita. Teoriat ja mallit muodostavat pohjan, jonka valossa kokeellisia asetelmia luodaan, havaitaan ja tulkitaan. Suomen lukio-opetuksen opetussuunnitelman perusteiden kemian opetuksen tavoitteet eivät Ruotsin ja Norjan opetussuunnitelmien tavoitteiden tavoin huomioi tätä teorioiden ja mallien vuorovaikutussuhdetta kokeellisuuden kanssa (liite 2, kohta 7).

5.3 Kemian yhteiskunnallinen merkitys ja eettiset ulottuvuudet

Kemian eettistä ja yhteiskunnallista ulottuvuutta koskevat tavoitteet, sisällöt ja kriteerit on jaoteltu seuraaviin aineistosta nousseisiin sisältöluokkiin:

- kemian sovellutusten merkitys yhteiskunnalle ja elinympäristölle
- kemiallisen tiedon ja tutkimuksen vaikutus kulttuuriimme ja maailmankuvaamme
- kemiallisen tiedon käyttäminen valintojen yhteiskunnallisissa ja eettisissä perusteluissa
- kemian tutkimuksen eettisyys

Sisältöluokat kuvauksineen ja esimerkkialkioineen ovat liitteessä 1. Sisältöluokkien teoreettisena pohjana on käytetty kemian filosofiassa esitettyjä näkemyksiä kemian tutkimuksen eettisyydestä ja sen yhteiskunnallisesta luonteesta, jotka on esitelty luvussa 2.4.

Perusopetuksen tavoitteet

Kemian perusopetuksen valtakunnallisten opetussuunnitelmien tavoitteissa eksplisiittisesti huomioitua kemian eettistä ja yhteiskunnallista ulottuvuutta käsittelevät sisältöluokat on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Kemian yhteiskunnallisen merkityksen ja eettisten ulottuvuuksien huomiointi Suomen ja Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa..

Sisältöluokat	Perusopetuksen opetussuunnitelmien perusteet	Grundskolans kursplaner och betygskriterier (Ruotsi)
Kemian sovellutusten merkitys yhteiskunnalle ja elinympäristölle	+	+
Kemiallisen tiedon ja tutkimuksen vaikutus kulttuuriimme ja maailmankuvaamme		+
Kemiallisen tiedon käyttäminen valintojen yhteiskunnallisissa ja eettisissä perusteluissa	+	+
Kemian tutkimuksen eettisyys		+

Sekä Suomen että Ruotsin perusopetuksen valtakunnalliset opetussuunnitelmat ottavat huomioon kemian sovellutusten merkityksen yhteiskunnalle ja elinympäristölle. Molemmissa otetaan esille esimerkiksi kemian tekniikan merkitys teollisuudelle. Ruotsin valtakunnallisen opetussuunnitelman kuvauksessa ympäristökysymyksellä on keskeisempi asema ja siinä mainitaan tuotantoon liittyvän myös riskejä ihmisen hyvinvoinnille. (Liite 2, kohta 8.) Suomen opetussuunnitelman perusteissa kuitenkin

huomioidaan ympäristövastuu omana eheyttävänä eli ainerajat ylittävänä aihekokonaisuutenaan (Opetushallitus 2004, 41).

Tieteellisellä tiedolla ja tutkimuksella on ollut valtava vaikutus maailmankuvaamme ja kulttuuriimme myös kulttuurisena produktina eikä vain sovellustensa kautta. Kemia ja muut luonnontieteet määrittelevät tapaamme nähdä meitä ympäröivää maailmaa ja esimerkiksi sen syy-seuraussuhteita. Luonnontieteellisen tutkimuksen merkitys asioiden ja ilmiöiden tulkitsemisessa, selittämisessä ja kuvaamisessa on valtava. Suomen perusopetuksen opetussuunnitelmien perusteissa ei mainita erikseen kemian vaikutusta maailmankuvaamme ja kulttuuriimme. Epäsuorat viittaukset kemiallisen tiedon ja tutkimuksen vaikutuksesta kulttuuriin ja maailmankuvaamme korostavat ilmiöitä ja sovellutuksia viitaten niiden merkitykseen ihmiselle tai yhteiskunnalle.

”Oppilas – – tuntee kemian ilmiöiden ja sovellusten merkityksen ihmiselle ja yhteiskunnalle, esimerkiksi fotosynteesin merkityksen elollisen luonnon energiavarannolle sekä korroosion ja korroosiolta suojaamisen merkityksen rakentamisessa ja metalliteollisuudessa.” (Opetushallitus 2004, 196.)

Ruotsin perusopetuksen valtakunnallinen opetussuunnitelma huomioi eksplisiittisemmin kemiallisen tietojen ja tutkimuksen vaikutuksen kulttuuriimme ja maailmankuvaamme (liite 2, kohta 9).

Kemiallisen tiedon käyttäminen valintojen yhteiskunnallisissa ja eettisissä perusteluissa näkyy sekä Suomen että Ruotsin perusopetuksen valtakunnallisen opetussuunnitelman kemian tavoitteissa selvästi. Molemmat ottavat erityisesti esille ympäristökysymykset. (Liite 2, kohta 10.)

Kemian tutkimuksen eettisyydellä tarkoitetaan tutkimista ja tutkijoita ohjaavia eettisiä periaatteita, kuten tutkimuksen julkisuutta, objektiivisuutta ja kriittisyyttä, sekä tutkimuksen ja sen tulosten yhteiskunnallista merkitystä. Suomen perusopetuksen opetussuunnitelman perusteissa ei käsitellä kemian tutkimuksen eettisyyttä lainkaan, jos ei huomioida laboratoriotyöskentelyn turvallisuuteen liittyviä tavoitteita. Laboratoriotyöskentelyn turvallisuustavoitteet liittyvät kuitenkin pikemminkin käytännölliseen turvallisuusnäkökulmaan kuin tutkimuseettiseen näkökulmaan. Ruotsin perusopetuksen valtakunnallinen opetussuunnitelma nostaa esille kemian tutkimuksen eettisyyden luonnontieteellisten aineiden yhteisissä arvosteluperusteissa,

jotka koskevat myös kemiaa. Arvosteluperusteet lähestyvät luonnontieteiden eettisyyttä ottamalla esille luonnontieteellisen tutkimusten tulosten ja tuotosten vaikutuksen ihmisiin ja luontoon. Ruotsin valtakunnallisen opetussuunnitelman luonnontieteiden arviointikriteerit ottavat esille eettisten kysymysten lisäksi myös esteettisten kysymysten merkityksen. (Liite 2, kohta 11.)

Lukio-opetuksen tavoitteet

Lukiotasoisien opetuksen kemian tavoitteissa huomioitua kemian eettistä ja yhteiskunnallista ulottuvuutta käsittelevät sisältöluokat on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Kemian yhteiskunnallisen merkityksen ja eettisten ulottuvuuksien huomiointi Suomen, Ruotsin ja Norjan lukiotasoisissa valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa.

Sisältöluokat	Lukion opetus-suunnitelman perusteet	GY-07 - Kursplaner för Kemi (Ruotsi)	Programområde for realfag (Norja)
Kemian sovellutusten merkitys yhteiskunnalle ja elinympäristölle	+	+	+
Kemiallisen tiedon ja tutkimuksen vaikutus kulttuuriimme ja maailmankuvaamme		+	+
Kemiallisen tiedon käyttäminen valintojen yhteiskunnallisissa ja eettisissä perusteluissa	+	+	+
Kemian tutkimuksen eettisyys			+

Perusopetuksen opetussuunnitelman tavoin Suomen *Lukion opetussuunnitelman perusteet* (Opetushallitus 2003) pitää kemian sovellutusten merkitystä yhteiskunnan ja elinympäristömme tilaan tärkeänä. Lukio-opetuksen opetussuunnitelman perusteet asettaa jopa opetuksen yhdeksi keskeiseksi tavoitteeksi välittää sovellutuksia ja kestävästä kehityksestä korostavaa kuvaa kemiasta.

”Opetus välittää kuvaa kemiasta yhtenä keskeisenä perusluonnontieteenä, joka tutkii ja kehittää materiaaleja, tuotteita, menetelmiä ja prosesseja kestävästä kehityksen edistämiseksi.” (Opetushallitus 2003, 152.)

Käytännön sovellutukset sekä kestävästä kehityksestä teema ovat esillä myös Ruotsin ja Norjan kemian lukiotasoisien opetuksen valtakunnallisissa tavoitteissa. (Liite 2, kohta 8.)

Kemiallisen tiedon ja tutkimuksen kulttuurillisen ja maailmankuvallisen vaikutuksen ymmärtäminen jää Suomen Lukion opetussuunnitelman perusteiden kemian tavoitteissa implisiittisemmäksi kuin perusopetuksen opetussuunnitelmassa:

”Kemian opetuksen tavoitteena on, että opiskelija – – osaa kemian keskeisimmät peruskäsitteet ja tietää kemian yhteyksiä jokapäiväisen elämän ilmiöihin sekä ihmisen ja luonnon hyvinvointiin.”

”Kurssin tavoitteena on, että opiskelija – – osaa orgaanisten yhdisteiden rakenteita, niiden ominaisuuksia ja reaktioita sekä ymmärtää niiden merkityksen ihmiselle ja elinympäristölle.” (Opetushallitus 2003, 152–153.)

Ruotsin lukio-opetuksen kemian arvostelukriteereissä huomioidaan kemiallisen tiedon kehityksen merkitys maailmankuvan muodostamisessa. Norjan kemian lukiotasoisien opetuksen tavoitteet puolestaan näkevät kemiallisen ja tieteellisen tiedon kehityksen osana kulttuuriperintöämme. (Liite 2, kohta 9.)

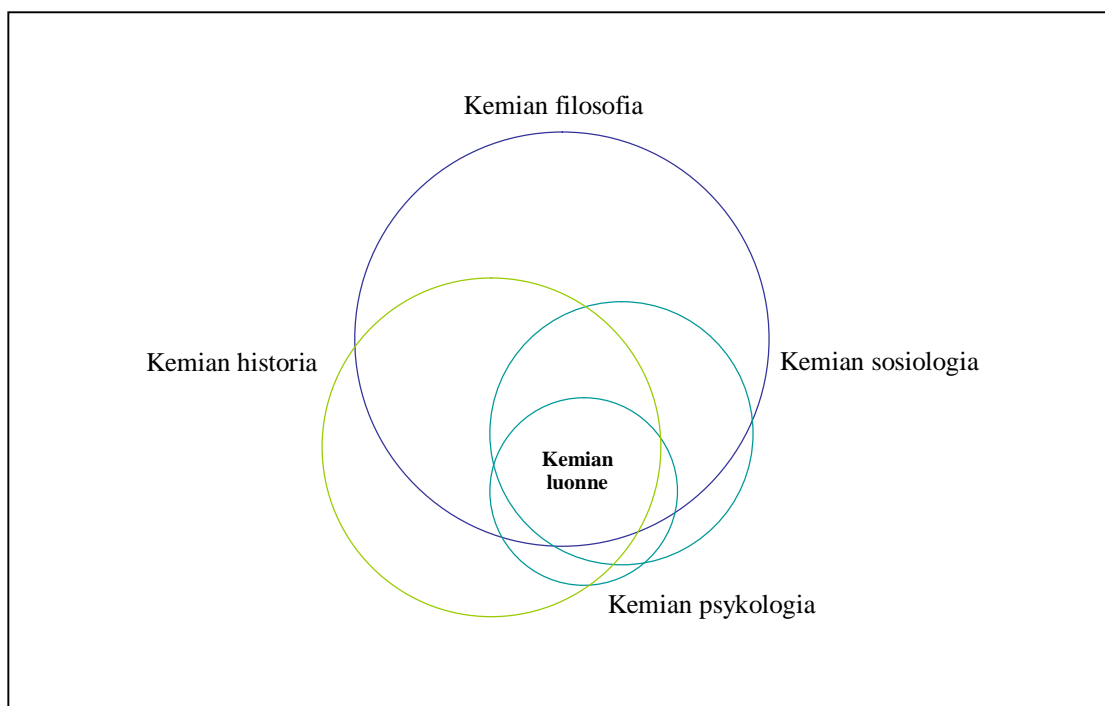
Kemiallisen tiedon käyttämisen yhteiskunnallisten ja eettisten valintojen perusteluissa Suomen, Ruotsin ja Norjan lukiotasoisien opetuksen valtakunnalliset opetussuunnitelmat huomioivat kemian opetuksen yleisissä tavoitteissa. Käytännönläheisimmin asiaa lähestyvät Norjan valtakunnallisen opetussuunnitelman kemian tavoitteet, jotka huomioivat, että koulun ulkopuolella kemiaan törmätään aivan toisenlaisessa kontekstissa kuin koulussa. Tavoitteiden mukaan opiskelijat tulisikin tutustuttaa kemialliseen tietoon eri konteksteissa esimerkiksi aikakauslehdissä, mainoksissa ja Internetissä. (Liite 2, kohta 10.)

Suomen ja Ruotsin lukio-opetuksen valtakunnalliset opetussuunnitelmat eivät aseta tutkimusetiikkaan tai tutkimuksen eettisen merkityksen ymmärtämiseen liittyviä tavoitteita. Norjan lukiotasoisien opetuksen valtakunnallinen opetussuunnitelma näkee, että kemian sovellutusten ja tutkimuksen merkitys erityisesti ympäristölle tekee kemiallisesta tutkimuksesta eettistä (Utdanningsdirektoratet 2006, 1). Opetussuunnitelman toisen kurssin tavoitteissa mainitaankin kemian tutkimuksen eettisyyden ymmärtäminen (liite 2, kohta 11).

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Kemian filosofiassa on tutkittu myös muita tieteentieteen lohkoja (katso Niiniluoto 2002, 19–22) kuin tieteenfilosofiaa. Esimerkiksi Michael Davisin (2002) ja Jeffrey Kovacin (2006) kemistien ammattietiikkaa kuvaavat tutkimukset ovat enemmän tieteensosiologisia tai -psykologisia kuin tieteenfilosofisia. Tieteenpsykologiaan kuuluvat myös esimerkiksi kemiallista luovuutta analysoivat tutkimukset. Sekä tieteenfilosofia, -historia, -sosiologia että -psykologia sisältävät kaikille tieteille yhteisiä sekä vain tietyille tieteenaloille tyypillisiä kysymyksiä (Niiniluoto 2002, 31–34). Kaikki luonnontieteiden yhteisen tieteentieteen kannalta kiinnostavat kysymykset eivät ole kiinnostavia kemian kannalta. Siksi kaikki luonnontieteen luonteen (*nature of science*) keskeiset piirteet eivät välttämättä ole kemian luonteen (*nature of chemistry*) kannalta merkittäviä. Kemian luonteen kannalta merkittävät asiat on tässä tutkimuksessa pyritty löytämään tutustumalla kemian filosofian tutkimuksissa esitettyihin ideoihin, joiden merkitystä kemian luonteeseen ja kemian opetuksen tavoitteisiin pohditaan tässä luvussa. Kemian luonteen voi nähdä sijaitsevan neljän kemian tietoa ja tutkimusta kuvaavan tutkimusalan risteyskohdassa kaavion 5 mukaisesti.

Kaavio 5. *Kemian luonne neljän tiedonalan yhtymäkohdassa mukailten McComasia ja Olsonia (1998, 50):*



6.1 Mallit ja historiallinen lähestymistapa

Valtakunnallisten opetussuunnitelmien käsitys kemian tutkimuskohteesta oli jokaisessa opetussuunnitelmassa samansuuntainen. Kaikissa opetussuunnitelmissa nostettiin selvästi esille myös aineiden rakenteen ja ominaisuuksien yhteys. Esimerkiksi Suomen perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden kemian tavoitteiden keskeisissä sisällöissä mainitaan:

”alkuaineiden ja yhdisteiden ominaisuuksien ja rakenteiden selittäminen atomimallin tai jaksollisen järjestelmän avulla.” (Opetushallitus 2004, 196.)

Vaikka molekyylien, atomien ja orbitaalien mikrotaso mainittiin eksplisiittisesti vain Norjan lukiotasoisien opetuksen valtakunnallisen opetussuunnitelman kemian tavoitteissa (liite 2, kohta 2), kaikkien tutkittujen opetussuunnitelmien tavoitteissa käytetään kemiallisissa selityksissä mikrotason selitysmalleja.

Kemian käsitteiden ja mallien eroavuus fysiikassa käytetyistä käsitteistä ja malleista näkyy implisiittisesti kemian tutkimuskohteen kuvauksessa. Esimerkiksi Suomen lukio-opetuksen opetussuunnitelmien perusteissa todetaan, että fysiikan tutkimuksen *”tavoitteena on löytää luonnossa yleispäteviä lainalaisuuksia ja esittää ne matemaattisina malleina”* (Opetushallitus 2003, 144) ja kemian tutkimuksen tavoitteena *”ilmiöiden tulkitseminen ja selittäminen mallien ja rakenteiden avulla, ilmiöiden kuvaaminen kemian merkkikielellä sekä ilmiöiden mallintaminen ja matemaattinen käsittely”* (Opetushallitus 2003, 152). Tutkimuskohteen kuvaukset tukevat kemian filosofien näkemystä, että fysiikka on tieteenä keskittynyt ilmiöiden kvantitatiiviseen matemaattiseen mallintamiseen kemian mallien ollessa useammin luokittelevia ja kuvaavia (Erduran 2001, 583; Erduran & Scerri 2002, 11).

Reduktiokysymystä ei eksplisiittisesti oteta esille yhdessäkään tutkitussa valtakunnallisessa opetussuunnitelmassa. Suomen perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden fysiikan opetuksen päättöarvioinnin kriteereissä esitetään reduktionistinen näkemys fysiikasta perusluonnontieteenä, jonka *”tietoja ja kokeellista tiedonhankintamenetelmää käytetään muissa luonnontieteissä ja tekniikassa”* (Opetushallitus 2004, 193). Tarkempaa kuvausta siitä, kuinka fysiikan tietoja käytetään esimerkiksi kemiassa, ei esitetä. Jotta välttyttäisiin virhekäsityksiltä,

että on olemassa yksi oikea luonnontieteellinen tutkimusmenetelmä tai että kaikki luonnontieteellinen tieto on johdettavissa fysiikasta, tulisi tarkemmin kuvata kemiallisen ja fysikaalisen tiedon ja tutkimuksen suhdetta.

Kemian opetuksessa kemiassa käytettävät käsitteet, kuten kemiallinen sidos tai yhdisteen rakenne, esitetään usein ilman pohdintaa niiden luonteesta tai suhteesta toisiinsa. Tästä syystä oppilailla jää käsitteistä epämääräinen kuva. Keskustelemalla reduktiosta voidaan vahvistaa myös parempaa ymmärrystä kemian käsitteistä. Reduktiokysymyksen käsittely tukisi sekä kemian mallien ja selitysten ymmärrystä, tieteellisen argumentaation oppimista että kemian makro- ja mikromaailmojen välisten suhteiden ymmärrystä (Erduran & Scerri 2002, 13–18 ja Osborne et al. 2001). Teoreettista käsittelyä kvanttikemian laskennallisin mallein ei tulisi kuitenkaan aloittaa liian aikaisin (Erduran 2001, 588–589). Kemian submikroskooppisen ja havainnoitavan makrotason välistä suhdetta sekä mallien asemaa siinä kannattaa käsitellä oppilaille sopivalla tasolla. On tärkeää ymmärtää, että kaikki kemian mallit (myös kvanttikemian laskennalliset mallit) ovat ainoastaan malleja.

Suomen opetussuunnitelmien perusteet huomioivat, että kemian mallit liittyvät kemiallisten ilmiöiden ja ominaisuuksien selittämiseen. Ne eivät kuitenkaan huomioi sitä, että malli on aina idealisoitu kuvaus ja kuvaa kohdettaan vain rajallisesti (katso Gilbert et al. 2000a, 11 ja Saari 2000, 25). Ainoastaan Ruotsin lukio-opetuksen valtakunnallinen opetussuunnitelma (Skolverket 2006a) nosti esille sekä mallien ja teorioiden rajat että niiden alustavuuden ja kehittymisen. Erduranin (2001, 587–589) mukaan se, että oppilaat eivät ymmärrä mallien eroja ja rajoituksia sekä niiden kehittymistä ja muuttumista, on tärkeimpiä esteitä kemiallisten mallien luonteen ymmärtämisen oppimiselle. Oppilaille saattaa tästä syystä jäädä naiivin realistinen kuva malleista todellisuuden täydellisinä tai tarkoituksellisesti vajavaisina kopioina.

Mallien luonteen ymmärtäminen on erityisen ongelmallista kemiassa, koska kemian selitykset sijoittuvat atomien ja molekyylien submikroskooppiseen maailmaan, josta voidaan tehdä havaintoja vain makroskooppisessa maailmassa. Kemiallisten muutosten ja rakenteiden kuvailuun käytetään hyvin monenlaisia ja tasoisia malleja, jotka saattavat olla keskenään ristiriitaisia. Malleja voidaan kuvata hyvin monin eri symbolisin ja ikonisin tavoin, joka on omiaan sotkemaan oppilaiden ajatuksia. (Katso

Boulter & Buckley 2000; Gilbert et al. 2000c sekä Grosholz & Hoffman 2000.) Lisäksi opetuksessa käytetään usein useista erilaisista historiallisista tai tieteellisistä malleista luotuja yhdistelmä- eli hybridimalleja (Gilbert et al. 2000a, 12). Siksi olisi tärkeä ymmärtää, että tieteelliset mallit liittyvät selityksen antamiseen jollekin ilmiölle sekä sisältävät omat rajoitteensa. Keskeisellä sijalla ovat uudet tutkimuskysymykset, joita ratkaistaessa vanhat mallit kehittyvät tai joiden ratkaiseminen vaatii kokonaan uusia malleja. Tämä mallintamisen prosessi on osa tieteellisen tiedon kehittymistä.

Suomen opetussuunnitelmien perusteet eivät ota esille kemiallisen tiedon kehittymistä sekä avoimuutta muutoksille ja tarkistuksille, vaikka tieteellisen tiedon alustavuus on yksi luonnontieteellisen tiedon keskeisimmistä piirteistä sekä englanninkielisissä opetussuunnitelmissa (McComas & Olson 1998) että asiantuntijaryhmien mielipiteissä (Bell 2004, 430–431; Collins et al. 2001 ja Lederman 307–308). Suomen opetussuunnitelmien perusteissa tulisi nostaa vahvemmin esille historiallinen lähestymistapa, jossa malleja esitellään historiallisessa kontekstissa ymmärtäen, mihin malli on aikanaan luotu ja mitä rajoituksia mallilla on. Näin historiallinen lähestymistapa tukisi kemiallisen tiedon ja mallien luonteen ymmärrystä ja sillä olisi syvällisempää merkitystä, kuin pelkällä opetuksen monipuolistamiseen pyrkivällä tieteilijöiden henkilökuvien ja tieteen läpimurtojen esittelemisellä.

Lähestymällä tieteen mallien ja teorioiden kehitystä Sibyl Erduranin (2001, 581–582) ehdottamasta osattoman näkökulmasta voidaan käsitellä myös syitä tutkimuskohteen valintaan. Historiallinen lähestymistapa helpottaisi tällaisten intentionaalisten selitysten käsittelyä. Vastatessaan kysymyksiin: "Miksi tätä asiaa on tutkittu?" ja "Miksi tämä tieto on tärkeää?" intentionaaliset selitykset auttavat näkemään kemiallisen tiedon merkityksen laajemmassa kulttuurisessa kontekstissa. Tieteen filosofian kysymyksiä valottavia kemian historian esimerkkejä löytyy esimerkiksi Justin ja Gilbertin (1999), Erduranin (2001, 585–586) sekä Niazin ja Rodriguezin (2001) tutkimuksista.

Perinteinen induktivistinen käsitys tieteen kehittymisestä ei anna oikeaa kuvaa kemian tutkimuksesta ja kemiallisen tiedon kehittymisestä (katso esimerkiksi Niaz & Rodriguez 2001). Esimerkiksi Deborah Mayon (1996) edustama uusi kokeellisuus sopisi todennäköisesti paljon paremmin kuvaamaan kemiallista tiedon ja mallien

kehittymistä. Mayon kuvaamassa tieteellisen kehityksen mallissa keskiössä eivät ole teoriat vaan pienten ja rajattujen hypoteesien testaus. Hypoteeseja testataan rajaamalla niistä pois virheiden mahdollisuudet kokeellisin järjestelyin ja tilastollisin virheentarkasteluin. Mayon yksittäisten hypoteesien ja kokeiden tasolta lähtevä lähestymistapa saattaisi tarjota erinomaisesti taso-spesifiseen mallintamiseen keskittyneelle kemialle sopivan tavan kuvata tieteellisen tiedon kehittymistä. Mielenkiintoinen kemian filosofinen tutkimuskysymys voisi olla, miten Mayon tai esimerkiksi Ronald Gieren (1998) esittämät tieteellisen kehityksen mallit onnistuvat kuvaamaan esimerkiksi reaktiokinetiikan tai happo-emäsreaktioiden mallien historiallista kehitystä.

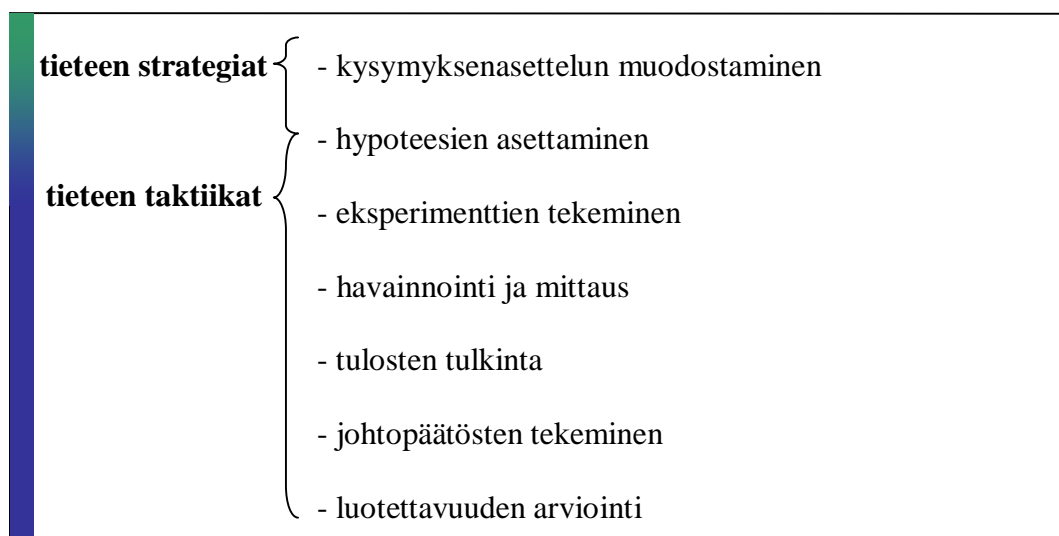
6.2 Kokeellisuus ja kemian tutkimus

Isobritannialainen asiantuntijaryhmä näki tutkimuksen kysymyksenmuodostamisen sekä hypoteesien ja ennusteiden merkityksen tiedeopetuksen opetussuunnitelmien kannalta keskeisinä teemoina (Collinsin et al. 2001). Molemmat teemat olivat esillä ainoastaan Ruotsin lukiotasoisessa kemian opetussuunnitelmassa *GY-07: Kursplaner för Kemi* (Skolverket 2006a). Suomen opetussuunnitelmien perusteet eivät ota kemian tavoitteissa eksplisiittisesti esille sen paremmin kysymyksenmuodostamista kuin hypoteesejakaan. Opetussuunnitelmien perusteiden havainnoinnista mallintamiseen etenevä ja kysymyksenasetteluvaiheen unohtava lähestymistapa voidaan nähdä tieteenfilosofiselta näkemykseltään induktivistisena (katso luku 2.1.1). Induktivistinen lähestymistapa, jossa opetuksessa käytettävillä oppilastoilla on tarkoitus osoittaa teorian paikkansapitävyys, voi johtaa siihen, että oppilas ei ymmärrä tekemänsä kokeen yhteyttä teoriaan ja kokeiden tekeminen muuttuu koneelliseksi reseptien seuraamiseksi (Monk & Dillon 2000, 74–76).

Induktivistisen näkemyksen kyseenalaistanut Popper (1992, 31–32) yhdisti luovuuden käsitteenluomisvaiheeseen. Suomen opetussuunnitelmien mainitut tutkimusvaiheet eksperimenttien tekeminen, havainnointi ja tulosten tulkinta ovat Elkanan (2000) esittämän jaon mukaan tieteen taktiikoita. Popperin käsitteenluomisvaiheeseen liittyvät hypoteesien asettaminen ja etenkin tutkimuskysymysten muodostaminen ovat tieteen strategioita ja määrittävät tieteen luonnetta syvällisemmällä tasolla. Tutkimuksessa esiintyneet tutkimuksen vaiheet ja niiden suhde tieteen strategioihin ja

taktiikoihin on esitetty kaaviossa 6. Kaikki kokeellinen tutkimus ei tietenkään etene Elkanan esittämän mallin mukaisesti ja uusia käsitteitä voidaan luoda myös esimerkiksi tulosten tulkinnan kautta. On tärkeää ymmärtää, että tieteellinen tieto ei nouse suoraan havainnoista, koska tutkimuskysymysten muodostaminen ja havaintojen tulkinta tapahtuu aina ihmisen luomien käsitejärjestelmien avulla (katso luku 2.1.1).

Kaavio 6. Valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa esiintyvien kokeellisen tutkimuksen vaiheiden sijoittuminen Elkanan (2000) tieteen strategioiden ja taktiikoiden jakoon:



Jotta oppilas oppisi, miksi juuri tutkitut ominaisuudet on valittu tutkimuksen kohteeksi ja miten tutkimuksen puitteet antavat käsitteet on muodostettu, opetussuunnitelmissa tulisi ottaa esille myös tieteen strategiat. Perusopetuksessa hypoteesien tekemisen tulisi ehdottomasti liittyä kemian opetuksen tavoitteisiin ja viimeistään lukion opetussuunnitelman perusteiden tutkimusvaiheiden kuvaukseen tulisi sisällyttää myös tutkimuskysymysten muodostamisen vaihe.

Tieteen taktiikoiden tasolla tarvitaan erityisesti huolellisuutta ja tarkkuutta. Tieteen strategiat taas korostavat tutkituissa opetussuunnitelmissa unohdettua tieteellistä luovuutta. Yksikään tutkituista valtakunnallisista opetussuunnitelmista ei eksplisiittisesti huomionnut luovuuden osuutta kemiallisten mallien ja käsitteiden muodostamisessa. Asiantuntijaryhmät ovat nähneet tieteellisen luovuuden yhdeksi tärkeimmistä luonnontieteiden luonnetta kuvaavista piirteistä (Bell 2004, 430–431;

Collins et al. 2001: Lederman 2004, 307). Tieteellisen luovuuden eksplisiittinen esille nostaminen olisi tarpeen, jotta oppilaat muodostaisivat realistisemmän kuvan kemian tutkimuksesta ja siinä tarvittavista vahvuuksista. Nykyinen huolellisuutta ja tarkkuutta vaativua tutkimusvaiheita korostava kuva tutkimuksesta saattaa antaa väärään kuvan luonnontieteellisen tutkimuksen ja koulutuksen tarjoamista haasteista. Tieteellistä luovuutta voidaan harjoitella oppilaiden tekemillä pienimuotoisilla tutkimuksilla. Kun oppilaat ymmärtävät mallintamisen prosessin, he voivat itse asettaa tutkimuskysymyksiä ja hypoteeseja, joihin etsivät vastauksia tai varmistusta kokeellisesti (katso Monk & Dillon 2000, 76). Tärkeää on, että kysymyksenasettelua ja siihen liittyviä ontologisia ja episteemisiä kysymyksiä käsitellään myös keskustellen (katso Elkana 2000).

Ruotsin ja Norjan valtakunnalliset opetussuunnitelmat huomioivat tieteellisen tiedon rakentuvan käsitteiden, mallien ja teorioiden kehittymisen kautta. Toisin kuin Suomen opetussuunnitelmien perusteet, ne asettavat tavoitteeksi ymmärtää teorian ja mallit myös kokeellisuuden lähtökohtana eikä pelkästään tuloksena (katso liite 2, kohta 7). Myös Suomen opetussuunnitelmien perusteiden kemian opetuksen tavoitteissa tulisi eksplisiittisesti nostaa esille, että tieteelliset teoriat ja mallit ovat käsite rakenteita, joissa käytettävät käsitteet määrittelevät myös tutkijan havaintoja ja kysymyksenasetteluja.

Tieteen julkaiseminen ja asettaminen muun tiedeyhteisön kritiikin kohteeksi on tärkeä osa tiedettä. Yksikään opetussuunnitelma ei noston esille tieteellisen tutkimuksen yhteisöllistä luonnetta ja tiedeyhteisön roolia mallien ja teorioiden hyväksynnässä. Tieteenteon sosiaalinen konteksti tuli esille ainoastaan implisiittisesti ryhmätyöskentelytaidot huomioivina tavoitteina. Tutkiessaan millaisia luonnontieteellisiä tietoja ja taitoja ihmiset tarvitsevat yhteiskunnallisina toimijoina ja jokapäiväisessä elämässään Duggan ja Gott (2000) näkivät tärkeimmiksi luotettavuuden arviointiin liittyvät taidot. Jos ei ymmärrä tapaa, jolla tiedeyhteisö arvioi tuloksiaan, on hyvin vaikea arvioida kriittisesti sitä valtavaa määrää erilaisia tutkimustuloksia, jotka tulvivat tiedotusvälineistä.

Tieteellisen tiedon tuottamiseen liittyvä sosiaalinen konteksti on keskeistä sekä luonnontieteen kulttuurisen luonteen ymmärtämisessä että puhtaasti käytännöllisestä

näkökulmasta. Tieteenteon sosiaalinen luonne tulisi valtakunnallisissa opetussuunnitelmissa nostaa eksplisiittisemmin esille lähestyen sitä sekä historiallisessa kontekstissa että ajankohtaisiin ja kiistanalaisiin kysymyksiin keskittyen. Erilaiset lähestymistavat mahdollistaisivat sen oppimisen, että kaikki tieteellinen tieto ei ole yhtä varmaa. Tieto voi myöhemmin osoittautua epätarkaksi tai jopa vääräksi. Tietyt perustavanlaatuiset tiedot ovat kuitenkin hyvin varmoja ja tiedeyhteisön nykyinen konsensustieto on yleensä perustelluinta mahdollista.

Koska opettajat opetuksen toteuttajina valitsevat lopulta oman opetuksensa tavoitteet, jatkossa kannattaisi tutkia opettajien käsityksiä kemiallisen tutkimuksen ja tiedon luonteesta. Jos opettaja omaa induktiivisen näkemyksen tutkimuksesta ja positivistisen näkemyksen tiedosta, näkeekö hän roolinsa vain tieteellisen tiedon ja menetelmällisten taitojen välittäjänä? Millaisia muita käsityksiä opettajilla on kemiallisen tiedon ja tutkimuksen luonteesta ja mikä on niiden vaikutus opetukseen? Vaikuttaako opettajan näkemys kemian tutkimuksen luonteesta siihen, mitä oppimistavoitteita opettaja asettaa kokeellisille oppilastöille?

6.3 Kemian yhteiskunnallisen merkityksen ja etiikan näkökulma

Koska kemian tutkimukset ovat yleensä kiinnostuneet perimmäisen ymmärryksen kasvattamisen lisäksi myös tutkimustulosten käyttökelpoisuudesta (Kovac 2006, 164–165), ei liene ihme, että kemian kaikki tutkitut kemian opetuksen tavoitteet ottavat esille kemian sovellutusten yhteiskunnallisen merkityksen. Materiaalisen maailman lisäksi kemiallisella tiedolla ja tutkimuksella on ollut valtava vaikutus myös maailmankuvaamme (Sjøberg 2000, 39–54). Kemian vaikutus maailmankuvaamme kannattaisikin huomioida paremmin Suomen opetussuunnitelmien perusteiden opetuksen tavoitteissa.

Kemiallisen tutkimuksen käytännön sovellutuksia tuottavalla luonteella on vaikutusta myös kemian tutkimuksen eettisyyteen. Tutkimuksessa syntyvien sovellutusten yhteiskunnalliset tai ympäristövaikutukset voivat olla valtavat. Sovellutusten merkitys korostaa tutkijoiden vastuuta tutkimuskohteen valinnassa ja tekevät tutkimuskohteen valinnasta aina eettisen päätöksen. (Katso Jacob & Walters 2005; Kovac 2001 ja Schummer 2001b.) Lisäksi tieteen ja tutkimuksen poikkeuksellinen yhteiskunnallinen

asema asettaa kaikelle tutkimukselle tutkimuseettisiä velvoitteita (Kovac 2006 ja Merton 1973). Norjan lukiotasoisien opetuksen ja Ruotsin perusopetuksen kemian tavoitteiden lisäksi tieteellisen tutkimuksen eettisyys on mainittu kaikissa kahdeksassa McComasin ja Olsonin (1998) tutkimassa tiedeopetuksen englanninkielisessä opetussuunnitelmassa. Puolimatkan (1995, 139–141) mukaan indoktrinoivaa on opetus, joka sivuuttaa esimerkiksi sisällön maailmankatsomukselliset ja moraaliset kytkennät. Jos halutaan antaa oppilaille mahdollisuus arvioida oppimaansa maailmankatsomuksellisessa viitekehyksessä, tulisi Suomen opetussuunnitelmissa tuoda esille kemian tutkimuksen eettisyys. Vaikka tutkimuseettisen opetuksen ensisijainen vastuu on Suomessa korkeakouluilla (Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2006), kannattaisi siihen liittyvien kysymysten käsittely kuitenkin aloittaa viimeistään lukio-opetuksessa.

Koska tutkimuseettisen opetuksen vastuu on korkeakouluilla, olisi mielenkiintoista tutkia millaisia tutkimuseettisiä päätöksiä korkeakouluissa tutkimusta tekevät kemistit tekevät ja millaisena he näkevät eettisen vastuunsa. Tutkimus voisi vastata kysymyksiin, mitä tutkimuseettisiä tekijöitä tutkijat ottavat huomioon ja mitkä tutkimuseettiset näkökohdat jäävät huomioimatta. Tutkimuksen tuloksia olisi mahdollista käyttää esimerkiksi korkeakoulujen kemian tutkimuseettisen opetuksen kehittämiseen.

6.4 Yhteenveto

Ruotsin ja Norjan valtakunnalliset opetussuunnitelmat nostavat Suomen opetussuunnitelmien perusteita eksplisiittisemmin esille erilaisia luonnontieteiden luonteeseen kuuluvia piirteitä, kuten kemiallisen tiedon alustavuuden sekä teorioiden ja mallien vaikutuksen kokeelliseen tutkimukseen (katso liite 2, kohdat 5 ja 7). Suomen opetussuunnitelmien perusteissa on nähtävissä implisiittinen lähestymistapa, jonka mukaan luonnontieteiden luonnetta oppii ymmärtämään havaitsemisesta mallintamiseen etenevän kokeellisuuden kautta, eikä sitä tarvitse eksplisiittisesti käsitellä. Esimerkiksi perusopetuksen kemian opetuksen tavoitteissa todetaan, että kokeellisuuden tulisi ”*auttaa oppilasta hahmottamaan luonnontieteiden luonnetta ja omaksumaan uusia luonnontieteellisiä käsitteitä, periaatteita ja malleja, kehittää käden taitoja, kokeellisen työskentelyn ja yhteistyön taitoja sekä innostaa oppilasta*

kemian opiskeluun” (Opetushallitus 2004, 195). Fouad Abd-El-Khalickin ja Norman Ledgermanin (2000) mukaan Suomen opetussuunnitelmien implisiittinen lähestymistapa luonnontieteiden luonteen piirteisiin on Ruotsin ja Norjan opetussuunnitelmien eksplisiittisempää lähestymistapaa tehottomampi luonnontieteiden luonteen ymmärtämisen opettamisessa.

Suomen *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteissa* (Opetushallitus 2004) ja *Lukion opetussuunnitelman perusteissa* (Opetushallitus 2003) kemian vaikutus yhteiskuntaan ja kulttuuriin nähdään yhdensuuntaisena ja instrumentaalisenä. Opetussuunnitelmien perusteet korostavat ilmiöiden ja sovellutusten merkitystä näkemättä kemialliseen tietoon ja sen tuottamiseen liittyvää eettisyyttä. Ilmiöitä korostava näkemys voi nousta esimerkiksi siitä, että mallit ja niiden antamat selitykset nähdään naiivin realismin valossa täydellisinä kuvauksina kohteistaan. Ei ymmärretä, että tieteelliset mallit ja selitykset ilmiöistä ovat nekin kulttuurillisia tuotteita ja vuorovaikutussuhteessa muuhun kulttuuriin ja maailmankuvaamme. Kemian ja yhteiskunnan suhteessa opetussuunnitelmien perusteissa huomioidaan kemian vaikutus yhteiskuntaan – mutta ei yhteiskunnan vaikutusta kemiaan. Tämä näkemys saattaisi olla lähtöisin siitä, että luonnontieteellinen osaaminen nähdään välineenä opetuksen päämäärien ollessa instrumentaalisen hyötynäkökulman mukaisia (katso Sjøberg 2000, 161–177). Tätä tukee esimerkiksi se, että Suomen opetussuunnitelmien perusteet unohtavat mainita kemian vaikutuksen maailmankuvaamme, joka on kulttuuriperustelun kannalta todella oleellinen perustelu, ja ottavat esille kemian tietojen käyttämisen jokapäiväisten valintojen ja kulutuspäätösten tukena, joka on selvästi käytännöllisen hyödyn perustelu.

Historiallinen lähestymistapa ja tieteenfilosofisten kysymysten eksplisiittinen käsittely on edellytys ymmärtää paremmin luonnontieteiden luonnetta sekä kemian kulttuurillista merkitystä. Suomen opetussuunnitelmien perusteissa tulisi huomioida paremmin seuraavat teemat:

- **Kemiallisten mallien ja teorioiden rajat**

Kemian mallit ja teoriat ovat tasospesifisiä ja sisältävät oletuksia ja likimääräistyksiä, jotka rajoittavat niiden soveltamisalaa. Mallit eivät ole todellisuuden kopioita vaan ideoiden kehittelemiseksi rakennettuja kuvauksia (Erduran 2001, 589).

- **Kemian ja fysiikan suhde**

Kaikki kemiallinen tieto ei ole johdettavissa suoraan fysiikasta. Fysiikan teorat asettavat ainoastaan rajoja kemiallisille selityksille, jotka keskittyvät fysiikalle ominaisen matemaattisen mallintamisen lisäksi kuvaamaan kemian submikroskooppisella tasolla tapahtuvia muutoksia ja niiden ilmentymistä makroskooppisella tasolla. Kemia on oma itsenäinen tieteenala, jolla on sille ominaiset kysymyksenasettelut, tutkimusmenetelmät ja selitysmallit.

- **Kemiallisen tiedon alustavuus**

Kemiallinen tieto on alustavaa eli sen käyttävät mallit sekä teorat ovat muuttuneet ajan saatossa. Historiallisten mallien ja niiden kehityksen huomioiminen edistäisi myös mallien luonteen ymmärrystä (katso esimerkiksi Duschl 2006; Erduran 2001 sekä Niaz & Rodriguez 2001).

- **Kysymyksenasettelu ja mallien vaikutus kokeelliseen tutkimukseen**

Teorat ja mallit muodostavat pohjan, jonka varassa kokeelliset asetelmat luodaan ja tuloksia tulkitaan. Kysymyksenasettelulla ja hypoteesien tekemisellä on keskeinen asema kemiallisessa tutkimuksessa.

- **Luovuuden merkitys kemian tutkimuksessa**

Muodostaessaan kysymyksenasetteluja ja hypoteeseja sekä luodessaan malleja ja teorioita tutkijalta vaaditaan luovuutta ja mielikuvitusta.

- **Kemian tutkimuksen sosiaalinen luonne**

Tieteellinen tutkimus on yhteisöllistä toimintaa. Tiedeyhteisön on merkittävä rooli mallien ja teorioiden hyväksynnässä. Tiedeyhteisön kriittisen arvioinnin tuloksena useimmat perus- ja lukio-opetuksessa esitetyt kemian teorat ja mallit ovat hyvin perusteltuja ja varmoja.

- **Kemiallisen tiedon ja tutkimuksen vaikutus kulttuuriimme ja maailmankuvaamme**

Kemialla on ollut suuri vaikutus näkemykseemme ympäröivästä maailmasta ja paikastamme siinä.

- **Kemian tutkimuksen eettisyys**

Tutkimuksen tekeminen on aina eettistä toimintaa. Kemian tutkimus tuottaa usein käytännön sovellutuksia, joilla saattaa olla suuriakin vaikutuksia esimerkiksi ympäristölle.

Kemian filosofia on keskeisessä asemassa kemian luonteen ymmärtämisessä ja osa hyvää luonnontieteellistä yleissivistystä. Seuraavia opetussuunnitelman perusteita suunniteltaessa tulee pitää huolta, että suunnittelussa ymmärretään tieteen- ja kemian filosofian merkitys luonnontieteellisen yleissivistyksen osana. Kemian luonne ja siihen liittyvät tieteenfilosofiset kysymykset pitäisi ottaa esille myös oppikirjoissa. Koska monilta kemian opettajilta usein puuttuu luonnontieteiden opettamiseen vaadittavat tiedot luonnontieteen filosofiasta ja historiasta (katso Collins et al. 2001, 5–6), tulisi kemian opettajakoulutuksessa keskittyä kemian luonteen ymmärtämiseen käsittelemällä kemian filosofisia kysymyksiä.

LÄHTEET

- Abd-El-Khalick, F. & Lederman, N. G. 2000. Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature. *International Journal of Science Education* 22 (7), 665–701.
- Ahonen, T. 2005. *Historiaan pohjautuva lähestymistapa kemian opetuksessa*. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, Kemian laitos.
- Allanou, R., Hansen, B. G. & van der Bilt, Y. 2003. Public Availability of Data on EU High Production Volume Chemicals – Part 2. *Chemistry Today*, Vol. 21 No 7/8, 59–64.
- Alters, B. 1997. Whose Nature of Science? *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 34 No 1, 39–55.
- Baird, D. 1997, Scientific Instrument Making, Epistemology and the Conflict between the Gift and Commodity Economies. *Techne: Electronic Journal of the Society for Philosophy and Technology* 2, (<http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v2n3n4/baird.html>), 13.10.2006.
- Baird, D. 2000. Analytical instrumentation and instrumental objectivity. Teoksessa Bhushan, N. & Rosenfeld, S. (toim.) *Of minds and molecules: new philosophical perspectives on chemistry*. New York, NY: Oxford University Press, 90–113.
- Bell, R. L. 2004. Perusing Pandora's box: exploring the what, when, and how of nature of science instruction. Teoksessa Flick, L. B. & Lederman, N. G. (toim.) *Scientific inquiry and nature of science: implications for teaching, learning, and teacher education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 427–446.
- Bhushan, N. & Rosenfeld, S. (toim.) 2000. *Of minds and molecules: new philosophical perspectives on chemistry*. New York, NY: Oxford University Press.
- Bhushan, N. 2006. Are chemical kinds natural kinds? Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht: Springer, 327–336.
- Boulter, C. J. & Buckley, B. C. 2000. Constructing a typology of models for science education. Teoksessa Gilbert, J. k. & Boulter, C. J. (toim.) *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 41–57.
- Carpenter, B. K. 2000. Models and explanations: understanding chemical reaction mechanics. Teoksessa Bhushan, N. & Rosenfeld, S. (toim.) *Of minds and molecules: new philosophical perspectives on chemistry*. New York, NY: Oxford University Press, 211–229.

- Chalmers, A. F. 1999. *What is this thing called Science?* Indianapolis, IN: Hackett Publishing Company.
- Collins, S., Osborne, J., Ratcliffe, M., Millar, R. & Duschl, R. 2001. *What 'ideas-about-science' should be taught in school science? A Delphi study of the expert community.* Paper presented at the Annual Conference of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), St. Louis, 26–28 March, (http://www.tlrp.org/dspace/retrieve/790/NARST2001_P3.pdf), 13.10.2006.
- Davis, M. 2002. Do the professional ethics of chemists and engineers differ? *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 8, 21–34.
- Del Re, G. 2001. Ethics and science. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 7, 85–102.
- Driver, R., Guesne E. & Tiberghien A. 1985. *Children's Ideas in Science.* Buckingham: Open University Press.
- Duggan, S. & Gott, R. 2000. What sort of science education do we really need? *International Journal of Science Education* 24 (7), 661–679
- Duschl, R. A. 2004. Relating history of science to learning and teaching science: using and abusing. Teoksessa Flick, L. B. & Lederman, N.G. (toim.) *Scientific inquiry and nature of science.* Dordrecht: Kluwer, 319–330.
- Elkana, Y. 2000. Science, philosophy of science and science teaching. *Science and Education* 9: 463–485. (Alunperin julkaistu lehdessä *Educational Philosophy and Theory*, 1970, Vol. 2.)
- Erduran, S. 2001. Philosophy of chemistry: an emerging field with implications for chemistry education. *Science & Education* 10, 581–593.
- Erduran, S. & Scerri, E. 2002. The nature of chemical knowledge and chemical education. Teoksessa Gilbert, J. K., De Jong, O., Justi, R., Treagust, D. f. & Van Driel, J. (toim.) *Chemical education: towards research-based practice.* Dordrecht: Kluwer, 7–28.
- Feyerabend, P. K. 1975. *Against method: outline of an anarchistic theory of knowledge.* London: New Left Books.
- Friedrich, B. 2004. Hasn't it? A commentary on Eric Scerri's paper "Has quantum mechanics explained the periodic table?" now published under the title "Just how ab initio is ab initio quantum chemistry?" *Foundations of Chemistry* 6, 117–132.
- Gallagher, J. J. (1991). Prospective and practicing secondary school science teachers' knowledge and beliefs about the philosophy of science. *Science Education* 75, 121–133.

- Giere, R. N. 1988. *Explaining science: a cognitive approach*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Giere, R. N., Bickle, J. & Mauldin, R. F. 2006. *Understanding scientific reasoning*. Belmont, CA: Thomson Wadsworth.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. & Rutherford, M. 1998. Models in explanations, Part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education* 20 (1), 83–97.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. J. & Elmer, R. 2000a. Positioning models in science education and in design and technology education. Teoksessa Gilbert, J. k. & Boulter, C. J. (toim.) *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 3–17.
- Gilbert, J. K., Pietrocola, M., Zylbersztajn, A. & Franco, C. 2000b. Science and education notions of reality, theory and model. Teoksessa Gilbert, J. k. & Boulter, C. J. (toim.) *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 19–40.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. J. & Rutherford, M. 2000c. Explanation with models in science education. Teoksessa Gilbert, J. k. & Boulter, C. J. (toim.) *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 193–208.
- Grosholz, E. R. & Hoffmann, R. 2000. How symbolic and iconic languages bridge the two worlds of chemist: a case study from contemporary bioorganic chemistry. Teoksessa Bhushan, N. & Rosenfeld, S. (toim.) *Of minds and molecules: new philosophical perspectives on chemistry*. New York, NY: Oxford University Press, 230–247.
- Hacking, I. 1983. *Representing and intervening: introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge: Cambridge university press.
- Hefferlin, R. 2006. The periodic system of molecules: presuppositions, problems and prospects. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht: Springer, 221–243.
- Hoffmann, R., & Torrence, V. 1993. *Chemistry imagined: reflections on science*. Washington DC: Smithsonian Institute Press.
- Huberman, A. M. & Miles, M. B. 1994. Data Management and Analysis Methods. Teoksessa Denzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (toim.) *Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks: Sage.
- Hudson, J. 2002. *Suurin tiede: kemian historia*. Helsinki: Art House.

- Hunger, J. 2006. How classical models of explanation fail to cope with chemistry: the case of molecular modeling. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht: Springer, 129–156.
- Jacob, C. & Walters, A. 2005. Risk and responsibility in chemical research: the case of Agent Orange. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 11, 147–166.
- Jones, C. 2000. The role of language in the learning and teaching of science. Teoksessa Monk, M. & Osborne, J. (toim.) *Good practice in science teaching: what research has to say*. Maidenhead: Open University Press, 88–103.
- Justi, R. & Gilbert, J. 1999. A cause of ahistorical science teaching: use of hybrid models. *Science Education*, 83 (2), 163–177.
- Justi, R. & Gilbert, J. 2002. Models and modelling in chemical education. Teoksessa Gilbert, J. K., De Jong, O., Justi, R., Treagust, D. f. & Van Driel, J. (toim.) *Chemical education: towards research-based practice*. Dordrecht: Kluwer, 47–68.
- Kovac, J. 2001. Gifts and commodities in chemistry. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 7.2, 141–153.
- Kovac, J. 2006. Professional ethics in science. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht: Springer, 157–169.
- Kuhn, T. S. 1970. *The structure of scientific revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Laudan, L. 1977. *Progress and its problems: towards a theory of scientific growth*. London: Routledge & Kegan Paul
- Lederman, N. G. 1992 Students' and teachers' conceptions of the nature of science: a review of the research. *Journal of Research in Science Teaching* 29, 331–359.
- Lederman, N. G. 2004. Syntax of nature of science within inquiry and science instruction. Teoksessa Flick, L. B. & lederman, N.G. (toim.) *Scientific inquiry and nature of science*. Dordrecht: Kluwer, 301–317.
- Machamer, P. 2002. A brief historical introduction to the philosophy of science. Teoksessa Machamer, P. & Silberstein, M. (toim.) *The Blackwell guide to the philosophy of science*. Malden, MA: Blackwell Publishers, 1–17.
- Matthews, M. R. 1994. *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. London: Routledge.

- Mayo, D. G. 1996. *Error and the growth of experimental knowledge*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- McComas, W. F., Clough, M. & Almazroa, H. 1998. The role and character of the nature of science education. Teoksessa McComas, W. F. (toim.) *The nature of science in science education: rationales and strategies*. Dordrecht: Kluwer, 3–39.
- McComas, W.F. & Olson, J. K. 1998. The nature of science in international science education documents. Teoksessa McComas, W. F. (toim.) *The nature of science in science education: rationales and strategies*. Dordrecht: Kluwer, 41–52.
- Meisalo, V. & Lavonen, J. 1994. *Fysiikka ja kemia opetussuunnitelmassa*. Helsinki: Opetushallitus.
- Merron, S. & Lock, R. 1998. Does knowledge about a balanced diet influence eating behaviour? *School Science Review*, 80 (290), 43–48.
- Merton, R. K. 1973. The normative structure of science. Teoksessa Merton, R. K. (toim.) *The sociology of science: theoretical and empirical investigations*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 267–278.
- Millar, R. 1996. Towards a science curriculum for public understanding. *School Science Review*, 77 (280), 7–18.
- Monk, M. & Dillon, J. 2000. The nature of scientific knowledge. Teoksessa Monk, M. & Osborne, J. (toim.) *Good practice in science teaching: what research has to say*. Maidenhead: Open University Press, 72–87.
- Monk, M. & Osborne, J. 1997. Placing the history and philosophy of science on the curriculum: a model for the development of pedagogy. *Science Education*, Vol. 81 (4), 405–424.
- Nagel, E. 1961. *The structure of science: problems in the logic of scientific explanation*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Needham, P. 2006. Aristotle's theory on chemical reaction and chemical substances. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht : Springer, 43–67.
- Niaz, M. & Rodriguez, M. A. 2001. Do we have to introduce history and philosophy of science or is it already 'inside' chemistry? *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, Vol. 2, No 2, 159–164.
- Niiniluoto, I. 1983. *Tieteellinen päättely ja selittäminen*. Helsinki: Otava.
- Niiniluoto, I. 1999. *Critical scientific realism*. Oxford: Oxford University Press.

- Niiniluoto, I. 2002. *Johdatus tieteenfilosofiaan: käsitteen- ja teorianmuodostus*, 3. p. Helsinki: Otava.
- Opetushallitus 2003. *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003*. Helsinki: Opetushallitus.
- Opetushallitus 2004. *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2004*. Helsinki: Opetushallitus.
- Opetushallitus 2006. *OPH – Opetushallitus*. Helsinki: Opetushallitus, (<http://www.oph.fi>).
- Opetusministeriö 2004. *Tiede ja yhteiskunta -työryhmän muistio. Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä 2004:28*. Helsinki: Opetusministeriö.
- Osborne, J. 2000. Science for citizenship. Teoksessa Monk, M. & Osborne, J. (toim.) *Good practice in science teaching: what research has to say*. Maidenhead: Open University Press, 225–240.
- Osborne, J., Erduran, S., Simon, S. & Monk, M. 2001. Enhancing the Quality of Argument in School Science. *School Science Review* 82 (301), 63–70.
- Ostrovsky, V. N. 2001. What and how physics contributes to understanding the periodic law? *Foundations of Chemistry* 3, 145–182.
- Ostrovsky, V. N. 2005a. Towards a philosophy of approximations in the 'exact' sciences. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 11, 101–126.
- Ostrovsky, V. N. 2005b. On recent discussion concerning quantum justification of the periodic table of the elements. *Foundations of Chemistry* 7, 235–239.
- Paneth, F. A. 2003. The epistemological status of the concept of element. *Foundations of Chemistry* 5, 113–145. (Alunperin julkaistu lehdessä *British Journal for the Philosophy of Science* 13, 1962.)
- Pietilä, V. 1976. *Sisällön erittely*. Helsinki: Gaudeamus.
- Plesch, P. H. 1999. On the distinctness of chemistry. *Foundations of Chemistry* 1, 7–16.
- Popper, K. R. 1992. *The logic of scientific discovery*. London: Routledge.
- Psarros, N. 2001. The lame and the blind, or how much physics does chemistry need? *Foundations of Chemistry* 3, 241–249.
- Puolimatka, T. 1995. *Kasvatus ja filosofia*. Rauma: Kirjayhtymä.

- Reinikainen, P. 2002. Millaista on luonnontieteellinen osaaminen suomessa. Teoksessa Välijärvi, J. & Linnakylä, P. (toim.) *Tulevaisuuden osaajat: PISA 2000 Suomessa*. Jyväskylä: Koulutuksen tutkimuslaitos, 57–72.
- Rosenfeld, S. & Bhushan, N. 2000. Chemical synthesis: complexity, similarity, natural kinds, and the evolution of a "logic". Teoksessa Bhushan, N. & Rosenfeld, S. (toim.) *Of minds and molecules: new philosophical perspectives on chemistry*. New York, NY: Oxford University Press, 187–207.
- Ruschig, U. 2001. Logic and chemistry in Hegel's philosophy. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 7 (1), 5–22.
- Ruthenberg, K. 1997. Short biographies of philosophizing chemists: Friedrich Adolf Paneth (1887-1958). *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 3, 103–106.
- Saari, H. 2000. *Oppilaiden käsitykset malleista ja mallintaminen fysiikan perusopetuksessa*. University of Joensuu. Department of Physics. Väisälä Laboratory. Dissertations: 22.
- Scerri, E. R. 1991a. Chemistry, spectroscopy and the question of reduction. *Journal of Chemical Education* 68, 122–126.
- Scerri, E. R. 1991b. Electronic configurations, quantum mechanics and reduction. *British Journal for the Philosophy of Science* 42, 309–325.
- Scerri, E. R. 1994. Has chemistry been at least approximately reduced to quantum mechanics? Teoksessa Hull, D., Forbes, M. & Burian, R. (toim.) *Proceedings of the Philosophy of Science Association, PSA, Volume 1*. East Lansing, MI: Philosophy of Science Association, 160–170.
- Scerri, E. R. 2000a. The failure of reduction and how to resist disunity of the sciences in the context of chemical education. *Science & Education* 9, 405–425.
- Scerri, E. R. 2000b. Philosophy of chemistry – a new interdisciplinary field? *Journal of Chemical Education* 77 (4), 522–525.
- Scerri, E. R. 2001. The recently claimed observation of atomic orbitals and some related philosophical issues. *Philosophy of Science* 68, 76–88.
- Scerri, E. R. 2003. Philosophical confusion in chemical education research. *Journal of Chemical Education* 80 (5), 468–474.
- Scerri, E. R. 2004. Just how ab initio is ab initio quantum chemistry? *Foundations of chemistry* 6, 93–116.
- Scerri, E. R. 2005. Some aspects of the metaphysics of chemistry and the nature of elements. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 11 (2), 127–145.

- Scerri, E. R. 2006. Normative and descriptive philosophy of science and the role of chemistry. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht : Springer, 119–128.
- Scerri, E.R. & McIntyre, L. 1997. The case for philosophy of chemistry. *Synthese* 111, 213–232.
- Schauble, L., Klopfer, L. E. & Raghavan, K. 1991. Students' transition from an engineering model to a science model of experimentation. *Journal of Research in Science Teaching* 18, 859–882.
- Schummer, J. (toim.) 2001a. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 8 (1), Special issue: *Ethics of Chemistry* 1.
- Schummer, J. 2001b. Ethics of chemical synthesis. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 7, 103–124.
- Schummer, J. (toim.) 2002. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 8 (1), Special issue: *Ethics of Chemistry* 2.
- Schummer, J. 2006. The philosophy of chemistry: from infancy toward maturity. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht : Springer, 19–39.
- Silberstein, M. 2002. Reduction, emergence and explanation. Teoksessa Machamer, P. & Silberstein, M. (toim.) *The Blackwell guide to the philosophy of science*. Oxford: Blackwell, 80–109.
- Sintonen, M. (toim.) 1998. *Biologian filosofian näkökulmia*. Helsinki: Gaudeamus.
- Sjøberg, S. 1996. Scientific literacy and school science: arguments and second thoughts. Paper presented at the Seminar on Science, Technology and Citizenship Leangkollen, Oslo Nov 1996, (<http://folk.uio.no/sveinsj/Literacy.html>), 13.10.2006.
- Sjøberg, S. 2000. *Naturvetenskap som allmänbildning – en kritisk ämnesdidaktik*. Lund: Studentlitteratur
- Skolverket 2000. *Grundskolans kursplaner och betygskriterier*. Stockholm: Skolverket.
- Skolverket 2006a. *GY-07: Kursplaner för Kemi*. Stockholm: Skolverket, (<http://www.skolverket.se/sb/d/1027>), 13.10.2006.
- Skolverket 2006b. *GY-07: Kursplaner för Naturkunskap*. Stockholm: Skolverket, (<http://www.skolverket.se/sb/d/1059>), 13.10.2006.

- Spector, T. I. & Schummer, J. (toim.) 2003a. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 9 (1), Special issue: *Aesthetics and Visualization in Chemistry* 1.
- Spector, T. I. & Schummer, J. (toim.) 2003b. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry* 9 (2), Special issue: *Aesthetics and Visualization in Chemistry* 2.
- Sutton, C. 1992. *Words, science and learning*. Buckingham: Open University Press.
- Stokes, D. E. 1997. *Pasteur's quadrant: basic science and technological innovation*. Washington (D.C.): Brookings Institution.
- Syrjälä, L., Ahonen, S., Syrjäläinen, E. & Saari, S. 1994. *Laadullisen tutkimuksen työtapoja*. Helsinki: Kirjayhtymä.
- Tuomi, J. & Sarajärvi, A. 2002. *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi*. Helsinki: Tammi.
- Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2006. *Tutkimuksen eettinen arviointi Suomessa*. Helsinki: Tutkimuseettinen neuvottelukunta.
- Utdanningsdirektoratet 2006. *Fastsatte læreplaner for Kunnskapsløftet: Læreplan i kjemi – programfag i studiespesialiserende utdanningsprogram*. Hamar: Utdanningsdirektoratet, (http://www.udir.no/templates/udir/TM_Læreplan.aspx?id=2100&laereplani d=7334), 13.10.2006.
- Van Brakel, J. 2000a. *Philosophy of chemistry: between the scientific and the manifest image*. Leuven: Leuven University Press.
- Van Brakel, J. 2000b. The nature of chemical substances. Teoksessa Bhushan, N. & Rosenfeld, S. (toim.) *Of minds and molecules: new philosophical perspectives on chemistry*. New York, NY: Oxford University Press, 162–184.
- Van Brakel, J. 2006. Kant's legacy for the philosophy of chemistry. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht : Springer, 69–91.
- Van Fraassen, B. C. 1980. *The scientific image*. Oxford: Oxford University Press.
- Varama, S. 2003. *Kokeellisuus happo-emäskemian oppimisen tukena*. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, Kemian laitos.
- Vemulapalli, G. K. 2006. Physics in the crucible of chemistry: ontological boundaries and epistemological blueprints. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht: Springer, 191–204.

- Vilches, A., Furió, C., Guisasola, J. & Romo, V. 2002. *Aims of chemistry in compulsory secondary education: Scientific literacy or propedeutic training?* (<http://www.ipn.uni-kiel.de/projekte/esera/book/023-vil.pdf>), 13.10.2006
- Walker, D. F. & Soltis J. F. 1997. *Curriculum and Aims*. New York: Teachers College Press.
- Wartofsky, M. W. 1979. *Models: representation and the scientific understanding*. Dordrecht: Reidel.
- Weisberg, M. 2006. Water is *not* H₂O. Teoksessa Baird, D., Scerri, E., & McIntyre, L. (toim.) *Philosophy of chemistry: synthesis of a new discipline*. Dordrecht: Springer, 337–345.

LIITTEET

LIITE 1

Sisältöluokkien määrittelyt esimerkkialkioineen

Kemian tutkimuskohde ja mallit

1. Kemia aineen ominaisuuksien sekä rakenteen ja sen muutosten tutkimuksena

Kuvaillaan kemian tutkimuskohdetta aineen ominaisuuksien sekä rakenteen ja sen muutosten tutkimisena.

”Kemi behandlar egenskaper, struktur och funktion hos kemiska ämnen samt vad som sker vid kemiska reaktioner.” (Skolverket 2006a.)

2. Kemiallisten ilmiöiden selittäminen mallien avulla

Tuodaan esille mallien merkitys kemiallisissa selityksissä.

”Kemian opetukselle on luonteenomaista – – ilmiöiden tulkitseminen ja selittäminen mallien ja rakenteiden avulla...” (Opetushallitus 2003, 152.)

3. Käsitteiden merkitys kemiassa

Huomioidaan, että kemiassa käytetään sille tyypillisiä käsitteitä.

”Oppilas – – osaa käyttää oikeita käsitteitä kuvaillaan aineiden ominaisuuksia ja kemiallisia ilmiöitä...” (Opetushallitus 2004, 152.)

4. Kemian mallien ja teorioiden rajat

Kemian mallit ja teorit ovat tasospesifisiä ja sisältävät oletuksia ja likimääräistyksiä, jotka rajoittavat niiden soveltamisalaa. Huomioidaan, että mallit ovat todellisuuden kuvauksia vain tiettyjen tarkoituksenmukaisten ominaisuuksien suhteen (Wartofsky 1979, 462) nostamalla esille mallien ja teorioiden alaa ja rajoja.

”Vidare bedöms elevens förmåga att reflektera över teoriernas, modellernas och arbetsmetodernas giltighet och begränsningar.” (Skolverket 2006a.)

5. Kemiällinen tiedon alustavuus

Kemiällinen tieto on alustavaa eli sen käyttävät mallit sekä teorit ovat muuttuneet ajan saatossa. Huomioidaan kemian kehityksen historiallinen näkökulma ja kemiällisten mallien ja teorioiden muuttuminen ajan myötä.

”Videre gir hovedområdet et innblikk i hvordan modellene har endret seg gjennom historien.” (Utdanningsdirektoratet 2006, 2.)

Kokeellisuus ja kemian tutkimus

6. Tutkimuksen vaiheet

Mainitaan kemiällisen tutkimuksen vaiheet: kysymyksenasettelun muodostaminen, hypoteesien asettaminen, eksperimienttien tekeminen, havainnointi ja mittaus, tulosten tulkinta, johtopäätösten tekeminen sekä luotettavuuden arviointi.

”Bedömningen gäller elevens förmåga att analysera och söka lösningar på teoretiska och praktiska problemställningar med anknytning till kemi samt att reflektera över metoder och resultat.”

”Vidare gäller bedömningen elevens förmåga att använda naturvetenskapliga arbetsmetoder som att formulera en frågeställning, ställa upp en hypotes, pröva den genom experiment, bearbeta och kritiskt granska resultat, reflektera över slutsatsers giltighet och rimlighet samt redovisa arbetet.” (Skolverket 2006a.)

7. Teorioiden ja mallien vaikutus kokeelliseen tutkimukseen

Hypoteesien tehdään teorioiden pohjalta ja niillä testataan uusia teorioita. Huomioidaan, että teorit ja mallit muodostavat pohjan, jonka varassa kokeelliset asetelmat luodaan ja tuloksia tulkitaan.

”Eleven skall – – ha inblick i hur experiment utformas och analyseras utifrån teorier och modeller.” (Skolverket 2000, 61.)

Kemian yhteiskunnallinen merkitys ja eettiset ulottuvuudet

8. Kemian sovellutusten merkitys yhteiskunnalle ja elinympäristölle

Tavoitteeksi asetetaan, että oppilaiden tulisi ymmärtää kemian sovellutusten merkitys elinympäristössämme.

”Opetus – – auttaa ymmärtämään kemian ja teknologian merkityksen jokapäiväisessä elämässä, elinympäristössä ja yhteiskunnassa.”
(Opetushallitus 2004, 196.)

9. Kemiällisen tiedon ja tutkimuksen vaikutus kulttuuriimme ja maailmankuvaamme

Otetaan esille kemian vaikutus näkemykseemme ympäröivästä maailmasta ja paikastamme siinä.

”Eleven skall – – kunna med hjälp av exempel belysa hur kemins upptäckter har påverkat vår kultur och världsbild.” (Skolverket 2000, 61.)

10. Kemiällisen tiedon käyttäminen valintojen yhteiskunnallisissa ja eettisissä perusteluissa

Tavoitteeksi asetetaan kasvattaa oppilaan kykyä osallistua yhteiskunnalliseen keskusteluun ja tehdä rationaalisia valintoja kemiällisen tietämyksensä valossa.

”Kemian opetuksen tulee antaa oppilaille valmiuksia tehdä jokapäiväisiä valintoja ja keskustella erityisesti energian tuotantoon, ympäristöön ja teollisuuteen liittyvistä asioista ja ohjata oppilasta ottamaan vastuuta ympäristöstään.” (Opetushallitus 2004, 195.)

11. Kemian tutkimuksen eettisyys

Tuodaan esille myös kemian tutkimuksen eettinen merkitys.

”Mål for opplæringen er at eleven skal kunne – – drøfte hvordan forskere sikrer at forskningen er etisk forsvarlig.” (Utdanningsdirektoratet 2006, 4.)

Taulukko tutkimusaineisto sisältöluokkiin jaoteltuna

Sisältöluokka	Alkiot
1 Kemia aineen ominaisuuksien sekä rakenteen ja sen muutosten tutkimuksena	<p><i>”Opetus tukeutuu kokeelliseen lähestymistapaan, jossa lähtökohtana on elinympäristöön liittyvien aineiden ja ilmiöiden havaitseminen ja tutkiminen. Tästä edetään ilmiöiden tulkitsemiseen, selittämiseen ja kuvaamiseen sekä aineen rakenteen ja kemiallisten reaktioiden mallintamiseen kemian merkkielellä.”</i> (Opetushallitus 2004, 195.)</p> <p><i>”Grundläggande är begrepp som materiens uppbyggnad och egenskaper, kemiska reaktioner, kretslopp och transport.”</i> (Skolverket 2000, 60.)</p> <p><i>”Kemian opetukselle on luonteenomaista kemiallisten ilmiöiden ja aineiden ominaisuuksien havaitseminen ja tutkiminen kokeellisesti...”</i> (Opetushallitus 2003, 152.)</p> <p><i>”Kemi behandlar egenskaper, struktur och funktion hos kemiska ämnen samt vad som sker vid kemiska reaktioner.”</i> (Skolverket 2006a.)</p> <p><i>”Kjemikere utforsker, bestemmer og beskriver hvordan stoffer er oppbygd på mikronivå, og forklarer på dette grunnlaget stoffenes egenskaper og reaksjoner.”</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 3.)</p>
2 Kemiallisten ilmiöiden selittäminen mallien avulla	<p><i>”[Aineiden ja ilmiöiden havaitsemisesta ja tutkimisesta] edetään ilmiöiden tulkitsemiseen, selittämiseen ja kuvaamiseen sekä aineen rakenteen ja kemiallisten reaktioiden mallintamiseen kemian merkkielellä.”</i></p> <p><i>”Oppilas oppii – – aineen rakennetta ja kemiallisia sidoksia kuvaavia käsitteitä ja malleja...”</i> (Opetushallitus 2004, 195.)</p> <p><i>”Skolan skall i sin undervisning i kemi sträva efter att eleven – – utvecklar kunskap om atomens byggnad och kemisk bindning som förklaringsmodell för kemiska processer.”</i> (Skolverket 2000, 60.)</p> <p><i>”Kemian opetukselle on luonteenomaista – – ilmiöiden tulkitseminen ja selittäminen mallien ja rakenteiden avulla...”</i> (Opetushallitus 2003, 152.)</p> <p><i>”Kjemikere utforsker, bestemmer og beskriver hvordan stoffer er oppbygd på mikronivå, og forklarer på dette grunnlaget stoffenes egenskaper og reaksjoner. – – Hovedområdet handler om kjemiens nomenklatur, og kjemiske fenomener blir forklart med modeller på mikronivå.”</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 1–2.)</p>
3 Käsitteiden merkitys kemiassa	<p><i>”Oppilas – – osaa käyttää oikeita käsitteitä kuvaillessaan aineiden ominaisuuksia ja kemiallisia ilmiöitä...”</i> (Opetushallitus 2004, 152.)</p> <p><i>”Vidare gäller bedömningen hur eleven kan följa, förstå och delta i naturvetenskapliga samtal och diskussioner och därvid uttrycka sina tankar och frågor med hjälp av begrepp, modeller och teorier från biologi, fysik och kemi.”</i> (Skolverket 2000, 64.)</p> <p><i>”Kemian opetuksen tavoitteena on, että opiskelija – – osaa kemian keskeisimmät peruskäsitteet...”</i> (Opetushallitus 2003, 152.)</p> <p><i>”Målet för undervisningen i ämnet är att eleven skall utveckla – – kunskap inom kemins delområden och om kemins begrepp – – [och] förmåga att muntligt och skriftligt kommunicera kunskap i kemi.”</i> (Skolverket 2006a.)</p> <p><i>”I dette inngår å beskrive egne observasjoner og erfaringer fra naturen og laboratoriet ved å bruke kjemifaglige begreper. Det betyr å formulere spørsmål og hypoteser og presentere resultater.”</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 1.)</p>

4	Kemian mallien ja teorioiden rajat	”Vidare bedöms elevens förmåga att reflektera över teoriernas, modellernas och arbetsmetodernas giltighet och begränsningar.” (Skolverket 2006a.)
5	Kemiällinen tiedon alustavuus	<p>”Skolan skall i sin undervisning i kemi sträva efter att eleven – – får inblick i äldre tiders kemiska tänkande och kunnande.”</p> <p>”I bedömningen ingår elevens medvetenhet om hur den naturvetenskapliga kunskapen förändras genom historien...” (Skolverket 2000, 59–60.)</p> <p>”Kemi är i ständig utveckling och teorier och modeller förändras över tid.” (Skolverket 2006a.)</p> <p>”Videre gir hovedområdet et innblikk i hvordan modellene har endret seg gjennom historien.” (Utdanningsdirektoratet 2006, 2.)</p>
6	Tutkimuksen vaiheet	<p>”Oppilas – – osaa tehdä havaintoja ja mittauksia eri aisteilla ja mittausvälineillä, – – osaa tehdä yksinkertaisia luonnontieteellisiä kokeita, – – [ja] osaa esittää kokeidensa tulokset ja tulkita niitä.”</p> <p>”Oppilas oppii – – käyttämään luonnontieteellisen tiedonhankinnan kannalta tyypillisiä tutkimusmenetelmiä, myös tieto- ja viestintätekniikkaa, sekä arvioimaan tiedon luotettavuutta ja merkitystä, – – käyttämään luonnontieteellisen tiedonhankinnan kannalta tyypillisiä tutkimusmenetelmiä, myös tieto- ja viestintätekniikkaa, sekä arvioimaan tiedon luotettavuutta ja merkitystä.” (Opetushallitus 2004, 189–196.)</p> <p>”Eleven skall – – kunna genomföra mätningar, observationer och experiment samt ha insikt i hur de kan utformas, [och] kunna genomföra experiment utifrån en hypotes och formulera resultat.” (Skolverket 2000, 61.)</p> <p>”Kemian opetuksen tavoitteena on, että opiskelija – – osaa kokeellisen työskentelyn ja muun aktiivisen tiedonhankinnan avulla etsiä ja käsitellä tietoa elämän ja ympäristön kannalta tärkeistä kemiallisista ilmiöistä ja aineiden ominaisuuksista sekä arvioida tiedon luotettavuutta ja merkitystä.”</p> <p>”Arvioinnissa tulee lisäksi ottaa huomioon kokeellisen tiedonhankinnan ja -käsitteilytaitojen kehittyminen, johon kuuluvat</p> <ul style="list-style-type: none"> • havaintojen tekeminen, mittausten ja kokeiden suunnittelu ja toteutus • työvälineiden ja reagenssien turvallinen käyttö • tulosten esittäminen sekä suullisesti että kirjallisesti • tulosten tulkitseminen, mallintaminen ja arviointi • johtopäätösten tekeminen ja soveltaminen.” (Opetushallitus 2003, 152.) <p>”Bedömningen gäller elevens förmåga att analysera och söka lösningar på teoretiska och praktiska problemställningar med anknytning till kemi samt att reflektera över metoder och resultat.”</p> <p>”Vidare gäller bedömningen elevens förmåga att använda naturvetenskapliga arbetsmetoder som att formulera en frågeställning, ställa upp en hypotes, pröva den genom experiment, bearbeta och kritiskt granska resultat, reflektera över slutsatsernas giltighet och rimlighet samt redovisa arbetet.” (Skolverket 2006a.)</p> <p>”Hovedområdet handler om at kunnskaper i kjemi bygges opp gjennom prosesser med hypoteser, forsøk, observasjoner, vurderinger og begrunnede konklusjoner.”</p> <p>”Hovedområdet handler om aktuell forskning innen kjemi og om hvilke krav som stilles til forskningsresultater for at de skal være pålitelige.”</p> <p>”Det betyr å formulere spørsmål og hypoteser og presentere resultater.” (Utdanningsdirektoratet 2006, 2–4.)</p>

<p>7 Teorioiden ja mallien vaikutus kokeelliseen tutkimukseen</p>	<p><i>"Skolan skall i sin undervisning i kemi sträva efter att eleven – – utvecklar kunskap om hur kemiska experiment bygger på begrepp och modeller och hur dessa kan utvecklas genom experimenterande. – – Eleven skall – – ha inblick i hur experiment utformas och analyseras utifrån teorier och modeller."</i> (Skolverket 2000, 59–61.)</p> <p><i>"Kunskap i kemi utvecklas genom växelverkan mellan å ena sidan observationer och experiment, å andra sidan teorier och modeller."</i></p> <p><i>"Bedömningen gäller elevens förmåga att planera, genomföra, tolka och redovisa experiment. Bedömningen gäller också elevens förståelse för hur erfarenheter från dessa växelspelar med begrepp, teorier och modeller."</i> (Skolverket 2006a.)</p> <p><i>"Utviklingen av kjemisk viten skjer i en vekselvirkning mellom eksperimenter og teori. – – Opplæringen i kjemi skal knytte teori til praktisk laboratoriearbeid."</i></p> <p><i>"Videre dreier det seg om at kjemi er et praktisk fag der det blir brukt laboratorieutstyr og utført analyser, og om hvordan teorier og modeller blir testet og illustrert gjennom forsøk."</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 1–2.)</p>
<p>8 Kemian sovellutusten merkitys yhteiskunnalle ja elinympäristölle</p>	<p><i>"Opetus – – auttaa ymmärtämään kemian ja teknologian merkityksen jokapäiväisessä elämässä, elinympäristössä ja yhteiskunnassa."</i></p> <p><i>"Oppilas – – tuntee kemian ilmiöiden ja sovellusten merkityksen ihmiselle ja yhteiskunnalle, esimerkiksi fotosynteesin merkityksen elollisen luonnon energiavaramolle sekä korroosion ja korroosiolta suojaamisen merkityksen rakentamisessa ja metalliteollisuudessa."</i></p> <p><i>"Oppilas – – tuntee teollisuuden eri aloja kuten metalli- ja puunjalostus-teollisuus sekä niiden tuotteita ja niiden merkityksen jokapäiväisessä elämässä."</i> (Opetushallitus 2004, 196–197.)</p> <p><i>"Industriella processer ger många produkter som väsentligt förbättrat människans livsvillkor. Samma processer ger också ofta biprodukter som behöver tas hand om på ett miljömedvetet sätt."</i></p> <p><i>"Eleven skall – – ha kunskaper om industriella tillämpningar inom kemiområdet."</i></p> <p><i>"Eleven skall – – kunna med hjälp av exempel belysa hur kemisk kunskap har använts för att förbättra våra levnadsvillkor samt hur denna kunskap har missbrukats."</i> (Skolverket 2000, 60–62.)</p> <p><i>"Opetus auttaa ymmärtämään jokapäiväistä elämää, luontoa ja teknologiaa sekä kemian merkitystä ihmisen ja luonnon hyvinvoinnille tutkimalla aineita, niiden rakenteita ja ominaisuuksia sekä aineiden välisiä reaktioita."</i></p> <p><i>"Kemian opetuksen tavoitteena on, että opiskelija – – perehtyy nykyaikaiseen teknologiaan teollisuudessa ja ympäristötekniikassa."</i></p> <p><i>"Opetus välittää kuvaa kemiasta yhtenä keskeisenä perusuuontieteenä, joka tutkii ja kehittää materiaaleja, tuotteita, menetelmiä ja prosesseja kestäväen kehityksen edistämiseksi."</i> (Opetushallitus 2003, 152.)</p> <p><i>"Ämnet Kemi skall bidra till kunskap om kemiska processer och kemins skiftande tillämpningar och betydelse inom vardagsliv, industri, forskning, medicin och livsmiljö."</i></p> <p><i>"Målet för undervisningen i ämnet är att eleven skall utveckla – – kunskap om kemins betydelse för individ och samhälle."</i> (Skolverket 2006a.)</p> <p><i>"Kjemikere er viktige bidragsyttere i utviklingen av bioteknologi, nanoteknologi, medisin, farmasi, miljøfag, nye materialer og nye energikilder. Gjennom programfaget skal den enkelte få innsikt i hvilken betydning kjemisk forskning har for teknologisk og økonomisk utvikling. Programfaget skal bidra til forståelse for hvordan stoffer påvirker miljøet, og hvordan utvikling av nye industrielle metoder kan redusere belastningen på miljøet. På den måten kan programfaget bidra til å fokusere på miljø og bærekraftig utvikling."</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 1.)</p>

<p>9 Kemiällisen tiedon ja tutkimuksen vaikutus kulttuuriimme ja maailmankuvaamme</p>	<p><i>"Eleven skall – – kunna med hjälp av exempel belysa hur kemins upptäckter har påverkat vår kultur och världsbild."</i> (Skolverket 2000, 61.)</p> <p><i>"I bedömningen ingår också elevens förståelse för hur kunskap i kemi har förändrats genom historien och hur den har bidragit och bidrar till att forma människans uppfattning om sig själv och sin omvärld."</i> (Skolverket 2006a.)</p> <p><i>"Den historiske utviklingen av kjemifaget er en del av kulturarven, og dette bør formidles gjennom opplæringen."</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 1.)</p>
<p>10 Kemiällisen tiedon käyttäminen valintojen yhteiskunnallisissa ja eettisissä perusteluissa</p>	<p><i>"Kemian opetuksen tulee antaa oppilaalle valmiuksia tehdä jokapäiväisiä valintoja ja keskustella erityisesti energian tuotantoon, ympäristöön ja teollisuuteen liittyvistä asioista ja ohjata oppilasta ottamaan vastuuta ympäristöstään."</i> (Opetushallitus 2004, 195.)</p> <p><i>"Skolan skall i sin undervisning i kemi sträva efter att eleven – – utvecklar kunskap om hur kemiska teorier och modeller samt personliga erfarenheter kan användas för att behandla miljö-, säkerhets- och hälsofrågor."</i></p> <p><i>"Eleven skall – – kunna använda resultat av mätningar och experiment i diskussioner om miljöfrågor."</i></p> <p><i>"Eleven skall – – kunna använda såväl kemiska kunskaper som estetiska och etiska argument i frågor om resursanvändning, föreningar och kretslopp, ha kunskaper om industriella tillämpningar inom kemiområdet."</i></p> <p><i>"Eleven skall – – kunna föra diskussioner om resursanvändning i privatlivet och i samhället."</i> (Skolverket 2000, 59–62.)</p> <p><i>"Kemian opetuksen tavoitteena on, että opiskelija – – osaa käyttää kemiallista tietoa kuluttajana terveyden ja kestäväen kehityksen edistämässä sekä osallistuttaessa luontoa, ympäristöä ja teknologiaa koskevaan keskusteluun ja päätöksentekoon."</i> (Opetushallitus 2003, 152.)</p> <p><i>"Undervisningen skall omfatta sådan kunskap som behövs för att utifrån en naturvetenskaplig utgångspunkt delta i samhällsdebatten, ta ställning i etiska frågor och miljöfrågor samt bidra till ett hållbart samhälle."</i> (Skolverket 2006a.)</p> <p><i>"Å kunne lese i kjemi innebærer å trekke kjemisk relevant informasjon ut av en tekst og forstå fagspesifikke tekster med ulik vanskelighetsgrad. Det vil si å forstå tekster, tabeller og diagrammer fra lærebøker, oppslagsverk, aviser, tidsskrifter, reklame og Internett."</i></p> <p><i>"Mål for opplæringen er at eleven skal kunne – – diskutere og vurdere kjemifaglig innhold i medieopp slag og reklame."</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 3.)</p>
<p>11 Kemian tutkimuksen eettisyys</p>	<p><i>"Bedömningsgrunden är här elevens insikter i växelspelet naturvetenskap-teknik-samhälle och hur detta växel spel leder till ny kunskap, nya uppfinningar och produkter som på olika sätt används av människan och därvid påverkar naturen, lokalt och globalt. Bedömningen gäller också medvetenheten om etiska och estetiska frågor med anknytning till både växelspelet och den naturvetenskapliga verksamheten. Elevens förmåga att argumentera utifrån såväl naturvetenskapliga som etiska och estetiska perspektiv ingår i bedömningen."</i> (Skolverket 2000, 62.)</p> <p><i>"Mål for opplæringen er at eleven skal kunne – – drøfte hvordan forskere sikrer at forskningen er etisk forsvarlig."</i> (Utdanningsdirektoratet 2006, 4.)</p>