



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Raitaisten rautamuodostumien syntyhistoria ja taloudellinen hyödynnettävyys

Joni Paronen

Geologia
LuK-tutkielma
Laajuus: 7 op

12.1.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

Pääaine: Geologia

Tekijä: Joni Paronen

Otsikko: Raitaisten rautamuodostumien syntyhistoria ja taloudellinen hyödynnettävyys

Ohjaaja: Teemu Vehkamäki

Sivumäärä: 32 sivua

Päivämäärä: 12.1.2025

Tässä työssä tarkastellaan raudan fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia, sen esiintymistä luonnossa ja taloudellista merkitystä teollisuuden raaka-aineena sekä syvennytään raitaisiin rautamuodostumiin (Banded Iron Formations, BIF). Työ alkaa yleiskatsauksella raudan roolista ja merkityksestä mineraalivarana, jonka jälkeen käsitellään raudan fysikaaliset ominaisuudet, esiintymisen erilaisissa tärkeissä yhdisteissä ja taloudellinen arvo erityisesti terästeollisuudessa. Malmien luokittelu on myös tärkeässä osassa, jossa malmienluokitteluperusteet käsitellään niiden syntyprosessien ja mineraalikoostumuksen näkökulmista. Tämän jälkeen työssä tarkastellaan raitaisten rautamuodostumien syntyteorioita ja keskeisiä tapahtumia maapallon historiassa, jotka vaikuttivat niiden muodostumiseen ja kerrostumiseen.

Työn pääpaino on raitaisissa rautamuodostumissa, jotka ovat merkittäviä raudan lähteitä globaalisti. Näiden muodostumien syntyä käsitellään keskeisten hypoteesien, kuten lumipallomaateorian ja suuren hapettumistapahtuman kautta, jotka selittävät raudan kerrostumisen prosesseja ja niiden vaikutuksia maapallon varhaiseen ilmastoon ja ekosysteemeihin. Lisäksi työssä analysoidaan raitaisten rautamuodostumien rakennetta, kemiallista koostumusta ja kerrostumisympäristöjä (Algoma-, Superior- ja Rapitan-tyypit) sekä niiden taloudellista merkitystä.

Lopuksi työssä keskitytään Australian Pilbaran kratonin geologiaan rakenteisiin ja merkittäviin rautamuodostumiin, kuten Hamersleyn alueeseen ja Brockmanin rautamuodostumaan sekä niiden tärkeimpiin rautamalmikaivoksiin Mount Whalebackiin ja Tom Priceen. Lake Superiorin alueelta perehdytään joihinkin historiallisesti ja taloudellisesti merkittäviin muodostumiin Yhdysvaltojen Minnesotan alueella, joista Mesabi, Vermilion, Gunflint ja Guyana ovat vaikuttaneet ratkaisevasti Pohjois-Amerikan kaivosteollisuuden kehitykseen.

Työn tarkoituksena on tarjota kattava kuva rautamuodostumien synnystä, rakenteesta ja merkityksestä sekä tuoda esille raudan ja raitaisten rautamuodostumien roolit kaivosteollisuudessa. Lisäksi työn tarkoituksena on osoittaa, että rautamuodostumat eivät ole pelkästään teollisesti arvokkaita, vaan niiden tutkimus syventää myös ymmärrystämme maapallon geologisesta ja ilmastollisesta historiasta.

Avainsanat: BIF, kemiallinen koostumus, raitainen rautamuodostuma, rauta, rautamalmi, rautamuodostuma, syntyprosessit

Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Rauta	4
2.1	Fysikaaliset ominaisuudet	4
2.2	Esiintyminen yhdisteissä	5
2.3	Teollinen merkitys	6
3	Malmien luokittelut	7
3.1	Syntyprosessin perusteella	7
3.2	Mineraalikoostumuksen mukaan	8
4	Raitaiset rautamuodostumat	10
4.1	Muodostumisteoria & mallit	11
4.1.1	Suuri hapettumistapahtuma	13
4.1.2	Lumipallomaa	14
4.2	Rakenne & kemiallinen koostumus	15
4.3	Syntymekanismit & kerrostumisympäristö	16
4.4	Taloudellinen merkitys	18
5	Raitaiset rautamuodostumat maailmalla	19
5.1	Pilbaran kratoni	19
5.1.1	Hamersleyn maakunta	20
5.1.2	Marra Mamba -muodostuma	21
5.1.3	Rautamalmikaivokset	21
5.1.4	Brockmanin rautamuodostuma	22
5.2	Lake Superior	23
5.2.1	Mesabi	24
5.2.2	Vermilion	25
5.2.3	Gunflint	26
5.2.4	Cuyuna	26
	Lähteet	28

1 Johdanto

Rauta on yksi maailman käytetyimmistä ja taloudellisesti merkittävimmistä metalleista. Sen fysikaaliset ominaisuudet, kuten korkea lämpötila- ja paineenkestävyys yhdistettynä sen runsaaseen saatavuuteen, ovat tehneet siitä elintärkeän alkuaineen monilla aloilla. Rauta esiintyy luonnossa vapaina alkuaineina sekä yhdisteinä, mutta teollisuuden tarpeisiin sitä louhitaan enimmäkseen erilaisista malmeista. Rautamalmien taloudellinen merkitys on valtava, sillä ne muodostavat tärkeän raaka-aineen teräksen valmistukselle, joka puolestaan on kriittinen materiaali useilla aloilla.

Rautamalmien luokittelu ja niiden ominaisuuspiirteet ovat avainasemassa ymmärtääksemme niiden syntyperää ja taloudellista merkitystä. Malmien luokittelua voidaan lähestyä monista eri näkökulmista, kuten syntyprosessin tai mineraalikoostumuksen perusteella. Eri malmityyppien geologiset ominaisuudet määrittävät niiden käytettävyyden ja taloudellisen arvon.

Tämän työn keskiössä ovat raitaiset rautamuodostumat (Banded Iron Formations, BIF), jotka edustavat ainutlaatuisia ja merkittäviä geologia kerrostumia. Raitaisia rautamuodostumia esiintyy eri puolilla maailmaa ja ne ovat syntyneet miljardeja vuosia sitten monimutkaisten geologisten ja biokemiallisten prosessien seurauksena. Niiden syntyprosesseihin liittyy vahvasti suuri hapettumistapahtuma ja globaaleja jääkausia, kuten niin sanottu ”lumipallomaa”-ilmiö. Nämä prosessit ovat vaikuttaneet ratkaisevasti maapallon kehitykseen sekä varhaisen elämän evoluutioon.

Työn toinen keskeinen osa on raitaisten rautamuodostumien alueellinen tarkastelu. Näitä muodostumia löytyy esimerkiksi Pilbaran kratonista Australiassa ja Lake Superiorin alueelta Pohjois-Amerikassa. Jokaisella alueella on omat erityispiirteensä, kuten mineraalikoostumus, kerrostumisympäristö ja taloudellinen merkitys. Pilbaran alueella sijaitsevat Hamersleyn maakunnan raitaiset rautamuodostumat edustavat maailman rikkaimpia rautamalmivaroja, kun taas Lake Superiorin alueen muodostumat olivat historiallisesti merkittäviä Pohjois-Amerikan teollisuuden kehitykselle.

2 Rauta

Rauta on yksi maapallon yleisimmistä alkuaineista. Rauta kuuluu yleisiin metalleihin ja muodostaa n. 5 % maankuoresta (Grotzinger et al. 2014). Rauta on maan kuoren neljänneksi yleisin alkuaine ja vain hapella, piillä ja alumiinilla on suuremmat pitoisuudet (Grotzinger et al. 2014). Kuvassa 1 on havainnollistettu alkuaineiden jaksollista järjestelmää. Raudan sijaintia jaksollisessa järjestelmässä on korostettu mustalla neliöllä.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H Hydrogeni 1,008																	2 He Heliumi 4,0026	
2	3 Li Litiumi 6,94	4 Be Berylliumi 9,0122																	10 Ne Neon 20,180
3	11 Na Natrium 22,990	12 Mg Magnesiumi 24,305																	18 Ar Argoni 39,948
4	19 K Kalium 39,098	20 Ca Kalsium 40,078	21 Sc Skandium 44,956	22 Ti Titaani 47,867	23 V Vanadiini 50,942	24 Cr Kromi 51,996	25 Mn Mangaani 54,938	26 Fe Rauta 55,845	27 Co Koboltti 58,933	28 Ni Nikkeli 58,693	29 Cu Kupari 63,546	30 Zn Sinkki 65,38	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germaniumi 72,630	33 As Arseni 74,922	34 Se Seleni 78,971	35 Br Bromi 79,904	36 Kr Krypton 83,798	
5	37 Rb Rubidium 85,468	38 Sr Strontium 87,62	39 Y Yttrium 88,906	40 Zr Zirkonium 91,224	41 Nb Niobium 92,906	42 Mo Molybdeeni 95,95	43 Tc Teknetium (98)	44 Ru Rutenium 101,07	45 Rh Rodium 102,91	46 Pd Palladium 106,42	47 Ag Hopea 107,87	48 Cd Kadmium 112,41	49 In Indium 114,82	50 Sn Tina 118,71	51 Sb Antimoni 121,76	52 Te Telluuri 127,60	53 I Jodi 126,90	54 Xe Ksenoni 131,29	
6	55 Cs Cesium 132,91	56 Ba Barium 137,33	57-71 Lantanoidit	72 Hf Hafnium 178,49	73 Ta Tantaali 180,95	74 W Volframi 183,84	75 Re Renium 186,21	76 Os Osmium 190,23	77 Ir Iridium 192,22	78 Pt Platina 195,08	79 Au Kulta 196,97	80 Hg Elohopea 200,59	81 Tl Tallium 204,38	82 Pb Lyijy 207,2	83 Bi Vismutti 208,98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatini (210)	86 Rn Radon (222)	
7	87 Fr Frankium (223)	88 Ra Radium (226)	89-103 Aktinoidit	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (268)	106 Sg Seaborgium (269)	107 Bh Bohrium (270)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnerium (278)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (282)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (290)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessini (294)	118 Og Oganesson (294)	
	Alkuaineilla, joilla ei ole pysyvää isotooppia, pysyvimmän isotoopin massaluku on merkitty sulkuihin.																		
	57 La Lantaani 138,91	58 Ce Cerium 140,12	59 Pr Praseodyymi 140,91	60 Nd Neodyymi 144,24	61 Pm Prometium (145)	62 Sm Samarium 150,36	63 Eu Euroopium 151,96	64 Gd Gadolinium 157,25	65 Tb Terbium 158,93	66 Dy Dysprosium 162,50	67 Ho Holmium 164,93	68 Er Erbium 167,26	69 Tm Tulium 168,93	70 Yb Ytterbium 173,05	71 Lu Luteetium 174,97				
	89 Ac Aktinium (227)	90 Th Torium 232,04	91 Pa Protaktinium 231,04	92 U Uraani 238,03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Amerikkium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Kalifornium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (261)				

Kuva 1. Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä. Rauta korostettu (Muokattu Dayah 2022 mukaan).

Rauta on siirtymämetalli, joka sijaitsee jaksollisessa järjestelmässä rivillä kahdeksan ja neljännessä jaksossa, sen kemiallinen kaava on Fe ja järjestysluku on 26. Raudalla on neljä stabiilia isotooppia, joita esiintyy luonnossa ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{57}Fe ja ^{58}Fe (Zum Dahl & DeCoste 2015). Rauta tunnetaan Bashyalin (2023) mukaan sen monipuolisista ominaisuuksistaan ja sillä on ollut suuri merkitys yhteiskuntien kasvun kannalta.

2.1 Fysikaaliset ominaisuudet

Rauta on hopeanvärinen ja kiiltävä metalli, jolla on magneettisia ominaisuuksia. Se on suhteellisen kovaa, mutta helposti muokattavissa kuumennettuna. Raudan sulamispiste on n. 1538 °C ja kiehumispiste on n. 2862 °C (Bashyal 2023). Raudan kiinteän faasin tiheys on 7,874 gm/cm³ ja nestefaasitiheys 6,98 gm/cm³ (Bashyal 2023). Raudalla on myös Bashyalin (2023) mukaan erinomainen sähkönjohtokyky, sillä sen elektronit voivat

liikkua vapaasti ja ne pystyvät kuljettamaan sähkövarausta metallin päästä toiseen. Raudalla on myös erityinen lämmönjohtokyky, sillä lämpö saa metallin hiukkaset värähtelemään ja liikkumaan nopeammin (Bashyal 2023).

Raudalla on erityinen kiteinen rakenne, joka ilmenee kolmessa erillisessä muodossa eli allotropiassa (Bashyal 2023). Näistä kolmesta raudan allotropiasta käytetään nimityksiä delta-, gamma- ja alfarauta (Bashyal 2023). Kun sula rauta jäähtyy, se saa Bashyalin (2023) mukaan nämä kolme erillistä allotropista muotoa eri lämpötiloissa. Rauta on ominaisuuksiltaan hyvin reaktiivinen ja syöpyy nopeasti etenkin joutuessaan kosketuksiin ilman hapen ja kosteuden kanssa muodostaen ruostetta (Zumdahl & DeCoste 2015).

2.2 Esiintyminen yhdisteissä

Rauta muodostaa hapen kanssa erilaisia happiyhdisteitä, joissa rautaoksidit ovat kiinnittyneet happiatomeihin (Tikkanen 2024). Näitä yhdisteitä ovat mm. FeO , Fe_2O_3 ja Fe_3O_4 , joista jälkimmäiset sisältävät rautaa sekä +2 että +3 -hapetusluvussa (Tikkanen 2024). Raudan yleisimmät ja tärkeimmät hapetusluvut ovat Tikkasen (2024) mukaan +2 ja +3, harvinaisempia ovat +4 ja +6 hapetusluvut. Rauta muodostaa tyypillisesti erilaisia yhdisteitä, kuten oksideja, sulfideja ja klorideja, mutta esiintyy myös yhdistettynä muihin alkuaineisiin (Tikkanen 2024). Tyypillisesti rauta esiintyy luonnossa erilaisina rautamalmeina. Malmilla tarkoitetaan sellaista mineraaliesiintymää, josta on taloudellisesti kannattavaa tuottaa metalleja (Jenkin et al. 2014).

Tärkeimpiä ja yleisimpiä rautamalmeja ovat hematiitti, magnetiitti ja takoniitti (Walther 2013). Rautaa esiintyy myös rikkiyhdisteissä, jonka pääkomponentit rauta ja rikki muodostavat kemiallisen yhdisteen. Tämän yhdisteen kemiallinen kaava on FeS ja se tunnetaan myös nimellä rauta(II)sulfidi, joka on Zumdahl & DeCoste:n (2015) mukaan veteen liukenematon, mutta liukenee happoihin muodostaen rikkivetyä. Kloorin kanssa rauta muodostaa toisen ryhmän teollisesti tärkeitä yhdisteitä, kuten ferrokloridin FeCl_2 ja ferrikloridin FeCl_3 (Zumdahl & DeCoste 2015).

2.3 Teollinen merkitys

Rautaa hyödynnettiin jo esiteollisissa yhteiskunnissa aseiden ja työkalujen valmistamiseen. Ihmiskunnan teknologisen kehityksen kannalta käänntekevä vaikutus nähtiin 1700–1800 -luvuilla kun teollinen vallankumous kiihdytti entisestään raudan suosiota ja yhteiskunnan kehitystä (Metalic 2023). Raudan ja teräksen laaja saatavuus ja suhteellisen halpa hinta tekivät niistä suosittuja materiaaleja, jonka seurauksena rautaa alettiin hyödyntää täysimääräisesti ja sulatustekniikat kehittyivät (Metalic 2023). Tehtaat ja työpajat alkoivat hyödyntämään rautaa luodakseen koneita ja parantaakseen tuotantoprosessejaan, jonka seurauksesta tuotannosta tuli yhä kustannustehokkaampaa (Metalic 2023).

Pelkästään raudan laajempi hyödyntäminen mullisti useita teollisuudenaloja, mutta vasta teräksen käyttöönotto teki Metalicin (2023) mukaan todellisen läpimurron teollisessa vallankumouksessa. Teräksellä tarkoitetaan raudan ja hiilen seosta, jolla on ainutlaatuiset lujuus- ja kestävyysominaisuudet (Metalic 2023). Teräs on mahdollista kierrättää kokonaan ja se tekikin siitä hyvin yleisesti käytettävän materiaalin ja vauhditti entisestään paitsi teollisuutta, mutta myös kestävä kehitystä (Metalic 2023).

Nykyään käytämme rautaa ja terästä rakentamisessa kaikkialla maailmassa sen runsauden ja alhaisten kustannusten vuoksi. Rautametallia on helppo muotoilla moniin eri muotoihin ja siksi sitä käytetään monissa arkipäivän esineissä. Keittiövälineet, työ- ja huonekalut sekä monet muut päivittäistavarat sisältävät usein rautaa tai terästä. Raudan magneettisuutta hyödynnetään myös magneettien valmistuksessa sekä elektroniikassa. Teräs on olennainen materiaali mm. rakentamisessa, autoteollisuudessa, laivanrakennuksessa ja monissa teollisuudenaloissa. Teräksen ominaisuudet tekevät siitä ihanteellisen materiaalin moniin eri tarkoituksiin.

3 Malmien luokittelut

Malmeja on kautta aikojen luokiteltu useilla eri tavoilla ja eri kriteereihin perustuen. Malmeja voidaan luokitella mm. niiden syntyvän, mineraalikoostumuksen ja metallisisällön mukaan. Malmien luokittelulla tavoitellaan taloudellisen arvon hyödynnettävyyttä. Malmien luokittelu vaatii yleensä geologista osaamista, jotta paljastuma osataan hyödyntää optimaalisella tavalla. Seuraavaksi tarkastellaan malmien luokitteluun vaikuttavia tekijöitä ja kriteerejä.

3.1 Syntyprosessin perusteella

Malmit luokitellaan syntyprosessin mukaan eri kategorioihin sen perusteella missä ja miten ne ovat muodostuneet. Syntyprosessiin vaikuttavat sekä muodostumisympäristö että muodostumistapa. Magmakivet ovat yksi kolmesta pääasiallisesta kivilajiluokasta. Magmat muodostumat tietyssä geologisessa ja tektonisessa ympäristössä.

Magmakivet muodostuvat maan sisäisistä prosesseista. Jahnsin & Kudon (2024) mukaan magma muodostuu muovautuvassa astenosfäärissä, joka alkaa maan vaipasta ja ylettyy aina ylempään kuoreen asti. Syvällä maan kuoren sisällä paine ja lämpötila ovat paljon korkeammat kuin maan pinnalla, jonka seurauksena kuuma magma jäähtyy siellä hitaasti (Jahns & Kudo 2024). Magmaattiset prosessit muodostavat mineraaliesiintymiä kuuman magman jäähtyessä ja kiteytyessä, sillä hidas jäähtyminen edistää myös mineraalien kasvua (Jahns & Kudo 2024). Magman jäähtyessä se jähmettyy ja alkaa kiteyttämään mineraaleja, joiden kertyessä tarpeeksi suureksi ne muodostavat malmiesiintymiä (Jahns & Kudo 2024).

Magmakivissä on paljon erilaisia malmin saostumatyyppisiä, jonka seurauksena magmakivissä esiintyy erimalmiesiintymien kombinaatioita ja ovat koostumukseltaan hieman erilaisia (Robb 2021). Mafisiin magmoihin rikastuu Robb:n (2021) mukaan todennäköisemmin Ni, Co, Pt, Pd ja Au alkuaineita ja vastaavasti felsisiin ja alkalisiin kivilajeihin rikastuu todennäköisemmin Li, Sn, Zr, U ja W alkuaineita. Tietyn tyyppisissä graniiteissa mafiset ja felsiset magmat voivat olla yhteydessä toisiinsa kidefraktionoinnin ansiosta, jossa esimerkiksi kromiittimalmit ja tinakertymät ovat samassa malmiesiintymässä (Robb 2021).

Metamorfiset kivet ovat syntyneet metamorfoosin aikana, jossa protoliitti muuttuu ajan myötä sitä ympäröivissä fysikaalisissa ja kemiallisissa olosuhteissa. Protoliitilla tarkoitetaan alkuperäistä kiveä, joka on ollut alun perin joko magma- tai sedimenttikivi. Metamorfiset malmimineraaliesiintymät muodostuvat metamorfisten prosessien seurauksena ja esiintyvät metamorfisissa kivissä. Metamorfisia kerrostumia muodostuu erilaisissa metamorfisissa olosuhteissa, joissa kivi altistuu vaihteleville PT -olosuhteille. Metamorfoosin olosuhteet vaihtelevat matalasta korkeaan lämpötilaan ja matalasta korkeaan paineeseen.

Hydrotermiseksi mineraaliesiintymäksi katsotaan mitä tahansa metallimineraalien esiintymää, joka muodostuu kiinteiden aineiden saostumisesta kuumassa mineraalipitoisessa vedessä (Robb 2021). Hydrotermiset esiintymät ovat Robb:n (2021) mukaan yleisiä alueilla, joilla on aktiivista tuliperäistä toimintaa, kuten tulivuoria ja kuumia lähteitä. Merenpohjan mustat savuttajat ovat esimerkki tällaisesta alueesta (Robb 2021). Hydrotermiset malmit muodostuvat kuumien, metallipitoisten nesteiden tunkeutuessa kivilajien rakoihin ja halkeamiin ja saostuvat niihin, esimerkkejä tällaisista ovat kullan ja hopean hydrotermiset esiintymät (Robb 2021).

Sedimenttikivien muodostumisympäristö ja synty tapa eroavat paljon edellä mainituista, sillä ne muodostuvat Grotzinger et al. (2014) mukaan maan pinnalla tapahtuvissa prosesseissa. Kivilajien hajotessa erilaisten rapautumisprosessien myötä jää ja vesi kuljettavat eroosion rapauttamaa materiaalia, jossa ne alkavat kerrostua pääsääntöisesti erilaisiin altaisiin (Grotzinger et al. 2014). Sedimenttikiviä ovat esimerkiksi hiekkakivet, kalkkikivet ja erilaiset liuskeet. Sedimentaariset mineraaliesiintymät muodostuvat mineraalien kertyessä sedimenttikiviin. Raitaiset rautamuodostumat ovat esimerkkejä tällaisista kerrostumista (Grotzinger et al. 2014).

3.2 Mineraalikoostumuksen mukaan

Malmeja voidaan luokitella myös niiden koostumuksen mukaan. Rautamalmi koostuu rautarikkaista kivistä ja mineraaleista, joista rauta voidaan taloudellisesti erottaa. Rautamalmia esiintyy useimmiten hematiitissa ja magnetiitissa, mutta myös götiitti-, limoniitti ja sideriittikivet ovat yleisiä rautamalmeja. Ne ovat tärkeitä ainesosia teräksen tuotannossa, koska ne tarjoavat seoksen luomiseen tarvittavan raudan.

Hematiittimalmi koostuu kahdenarvoisesta raudasta ja hapen oksideista ja sen kemiallinen kaava on Fe_2O_3 (Writer 2013). Hematiitin rautapitoisuus on 70 % ja sitä voidaan pitää erittäin korkeana pitoisuutena (Writer 2013). Hematiittimalmille on myös tyypillistä sen punertava väri, joka on peräisin juurikin raudasta (Writer 2013). Yksi hematiittimalmin tärkeimmistä eduista muihin malmeihin onkin juuri korkea rautapitoisuus, sillä se tekee Writerin (2013) mukaan sen tuotantoprosessista edullisemmän ja halvemmän muihin verrattuna.

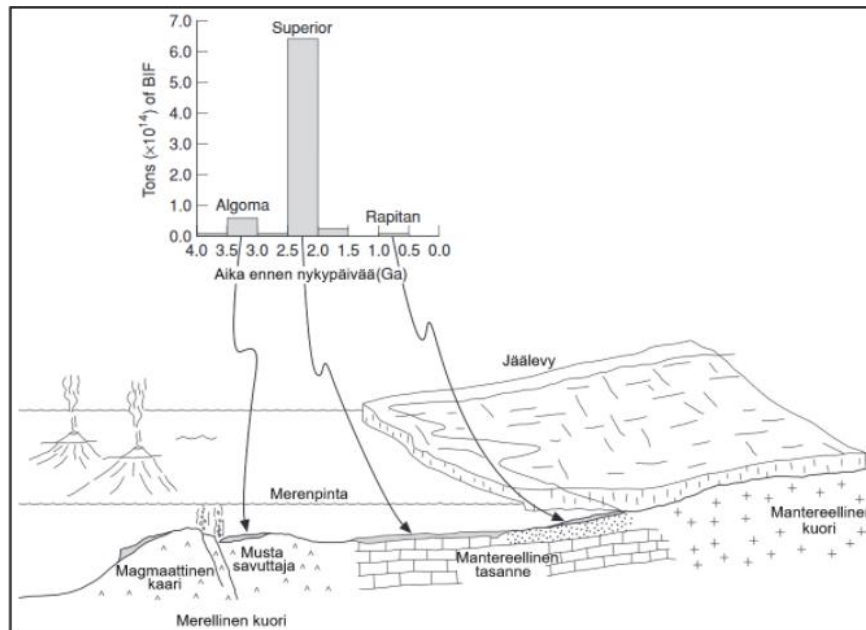
Magnetiitti on toinen hyvin yleisesti louhittu rautamalmi, joka on väriltään musta ja sen kiderakenne sisältää sekä kahden- että kolmenarvoisia rautaioneja (Writer 2013). Kemiallisen koostumuksen vuoksi magnetiitissa on Writerin (2013) mukaan paljon pienempi n. 25–40 % rautapitoisuus verrattuna hematiittimalmiin. Magnetiittimalmin merkittävin ominaisuus on sen magneettisuus, joka helpottaa sen erottamisen muusta kivistä rikastamisen aikana (Writer 2013). Magnetiitissa on myös vähemmän epäpuhtauksia, joka tekee siitä ensiluokkaisen tuotteen, jota voidaan myydä teräksenvalmistajille korkeammalla hinnalla (Writer 2013).

4 Raitaiset rautamuodostumat

Raitaiset rautamuodostumat ovat sedimenttikiviä, joissa vuorottelevat rautapitoisen materiaalin ja piioksidin kerrokset (Kirkby & Vining 2024). Rautapitoinen materiaali muodostaa tummemman ja punertavamman raidan ja vastaavasti piioksidi vaaleamman raidan (Kirkby & Vining 2024). Raitaiset rautamuodostumat ovat ainutlaatuisia, runsaasti rautaa ja piidioksidia sisältäviä kemiallisia sedimenttikiviä, jotka ovat kerrostuneet enimmäkseen arkeeseen eonin ja paleoproterotsooisen maailmankauden aikana hapettomassa meriympäristössä (Yin et al. 2023). Käsite raitainen rautamuodostuma sai Yin:n et al. (2023) mukaan alkunsa rautamuodostuman kuvauksesta Lake Superior -alueella.

Raitaisten rautamuodostuminen tärkeimmät rautamineraalit ovat hematitiitti ja magnetiitti (Sun & Li 2017). Raitaisia rautamuodostumia on löydetty Yin et al. (2023) mukaan kaikilta maailman mantereilta. Suuria raitaisten rautamuodostumien esiintymiä on löydetty mm. Kanadasta, Yhdysvalloista, Etelä-Afrikasta, Australiasta, Intiasta, Venäjältä ja Ukrainasta (Huston & Logan 2004, Zhu et al. 2014 mukaan).

Raitaiset rautamuodostumat ovat muodostuneet Robb:n (2021) mukaan pääasiassa kolmella maan historian ajanjaksolla arkeeseen ja proterotsooisen eonin aikana. Ensimmäisenä näistä kerrostuivat Algoma-tyyppiset raitaiset rautamuodostumat 3500–3000 Ma sitten. Kerrostumisen päävaihe tapahtui 2500–1800 Ma sitten, jolloin kerrostuivat Superior-tyypin raitaiset rautamuodostumat. Viimeisinä kerrostuivat Rapitan-tyypin raitaiset rautamuodostumat 1000–500 Ma sitten. Nämä on esitetty kuvassa 2. Kyseiset kolme ajanjaksoa vastaavat laajalti erilaisia geologisia jaksoja ja tektonisia tapahtumia (Robb 2021).



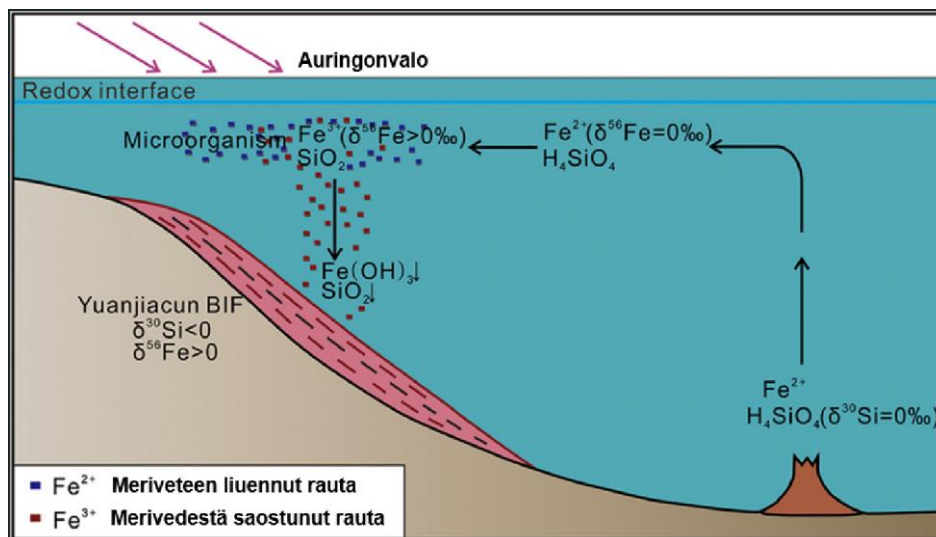
Kuva 2. Raitaisten rautamuodostumien päätyyppien syntyyn liittyvät geologiset prosessit, muodostumisympäristö ja kerrostumisajankohdat. Superior-tyyppin BIF-muodostumia on tonnimäärissä mitattuna kerrostunut huomattavasti enemmän muihin BIF-tyyppeihin verrattuna (Muokattu Robb 2005 mukaan).

4.1 Muodostumisteoria & mallit

Monet raitaisista rautamuodostumista ympäri maailmaa muodostuivat 3,5–1,8 Ga sitten (Kirkby & Vining 2024). Silloisissa muinaisissa valtamerissä oli Kirkby & Vining:n (2024) mukaan runsaasti liuennutta rautaa ja piioksidia, jotka huuhtoutuivat valtameriin maalta. Pienet syanobakteerit kehittivät fotosynteesiä muodostaen yhdyskuntia, jotka tunnetaan nimellä stromatoliitti, joita on edelleen nähtävissä Shark Bayssä ja Lake Cliftonissa Länsi-Australiassa (Kirkby & Vining 2024).

Bakteerien aloittaessa fotosynteesin, alkoivat ne samalla vapauttaa myös happea valtameriin, jonka seurauksesta happi reagoi liukenevan raudan kanssa muodostaen liukenematonta rautaoksidia (Kirkby & Vining 2024). Kausiluonteisilla leväkukinnoilla oli myös Kirkby & Vining:n (2024) mukaan meriveden hapen määrää lisäävä vaikutus. Rautaoksidit hematiitti ja magnetiitti vajosivat raskaampana valtameren pohjalle, jossa nämä sedimentit kerrostuivat edelleen vuorottelevina vyöhykkeinä valtameren pohjalle, jonka seurauksena muodostuivat raitaiset rautamuodostumat (Kirkby & Vining 2024). Nämä kivet heijastavat Kirkby & Vining:n (2024) mukaan miljoonien vuosien muutosta jokaisessa kerroksessa.

Maapallon varhainen ilmakehä oli nykyisestä poiketen pelkistävä ja valtamerille oli tyypillistä alhainen hapetuspotentiaali, jossa Fe^{2+} liukeni helposti merivesiin (Robb 2021). Nykyisenkaltainen ilmakehä muodostui vasta, kun suurin osa valtameren mineraaleista oli hapettunut ja happi pääsi pois valtameristä (Kirkby & Vining 2024). Varhaiset valtameret olivat Robb:n (2021) mukaan kyllästyneitä piioksidin suhteen, mikä varmisti säännöllisen saostumisen ja piipitoisen aineksen kerääntymisen merenpohjaan. Valtamerien Fe^{2+} -pitoisuuden ollessa korkea tapahtui hapetusmekanismi, jossa kahden arvoinen rauta hapettui Fe^{3+} -ioneiksi aiheuttaen rautahydroksidihiukkausten saostumisen merenpohjassa (Robb 2021). Prosessi on tyypillinen hapetusreaktio, jossa Fe^{2+} menettää yhden elektronin ja muuttuu Fe^{3+} -ioniksi, jonka ympäröivä hapetin mahdollistaa. Kuvassa 3 on havainnollistettu raudan ja piioksidin kerrostumisprosessia valtameren pohjalle.



Kuva 3. Raudan hapettumisprosessi, jossa kahden arvoinen rauta hapettuu Fe^{3+} -ioneiksi aiheuttaen rautahydroksidihiukkausten saostumisen ja piipitoisen aineksen kerääntymisen merenpohjaan (Muokattu Men et al. 2019 mukaan).

Tällä hetkellä on Robb:n (2021) mukaan yleisesti hyväksyttyä, että rautamuodostumat ovat sedimenttikiviä, jotka sisältävät yli 15 % rautaa ja joissa rautamineraaleja on kerrostunut yhdessä karbonaattimineraalien kanssa. Rautamuodostumat voivat olla kerrostuneita, laminoituja tai rakeisia ja muodostuivat Robb:n (2021) mukaan satunnaisesti koko maapallon historian ajan. Rautamuodostumat voidaan jakaa useisiin alatyyppeihin, joista prekambrikan rautamuodostumat voidaan jakaa edelleen raitamuodostukseen ja rakeisen raudan muodostukseen (Robb 2021). Raitaiset rautamuodostumat ovat tyypillisesti yli 2,3 Ga vanhoja ja muodostuneet ennen suurta

hapettumistapahtumaa, kun taas rakeiset rautamuodostumat kerrostuivat suurelta osin 2,3–1,8 Ga aikajaksolla (Robb 2021).

4.1.1 Suuri hapettumistapahtuma

Happi ei aina ole ollut maapallolla itsestäänselvyys, sillä varhaisen maan olosuhteet olivat hyvin erilaiset n. 4,5 Ga sitten (Aiyer 2022). Maapallolla oli tuohon aikaan pelkistävä ilmakehä, jonka pääkomponentit olivat hiilidioksidi, metaani ja vesihöyry (Aiyer 2022). Nykyinen ilmakehä koostuu pääasiassa typestä ja hapestä. 2,7 Ga sitten kehittyi erikoinen mikrobiryhmä nimeltä syanobakteerit, joilla oli huomattava kyky suorittaa fotosynteesiä eli ne pystyivät tuottamaan energiaa auringonvalosta (Aiyer 2022). Syanobakteerit pystyivät hyödyntämään vettä polttoaineena hapettamalla sitä ja vielä merkittävämpää oli se, että fotosynteesin tuotteena muodostui happea (Aiyer 2022). Tätä prosessia pidetään Aiyerin (2022) mukaan yhtenä merkittävimmistä kaikista biokemiallisista keksinnöistä.

Syanobakteerien meriveteen vapauttaman hapen määrä nousi vähitellen ajan myötä ja 200–300 Ma ajanjaksolla happea tuotettiin nopeammin kuin sitä kykeni reagoimaan muiden alkuaineiden kanssa tai hapettamaan mineraaleja (Aiyer 2022). Syanobakteerien vapauttama happi alkoi kerääntymään tasaisesti suurille valtamerille ja hapettamaan vettä, jonka seurauksena kertynyttä happea alkoi asteittain vapautumaan ilmakehään, jossa se alkoi reagoimaan myös metaanin kanssa (Aiyer 2022). Lopulta hapen vapautuminen oli niin voimakasta, että se syrjäytti metaanin ja hapestä tuli typen ohella yksi ilmakehän pääkomponenteista (Aiyer 2022). Tästä tapahtumasta käytetään nimitystä "Suuri hapettumistapahtuma", joka tapahtui Aiyerin (2022) mukaan n. 2,4–2,1 Ga sitten.

Suuri hapettumistapahtuma oli Aiyerin (2022) mukaan käänntekevä hetki evoluution aikajanalla, koska sillä oli merkittäviä seurauksia niin maapallon ilmastoon kuin elävien organismien sopeutumiseen ja evoluutioon. Tutkijat ovat olettaneet suuren hapettumistapahtuman vaikutuksista maapallon ilmastoon arvioimalla huolellisesti maan varhaisessa ilmakehässä olevien molekyylien geokemiallisia ja isotooppisia piirteitä sekä käyttämällä massamallinnusta ja suorittamalla tutkimuksia redox-herkkien siirtymämetalli-isotooppien kanssa (Aiyer 2022). Nämä tutkimukset osoittavat, että maapallon ilmakehän kemia muuttui radikaalisti happitason noustessa ja metaanin syrjäytyessä (Aiyer 2022).

Hapen kertymisen ilmakehään arvellaan johtaneen yhteen varhaisimmista jääkausista maan päällä, sillä kasvihuonekaasu metaanin maata lämmittävä vaikutus jäi vähemmälle (Aiyer 2022). Kun happi syrjäytti metaanin, maapallon lämpötilat jäätyivät riittävästi muodostaakseen laajempia jäätiköitä (Aiyer 2022). Hapella oli Aiyerin (2022) mukaan myös tärkeä rooli ilmakehän otsonikerroksen muodostamisessa. Auringon ultraviolettisäteily halkaisi happimolekyylejä O₂ kahdeksi happiatomiksi, jotka sitten reagoivat toisen happimolekyylin kanssa muodostaen otsonia O₃ (Aiyer 2022). Otsonikerros estää haitallisen auringon ultraviolettisäteilyn pääsyn maan pinnalle.

4.1.2 Lumipallomaa

Maapallolla vallitsi Schirberin (2015) mukaan 850–635 Ma sitten kryogeeninen ajanjakso, jolloin maapallon keskilämpötilan arvellaan olleen -12 °C. Tutkijat väittävät, että kryogeenian aikana lumipallomaan olosuhteet täyttyivät ainakin kaksi kertaa; n. 640 Ma ja 710 Ma sitten (Schirber 2015). Molempien keston arvioidaan olevan n. 10 Ma ja viimeisin näistä niin sanotuista "Snowball Earth" -jäätiköistä päättyi arviolta 635 Ma sitten, kun monimutkainen elämä oli juuri alkamassa kehittyä (Schirber 2015).

Geologiset, geofysikaaliset ja geokemialliset seikat tukevat teoriaa, jonka mukaan maapallolla oli prekambrikaudella useita voimakkaita jäätiköitä eli niin sanotut lumipallomaan olosuhteet (Kirschvink et al. 2000). Lumipallomaa -mallin ennustamat äärimmäiset geokemialliset ympäristöt selittävät neoproterotsooiset raitaiset rautamuodostumat (Kirschvink et al. 2000). Nämä raitaiset rautamuodostumat ovat pääasiassa Rapitan-tyyppisiä ja liittyvät läheisesti lumipallomaa -tapahtumaan (Yin et al. 2023).

Tutkijat ovat arvioineet Sturtian lumipallomaksi nimetyn tapahtuman alkamisen n. 717 Ma sitten (Burrows 2017). Geologiset ja kemialliset tutkimukset osoittivat, että voimakkaat tulivuorenpurkaukset olisivat työntäneet ilmakehään purkauksen aikana valtavia määriä rikkidioksidia, joka esti auringon säteilyä maan pinnalle (Burrows 2017). Rikkidioksidi heijastaa Burrows:n (2017) mukaan voimakkaasti auringon säteilyä joutuessaan ilmakehän yläkerrokseen. Filippiineillä vuonna 1991 tapahtunut Pinatubo tulivuoren purkaus vapautti arviolta 10 Mt rikkiä ilmaan ja alensi maapallon keskilämpötilaa n. yhden F -asteen vuodeksi (Burrows 2017).

Pääasiallinen todiste lumipallomaateorialle tulee Schirber:n (2015) mukaan geologisista todisteista päiväntasaajan lähellä olevista jäätiköistä. Jäätiköiden laajetessa merialueilta maan pinnalla ne heijastivat yhä enemmän auringonvaloa, joka johti jäätiköiden kasvamiseen ja maapallon kylmenemiseen. Jäällä on voimakas albedo, jonka seurauksena se heijastaa 55–80 % saapuvasta auringonvalosta ja lähettää tämän energian takaisin avaruuteen ennen kuin se voi lämmittää planeettaa (Schirber 2015). Verratessa valtameren ja maa-alueiden takaisin heijastumista, valtameren vesi heijastaa vain 12 % ja maa-alueet 10–40 %, joten auringon lämpöenergiasta absorboituvat eniten nämä pintaolosuhteet (Schirber 2015).

4.2 Rakenne & kemiallinen koostumus

Raitaiset rautamuodostumat määritellään kemiallisiksi sedimenttikiviksi, joiden pääkomponentit ovat rauta ja pii (Robb 2021). Ne koostuvat (Robb 2021) mukaan ohuista piipitoisten juovien kerroksista ja vuorottelevat paksumpien rautaa sisältävien mineraalien kanssa. Näiden raitaisten rautamuodostumien rautamassaosuus on yleensä 20–35 % ja SiO₂-pitoisuus 40–50 % (Yin et al. 2023). Haugaard et al. (2016) esittävät hieman eriävän näkemyksen raitaisten rautamuodostumien koostumuksesta, jossa rautamassaosuus on 15–40 painoprosenttia ja piipitoisen aineksen 40–60 painoprosenttia. Raitaisten rautamuodostumien erityinen piirre on, että niillä on ilmeiset raitarakenteet tai rytmiset kerrokset sekä makroskooppisessa että mikroskooppisessa mittakaavassa (Yin et al. 2023).

Raitaisilla rautamuodostumilla on useimmiten laminoitu rakenne ja raidoitusta havaitaan useilla asteikoilla (Haugaard et al. 2016). Karkeiden makroraitojen mittakaava on yleensä m ja raitaisille rautamuodostumille tyypillisten mikroraitojen paksuus vaihtelee asteikolla mm–cm (Haugaard et al. 2016). Raitaisille rautamuodostumille tyypillistä on, että ne sisältävät alhaisia pitoisuuksia Al₂O₃, alle yhden painoprosentin ja pieniä määriä yhteensopimattomia alkuaineita, kuten Ti, Zr, Th, Hf ja Sc alle 20 ppm (Haugaard et al. 2016).

Suurin osa kemiallisista sedimenteistä muodostuu meriympäristöissä (Robb 2021). Kemialliset prosessit, joissa malmipitoisuudet muodostuvat ovat monimutkaisia ja niitä säätelevät parametrit, joihin vaikuttavat mm. liukoisuus, hapettumis-pelkistymis-

olosuhteet ja pH (Robb 2021). Ympäristöluokituksen lisäksi raitaisia rautamuodostumia on luokiteltu myös niihin liittyvien rautafaasien mineralogian perusteella (Robb 2021).

Useimmissa raitaisissa rautamuodostumissa rautamineraalina on oksidifaasi eli hematiitti tai magnetiitti, mutta niissä esiintyy myös karbonaatti, silikaatti ja sulfidi rautamineraaleja yhdessä sertin tai mustan savikiven kanssa (Robb 2021). Raitaisten rautamuodostuminen mineralogia on huomattavan yhtenäinen eri muodostuminen välillä, eikä mikään muodostumatyyppi tee tähän poikkeusta (Haugaard et al. 2016). Kuvassa 4 on havainnollistettu raitaisen rautamuodostuman raitaista rakennetta ja rytmisiä kerroksia. Kuvasta on myös hyvin havaittavissa oikeakätinen siirros.



Kuva 4. Raitainen rautamuodostuma Norjan Luovttat:ssa, jossa näkyvät selkeästi rauta- ja piioksidin vuorottelevat kerrokset. Keskellä oleva oikeakätinen siirros kertoo siitä, että siirroksen vastakkaiset puolet ovat liikkuneet toisiinsa nähden siten, että oikea puoli on siirtynyt alemmas (Joni Paronen 2022).

4.3 Syntymekanismit & kerrostumisympäristö

Raitaisia rautamuodostumia on kolme päätyyppiä Algoma, Superior sekä Rapitan ja ne ovat muodostuneet pääasiassa eri ajanjaksoilla (Robb 2021). Algoma-tyypin raitaiset rautamuodostumat liittyvät tulivuorensyntyalueille ja niitä löytyy tyypillisesti arkeoisilta

viherkivivyöhykkeiltä (Robb 2021). Nämä raitaiset rautamuodostumat ovat stratigrafisesti sidoksissa viherkivivyöhykkeissä oleviin vedenalaisiin VMS-esiintymiin (Hartlaub & Böhm 2006). Robb:n (2021) mukaan nämä esiintymät ovat yleensä melko pieniä ja ne ovat muodostuneet rajoitetumpiin valtameren altaisiin.

Suurin osa Superior-tyyppisistä raitaisista rautamuodostumista sijaitsee Robb:n (2021) mukaan vakailta mannermaisilla alustoilla ja ne ovat pääosin kerrostuneet paleoproterotsooisena maailmankautena 2,5–1,5 Ga sitten. Superior-tyyppiset raitaiset rautamuodostumat kuuluvat ylivoimaisesti tärkeimpään rautamalmiesiintymien luokkaan, sillä suurin osa maailman suurimmista tällä hetkellä rautamalmia tuottavista alueista kuuluu juuri tähän luokkaan (Robb 2021). Tästä esimerkkeinä Hamersleyn-allas Länsi-Australiassa ja Lake-Superiorin alue Yhdysvalloissa (Robb 2021). Mineralogialtaan Algoma- ja Superior-tyypit ovat samanlaisia, mutta suuremman kokonsa ansiosta Superior-tyyppiset raitaiset rautamuodostumat ovat taloudellisesta näkökulmasta potentiaalisempia esiintymiä verrattuna Algoma-tyyppisiin raitaisiin rautamuodostumiin (Bekker et al. 2010).

Algoma-tyypin muodostumat ovat pinta-alaltaan suhteellisen pieniä, sillä niiden pinta-ala on yleensä alle 100 km² ja malmin paksuuskin harvoin yli 50 m (Yin et al. 2023). Vastaavasti Superior-tyyppiset raitaiset rautamuodostumat ovat kooltaan suuria yli 100 km² pinta-alaltaan ja useita satoja metrejä paksuudeltaan (Yin et al. 2023). Rapitan-tyyppisten raitaisten rautamuodostumien pinta-alat ovat näistä tyyppillisesti kaikkein pienimmät (Yin et al. 2023). Rapitan muodostuman pinta-ala on enintään 10 km² ja yksittäisen malmikerroksen paksuus yleensä enintään 10 m (Yin et al. 2023).

Rapitan-tyyppiset rautamuodostumat määritellään iältään uusproterotsooisiksi ja ne liittyvät läheisesti maailmanlaajuisiin lumipallomaatapahtumassa liittyviin redox-vaihteluihin (Robb 2021). Rapitan-tyyppiset rautamalmit edustavat melko epätavallista rautamalmien esiintymistä, joka liittyy suurten uusproterotsooisten jääkausien aikana muodostuneisiin glasiogeenisiin sedimentteihin (Robb 2021). Vaikka jokaisella näistä raudan muodostumisen alatyypeillä on omat erityispiirteensä ja syntytapansa, ne kaikki liittyvät vahvasti hapetus-pelkistysprosesseihin ja niiden muodostuminen on tapahtunut jaksollisina vaiheina varhaisen maan historiassa tiettyjen tapahtumasarjojen seurauksena (Robb 2021).

4.4 Taloudellinen merkitys

Raitaiset rautamuodostumat ovat taloudellisesti merkittäviä, sillä yli 95 % maailman rautavaroista esiintyy niissä (Christie & Brathwaite, s.a.). Raitaisten rautamuodostumien rautamalmi on maailmanlaajuisesti tärkein raudan lähde terästeollisuudelle (Lascelles 2007). Korkealaatuiset, yli 60 % rautaa sisältävien, raitaisten rautamuodostumien esiintymät ovat maailmanlaajuisesti tärkeimpiä taloudellisesta, tuotannollisesta ja työllisyysnäkökulmasta (Hagemann et al. 2016). Taloudellisesta näkökulmasta erityisesti evaporiittisedimentit sisältävät tärkeimmät pitoisuudet alkuaineita, kuten K, Na, Ca, Mg, Li, J, B ja Cl (Robb 2021). Näiden yhdisteitä nitraatteja ja sulfaatteja käytetään laajalti kemian- ja maatalousteollisuudessa (Robb 2021).

Robb:n (2021) mukaan maailmanlaajuisesti louhitaan vuosittain yli 2,5 mrd.t rautamalmia, joista suurin osa esiintyy raitaisissa rautamuodostelmissa. Australialle rautamalmi on elintärkeä vientituote, sillä rautamalmia myydään n. 135 \$/t Kiinaan, sen tuotantokustannusten ollessa arviolta 20–30 \$/t (Mueller 2022). Lisäksi rautamalmilla on suuri työllistävä vaikutus, sillä se tarjoaa 43 000 australialaista kaivostyöpaikkaa (Kirkby & Vining 2024).

Australia on maailman toiseksi suurin rautamalmin tuottaja ja sen osuus maailmanlaajuisesta tarjonnasta oli 420 Mt vuonna 2010, vain Kiina oli edellä 900 Mt tuotannolla (Mueller 2022). Vuosittain rautamalmi tuo Australialle 133 mrd.\$ tulot (Kirkby & Vining 2024). Brasilian 370 Mt ja Intian 260 Mt vuosittaisen rautamalmin tuotannon osuus on myös merkittävä taloudellisesta näkökulmasta (Mueller 2022).

5 Raitaiset rautamuodostumat maailmalla

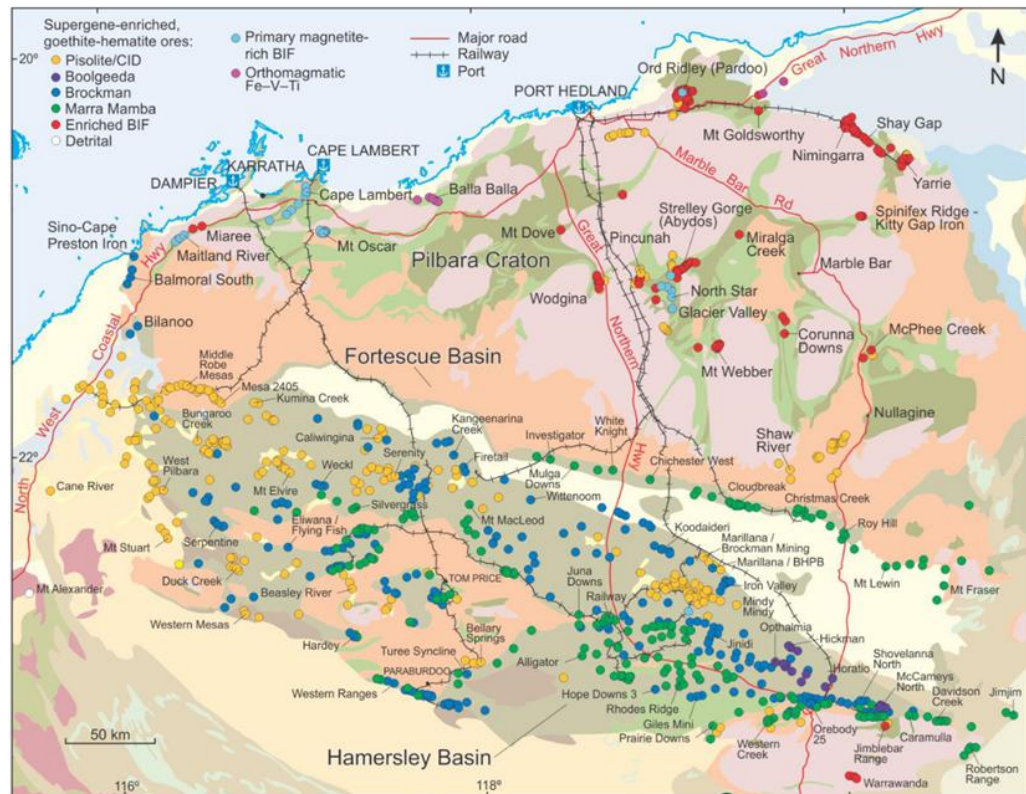
Australiassa ja Pohjois-Amerikassa sijaitsee useita suuria alueita, joissa on merkittäviä rautamuodostumia. Nämä muodostumat ovat olleet suuressa roolissa kansakuntien kehityksen ja niiden taloudellisen kehityksen näkökulmasta. Näillä alueilla rautamalmin tuotanto on yksi tärkeimmistä elinkeinoista.

5.1 Pilbaran kratoni

Pilbaran kratoni koostuu arkeeisista graniitti-vihreäkiviterraaneista, jonka pohjoispuoli koostuu pääasiassa vulkaanisista ja klastisista sedimenttikivistä (Duuring et al. 2016). Se pitää sisällään pieniä jaksoja mesoarkeisia raitaisia rautamuodostumia, jotka ovat paksuimmat ja sivusuunnassa laajimmat kratonin itäosissa (Duuring et al. 2016). Pilbaran kratonin rautamalmiesiintymät ovat jaettu eri luokkiin muodostuman sisältämän raudan painoprosentin mukaan, näistä suurimmat ovat ensisijainen ja supergeenirikastetut rautamalmiesiintymät, jotka muodostavat yli 96 % koko raudan volyyymistä Pilbaran kratonissa (Duuring et al. 2016).

Pilbaran kratonin rautamuodostumat koostuivat alun perin sertin ja magnetiitin/hematiitin muodostamista kerrostumista, jotka sisälsivät tyypillisesti n. 30 % rautaa (Robb 2021). Malmiesiintymän taloudellisesti kannattavaksi saamiseksi tarvittiin Robb:n (2021) mukaan raudan osuuden kaksinkertaistamista tähän arvoon. Tämä toteutettiin raudan rikastusprosessilla, jossa haluttu raudan prosenttiosuus saadaan joko liuottamalla tai korvaamalla kivessä oleva piioksidi (Robb 2021).

Itä-Pilbara kratonin rautamalmiesiintymät ovat enimmäkseen mesoarkeisia raitaisten rautamuodostumien yksiköitä, joista Cleaverville muodostuma on rautamalmiesiintymien tärkein esiintymä koko Pilbara kratonissa sen paksuuden, leveyden ja yleisesti korkean rautapitoisuuden vuoksi (Duuring et al. 2016). Cleaverville rautamuodostuma kerrostui 2950–2940 Ma sitten (Duuring et al. 2016). Cleaverville on ominaisuuksiltaan primäärinen raitainen rautamuodostuma eli se sisältää rautaa 31–39 painoprosenttia (Duuring et al. 2016). Seuraavan sivun kuvassa 5 on havainnollistettu Pilbaran kratonin aluetta ja sen sisältämiä rautamuodostumia.



Kuva 5. Pilbaran kratonin alue ja sen sisältämät rautamuodostumat (Duuring et al. 2016). Brockmanin rautaesiintymät ovat merkitty karttaan sinisellä värillä ja Marra Mamban rautaesiintymät vihreällä värillä. Tom Pricen rautamalmikaivoksen alueelta löytyy molempia rautamuodostumia.

5.1.1 Hamersleyn maakunta

Länsi-Australiassa sijaitseva Hamersleyn maakunta sisältää joitakin maailman suurimpia rautamalmiesiintymiä. Hamersleyn alueella on Robb:n (2021) mukaan valtavia määriä Superior-tyyppisiä raitaisten rautamuodostumien esiintymiä. Paleoproterotsooinen Hamersleyn allas sisältää yhden maailman suurimmista raitaisten rautamuodostumien alueista, joka ulottuu n. 100 km² alueelle (Yin et al. 2023).

Hamersleyn raitaiset rautamuodostumat kerrostuivat välillä 2,63–2,45 Ga (Trendall et al. 2004, Alibert 2016 mukaan). Länsi-Australiassa ne muodostuivat Konhauserin et al. (2017) mukaan suuren tektonismagmaattisen tapahtuman seurauksena, joka aiheutti lisääntyneen liuennon Fe²⁺ määrän pääsyn valtameriin. Suurin osa Länsi-Australian rautavaroista, yli 75 % on peräisin Fortescuen ja Hamersleyn altaiden raitaisista rautamuodostumista (Duuring et al. 2016). Länsi-Australia on maailman suurin rautamalmin viejä, jonka tuotannosta suurin osa tulee Hamersleyssä sijaitsevasta rikastetuista raitaisista rautamuodostumista (Robb 2021).

5.1.2 Marra Mamba -muodostuma

Marra Mamban rautamuodostelma on yksi Länsi-Australian luoteisosassa sijaitsevan Hamersleyn maakunnan tärkeimmistä rautamalmia sisältävistä horisonteista (Lascelles 2000). Trendall:n & Blockleyn (1970) mukaan Marra Mamba rautamuodostuma on Hamersleyn ryhmän alin yksikkö, jonka paksuus vaihtelee 180–230 m. Marra Mamba rautamuodostumasta tekee ainutlaatuiseksi sen tunnusomainen keltainen väri, kun tavallisesti raitaiset rautamuodostumat ovat punertavan värisiä (Trendall & Blockley 1970).

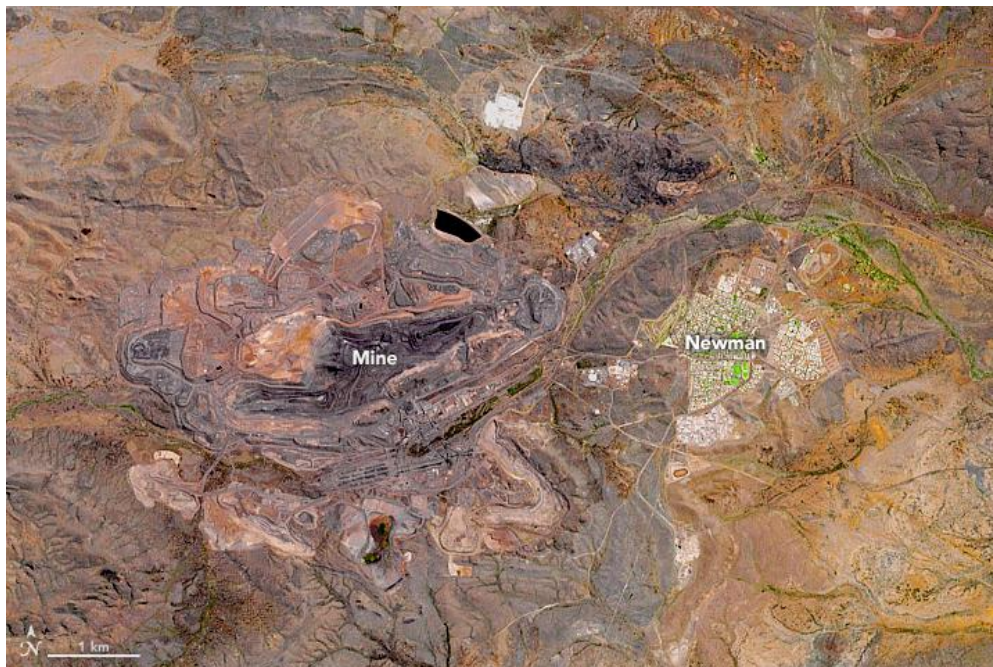
Marra Mamban rautamuodostuma kerrostui itäisellä Chichesterin vuoristoalueella eristettyyn altaaseen suuren valliriutan taakse (Lascelles 2000). Rautamuodostuma jakautuu laajasti kolmeen jäseneen, joissa ylä- ja alajäsenellä on jatkuvampia raitaisen rautamuodostuman tunnusmerkkejä sekä muodostuman keskijäseneseen, joka on enemmän kivimäisempi kerrostuma (Trendall & Blockley 1970). Lascelles (2000) toteaa Marra Mamban rautamuodostuman olevan kaikilta osin samanlainen kuin muut esiintymät Hamersleyn maakunnassa, sillä paksuuden pienenemisestä tai faasimuutoksia ei ole tutkimuksissa havaittu.

5.1.3 Rautamalmikaivokset

Australia on Patelin (2020) mukaan maailman suurin rautamalmin tuottaja ja viejä, jolla on lähes 30 % volyyymi arvioidusta maailmanlaajuisesta tarjonnasta. Australiassa sijaitsee useita suuria ja merkittäviä rautamalmikaivoksia (Patel 2020). Nämä Australian suuret rautamalmikaivokset Mesa J, Tom Price, Paraburdoo ja Mount Whaleback yhdessä monien pienempien toimijoiden kanssa tuottavat vuosittain yli 170 Mt rautamalmia, josta suuri osa viedään Aasian markkinoille, kuten Japaniin, Etelä-Koreaan ja Kiinaan (Robb 2021).

Patel:n (2020) mukaan suurin osa näistä varannoista sijaitsee Länsi-Australiassa, jossa sijaitsee yksi maan suurimmista ja vanhimmista rautamalmikaivoksista. Hamersleyn maakunnan kaakkoisosassa sijaitseva Mount Whaleback on Australian suurin yksittäinen rautamalmiesiintymä, jonka alkuperäinen rautamalmivarasto on arviolta 1,8 mrd.t (Robb 2021). Mount Whalebackin massiiviset rautamalmiesiintymät löydettiin jo vuonna 1957

Ophthalmian vuoriseudulta, jonka alueelle pian perustettiin Mount Whalebackin rautakaivos (Patel 2020). Kuvassa 6 on havainnollistettu Mount Whalebackin rautamalmikaivoksen suuria mittasuhteita viereiseen Newmanin kaupunkiin.



Kuva 6. Mount Whalebackin suuri rautamalmikaivos verrattuna viereiseen kaupunkiin (Patel 2020).

Toinen tärkeä kaivoskaupunki Hamersleyn rautamuodostuma-alueella on Tom Price, sillä sen vuoristoalueella sijaitsee merkittäviä ja korkealaatuisia hematitiittiesiintymiä (Murray 2024). Alueelta louhitaan Murrayn (2024) mukaan vuosittain useita Mt rautamalmia, jotka viedään pääasiassa Kiinaan ja Japaniin. Vuonna 2012 Tom Pricen vuotuinen kapasiteetti oli 28 Mt vuodessa (Young 2012).

5.1.4 Brockmanin rautamuodostuma

Brockmanin esiintymä edustaa maailman suurimpia raitaisia rautamuodostelmia, joiden kerrokset ja raidat vaihtelevat mm–m-mittakaavassa (Strimpel 2023). Brockmanin rautamuodostuma koostuu neljästä litostratigrafisesta yksiköstä Dales Gorge -jäsenestä (BIF), Whaleback Shale -jäsenestä, Joffre -jäsenestä (BIF) ja Yandicoogina Shale -jäsenestä (Haugaard et al. 2016). Brockmanin rautamuodostuman Joffre-jäsen sisältää Haugaard et al. (2016) mukaan arviolta 4.3×10^{13} t rautaa ja on tilavuudeltaan suurin

yksittäinen tunnettu raitainen rautamuodostuma maailmassa. Joffre-jäsenen raitaisen rautamuodostuman paksuus on arviolta 620 m (Haugaard et al. 2016).

Brockmanin rautamuodostuman ikä on n. 2,5 Ga ja sen punainen väri on seurausta viimeaikaisesta rautaoksidien pinnan rapautumisesta (Strimpel 2023). Brockmanin rautamuodostuma on kerrostunut vakaalle mannermaiselle alustalle ja edustaa Superior-tyyppin raitaisia rautamuodostumia (Haugaard et al. 2016). Muodostuman tärkein rautamineraali on magnetiitti ja suurin osa jäljellä olevasta kivistä koostuu kvartsista (Strimpel 2023).

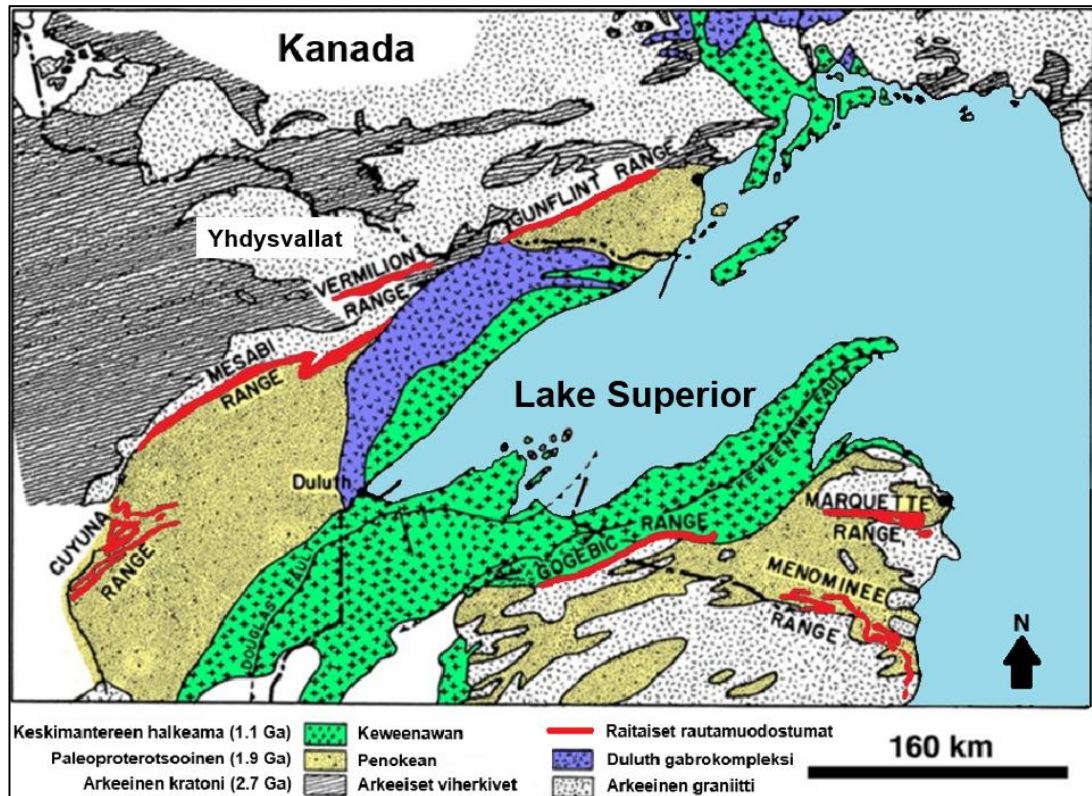
5.2 Lake Superior

Lake Superiorin alueella on useita rautamuodostumia, jotka ovat olleet tärkeitä rautamalmin lähteitä yli 130 vuoden ajan (Morey 1983). Alueen rautamalmista Moreyn (1983) mukaan yli 96 % on peräisin varhaisproterotsooisien maailmankauden kerroksista. Lake Superior rautamuodostumien kerrostumien ikä vaihtelee arkeeisista myöhäiseen liitukauteen (Morey 1983). Alueen suuret rauta- ja kupariesiintymät voidaan jakaa useisiin litologisiin ja ajallisiin yksiköihin, joista alue on laajalti tunnettu (Van Hise & Leith 1911). Mineraaliteollisuuden suuri kehitys tällä alueella on tarjonnut geologeille poikkeuksellisen mahdollisuuden tutkimuksiin, sillä se on tehnyt alueesta helpommin saavutettavan ja oikeuttanut suuremmat panostukset geologisiin tutkimuksiin, joita ei muuten olisi alueella tehty (Van Hise & Leith 1911).

Lake Superior alueen raudalla on merkittävä rooli taloudellisesta ja strategisesta näkökulmasta, sillä se on tällä hetkellä ainoa kotimaisen rautamalmin lähde Yhdysvaltain markkinoille. Cannonin (s.a.) mukaan viime vuosina Lake Superiorin malmit ovat kattaneet n. 85 % Yhdysvaltojen kysynnästä. Vuotuinen tuotanto vaihtelee, mutta on yleensä n. 50 Mt rikastetta, jonka arvo on n. 2 mrd.\$ (Cannon, s.a.).

Millerin (1914) mukaan mikään yksittäinen resurssi, paitsi ehkä kivihiili tai maaperä, ei ole niin tärkeä modernin kansakunnan talouskasvulle kuin rauta. Lake Superiorin alueella sijaitsevat rautamalmiesiintymät ovat korkealaatuisia, keskittyneet rajatulle alueelle ja ovat helposti suurimittaisesti louhittavissa, joten niiden tuotanto, hyödyntäminen ja säilyttäminen koskettivat koko kansakuntaa (Miller 1914). Lake Superior alueen raitaiset

rautamuodostumat ovat Superior-tyyppisiä ja muodostuneet paleoproterotsooisella maailmankaudella 2,5–1,8 Ga sitten (Li et al. 2014). Lake Superiorin alueella Minnesotan osavaltiossa Mesabi, Vermilion, Gunflint ja Cuyuna muodostavat rautajonon, joka on havaittavissa kuvasta 7.



Kuva 7. Lake Superior alueen raitaiset rautamuodostumat. Raitaiset rautamuodostumat ovat merkitty karttaan punaisella ja kuvasta nähdään, kuinka Kanadan ja Yhdysvaltojen rajan lähistölle on muodostunut rautajono (Muokattu Mueller 2022 mukaan).

5.2.1 Mesabi

Yli 2 Ga sitten tapahtui vuoristonmuodostuskausi, joka tunnetaan nimellä Algoman orogenia (Tieberg 2020a). Pohjois-Minnesotaan muodostui korkeita vuoria ja myöhemmin suuri matala meri peitti suuren osan Ylä-Midwestistä (Tieberg 2020a). Tämä vesialue rapautti vuoriston rautapitoista kiveä ja syntynyt sedimentti laskeutui meren pohjalle. Rauta ja pii laskeutuivat meren pohjalle ja muodostivat paksuja kerroksia rautapitoista sedimenttiä (Tieberg 2020a).

Ajan myötä meri katosi, ilmakehään syntyi happea ja rautasedimentti tiivistyi kerroksiksi useiden satojen metrien syvyyteen hiekan, saven ja mudan alle (Tieberg 2020b). Tämän syvän hautautumisen seurauksena rautapitoinen sedimentti altistui kuumuudelle ja paineelle, jotka muuttivat sen kovaksi, piikivimäiseksi kiveksi, jota kutsutaan Tiebergin (2020b) mukaan takoniitiksi. Takoniitti on kivilaji, joka koostuu pääasiassa piikivestä ja magnetiitista. Rauta- ja takoniittiesiintymiä on havaittu koko Mesabian alueella (Tieberg 2020b).

Mesabin rautamuodostuma ei ollut ensimmäinen rautamalmialue, jota Minnesotassa kaivettiin, mutta se on ollut kiistatta tuotteliain (Tieberg 2020b). 1890-luvulta lähtien Mesabi on tuottanut rautamalmia, joka on Tiebergin (2020b) mukaan vahvistanut kansantaloutta ja kehittänyt monietnistä alueellista kulttuuria Koillis-Minnesotassa. Mesabin rautamalmin osuus kokonaistuotannosta on Muellerin (2022) mukaan 70–75 %. Mesabin alueen rautamalmi oli myös tärkeässä roolissa toisen maailmansodan sotamenestyksessä (Tieberg 2020b).

5.2.2 Vermilion

Vermilionin raitainen rautamuodostuma on tyypillinen arkeisen ajan viherkivivyöhykkeelle muodostunut kerrostuma, joka koostuu metavulkaniiteista ja metasedimenteistä (Schulz 1980). Useita Ma sitten Vermilionin alue oli Kleinjungin (2023) mukaan sisämeren peitossa. Tuliperäisen kiven hajoaminen tuotti rikkaita rautamalmiesiintymiä, jotka koostuivat vuorottelevista piikivestä, magnetiitista ja hematitista, ja jotka myöhemmin määrittelivät alueen (Kleinjung 2023).

Vermilionin alue on tunnettu sen kovista ja korkealaatuisista rautamalmiesiintymistä, jotka olivat merkittävässä asemassa Minnesotan kaivosteollisuuden historiassa (Kleinjung 2023). Se oli Kleinjungin (2023) mukaan maan ensimmäinen avattu kaivostoiminta-alue ja myös ensimmäinen, joka lopetti kaupallisen kaivostoiminnan teräksenvalmistusprosessin muutosten ja läheisen Mesabi-vuoriston edullisemmin tuotetun takoniitin nousun vuoksi. Kaivostoiminnan päätyttyä alueen suojellut erämaa-alueet nousivat keskeiseen asemaan uudessa matkailuun ja luonnonsuojeluun perustuvassa alueellisessa taloudessa (Kleinjung 2023).

Yksi suurimmista rautamalmin tuottajista Vermilionin alueella oli Zenith-kaivos, joka tuotti arviolta 21 Mt korkealaatuista rautamalmia ennen sulkemistaan vuonna 1962 (Machamer 1968). Vermilionin alueen rautamalmit Pohjois-Minnesotassa koostuvat Machamerin (1968) mukaan kovasta massiivisesta hematitista. Geologiset ja petrografiset suhteet osoittavat, että esiintymät ovat postmetamorfisia iältään (Machamer 1968).

5.2.3 Gunflint

Gunflint-rautamuodostelma on osa myöhäisen prekambrikan vulkaanisten sedimenttien sarjaa, jonka rautaa ja piidioksidia sisältävät kivet kerrostettiin marginaaliseen altaaseen, joka rajoitti avomerivettä vulkaanisen toiminnan alueella (Goodwin 1956). Vulkanismilla oli Goodwin:n (1956) mukaan kaksinainen rooli; se tarjosi tasaisen saatavuuden rautaa ja piioksidia sisältäville liuksille sekä aiheutti jaksoittaisia vaihteluita kerrostuma-altaaseen. Tämä johti rautaa ja piioksidia sisältävien kivien sykliseen sedimentoitumiseen (Goodwin 1956).

Gunflintin rautamuodostuma kerrostui n. 1880 Ma sitten ja sen tutkimisella on ollut merkittävä rooli näkemysten muovaamisessa prekambrikan biosfäärin ja varhaisten valtamerien redox-tilan kehityksestä (Fralick et al. 2016). Gunflintin rautamuodostuma koostuu Floran ja Papiken (1975) mukaan enimmäkseen sertistä, rautaoksideista ja rautakarbonaateista. Magnetiittirikkaat horisontit olivat taloudellisesti tärkeässä roolissa alueen kehityksen kannalta (Broderick 1920).

5.2.4 Cuyuna

Cuyunan rautamuodostuma on yksi kuudesta raudan kaivosalueesta tunnetun Lake Superior -alueella, josta saadaan vuosittain n. 80 % Yhdysvaltojen kaikesta louhittavasta rautamalmin (Brightman 1942). Itse Cuyunan kaivosalue tuotti Brightmanin (1942) mukaan rautamalmia vuosittain 2–4 % tästä suuresta volyymista. Suhteellisen pienestä tuotannostaan huolimatta Cuyunan muodostuma oli tärkeä osa Yhdysvaltojen teollisuusrakennetta, sillä se oli ainoa suuri mangaanipitoisten rautamalmien tuottaja (Brightman 1942).

1940-luvun alussa Cuyunan rautamalmin kysyntä oli Sutherlandin (2016) mukaan huipussaan, sillä mangaanipitoiset rautamalmit olivat tärkeitä kovien terästen valmistuksessa, joita tarvittiin sotateollisuuden tarpeisiin. Cuyunan rauta- ja mangaanimineraalit kerrostuivat prekambrikauden puolivälissä n. 2 Ga sitten (Sutherland 2016). Kerätyt todisteet ovat osoittaneet, että Cuyunan rautamuodostuma on valtakunnallisesti ja maailmanlaajuisesti tärkeä kaivosalue (Sutherland 2016).

Lähteet

- Alibert, C. (2016). *Rare earth elements in Hamersley BIF minerals*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Volume 184. 311–328 s.
- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapež, B., Hofmann, A., Konhauser, K.O. & Rouxel, O.J. (2010). *Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes*. *Economic Geology*. Volume 105. 467–508 s.
- Brightman, G.F. (1942). *Cuyuna iron range*. *Economic Geography*. Volume 18. Issue 3. 275–286 s.
- Broderick, T.M. (1920). *Economic geology and stratigraphy of the Gunflint iron district, Minnesota*. Society of Economic Geologist, Inc. Volume 15. 422–452 s.
- Christie, T. & Brathwaite, B. (s.a.). *Mineral Commodity Report 15 — Iron*. Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd. 16 s.
- Floran, R.J. & Papike, J.J. (1975). *Petrology of the low-grade rocks of the Gunflint iron formation, Ontario-Minnesota*. Geological Society. Bulletin of the Geological Society of America. Volume 86, Number 9. 1169–1190 s.
- Fralick, P., Planavsky, N., Burton, J., Jarvis, I., Addison, W.D., Barret, T.J. & Brumpton, G.R. (2016). *Geochemistry of Paleoproterozoic Gunflint Formation carbonate: Implications for hydrosphere-atmosphere evolution*. *Precambrian Research*. Volume 290. 126–146 s.
- Goodwin, A.M. (1956). *Facies relations in the Gunflint iron formation*. *Economic Geology*. Volume 51. Issue 6. 565–595 s.
- Grotzinger, J.P., Jordan, T.H., Press, F. & Siever, R. (2014). *Understanding earth*. WH Freeman. New York. 650 s.
- Hagemann, S.G., Angerer, T., Duuring, P., Rosière, C.A., Figueiredo e Silva, R.C., Lobato, L., Hensler, A.S. & Walde, D.H.G. (2016). *BIF-hosted iron mineral system: A review*. *Ore Geology Reviews*. Volume 76. 317–359 s.
- Hartlaub, R.P. & Böhm, C.O. (2006). *Preliminary results from geological mapping of the Bear Lake greenstone belt, Manitoba*. Geological Survey, Manitoba. 65–73 s.
- Haugaard, R., Pecoits, E., Lalonde, S., Rouxel, O. & Konhauser, K. (2016). *The Joffre banded iron formation, Hamersley Group, Western Australia: Assessing the palaeoenvironment through detailed petrology and chemostratigraphy*. *Precambrian Research*. Volume 290. 12–37 s.
- Huston, D. & Logan, G. (2004). *Barite, BIFs and bugs: evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere*. *Earth and Planetary Science Letters*. Volume 220. Issues 1–2. 41–55 s.
- Jenkin, G., Lusty, P.A.J., McDonald, I., Smith, M.P., Boyce, A.J. & Wilkinson, J.J. (2014). *Ore deposits in an evolving Earth: An introduction*. Geological Society Special Publications. London. Volume 393. 333 s.
- Kirschvink, J., Gaidos, E., Bertani, E., Beukes, N., Gutzmer, J., Maepa, L. & Steinberger, R. (2000). *Paleoproterozoic snowball earth: Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Volume 97. Issue 4. 1400–1405 s.
- Konhauser, K.O., Planavsky, N.J., Hardisty, D.S., Robbins, L.J., Warchola, T.J., Haugaard, R., Lalonde, S.V., Partin, C.A., Oonk, P.B.H., Tsikos, H., Lyons, T.W., Bekker, A. & Johnson, C.M. (2017). *Iron formations: A global record of Neoarchaeon to Palaeoproterozoic environmental history*. *Earth-Science Reviews*. Volume 172. 140–177 s.

- Lascelles, D. (2000). *Marra Mamba iron formation stratigraphy in the eastern Chichester range, Western Australia*. Australian Journal of Earth Sciences. Volume 47. Issue 4. 799–806 s.
- Lascelles, D.F. (2007). *Black smokers and density currents: A uniformitarian model for the genesis of banded iron-formations*. Ore Geology Reviews. Volume 32. Issues 1–2. 381–411 s.
- Li, H., Zhang, Z., Li, L., Zhang, Z., Chen, J. & Yao, T. (2014). *Types and general characteristics of the BIF-related iron deposits in China*. Ore Geology Reviews. Volume 57. 264–287 s.
- Machamer, J.F. (1968). *Geology and Origin of the Iron Ore Deposits of the Zenith Mine Vermilion District, Minnesota*. SP-2 erikoisjulkaisusarja. Minnesotan yliopisto. 68 s.
- Men, Y., Wang, E., Fu, J., Jia, S., You, X. & He, Q. (2019). *Geology and geochemistry of the Yuanjiacun banded iron formation in Shanxi Province, China: constraints on the genesis*. Geological Magazine. Volume 156. Issue 11. 1839–1862 s.
- Miller, G.J. (1914). *Some geographic influences of the Lake Superior iron ores*. Bulletin of the American Geographical Society. Volume 46. Issue 12. 881–916 s.
- Morey, G.B. (1983). *Animikie Basin, Lake Superior region, U.S.A*. Developments in Precambrian Geology. Volume 6. 67 s.
- Mueller, A.G. (2022). *A short review of Precambrian and Phanerozoic sedimentary iron (\pm Mn, P) ore deposits*. Mineral Deposit. 22 s.
- Robb, L. (2005). *Introduction to ore-forming processes*. 1. painos. Blackwell Publishing. Oxford, UK. 373 s.
- Robb, L. (2021). *Introduction to ore-forming processes*. 2. painos. Wiley Blackwell. Oxford, UK. 456 s.
- Schulz, K.J. (1980). *The magmatic evolution of the Vermilion greenstone belt, NE Minnesota*. Precambrian Research. Volume 11. Issues 3–4. 215–245 s.
- Sun, S. & Li, Y.L. (2017). *Geneses and evolutions of iron-bearing minerals in banded iron formations of >3760 to ca. 2200 million-year-old: Constraints from electron microscopic, X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopic investigations*. Precambrian Research. Volume 289. 1–17 s.
- Sutherland, F. (2016). *The Cuyuna iron range: legacy of a 20th century industrial community*. Pro-gradu - tutkielma. Michiganin teknillinen yliopisto. 271 s.
- Trendall, A.F., & Blockley, J.G. (1970). *The iron formations of the Precambrian Hamersley Group Western Australia*. Geological Survey of Western Australia. Bulletin 119. 403 s.
- Trendall, A. F., Compston, W., Nelson, D. R., De Laeter, J. R., & Bennett, V. C. (2004). *SHRIMP zircon ages constraining the depositional chronology of the Hamersley Group, Western Australia**. Australian Journal of Earth Sciences. Volume 51. Issue 5. 621–644 s.
- Van Hise, C.R. & Leith, C.K. (1911). *The geology of the Lake Superior region*. Washington. 641 s.
- Walther, J.V. (2013). *Earth's Natural Resources*. Jones & Bartlett Learning. Illustrated edition. 434 s.
- Yin, J., Li, H. & Xiao, K. (2023). *Origin of Banded Iron Formations: Links with Paleoclimate, Paleoenvironment, and Major Geological Processes*. Minerals. Volume 13. Issue 4. 547 s.
- Zhu, X., Tang, H. & Sun, X. (2014). *Genesis of banded iron formations: A series of experimental simulations*. Ore Geology Reviews. Volume 63. 465–469 s.
- Zumdahl, S. & DeCoste, D.J. (2015). *Chemical principles*. Cengage Learning. Australia. 8. painos. 888 s.

Verkkolähteet

- Aiyer, K. (2022). *The great oxidation event: how cyanobacteria changed life*. American Society for Microbiology. Viitattu 14.8.2024. <<https://asm.org/articles/2022/february/the-great-oxidation-event-how-cyanobacteria-change>>
- Bashyal, J. (2023). *Iron (Fe): Metallic Element Properties, Uses, Toxicity*. Science Info. Viitattu 20.7.2024. <<https://scienceinfo.com/iron-fe-metallic-element-properties/>>
- Burrows, L. (2017). *A perfect storm of fire and ice may have led to snowball Earth*. Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences. Viitattu 27.8.2024. <<https://seas.harvard.edu/news/2017/03/perfect-storm-fire-and-ice-may-have-led-snowball-earth>>
- Cannon, W.F. (s.a.). *The Lake Superior iron ranges: geology and mining*. USGS science for a changing world. Viitattu 10.12.2024. <<https://mn.water.usgs.gov/projects/tesnar/2011/Presentations/CannonIron%20ranges.pdf>>
- Dayah, M. (2022). *Jaksollinen järjestelmä*. Ptable. Päivitetty 3.10.2024. Viitattu 29.6.2024. <<https://ptable.com/?lang=fi#Ominaisuudet/Jakso>>
- Duuring, P., Teitler, Y. & Hagemann, S.G. (2016). *Banded iron formation-hosted iron ore deposits of the Pilbara Craton*. Viitattu 14.11.2024. <<https://minedocs.com/21/Iron-ore-deposits-of-the-pilbara-craton-2017.pdf>>
- Jahns, R.H. & Kudo, A.M. (2024). *Igneous rock*. Britannica. Päivitetty 12.11.2024. Viitattu 24.10.2024. <<https://www.britannica.com/science/igneous-rock>>
- Kirkby, G. & Vining, K. (2024). *Banded iron formations: oceans, algae and iron oxide*. CSIRO. Viitattu 15.10.2024. <<https://www.csiro.au/en/news/All/Articles/2024/March/Banded-iron-formations>>
- Kleinjung, J. (2023). *Vermilion iron range*. MNopedia. Päivitetty 21.5.2024. Viitattu 7.12.2024. <<https://www.mnopedia.org/place/vermilion-iron-range>>
- Metalic, S. (2023). *Iron and steel's impact on industrial revolution*. Shyam Metalics. Viitattu 14.7.2024. <<https://www.shyammetalics.com/iron-and-steels-impact-on-industrial-revolution/>>
- Murray, L. (2024). *Tom Price*. Britannica. Päivitetty 23.11.2024. Viitattu 15.12.2024. <<https://www.britannica.com/place/Tom-Price>>
- Patel, K. (2020). *Mining for iron at Mount Whaleback*. Earth observatory, NASA. Viitattu 24.11.2024. <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/147416/mining-for-iron-at-mount-whaleback>>
- Schirber, M. (2015). *"Snowball Earth" Might Have Been Slushy*. National Aeronautics and Space Administration. Astrobiology Magazine. Viitattu 16.8.2024. <https://www.giss.nasa.gov/research/features/201508_slushball/>
- Strimpel, A.O. (2023). *Clark Johnson on the Banded Iron Formations*. Geology Bites. Viitattu 10.12.2024. <<https://www.geologybites.com/clark-johnson1>>
- Tieberg, A. (2020a). *Mesabi iron range*. MNopedia. Päivitetty 15.11.2023. Viitattu 10.12.2024. <<https://www.mnopedia.org/place/mesabi-iron-range#:~:text=This%20waterbody%20eroded%20the%20iron,taconite%20deposits%20throughout%20the%20Mesabi>>
- Tieberg, A. (2020b). *A brief history of Minnesota's Mesabi Iron Range*. Minnpost. MNopedia. Viitattu 10.12.2024. <<https://www.minnpost.com/mnopedia/2020/05/a-brief-history-of-minnesotas-mesabi-iron-range/>>
- Tikkanen, A. (2024). *Iron, chemical element*. Britannica. Päivitetty 9.12.2024. Viitattu 5.7.2024. <<https://www.britannica.com/science/iron-chemical-element>>

Writer, S. (2013). *Types of Iron Ore: Hematite vs. Magnetite*. SMM Information & Technology Co. Viitattu 26.7.2024. <<https://news.metal.com/newscontent/100052679/types-of-iron-ore-hematite-vs.-magnetite>>

Young, B. (2012). *Iron mining in Australia*. Business Insider. Viitattu 15.12.2024. <<https://www.businessinsider.com/iron-mining-in-australia-2012-3>>