TURUN YLIOPISTO

Kiirunan kaivos

Annisofia Verronen

Geologia

LuK-tutkielma

Laajuus: 7 op

25.11.2024

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

Pääaine: Geologia
Tekijä: Annisofia Verronen
Otsikko: Kiirunan kaivos
Ohjaaja: Teemu Vehkamäki
Sivumäärä: 25 sivua
Päivämäärä: 25.11.2024

Maailman suurin maanalainen rautakaivos sijaitsee Kiirunassa Norrbottenin maakunnassa Pohjois-Ruotsissa. Ruotsin valtion omistama kaivosyhtiö LKAB rahtaa vuosittain noin 25 miljoonaa tonnia rautamalmia, mikä vastaa 80 prosenttia EU:n kokonaistuotannosta.

Kuten suurin osa Ruotsin kallioperästä, myös Norrbottenin malmialue on syntynyt svekofennisen orogenian aikana. Kiirunavaaran 1 888–1 880 Ma ikäinen esiintymä koostuu apatiitti-rautamalmista ja seuraa kahden svekofennisen kivilajin kontaktia.

Kaivosta louhitaan romauttamalla sivukivi kaivoksen sisään. Tämä aiheuttaa maanpinnan luhistumista. Sortumisvaaran vuoksi Kiirunassa on meneillään projekti, jossa kaupungin keskusta siirretään uuteen paikkaan.

Avainsanat: apatiitti-rautamalmi, geologia, Kiiruna, levysorroslouhinta, Ruotsi

Sisällysluettelo

1 Johdanto 3

2 Ruotsin geologia 6

2.1 Ruotsin malmivarat 9

3 Norrbottenin geologia 11

3.1 Norrbottenin malmivarat 14

4 Kiirunavaaran esiintymä 16

5 Louhintatekniikka 19

6 Ympäröivän kallioperän luhistuminen 21

Lähteet 24

Nettilähteet 25

1 Johdanto

Kiirunavaaran kaivos (kuva 1) sijaitsee Norrbottenin maakunnassa Pohjois-Ruotsissa noin 180 kilometriä napapiirin pohjoispuolella Kiirunan kaupungista länteen (Villegas *et al*. 2011). Kiirunan kaivos on maailman suurin maanalainen rautakaivos (Pöyhönen 2024). Kaivoksessa louhitaan reilut 80 prosenttia Euroopan unionin alueella tuotetusta rautamalmista (LKAB 2024, Pöyhönen 2024). Malmin kokonaismäärä on arviolta 2 000 Mt (Bergman *et al*. 2001).

Kuva 1. Kiirunavaaran avolouhos kuvattuna etelästä. Taustalla näkyy Kiirunan nykyinen keskusta ja Luossavaaran suljettu kaivos (Kiirunavaara 2017).

Kiirunavaaran esiintymä löydettiin jo vuonna 1696, mutta kaivostoiminta alkoi vasta vuonna 1900, kun rautatie Norjan rannikolta Kiirunaan valmistui (Bergman *et al*. 2001, Martinsson *et al*. 2016). Maanalainen louhiminen alkoi vähitellen 1950-luvun kuluessa, ja maan alle siirryttiin kokonaisuudessaan vuonna 1962 (Bergman *et al*. 2001). Nykyinen kuljetustaso on 1 365 metrin syvyydessä, ja se louhittanee tyhjäksi 2040-luvun aikana (LKAB 2024). Nykyinen arvio koko kaivoksen rautamalmin riittävyydestä ulottuu vuoteen 2060 asti (Rantamartti 2022).

Kiirunan kaivoksen omistaa Ruotsin valtion yritys Luossavaara–Kiirunavaara Aktiebolag, joka tunnetaan lyhyemmin nimellä LKAB (Pöyhönen 2024). Kaivosyhtiö louhii rautamalmia myös Malmivaaran (ruot. *Malmberget*) kaivoksella Jällivaarassa (ruot. *Gällivare*) ja Leveäniemen kaivoksella Svappavaarassa (LKAB 2024). Vuonna

2023 kaivosyhtiön päivittäinen rahti oli 83 000 tonnia ja vuoden kokonaistuotanto 25,3 miljoonaa tonnia (LKAB 2024). Yhtiön tavaraliikenne muodostaa 44 prosenttia Ruotsin rautateiden rahtiliikenteestä (LKAB 2024).

Kaivosyhtiön suurimmat markkina-alueet ovat Eurooppa (66 %), Lähi-itä ja Pohjois-Afrikka (25 %), Yhdysvallat sekä Aasia (LKAB 2024). Yrityksen liikevaihto vuonna 2023 oli 43 miljardia Ruotsin kruunua (LKAB 2024), mikä vastaa vajaata neljää miljardia euroa. Yritys työllistää kahdessatoista eri maassa noin 5 200 työntekijää (LKAB 2024), joista 2 500 henkilöä työskentelee Kiirunassa (Pöyhönen 2024). Kiirunan isoin työnantaja onkin yhä kaivos (Pöyhönen 2024), jonka ympärille kaupunki aikanaan syntyi (Rantamartti 2022).

Kiirunan kaupunki sijaitsee kaivoksesta itään, sen kattopuolella (Villegas *et al*. 2011). Kaivoksessa käytettävä louhintamenetelmä on levysorroslouhinta, jonka ideana on sivukiven romauttaminen kaivoksen sisään (Villegas *et al*. 2011). Louhintamenetelmä aiheuttaa ympäröivän peruskallion murtumista ja vajoamista (Villegas *et al*. 2011). Louhintamenetelmä vaikuttaa myös kaupunkiin, sillä maa kaupungin nykyisen keskustan alla on vaarassa sortua (Pöyhönen 2024).

Vuonna 2004 päätettiin, että osa Kiirunan kaupungista siirretään kaivoksen tieltä noin 3–6 kilometriä itään (Pöyhönen 2024). Kyseessä on ainutlaatuinen ja kallis projekti (Pöyhönen 2024). Ruotsin laki velvoittaa kaivosyhtiön maksamaan kaikki siirtämisestä aiheutuvat kulut (Pöyhönen 2024). Pöyhösen (2024) mukaan kaivos kuitenkin tuottaa niin hyvin, että siirto kannattaa. Tällä hetkellä kaupungin siirtämiseen menee neljäsosa kaivosyhtiön voitoista (Pöyhönen 2024).

Kiirunan siirtäminen aloitettiin vuonna 2017, ja projekti on tarkoitus saada valmiiksi vuoteen 2035 mennessä (Pöyhönen 2024). Vanhan keskustan rakennuksista suurin osa puretaan, mutta joitakin kulttuurihistoriallisesti merkittäviä rakennuksia siirretään uuteen keskustaan (kuva 2) (Pöyhönen 2024). Kaupungin reilusta 20 000 asukkaasta 6 000 asukasta muuttaa uuteen keskustaan projektin yhteydessä (Pöyhönen 2024).

Tässä tutkielmassa perehdytään Ruotsin, Norrbottenin ja erityisesti Kiirunavaaran geologiaan. Lisäksi tutustutaan tarkemmin levysorroslouhintaan ja sen aiheuttamaan kallioperän luhistumiseen.

Kuva 2. Kiirunan kaupungin keskusta muuttaa 3–6 kilometriä itään. Muuton yhteydessä 39 kulttuuri-historiallisesti tärkeää rakennusta siirretään uuteen paikkaan (Kiirunan kunta Rantamartin (2022) mukaan).

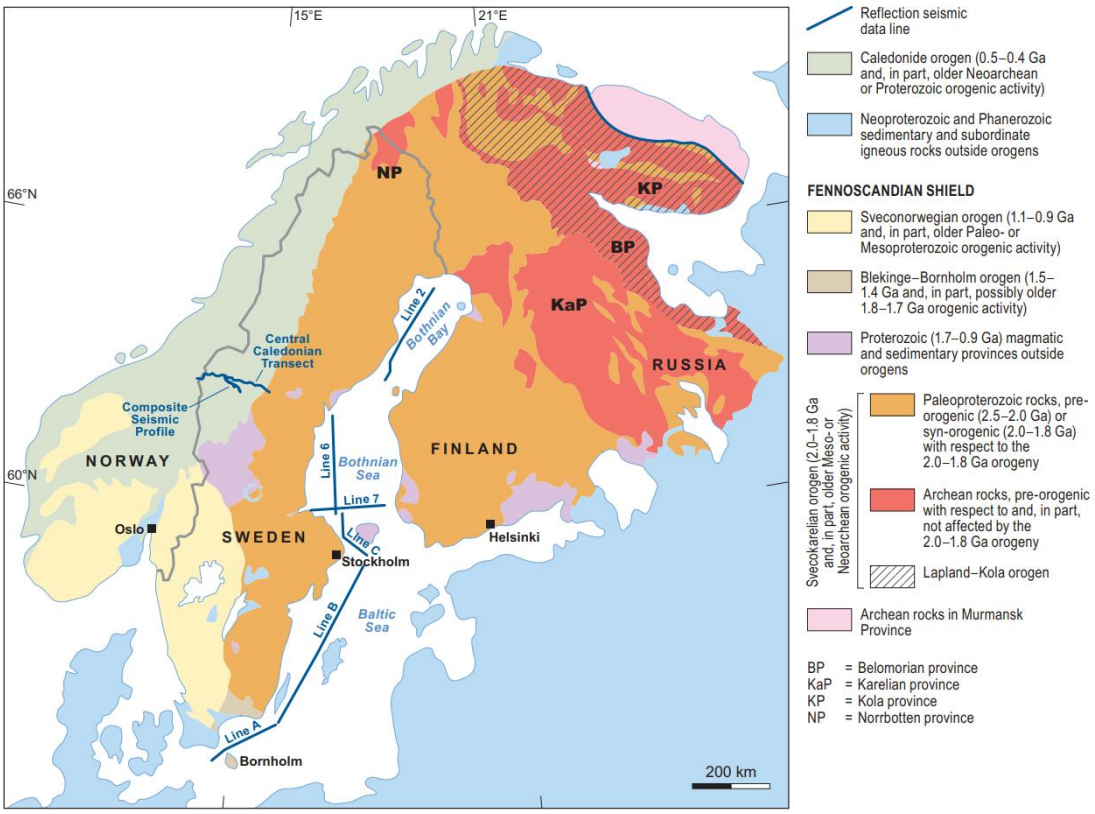
2 Ruotsin geologia

Stephensin (2020) mukaan Ruotsin kallioperä voidaan jakaa kolmeen osaan: vanhaan kiteiseen kallioperään, sedimenttikiviin ja nuorempaan kallioperään. Fennoskandian kilpeen kuuluva vanha kallioperä muodostaa 79 % maapinta-alasta kvartäärikauden moreenikerrostumien alla (Stephens 2020). Sedimenttikivet edustavat kahta erillistä ajanjaksoa, ja ne muodostavat 4 % maapinta-alasta (Stephens 2020). Loput 17 % pinta-alasta on nuorempaa kallioperää, joka tunnetaan Kaledonidien vuorijonona (Stephens 2020).

Fennoskandian kilpeen kuuluvat kivet ovat pääasiassa proterotsooisia magma- ja sedimenttikiviä, joiden joukossa on jäänteitä arkeeisesta kallioperästä (Stephens 2020). Stephensin (2020) mukaan kambrikaudelta paleogeenikaudelle kerrostuneet sedimenttikivet peittävät Ruotsin eteläisimmän osan, kun taas Keski-Ruotsissa on jäänteitä paleotsooisista ja sitä vanhemmista sedimenttikivistä. Kaledonidit puolestaan koostuvat proterotsooisesta, tektonisesti uudelleenmuokatusta peruskalliosta ja kryogeeni-siluurikauden peitekivistä (Stephens 2020).

Suurin osa Ruotsin kallioperästä on muodostunut kolmessa orogeniassa (kuva 3), jotka ovat svekofenninen orogenia (2,0–1,8 Ga), svekonorjalainen orogenia (1,1–0,9 Ga) ja kaledoninen orogenia (0,5–0,4 Ga) (Stephens 2020). Lisäksi pieni osa Etelä-Ruotsin kallioperää on syntynyt Blekinge-Bornholmin orogeniassa (1,5–1,4 Ga) (Stephens 2020). Ruotsin puoli Fennoskandian kilvestä voidaankin jakaa arkeeiseen, svekofenniseen, Blekinge-Bornholmin ja lounaisskandinaaviseen provinssiin sen mukaan, missä orogeniassa kyseisen provinssin kivet ovat syntyneet (Lundqvist *et al*. 2011).

Arkeeinen provinssi on muodostunut kahdessa orogeniassa, jotka ovat vanhempi saamelainen orogenia (ruot. *samiska orogenesen*) ja nuorempi lappilainen orogenia (ruot. *lopiska orogenesen*) (Lundqvist *et al*. 2011). Lundqvistin *et al.* (2011) mukaan vanhemmasta orogeniasta (3,5–2,9 Ga) on jäljellä vain jäänteitä nuoremmassa orogeniassa (2,8–2,6 Ga) muodostuneiden kivien joukossa. Arkeeinen provinssi koostuu pääasiassa tonaliittisista, granodioriittisista ja kvartsidioriittisista gneisseistä, joista useimmat ovat migmatisoituneet (Lundqvist *et al*. 2011). Lundqvistin *et al.* (2011) mukaan provinssiin kuuluu myös arkeeista graniittia ja pegmatiittia.



Kuva 3. Fennoskandian kallioperäkartta. Ruotsin kallioperä on muodostunut kolmessa merkittävässä orogeniassa, jotka ovat svekofenninen, svekonorjalainen ja kaledoninen orogenia. Erityisesti Ruotsissa svekofenninen orogenia tunnetaan svekokarjalaisena orogeniana (Stephens 2020).

Svekofenninen provinssi, joka tunnetaan Ruotsissa svekokarjalaisena provinssina, voidaan jakaa kahteen osaan: karjalais-lappilaiseen (ruot. *karelsk-lapponiska*) ja svekofenniseen (ruot. *svekofenniska*) osaprovinssiin (Lundqvist *et al*. 2011). Ensiksi mainittu koostuu arkeeisen kratonin halkeamiin ja mannerjalustalle kasaantuneista sedimenttikivistä ja vulkaanisista kivistä (Lundqvist *et al.* 2011). Lundqvistin *et al*. (2011) mukaan osaprovinssi sisältää myös syväkivilajeja, jotka tunkeutuivat pintakiviin svekofennisen orogenian aikana ja sen jälkeen. Karjalais-lappilaisen osaprovinssin kontakti arkeeiseen provinssiin on vaihettuva (Lundqvist *et al*. 2011).

Svekofenninen osaprovinssi kattaa suurimman osan svekokarjalaisesta provinssista (Lundqvist *et al*. 2011). Osaprovinssin pintasyntyiset kivet ovat tavallisesti iältään 1,89–1,87 Ga, ja ne ovat kerrostuneet erilaisille alustoille (Lundqvist *et al*. 2011). Alueen kivet ovat käyneet läpi voimakkaan deformaation, mistä syystä osaprovinssin alueella esiintyy granitoidien ja vulkaniittien lisäksi paljon migmatiittejä (Lundqvist *et al*. 2011). Lundqvistin *et al.* (2011) mukaan svekofenninen osaprovinssi sisältää

myös suuren määrän syväkivilajeja, jotka ovat tunkeutuneet kallioperään geologisen kehityksen eri vaiheissa.

Transskandinaavinen magmaattinen vyöhyke (ruot. *transskandinaviska magmatiska bältet*, *TMB*; engl. *Transscandinavian Igneous Belt*, *TIB*) sijaitsee svekokarjalaisen provinssin lounaispuolella (Lundqvist *et al*. 2011). Se koostuu granitoideista ja syenitoideista sekä porfyyrisistä kivistä (Lundqvist *et al*. 2011). Lundqvistin *et al*. (2011) mukaan pieni osa magmaattista vyöhykettä sijaitsee kauempana pohjoisessa. Kyseinen osa koostuu graniitista, jossa on sulkeumina vulkaanisia ja sedimenttikivilajeja (Lundqvist *et al*. 2011).

Blekinge-Bornholmin provinssi kattaa pienen palan Etelä-Ruotsia (Lundqvist *et al.* 2011). Provinssi rajautuu lännessä lounaisskandinaaviseen provinssiin (kuva 3) ja pohjoisessa transskandinaaviseen magmaattiseen vyöhykkeeseen (Lundqvist *et al.* 2011). Lundqvistin *et al.* (2011) mukaan alueen kivilajit ovat pintasyntyisiä ja granitoidisia kiviä, joista osa on vahvasti gneissimäisiä. Kivien iät vaihtelevat välillä 1,8–1,4 Ga (Lundqvist *et al.* 2011). Blekinge-Bornholmin provinssin erityispiirre on maankuoren suhteellinen ohuus (Lundqvist *et al.* 2011). Seismisten mittausten mukaan maankuori on provinssin kohdalla noin 36 kilometrin paksuinen, kun pohjoisempana maankuoren paksuus on 46–52 kilometriä (Lundqvist *et al.* 2011).

Lounaisskandinaavinen provinssi on syntynyt svekonorjalaisen orogenian aikana (Lundqvist *et al.* 2011). Provinssin kallioperässä on orogeniassa deformoituneita ja metamorfoituneita vanhoja kivilajeja sekä jonkin verran orogenian aikana muodostunutta uutta kallioperää (Lundqvist *et al.* 2011). Provinssin kivilajit ovat pääasiassa gneissimäisiä granitoideja, joiden joukossa on eri-ikäisiä mafisia intrusiivisia kiviä (Lundqvist *et al*. 2011). Kivien iät vaihtelevat välillä 1,7–1,1 Ga (Lundqvist *et al*. 2011). Lounaisskandinaavinen provinssi voidaan jakaa kuuteen segmenttiin, joiden geologinen kehitys eroaa toisistaan (Lundqvist *et al.* 2011).

Skandinaviassa, Ruotsin ja Norjan puolella sijaitseva Kaledonidien vuoristo on vain yksi osa kallioperää, joka syntyi kaledonisessa orogeniassa (Lundqvist *et al.* 2011). Kallioperän muut osat sijaitsevat itäisessä Pohjois-Amerikassa, Grönlannissa, brittien saarilla ja Huippuvuorilla (Lundqvist *et al.* 2011).

2.1 Ruotsin malmivarat

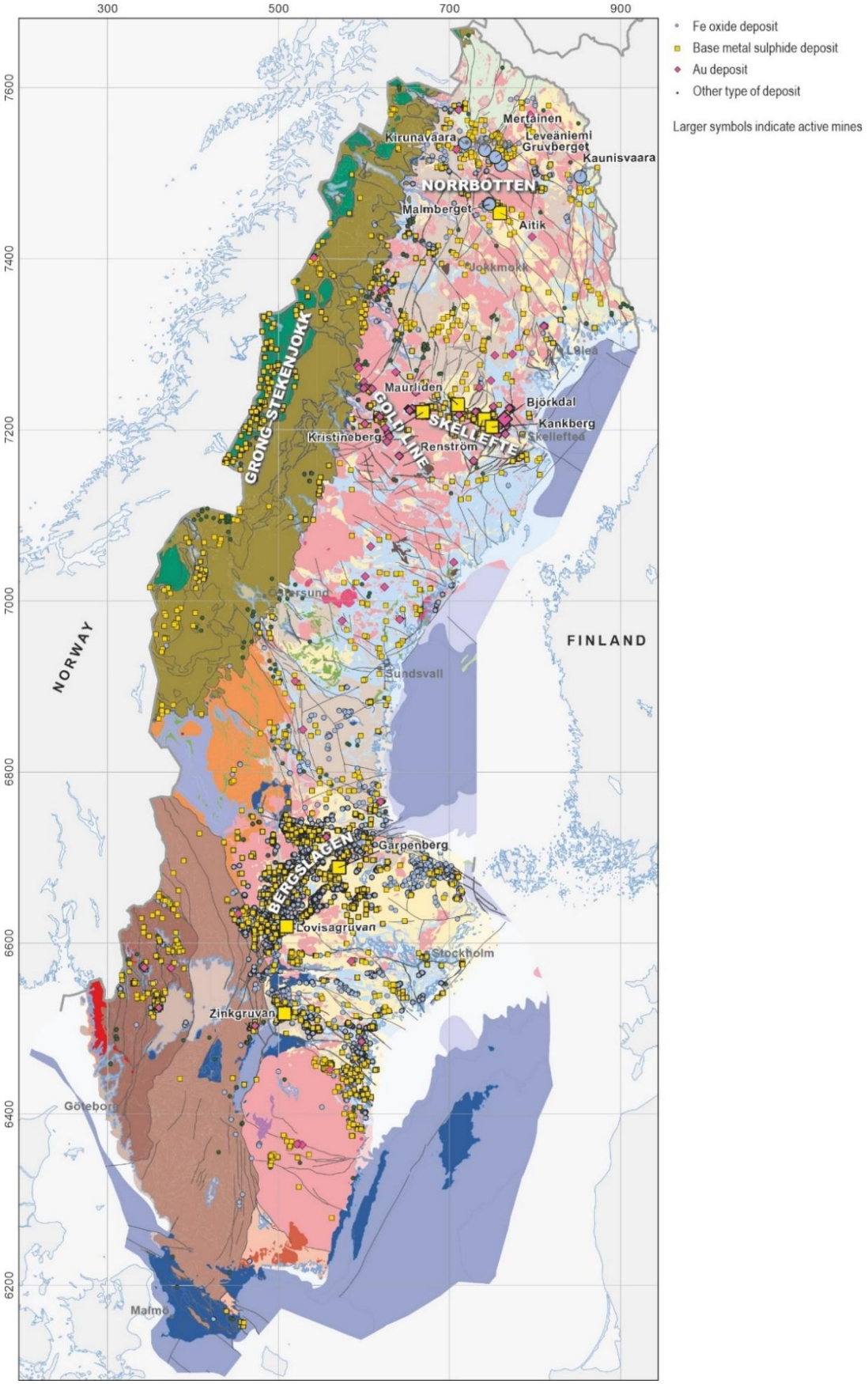
Ruotsin malmivarat keskittyvät viidelle maantieteelliselle alueelle (kuva 4), jotka ovat Bergslagen, Skellefte, Gold line, Norrbotten ja Grong-Stekenjokk (Stephens 2020). Stephensin (2020) mukaan neljä ensiksi mainittua aluetta ovat syntyneet svekofennisessä orogeniassa ja viimeksi mainittu kaledonisen orogenian aikana. Kaikki nykyisin toiminnassa olevat kaivokset sijaitsevat svekofennisen orogenian alueella (Stephens 2020).

Bergslagenin alueella Keski-Ruotsissa on kolme toiminnassa olevaa sulfidikaivosta, joista louhitaan monimetallimalmia (Stephens 2020). Kyseiset kaivokset ovat Garpenberg, Lovisagruvan ja Zinkgruvan (Stephens 2020). Stephensin (2020) mukaan alueella on lisäksi kahdenlaisia rautamalmiesiintymiä: Kiiruna-tyypin apatiitti-rautamalmiesiintymiä sekä karsi- ja karbonaattikiviin muodostuneita rautamalmeja.

Pohjoisempana sijaitsevilla Skelleften ja Gold linen alueilla on puolestaan esiintymiä, jotka sisältävät vulkaanista massiivista sulfidimalmia eli VMS-malmia ja orogeenista kultaa (Stephens 2020). Skelleften alueella on viisi toiminnassa olevaa kaivosta, joista yksi on kultakaivos ja loput sulfidikaivoksia (Stephens 2020). Kultakaivos on nimeltään Björkdal ja muut kaivokset ovat Kristineberg, Kankberg, Maurliden ja Renström (Stephens 2020). Gold linen alueella ei ole aktiivista kaivostoimintaa (Stephens 2020).

Svekofenniseen orogeniaan liittyvistä alueista pohjoisin on Norrbotten (Stephens 2020). Stephensin (2020) mukaan Norrbottenissa on rautaoksidiesiintymiä, joista osa on Kiiruna-tyypin apatiitti-rautamalmia. Lisäksi alueella esiintyy sivukiveä nuorempia (engl. *epigenetic*) kupari-kultaesiintymiä (Stephens 2020). Norrbottenissa on tällä hetkellä seitsemän toiminnassa olevaa kaivosta, joista yksi on Kiirunavaaran kaivos (Stephens 2020). Muita rautamalmikaivoksia ovat Gruvberget, Kaunisvaara, Leveäniemi, Malmberget ja Mertainen (Stephens 2020). Aitikin kaivoksella louhitaan puolestaan sivukiveä nuorempaa kuparia ja kultaa (Stephens 2020).

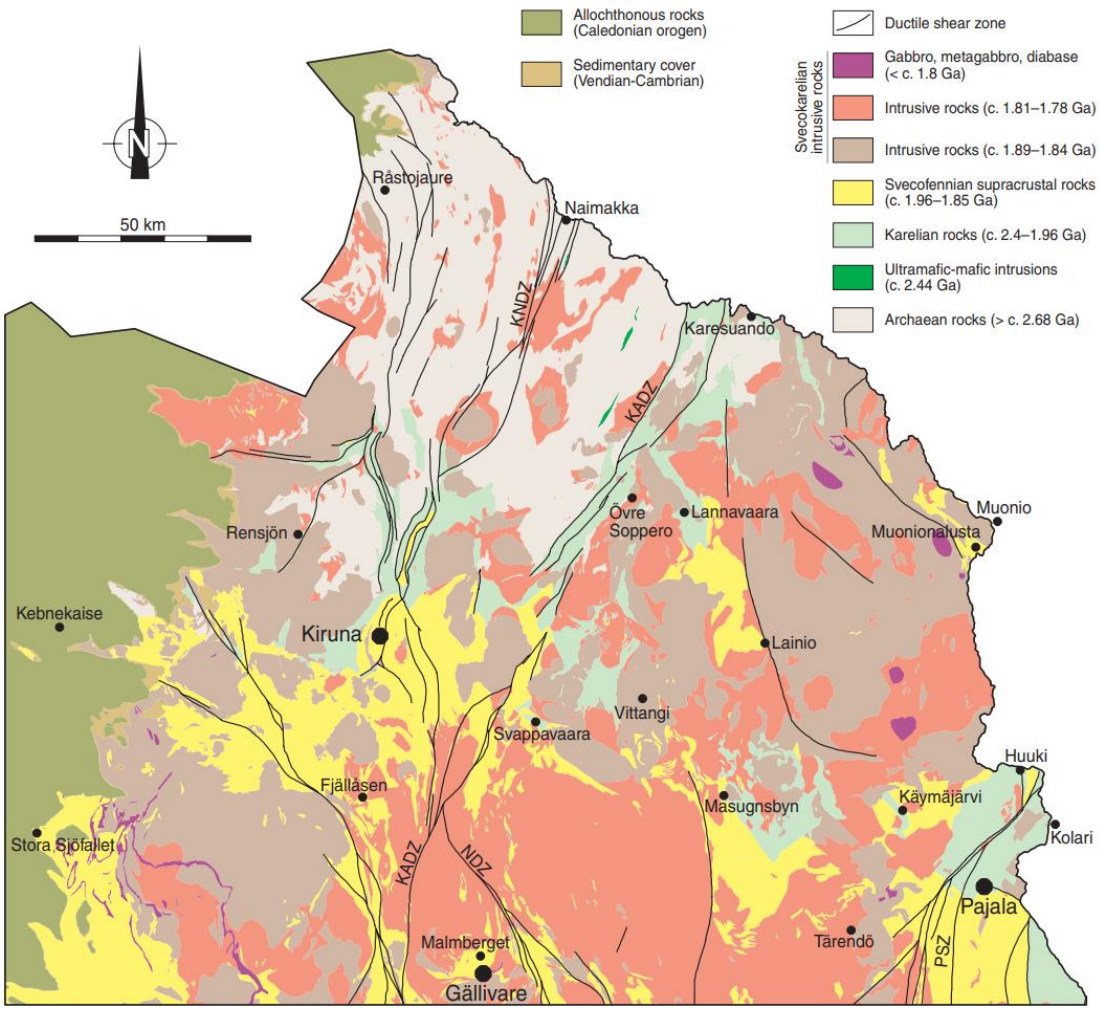
Grong-Stekenjokkin alueen esiintymät sijaitsevat puolestaan lähellä Norjan rajaa, ja alue jatkuukin länteen päin Norjan puolelle (Stephens 2020). Monimetalli-sulfidimalmeja sisältävällä alueella ei tällä hetkellä ole kaivostoimintaa (Stephens 2020).



Kuva 4. Karttakuva Ruotsin viidestä keskeisestä malmialueesta: Bergslagen, Skellefte, Gold line, Norrbotten ja Grong-Stekenjokk. Malmiesiintymät on merkitty pienillä symboleilla ja toiminnassa olevat kaivokset isoilla symboleilla (Stephens 2020).

3 Norrbottenin geologia

Norrbotten on Pohjois-Ruotsissa sijaitseva maakunta (kuva 5), joka tunnetaan yhtenä Ruotsin suurimmista malmintuotantoalueista (Bergman *et al*. 2001). Norrbottenin alueen kiteinen kallioperä koostuu vanhemmista arkeeisista ja varhais-paleoproterotsooisista kivistä sekä nuoremmista svekofennisen orogenian aikaisista kivistä (Bergman 2018). Kaikki kivet ovat deformoituneet ja metamorfoituneet vaihtelevassa määrin orogeenisen kehityksen eri vaiheissa (Bergman 2018). Lännessä kiteistä kallioperää peittävät kaledoniseen orogeniaan liittyvät sedimenttikivet ja ylityöntölaatat (engl. *nappe*) (Bergman 2018).



Kuva 5. Yksinkertaistettu kallioperäkartta Norrbottenin maakunnan pohjoisosista. KADZ = Karesuando–Arjeplog deformation zone, KNDZ = Kiruna–Naimakka deformation zone, NDZ = Nautanen deformation zone, PSZ = Pajala shear zone (Bergman *et al*. 2001).

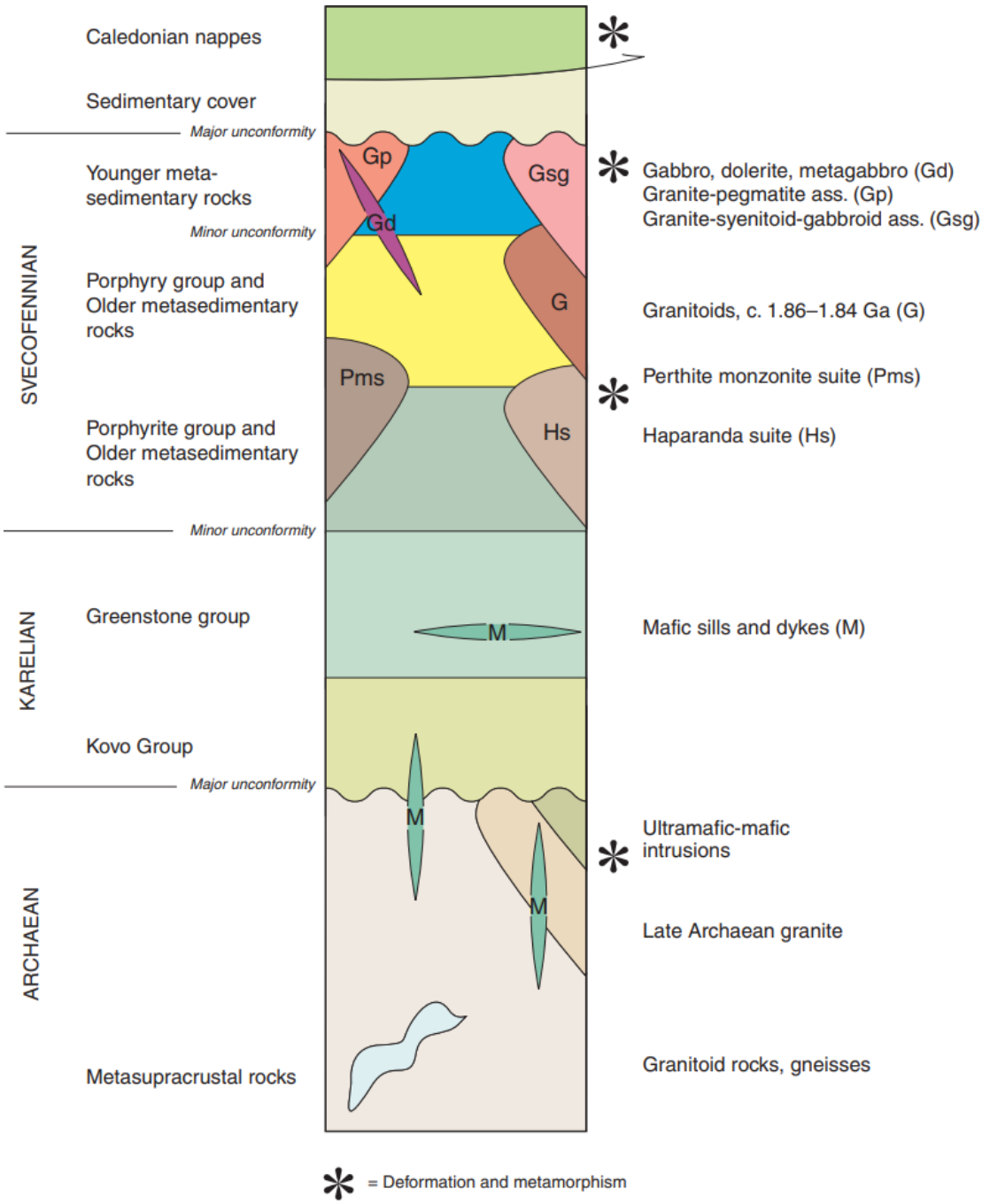
Norrbottenin arkeeiset kivet tunnetaan Råstejauren kompleksina (Bergman 2018). Kompleksi sisältää pääasiassa granitoideja, jotka ovat tunkeutuneet vanhempiin pintasyntyisiin kiviin (Bergman *et al*. 2001). Granitoideista suurin osa on gneissimäisiä ja niiden koostumus vaihtelee tonaliittisesta grano- ja kvartsidioriitteihin (Bergman *et al*. 2001). Granitoidit ovat kiteytyneet 2,8–2,7 Ga ja alueellinen metamorfoosi on tapahtunut 2,7 Ga (Bergman 2018). Råstejauren kompleksi sisältää myös ultramafisia-mafisia kerrosintruusioita, joiden ikä on 2,5–2,4 Ga (Bergman 2018).

Arkeeisten kivien päälle on kerrostunut karjalaisia kiviä (kuva 6), jotka voidaan jakaa kahteen stratigrafiseen ryhmään: alempaan Kovo-ryhmään ja ylempään vihreäkiviryhmään (Bergman *et al*. 2001). Kovo-ryhmä koostuu klastisista sedimenttikivistä sekä intermediäärisistä ja mafisista vulkaanisista kivistä (Bergman *et al*. 2001). Vihreäkiviryhmä koostuu pääasiassa basalttisesta laavasta, mutta sisältää myös vulkanoklastisia kiviä ja tyynylaavaa (Bergman *et al*. 2001). Karjalaisten kivien ikä on 2,4–1,9 Ga (Bergman *et al*. 2001). Arkeeisten ja karjalaisten kivien seassa esiintyy mafisia juonia ja sillejä, jotka ovat aiemmin mainittuja kerrosintruusioita nuorempia (Bergman *et al*. 2001).

Edellä mainittujen kerrosten päällä on svekofennisia pintasyntyisiä kiviä, joiden ikä on noin 1,9 Ga (Bergman *et al*. 2001). Metamorfoituneisiin vulkaanisiin kiviin kuuluu porfyriittiryhmä ja sitä peittävä nuorempi porfyyriryhmä (Bergman *et al*. 2001). Porfyriittiryhmän kivet ovat pääasiassa andesiitteja ja basaltteja, joissa on jopa kolmen senttimetrin kokoisia plagioklaasihajarakeita biotiittimatriksissa (Bergman *et al*. 2001). Bergmanin *et al*. (2001) mukaan porfyyriryhmä koostuu puolestaan basaltista, trakyytti-andesiitista ja ryoliitista. Kyseisen ryhmän kivissä on korkeat titaani- ja zirkoniumpitoisuudet, mikä erottaa ne porfyriittiryhmän kivistä, joissa kyseiset pitoisuudet ovat alhaiset (Bergman *et al*. 2001).

Svekofennisista pintasyntyisistä kivistä nuorimpia ovat metamorfoituneet sedimenttikivet, jotka ovat pääasiassa hiekkakiveä, konglomeraattia ja kvartsiittia (Bergman *et al*. 2001). Pintasyntyisten kivien joukossa on kuusi intruusiosarjaa, joiden iät vaihtelevat aikavälillä 1,9–1,8 Ga (Bergman *et al*. 2001). Kolme intruusiosarjoista sisältää graniittia, syenitoideja ja gabroideja, yksi kahdenlaisia granitoideja ja yksi

graniittin lisäksi pegmatiittia (Bergman *et al*. 2001). Nuorin sarja koostuu gabroista, metagabroista ja diabaasista (Bergman *et al*. 2001).



Kuva 6. Kaaviokuva Norrbottenin kallioperän stratigrafiasta. Kuvassa näkyvät tärkeimmät kivilajiyksiköt ja tapahtumat. Kuva ei ole mittakaavassa (Bergman *et al*. 2001).

3.1 Norrbottenin malmivarat

Norrbottenin alueen tärkeimmät metallit ovat rauta ja kupari (Bergman *et al*. 2001). Alueella on pieniä määriä muitakin metalleja, kuten sinkkiä, lyijyä, vanadiinia, titaania ja kobolttia, mutta niiden louhiminen ei ole taloudellisesti kannattavaa (Bergman *et al*. 2001). Kupari ja rauta esiintyvät useissa erilaisissa malmimuodostumissa, joista taloudellisesti merkittävin on Kiiruna-tyypin apatiitti-rautamalmi, jota louhitaan Kiirunassa ja Malmbergetissa (Bergman *et al*. 2001). Bergmanin *et al*. (2001) mukaan Norrbottenin malmiesiintymät voidaan jakaa viiteen ryhmään, jotka ovat kerrosmyötäiset ja -sidonnaiset (engl. *stratiform-stratabound*) metallit, apatiitti-rautamalmit, sivukiveä nuoremmat perusmetallit, muut metallit ja teollisuusmineraalit.

Kerrosmyötäiset ja -sidonnaiset metallit ovat yhteydessä vihreäkiviryhmän vulkanoklastisiin yksiköihin (Bergman *et al*. 2001). Esiintymät voidaan jakaa perusmetalleja sisältäviin sulfidimuodostumiin, karsirikkaisiin rautamuodostumiin ja raitaisiin rautamuodostumiin (Bergman *et al*. 2001). Kumpikaan rautamalmityyppi ei ole taloudellisesti merkittävä, ja sulfidimalmeista merkittävä on vain Viscarian kuparimalmi (Bergman *et al*. 2001). Bergmanin *et al*. (2001) mukaan kerrosmyötäisiin ja -sidonnaisiin malmeihin liittyvä muuttuminen on vähäistä. Siksi malmien on esitetty syntyneen samaan aikaan isäntäkiven kanssa (Bergman *et al*. 2001).

Apatiitti-rautamalmit esiintyvät sekä breksioina että kerrosmyötäisinä ja -sidonnaisina malmeina (Bergman *et al*. 2001). Jälkimmäisen tyypin malmit esiintyvät porfyyriryhmän yläosassa, ja niiden pääasiallinen rautaoksidi on hematiitti, joskin seassa on jonkin verran magnetiittia (Bergman *et al*. 2001). Breksiatyypin apatiitti-rautamalmit sijaitsevat puolestaan porfyyriryhmän alaosan ja alemman porfyriittiryhmän kivissä, ja ne sisältävät lähes poikkeuksetta pelkästään magnetiittia (Bergman *et al*. 2001). Bergmanin *et al*. (2001) mukaan apatiitti-rautamalmien titaanipitoisuus on huomattavan matala, kun taas vanadiinipitoisuus on korkea. Myös harvinaisten maametallien (engl. *Rare Earth Elements, REE*) pitoisuudet ovat korkeat useimmissa apatiitti-rautamalmeissa (Bergman *et al*. 2001). Kiirunavaara on suurin kyseisen malmityypin esiintymä (Bergman *et al*. 2001).

Sivukiveä nuoremmat perusmetallit sisältävät pääasiassa kuparia, mutta myös jonkin verran kobolttia ja kultaa (Bergman *et al*. 2001). Porfyyri- ja porfyriittiryhmän sivukiveä nuorempien malmien tyypillinen piirre on voimakas muuttuminen, jonka

tuloksena on kiteytynyt mm. kalimaasälpää (Bergman *et al*. 2001). Vihreäkiviryhmän muodostumat ovat kahta tyyppiä: Pahtohavare-tyyppiä ja karbonaatti-kvartsijuonityyppiä (Bergman *et al*. 2001). Bergmanin *et al*. (2001) mukaan Pahtohavare-tyypin malmin päämineraalit ovat rikki- ja kuparikiisut, joiden lisäksi malmissa on jonkin verran kultaa. Juonityypin malmit sisältävät nimensä mukaisesti kuparimalmia kvartsijuonissa ja karbonaattikivissä (Bergman *et al*. 2001). Sivukiveä nuorempien perusmetallien joukossa on vain kaksi taloudellisesti merkittävää esiintymää: Aitikin ja Pahtohavaren esiintymät (Bergman *et al*. 2001).

Norrbottenin muut metalliesiintymät sisältävät lähinnä titaania, vanadiinia, nikkeliä ja molybdeeniä, eivätkä ne ole taloudellisesti kiinnostavia (Bergman *et al*. 2001). Teollisuusmineraaleja louhitaan paikallisen teollisuuden tarpeisiin (Bergman *et al*. 2001). Bergmanin *et al*. (2001) mukaan tärkeimmät teollisuusmineraalit ovat apatiitti, kvartsi ja dolomiitti. Alueella on kartoitettu myös useita muita kiinnostavia esiintymiä, jotka sisältävät mm. grafiittia, talkkia ja baryyttia (Bergman *et al*. 2001).

4 Kiirunavaaran esiintymä

Martinssonin *et al*. (2016) ja Bergmanin *et al*. (2001) mukaan Norrbottenin alueella on noin 40 apatiitti-rautamalmiesiintymää, joista kaikki sijaitsevat svekofennisissä kivissä. Kiirunavaara on esiintymistä suurin: malmia on arviolta 2 000 Mt ja sen rautapitoisuus vaihtelee 60–68 %:n välillä (Bergman *et al*. 2001).

Kiirunavaaran levymäinen malmiesiintymä on noin viiden kilometrin pituinen, sadan metrin levyinen ja ulottuu vähintään 1 300 metrin syvyyteen maanpinnan alapuolelle (Bergman *et al*. 2001). Esiintymä kulkee pohjoisesta etelään ja kaatuu 60 astetta itään (Lupo 1997, Villegas *et al*. 2011). Martinssonin *et al*. (2016) mukaan pienempi Luossavaaran esiintymä sijaitsee samanlaisessa stratigrafisessa asennossa kilometrin päässä pohjoisessa (kuva 7). Esiintymien arvellaan syntyneen yhtä aikaa noin 1 888–1 880 Ma sitten (Bergman *et al*. 2001).

Kiirunavaaran esiintymä on yhdistelmä kerrosmyötäisiä ja -sidonnaisia sekä breksiatyypin malmeja (Martinsson *et al*. 2016). Malmin fosforipitoisuus vaihtelee merkittävästi ollen joko selvästi alle 0,05 % tai yli 1,0 % (Bergman *et al*. 2001). Myös malmin rautapitoisuus vaihtelee siten, että vähän fosforia sisältävän malmin keskimääräinen rautapitoisuus on 67 % ja paljon fosforia sisältävän malmin keskimääräinen rautapitoisuus on 60 % (Lupo 1997).

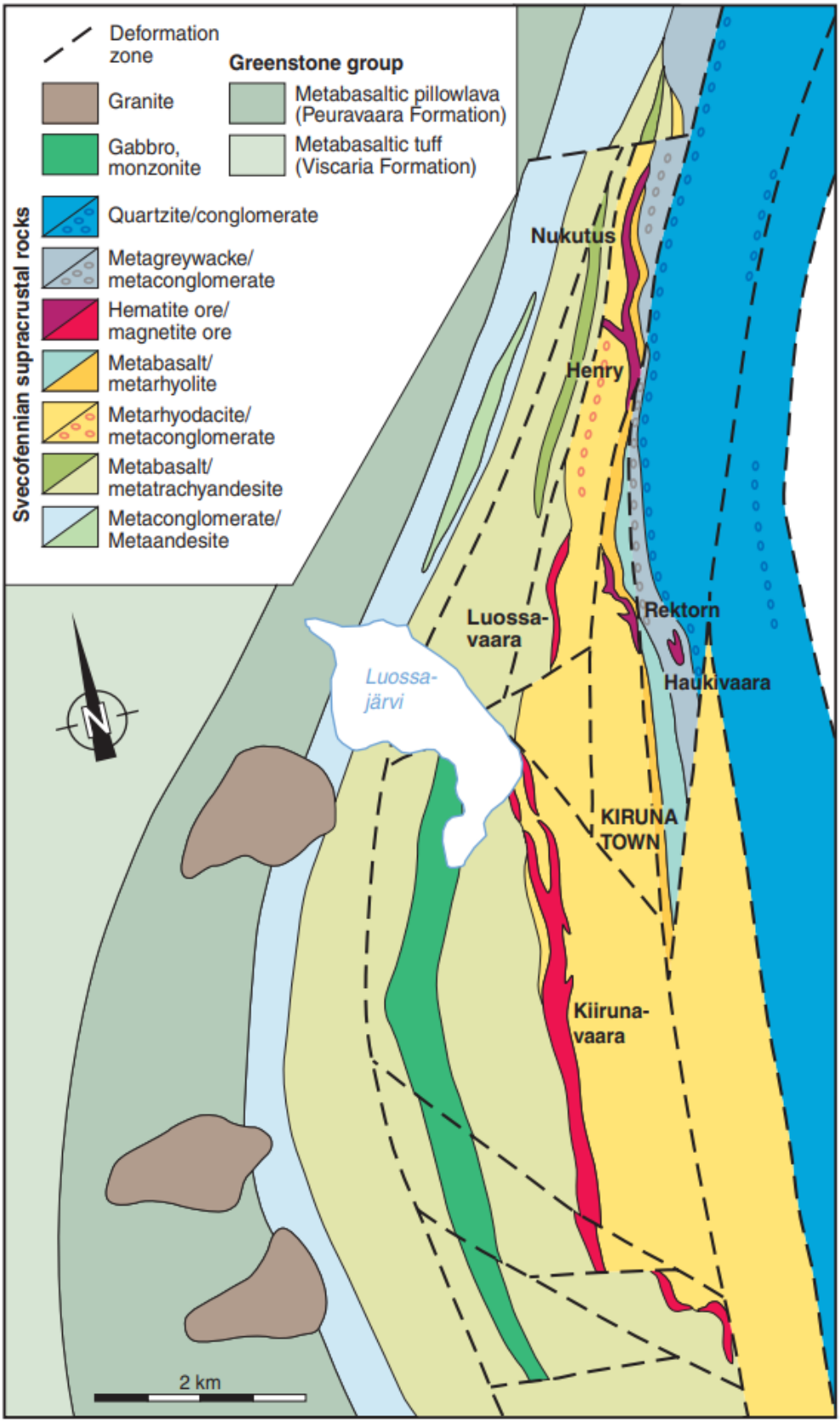
Alhainen fosfori- ja korkeampi rautapitoisuus ovat tyypillisiä breksiatyypin malmille, joka tunnetaan myös lyhyemmin B-malmina (Bergman *et al*. 2001, Martinsson *et al*. 2016). Korkea fosfori- ja matalampi rautapitoisuus ovat puolestaan kerrosmyötäisen ja -sidonnaisen malmin eli D-malmin tunnusomaisia piirteitä (Bergman *et al*. 2001, Martinsson *et al*. 2016). Lupon (1997) mukaan B-malmi muodostaa noin kolmanneksen ja D-malmi kaksi kolmasosaa malmiesiintymästä.

Kiirunavaaran esiintymä seuraa trakyytti-andesiittilaavan ja pyroklastisen ryodasiittin kontaktia (Bergman *et al*. 2001). Malmi koostuu pääasiassa D-malmista, mutta B-malmia on sekä katto- että jalkapuolen läheisyydessä (Bergman *et al*. 2001, Martinsson *et al*. 2016). B- ja D-malmit leikkaavat toisiaan ja niiden ikäsuhde on epäselvä (Bergman *et al*. 2001). B-malmin kontakti jalkapuolen trakyytti-andesiittiin on paikoitellen vaihettuva, ja breksia sisältääkin sivukiven kappaleita (Bergman *et al*.

2001). Kattopuolen läheisyydessä on puolestaan kulmikkaita ja osin pyöristyneitä kappaleita, jotka ovat koostumukseltaan ryodasiittisia (Bergman *et al*. 2001).

Fosforiköyhä B-malmi sisältää hienorakeista magnetiittia, jonka raekoko on alle kolme millimetriä (Bergman *et al*. 2001). B-malmin keskellä esiintyy kuitenkin kahden millimetrin kokoisia magnetiittikiteitä, minkä lisäksi malmissa on pieniä määriä kalsiittia ja rikkikiisua (Bergman *et al*. 2001), aina amfibolia ja toisinaan myös kuparikiisua ja titaniittia (Martinsson *et al*. 2016). Aktinoliitti, albiitti ja skapoliitti ovat B-malmin yleisiä muuttumismineraaleja (Martinsson *et al*. 2016).

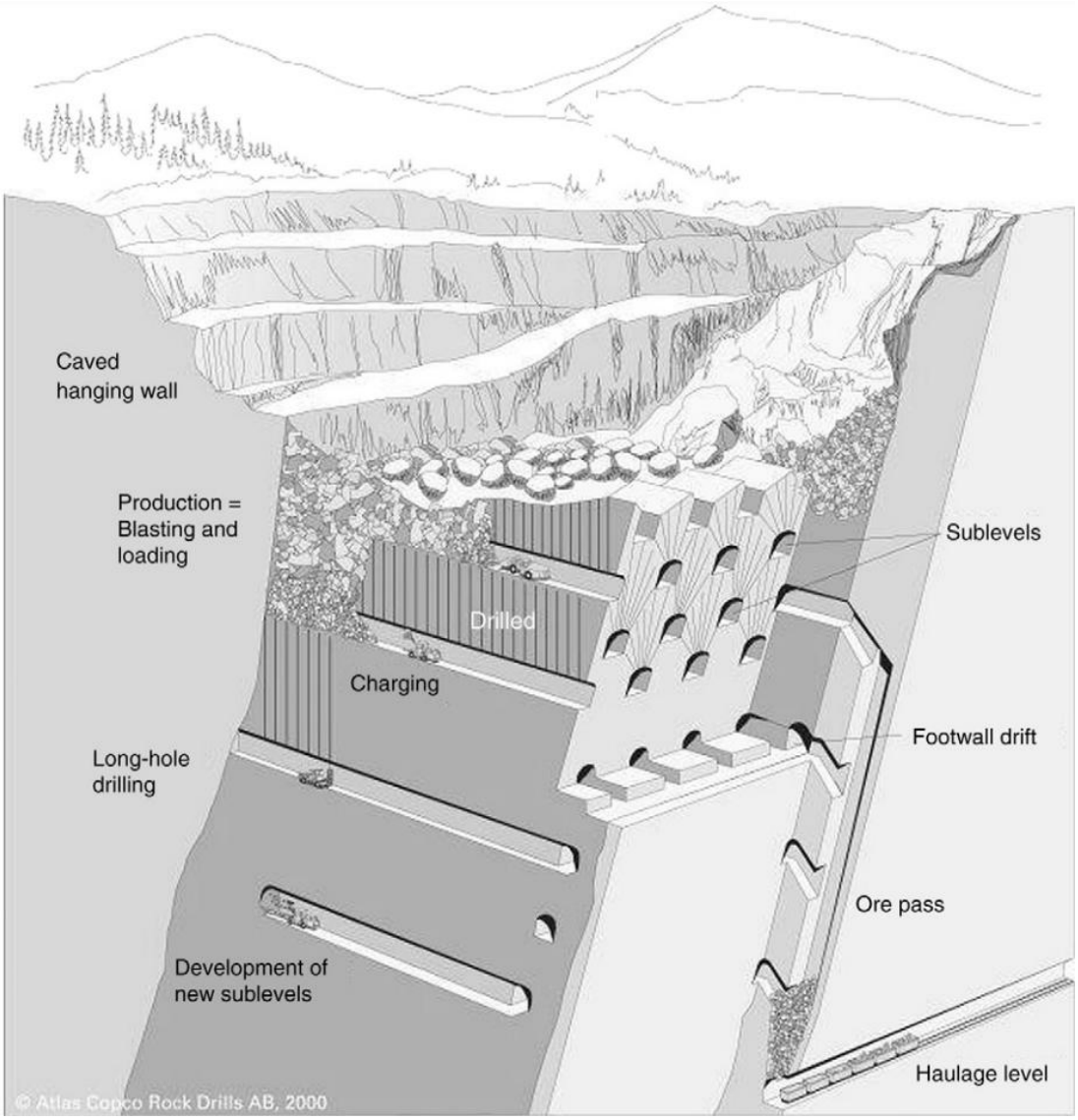
D-malmi sisältää hematiittia, mutta myös magnetiitta ja apatiittia (Martinsson *et al*. 2016). D-malmi sisältää amfibolin sijaan kvartsia ja karbonaattia (Martinsson *et al*. 2016). Isäntäkiven muuttumistuotteina D-malmissa on serisiittiä, kloriittia, biotiittia, turmaliinia ja karbonaattia (Martinsson *et al*. 2016).



Kuva 7. Kiirunavaaran malmiesiintymä kulkee pohjois-eteläsuuntaisesti seuraten trakyytti-andesiitin ja ryodasiitin kontaktia. Levymäinen esiintymä kaatuu 60 astetta itään. Kilometrin päässä pohjoisessa sijaitseva Luossavaaran esiintymä on samanlaisessa stratigrafisessa asennossa. Esiintymien arvellaankin syntyneen yhtä aikaa noin 1 888–1 880 Ma sitten (Bergman *et al*. 2001).

5 Louhintatekniikka

Villegasin *et al*. (2011) mukaan Kiirunan kaivoksen louhintamenetelmä on levysorroslouhinta (engl. *sublevel caving*). Menetelmää on kehitetty useita vuosikymmeniä juuri Kiirunavaarassa (Lappalainen 2009). Malmiesiintymä on jaettu levytasoihin (engl. *sublevel*), joihin ajetaan eli louhitaan tunneleita, ns. louhintaperiä (engl. *cross-cuts*) (Lappalainen 2009). Lappalaisen (2009) mukaan kaikki louhintaperät ovat samansuuntaisia, mutta eri levytasoilla limittäin (kuva 8). Kiirunassa louhintaperät ovat kohtisuorassa malmin kulkuun nähden ja levytasojen välit ovat 28,5 metriä (Villegas *et al*. 2011).



Kuva 8. Levysorroslouhinnassa malmiesiintymä jaetaan levytasoihin (engl. *sublevel*), joihin louhitaan samansuuntaisia, limittäisiä louhintaperiä. Louhintaperät räjäytetään, ja malmi tiputetaan kuljetustasolle (engl. *haulage level*). Sivukivi romahtaa kaivoksen sisään louhinnan edetessä (Atlas Copco Rock Drills AB (2000) Villegas *et al*. (2011) mukaan).

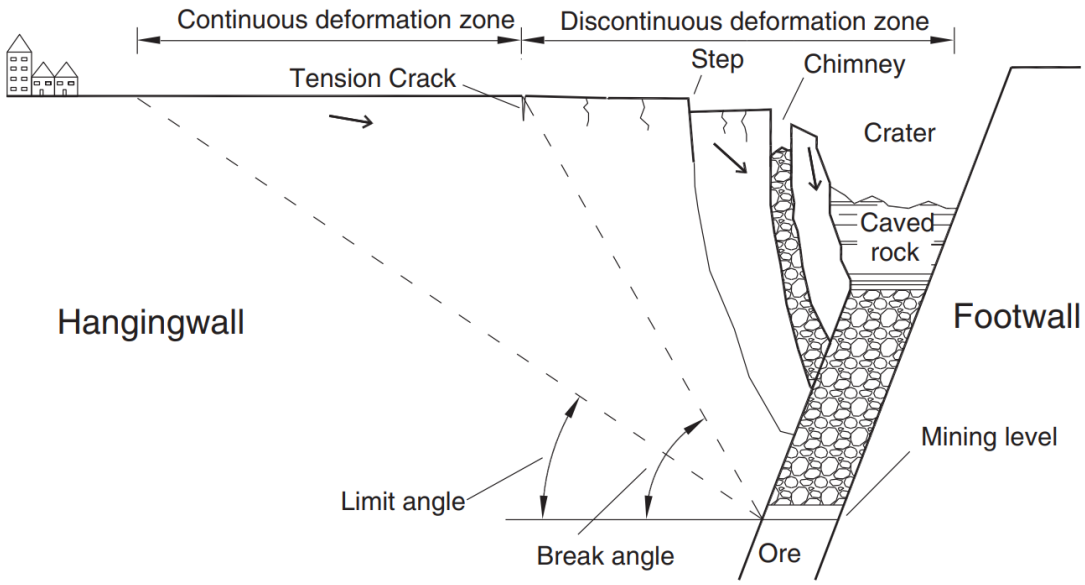
Louhintaperän kattoon porataan reikiä viuhkamaiseen muodostelmaan, reiät panostetaan ja panokset räjäytetään, jolloin malmi sivukivineen romahtaa (Lappalainen 2009). Lappalaisen (2009) mukaan räjäyttämällä pyritään varmistamaan malmin ja sivukiven rikkoutuminen haluttuun lohkarekokoon. Rikkoutunut malmi lastataan tasaisesti ja pudotetaan malmikuiluun, joka johtaa kuljetustasolle (engl. *haulage level*) (Villegas *et al*. 2011) 1 365 metrin syvyyteen (LKAB 2024). Kuljetustasolla malmi kuljetetaan murskattavaksi, jonka jälkeen se nostetaan kahdessa vaiheessa ensin 775 metriin ja lopulta maanpinnalle (Villages *et al*. 2011).

Louhinta etenee säntillisesti ylhäältä alas ja vaatii tarkkuutta ja täsmällisyyttä (Lappalainen 2009). Levysorroslouhinnan keskeinen piirre on, että louhintaperiin ei synny tyhjää tilaa, vaan malmi ja sivukivi virtaavat tasaisesti alaspäin painovoiman vaikutuksesta (Lappalainen 2009). Lappalaisen (2009) mukaan menetelmä aiheuttaakin maanpintaan asti ulottuvia painaumia ja lohkoliikuntoja. Kiirunavaarassa kaikki sisäänkäynnit ja kaivosinfrastruktuuri onkin sijoitettu malmin jalkapuolelle, sillä louhimisen seurauksena kattopuoli murtuu ja vajoaa (Villegas *et al*. 2011).

6 Ympäröivän kallioperän luhistuminen

Kiirunan kaupunki sijaitsee Kiirunavaaran kaivoksen kattopuolella (Villegas *et al*. 2011). Kiirunavaaran louhiminen aiheuttaa maanpinnalle vaurioita, jotka näkyvät neljällä eri alueella (kuva 9) kaivoksen läheisyydessä (Lupo 1997). Nämä alueet ovat kattopuolen murto- ja vajoamisvyöhykkeet, luhistunut vyöhyke ja jalkapuolen murtovyöhyke (Lupo 1997). Louhinnan jatkuessa yhä syvemmälle pintavauriot ulottuvat hitaasti kohti Kiirunan kaupunkia, rautatietä ja voimalaitosta (Villegas *et al*. 2011).

Luhistunut vyöhyke (engl. *caved rock zone*) sijaitsee suoraan louhitun alueen päällä siinä, missä avolouhos aiemmin sijaitsi (Lupo 1997). Se sisältää louhittua sivukiveä, jonka raekoko on muutamasta millimetristä useisiin metreihin (Lupo 1997). Lupon (1997) mukaan suurinta deformaatiota luhistuneella vyöhykkeellä aiheuttaa pystysuora valunta, joka johtuu sivukiven romahtamisesta (Lupo 1997). Myös piippumaiset halkeamat (engl. *chimney features*) ovat yleisiä deformaatiorakenteita kyseisellä vyöhykkeellä (Lupo 1997). Ne muodostuvat, kun kiven virtauskanava (engl. *flow channel*) yltää maanpinnalle asti (kuva 9) (Lupo 1997).



Kuva 9. Kuvan alueet eivät noudata Lupon (1997) jaottelua, vaan kattopuoli on jaettu jatkuvaan ja epäjatkuvaan deformaatiovyöhykkeeseen, ja jalkapuoli on jätetty kokonaan huomiotta. Kuvasta on kuitenkin nähtävissä Lupon (1997) jaottelun mukaiset alueet (Villegas *et al*. 2011).

Kattopuolen murtovyöhyke (engl. *hanging wall failure zone*) on alue kattopuolen vajoamisvyöhykkeen ja luhistuneen alueen välissä (Lupo 1997). Tällä vyöhykkeellä pintavauriot ovat halkeamia, vajoamia ja hiertosiirroksia (Lupo 1997). Kattopuolen murto- ja vajoamisvyöhykkeen rajana pidetään ulointa havaittua halkeamaa (Villegas *et al*. 2011). Villegasin *et al*. (2011) mukaan tämän halkeaman ja aktiivisen louhintatason välillä on kuvitteellinen viiva, jonka suhdetta horisontaaliin tasoon kutsutaan murtokulmaksi (engl. *break angle*) (kuva 9). Murtokulma on noin 60 astetta, eikä se toisenlaisista arvioista huolimatta ole muuttunut louhintatason mukana (Villegas *et al*. 2011).

Kattopuolen vajoamisvyöhyke (engl. *hanging wall subsidence zone*) sijaitsee kauimpana kaivoksesta (Lupo 1997). Vyöhykkeen deformaatio on jatkuvaa, hidasta vajoamista, joka voidaan havaita vain säännöllisen kartoittamisen ja tarkkojen mittausten avulla (Lupo 1997). Lupon (1997) mukaan kyseinen vyöhyke on puskurivyöhyke tasapainossa olevan ja sortuvan kivimassan välillä. Hidas siirtymä tapahtuu horisontaalisti kohti kaivosta ja vertikaalisti alaspäin (Lupo 1997). Pintahäiriöt alueella johtuvat stressikentän muutoksista (Lupo 1997).

Jalkapuolen murtovyöhyke (engl. *footwall failure zone*) sijaitsee nimensä mukaisesti malmin jalkapuolella (Lupo 1997). Pintahalkeamien lisäksi vyöhykkeellä tapahtuu kivimassojen liikuntoja ja kaivosrakenteiden sortumisia (Lupo 1997). Lupon (1997) mukaan jalkapuolen hiertosiirrokset muodostuvat sekä olemassa oleviin geologisiin rakenteisiin että ehjään kiveen. Jalkapuolen vauriot ovat toistaiseksi olleet vähäisemmät kuin kattopuolen vauriot (Lupo 1997). Siinä missä kattopuolen deformaatiota kartoitettiin jo 1960-luvulla, jalkapuolella havaittiin näkyviä vaurioita vasta 1990-luvun alkupuolella (Lupo 1997).

Villegasin *et al*. (2011) mukaan kattopuoli muistuttaa rakenteeltaan suuren avolouhoksen rinnettä, jonka deformaatio sisältää kolme vaihetta: regressiivinen, progressiivinen ja vakaa tila (engl. *steady state*). Regressiivisessä vaiheessa kivimassan stressikenttä alkaa muuttua edellisen romahduksen jälkeen (Villegas *et al*. 2011). Lisääntynyt louhinta ja uusien levytasojen hyödyntäminen kiihdyttävät regressiivisen vaiheen etenemistä (Villegas *et al*. 2011). Progressiivisessa vaiheessa ekstension aiheuttama jännitys kasaantuu halkeamiin (Villegas *et al*. 2011). Villegasin *et al*. (2011) mukaan kyseinen vaihe on deformaation käännekohta, jota nimitetään

kriittiseksi vertikaaliksi siirtymäksi (engl. *critical vertical displacement, CVD*). Kriittisen vertikaalin siirtymän jälkeen deformaatio asettuu vakaaseen tilaan, jossa kivimassan liikkuu tasaisesti alaspäin (Villegas *et al*. 2011).

Lähteet

Bergman, S. (2018). Regional geology of northern Norrbotten County. *Teoksessa*: Bergman, S. (toim.): Geology of the Northern Norrbotten ore province, northern Sweden. *Rapporter och meddelanden 141*. Geological Survey of Sweden. 432 p. 9–17.

Bergman, S., Kübler, L. & Martinsson, O. (2001). Description of regional geological and geophysical maps of northern Norrbotten County (east of the Caledonian orogen). *Sveriges geologiska undersökning Ba 56*. Geological Survey of Sweden. 114 p.

Lappalainen, P. (2009). Maanalaiset louhintamenetelmät. *Teoksessa*: Hakapää, A. & Lappalainen, P. (toim.): Kaivos- ja louhintatekniikka. Kaivannaisteollisuus ry & Opetushallitus, Vammala. 116–118.

Lundqvist, J., Lundqvist, T., Lindström, M., Calner, M. & Sivhed, U. (2011). Sveriges geologi från urtid till nutid. Studentlitteratur AB. Lund. 628 p.

Lupo, J. F. (1997). Progressive failure of hanging wall and footwall Kiirunavaara Mine, Sweden. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34:3-4, paper No. 184.

Martinsson, O., Billström, K., Broman, C., Weihed, P. & Wanhainen, C. (2016). Metallogeny of the Northern Norrbotten Ore Province, northern Fennoscandian Shield with emphasis on IOCG and apatite-iron ore deposits. *Ore Geology Reviews 78*. 447–492.

Stephens, M. B. (2020). Introduction to the lithotectonic framework of Sweden and organization of this Memoir. *Teoksessa*: Stephens, M. B. & Bergman Weihed, J. (toim.): Sweden: Lithotectonic Framework, Tectonic Evolution and Mineral Resources. Geological Society, London, Memoirs, 50. 1–15.

Villegas, T., Nordlund, E. & Dahnér-Lindqvist, C. (2011). Hangingwall surface subsidence at the Kiirunavaara Mine, Sweden. *Engineering Geology 121*. 18–27.

Nettilähteet

Kiirunavaara September 2017 10.jpg (2017). Wikimedia Commons. 14.11.2024. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kiirunavaara_September_2017_10.jpg>

LKAB (2024). Annual and Sustainability Report 2023. LKAB, Luleå. 174 p. <www.lkab.com>

Pöyhönen, S. (2024). Maailman suurin maanalainen rautamalmikaivos laajenee ja Kiiruna siirtyy tieltä – vanha keskusta on jo hiljentymässä. Ylen nettisivut. 5.9.2024. <https://yle.fi/a/74-20102669>

Rantamartti, T. (2022). Kiiruna juhlii uuden kantakaupungin syntyä – koko keskusta siirretään kaivoksen tieltä. Ylen nettisivut. 11.9.2024. <https://yle.fi/a/3-12603053>

Rauhala, M. (2022). SVT: Kiirunassa on pelkästään tänä vuonna ollut yli sata maanjäristystä kaivoksen takia. Ylen nettisivut. 11.9.2024. <https://yle.fi/a/3-12661692>