

Teknillinen korkeakoulu

Materiaali- ja kalliitekniikan osasto
Insinöörigeologian ja geofysiikan laboratorio

Jorma A. Palmén

KAIVOSGEOLOGINEN KALLIOLUOKITUS

Tutkintotehtävä, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi tekniikan
lisansiaatin tutkintoa varten

Otaniemessä 1.11.1999

Työn valvoja

Heikki Niini
professori

Tekijä ja työn nimi: Jorma A. Palmén Kaivosgeologinen kallioluokitus Päivämäärä: 1.11.1999	Sivumäärä: 105 s. + Atlasmatriisi
Osasto ja laitos: Materiaali- ja kalliotekniiikan osasto, Insinööri-geologian ja geofysiikan laboratorio	Professori: Mak-33 Taloudellinen geologia
Työn valvoja: professori Heikki Niini	
Tutkimuksessa selvitetään perusteita luoda käyttökelpoinen geologinen luokitusmalli, jonka avulla malmioiden louhimisen taloudellisiin ja teknisiin perusteisiin vaikuttavat kivilaji- ja rakenneominaisuudet erilaisine yhdistelmineen voidaan huomioida jo malminetsinnässä ja esiintymän inventoinnissa. Tutkimuksessa osoitetaan aluksi kaivostyöstä saaduin kokemuksiin ja systeemianalyttisin keinoin ne työvaihekohtaiset parametrit, jotka selvimminkin vaikuttavat irrotusteknisiin ja prosessitaloudellisiin suunnitelmiin. Geologisen esiintymän tutkimus ja sen jälkeinen hyödyntäminen seurantatoimintaan muodostavat sarjan työvaiheita, jossa luokitusmallin tarkoitus elää. Prosessin tuote (kivi) muokkautuu läpäistessään prosessin, jolloin kiven luokitukselliset piirteet vähenevät suuruusjärjestyksessä suurimmasta pienimpään. Jokainen työvaihe on riippuvainen edellisten työvaiheiden onnistumisesta. Tutkimuksen tulos on kaksitahoinen: sen metodologinen tulos on systeemianalyttinen lähestymistapa, jota voidaan soveltaa jokaiseen erilliseen kallioluokitustarpeeseen. Systeemianalyttiset keinot eivät sinänsä ole objektiivisia tutkimusmenetelmiä, mutta ne vakioivat luokitusprosessin ja pitävät huolen siitä, että kaikki systeemin sisäiset seikat tulevat huomioituiksi tutkimuksessa. Tutkimuksen toinen oleellinen tulos on keskeisten kallioluokitusparametrien rajaaminen kaivoksissa tapahtuvaa kallioluokittelua varten. Luokituskohtaisessa priorisoinnissa huomioitiin tärkeysjärjestyksessä rakenteellisesti neljä eri tahoja: parametrien ominaisuudet, luokituksen käyttökohde, sen käyttäjäkunta ja taloudelliset vaatimukset. Parametrien priorisoinnilla ratkaistaan, mitä parametreja systeemianalyttiseen lähestymistapaan kannattaa ottaa mukaan. Systeemianalyttisellä tarkastelulla selvitettiin parametrien väliset keskinäiset vaikutussuhteet. Tutkimuksen tarkastelulähtökohdat valittiin luokitteluperusteena olevien ilmiöiden parametroituvuuden perusteella. Mitattaviksi valittiin ne ilmiöt, joiden parametrit täyttävät luokituskohtaisen priorisoinnin sanelemat ehdot. Saadusta parametrijoukosta poimittiin luokitustarkasteluun soveltuvimmat, joita käytettiin lopullisen luokituksen perusteena. Suuntautuneisuudeltaan ja koulutustasoltaan vaihtelevan käyttäjäkunnan huomioonottaminen parametrisoinnissa oli yksi tämän tutkimuksen keskeisistä tehtävistä. Se toteutettiin suorittamalla prosessin parametrisointi peräkkäisten työvaiheiden suoritusjärjestyksessä. Toisaalta käyttäjäkunta huomioitiin myös suorittamalla eri käyttäjäryhmien keskuudessa kysely työvaiheparametrien välisistä riippuvuuksista. Näin saatiin myös esille erilaisten käyttökohteiden työvaiheiden väliset kriittiset riippuvuudet. Tutkimuksen perusteella keskeisimmiksi luokitteluparametreiksi osoittautuivat geologiset parametrit, jotka kuvaavat kiven rakennetta ja koostumusta sekä kallion rakennetta.	
Avainsanat: kaivosgeologia, kallioluokitus, Suomi, systeemianalyysi, louhinta, rikastus, taloudellinen geologia, cause-effect-diagrammi, vuorovaikutusintensiteetti, dominoivuus	

Author and name of thesis: Jorma A. Palmén Mining-Geological Rock Classification Date: November 1, 1999	Number of pages: 105 + Atlas matrix
Faculty: Department of Materials Science	Professorship: Mak-33 Economic Geology
Supervisor: Professor Heikki Niini	
The fundamentals of bedrock classification in mining were investigated by means of system-analysis approach, applied to collected professional experience. The target was to develop a system which helps in assessing excavation conditions already in the exploration stage. The classification was based on the economical and technical properties of rocks and prevailing conditions in excavation. The dominant procedure parameters of the classification were identified and determined on the basis of professional knowledge and system-analytical studies. The investigation of a geological formation and the resulting beneficiation with their effects form a chain of operations along with which the classification must be flexible. The product (rock) deforms and breaks during the process; accordingly, the original classification properties diminish in number, beginning from the large-scale structural properties, which are replaced by the small-scale textural ones. Each individual phase or process is dependant on the performance of the preceding one. The result of the study is twofold. First, the study contributed to the metodological system-analytical approach applied to bedrock classification. System analysis is not an objective research method, but it could be used to standardize the approach and to control that all parts of the system are included and properly considered. Second, the study was able to assess the mutual significance of the parameters dominating in mining, prospecting, and geological research. As for the parameter priorisation, four structurally different approaches were discussed: the parameter properties, the excavation/beneficiation site, the end users, and general economical interests. The parameter priorisation was carried out, and the parameters that were taken into the final classifying procedure were specified. The intended group of end users of the classification is wide, and their interests vary significantly. This variability was taken into account by retaining a high descriptivity in the classification. According to the study, the most important classification parameters are the geological ones describing the texture, structure, and composition of the excavated rocks and their country rocks.	
Keywords: mining geology, bedrock classification, Finland, system analysis approach, mining, excavation, economical geology, cause-effect diagramme, interaction intensity, dominance	

SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO	7
TERMINOLOGIA JA KÄSITTEIDEN MÄÄRITELMÄT	8
TUTKIMUSMENETELMÄT	10
TIETEEN FILOSOFIA	10
SYSTEEMIANALYYSI JA SYNTEESI	11
EMPIIRINEN TÄYDENNYS	11
INTUITIIVINEN OPTIMOINTI	12
SYSTEEMIANALYYSI JA LINEAARIALGEBRA	12
KATSAUS MUIHIN KALLIOLUOKITUKSIIN.....	13
KALLION HYÖDYNNETTÄVYYDEN LUOKITTELU	13
KALLION RAKENNUSTEKNINEN LUOKITTELU.....	13
RQD-LUOKITUS	15
Q-LUOKITUS	16
RMR-LUOKITUS	17
GSI-LUOKITUS	17
TERZAGHIN KALLIOLUOKITUS	18
LAUFFERIN LUOKITUS	18
RSR-LUOKITUS	18
NATM-LUOKITUS	19
RAKENNUSALAN KALLIOLUOKITUS	19
AIKAISEMMAAT TUTKIMUKSET.....	22
SYSTEEMIANALYYTTISEN TARKASTELUN PERUSTEET	22
TIETOKONEAVUSTEINEN LUOKITTELU JA KUVANKÄSITTELY	25
NÄYTEVALMISTELU	25
<i>Murskattu näyte ja rakennenäyte</i>	25
RAERAJOJEN TUNNISTAMINEN JA RAKENNEFAKTORIT.....	26
RAKEIDEN TUNNISTAMINEN	27
KAIVOSGEOLOGISEN KALLIOLUOKITUKSEN TYÖVAIHEET	28
TUTKITTAVIEN ILMIÖIDEN LUETTELOINTI	28
ILMIÖIDEN PARAMETRISOINTI	29
SYNTEETTISTEN PARAMETRIEN LISÄÄMINEN SYSTEEMIIN	29
EDUSTAVIEN PARAMETRIEN RAJAAMINEN JA KESKINÄISTEN RIIPPUVUUKSIEN TARKASTELU	30
RES-MATRIISIN DIAGONAALIJÄSENTEN VALINTA.....	32
CAUSE-EFFECT-DIAGRAMMIN LUOMINEN JA TULKINTA.....	33
LUOKITUSPERUSTEENA TOIMIVIEN PARAMETRIEN VALINTA.....	34
LUOKITUKSEN PERUSTAMINEN.....	34
LUOKITUKSEEN SISÄLTYVIEN TYÖVAIHEIDEN TOTEUTUS.....	35
TUTKITTAVAT JA MITATTAVAT ILMIÖT.....	35
<i>Geologiset ominaisuudet ja rakeutus</i>	35
Rikkonaisuustila	35
Rakeutuvuuden vaikutustekijät	35
Rakennetekijöiden kolmiulotteinen jakautuminen	36
Suurmuodostumissa	36
Syväkivimassiveissa	36
Liuskejaksoissa	37
Eri ikäisissä muodostumissa	37
Presvekofennisen pohjan alueella	38
Svekofennidessä	38
Jotunimuodostumissa	38
Paleotsooisissa muodostumissa	38
Kvartaarisissa mineraalimaissa	39
Erilaisissa hyödyntämiskohteissa	39

Rakennuskivimassiivit	39
Kalliorakennuskohteet	39
Geologiset ympäristövaikutukset	39
Lohkaroitumisvyöhykkeen hidas deformaatio ja hiipuma.....	40
Tutkimusmetodiikan kehitys	41
<i>Tekniset ominaisuudet eli vaikuttajaominaisuudet</i>	<i>41</i>
<i>Terveydelliset ominaisuudet.....</i>	<i>41</i>
Hiukkasturvallisuus.....	41
Louhintaturvallisuus.....	42
<i>Ympäristölliset ominaisuudet.....</i>	<i>42</i>
Raakun hyödynnettävyys	43
Maisemoitavuus	44
Jälkiseurannan toteutettavuus.....	45
PARAMETRIEN PRIORISOINTI.....	46
PARAMETRIEN TARKASTELULÄHTÖKOHDAT.....	47
PARAMETRISOINTI.....	47
<i>Parametrisoinnille asetettavat vaatimukset</i>	<i>47</i>
Parametrin ominaisuudet.....	47
Mitta-alueen ulottuvuudet	48
Asteikkotyyppi.....	48
Ordinaaliasteikko	48
Kardinaaliasteikko	49
Relatiiviasteikko	49
Nominaaliasteikko	49
Käyttäjien asettamat vaatimukset	49
Käyttökohteiden asettamat vaatimukset	50
Yleiset vaatimukset	50
PARAMETRIEN SYSTEEMIANALYYTTINEN TARKASTELU.....	50
GEOLOGISET PARAMETRIT (RAKEUTUVUUS)	50
<i>Kallion rakennusgeologiset erityispiirteet</i>	<i>50</i>
Kivilajiominaisuudet ja kallio-ominaisuudet.....	50
Kivilaji- ja kallio-ominaisuuksien ero	51
Anisotrooppiset ominaisuudet.....	51
Kerroksellisuus ja liuskeisuus	53
Poimuttuneisuus	53
Heterogeenisuus	54
Kallioperän rikkonaisuus ja stabiilius.....	54
TUTKIMUSVAIHEET JA KALLION HYÖDYNTÄMINEN SEKÄ NIIHIN LIITTYVÄT TEKNISET PARAMETRIT.....	56
<i>Geologinen tieto.....</i>	<i>57</i>
Kiven koostumus.....	57
Mineraalikoostumus.....	57
Laskennalliset ominaisuudet.....	58
Kemiallinen koostumus.....	59
Kiven rakenne	59
Kallion rakenne	60
<i>Louhintatekninen hyödynnettävyys</i>	<i>61</i>
Porattavuus.....	61
Räjäytettävyyys	61
Jyrsittävyys.....	62
Rusnattavuus	63
Lujitettavuus.....	63
Tiivistettävyyys	63
Lastattavuus.....	64
Siirtolastattavuus	64
Kuljetettavuus	64
Murskattavuus	64
Raakun hyödynnettävyys	65
<i>Rikastustekninen hyödynnettävyys</i>	<i>66</i>
Jauhettavuus	66
Seulottavuus	66
Rikastettavuus (eroteltavuus)	66
Veden poistettavuus	67
Jätteen käsiteltävyys	67

SYNTEETTISEN MENETELMÄN TUOTTAMAT LISÄPARAMETRIT	68
<i>Esiintymätyyppikohtaiset parametrit</i>	68
Esiintymän hyödyntämistapa ja esiintymätyyppi	68
Malmin ja sivukiven kontaktityyppi.....	69
Louhinnan etenemiseen kytketty kaivosperien kartoitus	69
ATLASMATRIISI.....	69
EDUSTAVIEN PARAMETRIEN RAJAUS	69
LUOKITUSPERUSTEIDEN VALINTA	71
LUOKITUKSEN PERUSTAMINEN JA YHTEENVETO	72
JATKOTUTKIMUKSEN TARVE	74
ATLASMATRIISIIN VALKOISTEN OSIEN KARTOITTAMINEN KYSELYLLÄ	74
KYSELYN LAAJENTAMINEN KOSKEMAAN KAIKKIA SUOMEN KAIVOKSIA	74
HUDSONIN ESQ-ASTEIKON LINEARISOIMINEN LINEAARIALGEBRALLISTA TARKASTELUA VARTEN.	75
KIVIAINEKSEN MUUTTUNEISUUDEN ARVIOINTI MINERALOGISIN PERUSTEIN	75
LUOKITUKSEN PARAMETRIEN HERKKYYS JA VIRHEKESTOISUUS.....	75
KIITOKSET	77
VIITELUETTELO	78
LIITELUETTELO	83
LIITE 1.....	84
KYSELY PARAMETRIEN RIIPPUVUUKSISTA.....	86

Johdanto

Viime vuosina ovat kalliorakennushankkeet, mukaanlukien maanalaiset kaivokset, saaneet kasvavaa huomiota osakseen (mm. MTR 1988). Mielenkiinto muokattavan kallion luokittelomiseksi erilaisia tarkoituksia varten on noussut laajasti keskusteluihin sekä kallio-, että maarakennuksen piirissä. Useita erilaisia yrityksiä maankamaran luokittelomiseksi on esitetty ja jotkut niistä ovat myös vakiintuneet käytäntöön.

Tutkimukseni päämääränä on luoda käyttökelpoinen geologinen luokitusmalli, jonka avulla malmioiden louhimisen taloudellisiin ja teknisiin perusteisiin vaikuttavat kivilaji- ja rakenneominaisuudet erilaisine yhdistelmineen voidaan huomioida ja arvottaa jo malminetsinnässä ja esiintymän inventoinnissa. Luokitus vastaisi itse malmivaroille tehtyä uutta luokitusta (YK 1997, VMY 1999).

Tutkimuksessa osoitetaan aluksi kaivostyöstä saaduin kokemuksiin ja tilastolaskennallisin keinoin ne työvaihekohtaiset parametrit, jotka selvimmin vaikuttavat irrotusteknisiin ja prosessitaloudellisiin suunnitelmiin. Tulokset on tarkoitus hyödyntää toisaalta kustannussäästöinä louhinnan yksityiskohtaisessa suunnittelussa (sekä etenevässä louhinnassa että uusissa kaivoskohteissa), toisaalta tarkempien jatkosuunnitelmien laadinnassa: niin yksittäisten kohteiden käsittelyssä kuin menetelmäkohtaisten tulevaisuuden ongelmien hahmotuksissakin.

Geologisen esiintymän tutkimus ja sen jälkeinen hyödyntäminen seurantatoimintaan muodostavat sarjan työvaiheita, jossa luokitusmallin tarkoitus elää. Prosessin tuote (kivi) muokkautuu läpäistessään prosessin, jolloin kiven luokitukselliset piirteet häviävät suuruusjärjestyksessä suurimmasta pienimpään.

Tutkimuksen keskeisin tulos on systeemianalyttinen lähestymistapa, jota voidaan soveltaa jokaiseen erilliseen kallioluokitustarpeeseen. Systeemianalyttiset keinot eivät sinänsä ole objektiivisia tutkimusmenetelmiä, mutta ne vakioivat lähestymistavan ja pitävät huolen siitä, että kaikki systeemin sisäiset seikat tulevat huomioiduiksi tutkimuksessa.

Luokituskohtaisella priorisoinnilla tarkoitetaan niitä tärkeysjärjestyssuhteita, joita kyseinen luokitusprojekti määrittelee eri parametrien välille. Priorisoinnissa täytyy huomioida rakenteellisesti neljä eri tahoja: parametrien ominaisuudet, käyttökohde, käyttäjäkunta ja taloudelliset vaatimukset.

Parametrien priorisointi ratkaisee, mitä parametreja systeemianalyttiseen lähestymistapaan otetaan mukaan. Systeemianalyttisellä tarkastelulla saadaan edelleen selville, mitkä ovat parametrien väliset keskinäiset vaikutussuhteet. Näin parametrit siis ensin luokitellaan, jotta kuvaavimmat niistä voidaan valita perustettavaan kaivosgeologiseen kallioluokitukseen.

Kallioluokituksen perustamisen kokonaisongelmakenttään liittyy ei-numeroituva joukko tarkastelulähtökohtia. Parametriedokkaita on siis rajaton määrä. Ainoa kehityskelpoinen strategia on tällöin valita keskeiset tarkastelulähtökohdat

luokitteluperusteena olevien ilmiöiden parametroituvuuden perusteella. Tämä tarkoittaa sitä, että valitaan mitattaviksi ne ilmiöt, joiden parametrit täyttävät luokituskohtaisen priorisoinnin sanelemat ehdot. Saadusta parametrijoukosta poimitaan luokitustarkasteluun vain soveltuvimmat, joita käytetään lopullisen luokituksen perusteena.

Kaivosgeologisen kallioluokituksen kunnianhimoisin päämäärä on muodostaa yhteinen kiviaineskieli esiintymää tutkiville geologeille, sekä kaivos- ja rikastamohenkilökunnalle. Kun tuotantoketjun eri lenkit ymmärtävät toisiaan, on taloudellinen kokonaistulos helpommin saavutettavissa. Tällainen vaatimus rajoittaa luokituskriteerien määrää.

Orientoituneisuudeltaan ja koulutustasoltaan vaihtelevan laajan käyttäjäkunnan huomioonottaminen parametrisoinnissa on yksi tämän tutkimusaiheen keskeisistä tehtävistä. Tässä tutkimuksessa se on pyritty ottamaan huomioon suorittamalla prosessin parametrisointi sen työvaiheiden suoritussyjärjestyksessä. Toisaalta käyttäjäkunta on myös huomioitu suorittamalla eri käyttäjäryhmien keskuudessa vakioitu kysely työvaiheparametrien välisistä riippuvuuksista. Näin on saatu myös esille erilaisten käyttökohteiden kriittiset työvaiheiden väliset riippuvuudet.

Terminologia ja käsitteiden määritelmät

Kaikki luokittelu perustuu siihen, että luokiteltava kohde, substanssi, jaetaan osueisiin jonkin ominaisuutensa tai joidenkin ominaisuuksiensa perusteella. Substanssin ominaisuudet voidaan kuvata rajattoman monella eri tavalla, minkä vuoksi on merkityksellistä löytää sellaiset kuvaustavat, joilla on merkittävyyttä halutun tavoitteen suhteen. Jos haluamme olla tarkkoja, on jo substanssin kuvaaminen eräänlaista luokittelua, luokitteluperusteiden luominen on vain tämän rajattoman luokkamäärän karsimista käyttökelpoiseksi jaotteluksi luokkien päällekkäisyyttä poistamalla.

Tieteellisessä ajattelussa suurista loogisista kokonaisuuksista pienempien johtamista kutsutaan deduktioksi. Luokittelutilanteessa tunnettuja sääntöjä sovellettaessa on kyse deduktiosta. Luokitusperusteiden päättelemisen ja valinta luokiteltavan substanssin ominaisuuksien perusteella on puolestaan induktiivinen prosessi, jossa pienten erillisten yksiköiden perusteella johdetaan suurempia kokonaisuuksia.

Systeemianalyttisessä lähestymistavassa tutkitaan rajatun systeemin sisäisiä prosesseja. Jakamalla systeemi yhä pienempiin osiin saadaan lopulta kuvattua koko systeemin rakenne, sen sisäinen muoto (Pirsig 1986). Systeemin jakaminen osiin on analoginen tapahtuma luokitteluun nähden. Sama analogia esiintyy myös rakenteellisessa ohjelmoinnissa, joka onkin systeemianalyysin tärkeä sovellusalue. Systeemianalyysin ohjelmointisovelluksissa luokiteltava substanssi koostuu loogisista yksiköistä ja osatapahtumien kuvauksista.

Rakenteellisen ohjelmoinnin liittyminen luokitustapahtumaan voidaan ymmärtää siten, että algoritmin suunnittelu on luokitteluun valmistautumista, tehtäväsarjan kronologista suoritusta. Näin on myös tämän tutkimuksen laita. Olen toteuttanut

tutkimusohjelman rakenteellisenä hierarkiana, toimintaohjesarjana. Sen päätulos on kallioluokituksen perustamismetodi, jonka looginen rakenne pohjautuu Hudsonin matriisikuvaukseen ja sen hyödyntämiseen. Hudsonista (1992) poiketen olen lisännyt käsittelyyn työvaihekohtaisen kronologisuuden Niinin (1998, vrt. myös Niini 1992b) esittämän katkeamattoman tuotantoketjun mukaisesti.

Parametrit mittaavat ominaisuuksia ja saavat tiettyjä arvoja. Niiden arvoja kutsutaan kvantittuneiksi tiloiksi. Yksi tila kuvaa yhtä alkiota tai niiden muodostamaa osajoukkoa luokiteltavassa joukossa. Itse ominaisuuden sitomista luokituksen ehdoilla parametriin on tässä tutkimuksessa kutsuttu parametrisoinniksi. Parametrisoinnilla tarkoitetaan siis sitä, että parametrisoitavalle ilmiölle valitaan sellainen mittari (parametri), joka ottaa huomioon luokituksen asettamat vaatimukset. Parametrointi puolestaan on prosessi, jossa kaikille systeemin ilmiöille määritellään jokin yhteys johonkin parametriin. Parametrointi ei siis ota huomioon luokituksen tarpeita, kun taas parametrisointi ottaa.

Luokittelu tapahtuu siis ilmiöitä mittaavien parametrien avulla. Parametrit tuotetaan mittauksilla tai arvioinnilla. Mittaus on tapahtuma jolta voidaan vaatia toistettavuus, mutta arvioinnilta ei. Siksi arviointia voidaan luokitustarkoituksessa suorittaa vain sellaisten ilmiöiden tapauksissa, joissa luokkajako on selkeä ja luokiteltavan substanssin ominaisuudet ovat arvioitavassa suhteessa mahdollisimman yksikäsitteiset.

Eräs merkittävä luokitteluun vaikuttava tekijä on kiven muuttuminen metamorfoosissa. Tässä sovelletaan Bucherin & Freyn (1994) uudistamaa Winklerin (1974) määritelmää :

"Metamorphism is the process leading to the changes in the mineralogy and/or structure and/or chemical composition in a rock. These changes are due to physical and/or chemical conditions that differ from those normally occurring in the zone of weathering, cementation and diagenesis. They may include partial melting as long as the bulk of the rock remains in a solid state. If change in bulk composition is dominant in metamorphic process, the term metasomatism is applied."

Määritelmässä on keskeistä, että pelkkää kiven deformaatiota ei katsota metamorfoosiksi, vaan metamorfoosi sisältää myös mineralogisen muutoksen, jossa mineraaliparageneesiin tulee yhden tai useamman mineraalin vähennys tai/ja lisäys. Esimerkkinä mainittakoon kiilteiden katoaminen ja vaiheittainen amfibolien, granaatin ja korundin ilmestyminen metamorfiseen parageneesiin metamorfoosiasteen noustessa korkeaan asteeseen koostumukseltaan alumiinirikkaissa kivilajiympäristöissä.

Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutettiin analysoimalla ja erittelemällä erilaiset tapaukset valituista kaivoksista valikoitujen työvaiheparametrien mukaan ja yhdistämällä saadut luokkaehdokkaat luonnollisen esiintymisensä mukaan käyttökelpoiseksi hierarkkiseksi luokitukseksi. Käytetyt tutkimusmenetelmät jakautuvat seuraaviin luokkiin:

Tieteenfilosofinen tarkastelu

Luokitteluperusteiden valinnassa joudutaan syventymään pitkälle parametrien rakenteisiin. Parametrien arvot ovat useimmiten arvioita, subjektiivisen prosessin tuloksia. Deduktiivisessa luokitteluprosessissa tämä merkitsee sitä, että parametrien arvojen lisäksi on niiden muutkin ominaisuudet otettava huomioon. Tällaisia ominaisuuksia ovat parametrien luotettavuus, resoluutio ja saatavuus.

Lisäksi parametreilla on joukko muita ominaisuuksia, joista tarkemmin jäljempänä. Koska luokittelutieto on subjektiivista, ei luokittelutapahtuma noudata tieteellisen kokeen toistettavuuden kriteeriä. Voidaan kuitenkin asettaa väljempi ehto, jossa luokittelutulos on tilastollisesti sama luokittelua toistettaessa. Tähän päämäärään pyrkiessäni olen yrittänyt valita selvärajaisia luokkia ja ohjaamaan tutkimuksen kulkua luokitustarpeen osoittamaan suuntaan.

Lähtökohtaisesti on siis jo tiedossamme, että yleispätevää helppoa kaivosgeologista kallioluokitusta ei ole tehtävissä. Tällöin tutkimuksen ensimmäinen tärkeä tehtävä on rajata ne parametrit, joilla on merkitystä, yhtäältä kyseisen luokituksen kohderyhmässä, toisaalta luokituksen tulevista käyttökohteista. Jotta tämä olisi tehtävissä, on tarkasteltava muissa luokituksissa perusteina käytettyjä parametreja ja niiden käytön edellytyksiä.

Luokituksissa yleisimmin käytettävät parametrit jakautuvat ordinaali- ja nominaaliparametreihin. Ordinaaliparametrit ovat luonteeltaan lukuarvoja, esim. mittaustuloksia ja nominaaliparametrit puolestaan luokkia, joilla ei ole keskinäistä suuruus- tai järjestyssuhdetta, vaikka niillä jokin muu suhde voisi ollakin. Esimerkiksi magmakivet, sedimenttikivet ja metamorfiset kivet ovat nominaaliluokkia jotka muodostavat nominaaliparametrin.

Merkittävä ongelmakenttä kallioluokituksissa liittyy juuri näiden erityyppisten parametrien yhteismitalliseen käsittelyyn. Numeerisen tiedon statistinen käsittely on tehtävissä tietokoneavusteisesti, mutta nominaaliasteikolla esitettävien parametrien huomioonottaminen vaatii intuitiivista asioiden ymmärtämistä ja ongelman loogista työstämistä. Toisin kuin ordinaaliparametreilla, on nominaaliparametreilla parhaimmillaan hyvin deskriptiivinen luonne. Näin ne soveltuvatkin ymmärrettävyytensä ja rajaavuutensa vuoksi erinomaisesti luokitusperusteeksi.

Systeemianalyysi ja synteesi

Tutkimuksessa on mahdollista käyttää kahta erilaista tarkastelutapaa: synteettistä eli rakentavaa, ja systeemianalyyttistä eli osiinpilkkovaa lähestymistapaa. Synteettisessä lähestymistavassa sidotaan olemassaolevaan runkoon uusia huomioonotettavia seikkoja ja selvitetään niiden riippuvuussuhteita.

Systeemianalyyttisessä tarkastelussa puolestaan rajataan kokonaisuus, joka sisältää kaikki systeemiin vaikuttavat tekijät. Kun kaikki osatekijät on lueteltu, voidaan kokonaisuus jakaa osasysteemeihin jotka voidaan pilkkoa edelleen pienemmiksi. Merkitsemällä systeemin osatekijät matriisin diagonaalijäseniksi saadaan pohja RES-matriisille, jonka solut kertovat kaikkien osatekijöiden vaikutuksen toisiin osatekijöihin.

Itse luokitus tehdään parametrien avulla. Koska osan luokitusparametreista tulisi olla saatavilla jo esiintymän kartoitusvaiheessa, painottuvat luokitukseen valittavat parametrit geologisiin kivilajiominaisuuksiin ja tektonisista havainnoista saatavaan informaatioon. Toisaalta saatavissa olevat kiven vaikuttajaominaisuuksia kuvaavat tekniset parametrit muodostavat oman kokonaisuutensa (joka on huomioitava systeemianalyyttisessä tarkastelussa omana RES-matriisin diagonaalijäsenenään).

RES-metodin mukaista systeemianalyyttistä lähestymistapaa on sovellettu aiemmin mm. Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunnan tutkimuksissa (Vieno et al. 1994)

Empiirinen täydennys

Kaikkien erilaisten kallioluokitusten perustana käytettävien parametrien valinta riippuu kyseisen luokituksen käyttäjäryhmästä. Jotta luokitukselta saadaan selkeä, on mitattavien parametrien oltava käyttäjäryhmän helposti saatavissa. Toisaalta myös kiven vaikeaselkoisemmat piirteet olisi liitettävä luokitusperusteisiin luokituksen laadun takaamiseksi. Näin tutkimusaiheen asettelussa vallitsee jo sisäinen ristiriita, johon jokaisessa erillisessä kallioluokitustutkimuksessa on löydettävä oma sopuratkaisunsa.

Käyttäjäkunnan huomioiminen on tässä tutkimuksessa toteutettu kyselyllä, joka on esitetty eri esiintymillä työskenteleville asiantuntijatahoille. Kyselytutkimuksen asetelma edellyttää, että jokainen asiantuntija vastaa oman esiintymänsä tiedoista, tai enintään oman esiintymänsä esiintymätyypin tiedoista. Jotta luokitus saataisiin kattamaan useampia kaivoksia, on systeemianalyyttiseen menetelmään lisättävä synteettisen menetelmän avulla muutamia esiintymäkohtaisia lisäparametreja.

Tässä tutkimuksessa on kaivosgeologisen kallioluokituksen potentiaaliselle käyttäjäkunnalle toimitettu kysely ensimmäisellä tarkkuusasteella. Jatko-tutkimuksia ajatellen asiantuntijoiden kokemuksen kerääminen tärkeiden kohteiden keskinäisistä sidonnaisuuksista olisi ensiarvoisen tärkeää. Paras tapa olisi tehdä uusi tarkennettu kyselykierros, jolla voitaisiin selvittää keskeisiksi

nousseiden parametrien sisäistä rakennetta (muotoa) ja parametrien keskinäisiä riippuvuuksia.

Kyselytutkimus jaettiin kaivosgeologeille ja louhinta- sekä rikastusinsinööreille Kemin Elijärven kromiittikaivoksella, Oriveden Kutemajärven kultakaivoksella, Pyhäsalmen kaivoksella ja Siilinjärven karbonaattikaivoksella, sekä lisäksi Vammalan Stormin rikastustehtaalla.

Intuiitiivinen optimointi

Kun ilmiöt on parametrisoitu, voidaan muodostaa RES-matriisi, joka kuvaa ilmiöiden (parametrien) välisiä riippuvuuksia. Laajimmillaan RES-matriisi muodostaa ”atlaksen”, joka kuvaa koko luokitteluun liittyvän problematiikan kokonaisuudessaan. Tällaisessa atlaksessa voidaan kuvata sanallisesti, matemaattisen kaavan muodossa tai kaavioin jokaisen solun sisältö. Jaettaessa osatapahtumia yhä pienempiin yksiköihin on lopulta vedettävä raja siihen, kuinka pitkälle asioita halutaan analysoida. 14 työvaiheparametrin luoman matriisin koko on 14^2 (196) solua. Jotta tutkimus voidaan rajata järkeviin mittoihin, on tutkittavia parametreja rajattava ja tarkastelusyvytyden lisäämistä syytä välttää siellä missä sen tarpeettomuus on perusteltavissa.

Tässä esityksessä olen esittänyt yhtäältä niitä tekijöitä, jotka on otettava huomioon systeemianalyttisen tarkastelun parametrivalinnoissa ja toisaalta pyrkinyt ratkaisemaan niitä ongelmia, joita parametrien valinnassa tulee vastaan luokituskohdista ratkaisua etsittäessä.

Systeemianalyysi ja lineaarialgebra

Päätutkimusmenetelmäksi olen valinnut systeemianalyttisen lähestymistavan, kuitenkin niin, että olen palannut perinteiseen synteettiseen tarkasteluun, mikäli siitä on jollain systeemin osa-alueella ollut työvaiheparametrien sisäisten rakenteiden takia erityistä etua. Saadun RES-matriisin lineaarialgebrallinen tarkastelu on jätetty pois, koska se vaatisi lineaarisen asteikon. Koska ESQ-asteikon (Expert Semi-Quantitative, Hudson 1992, s. 48) lineaarisuus on vähintäänkin kyseenalainen, on tähänkin erityisongelmaan syytä syventyä tulevilla asioilla koskevilla tutkimuksissa. Asteikon linearisointi lienee mahdollinen, mutta vaatii uuden tarkemman kyselyn.

Haastattelusta saamiani tuloksia olen arvioinut Hudsonin (1992) kehittämällä menetelmällä, cause-effect-diagrammilla, parametrien dominoivuudella ja vuorovaikutusintensiteetillä.

Katsaus muihin kallioluokituksiin

Kallion hyödynnettävyyden luokittelu

Mahdollisuus hyödyntää kalliota sen rakenteen, aineksen tai ilmiön perusteella tekee kalliosta taloudellisen resurssin, toisin sanoen kalliovaran. Varakäsite on luokiteltavissa kahdeksaan eriluonteiseen päätyyppiin (Niini 1992a, vrt. Niini 1998):

1. irrotettava kiviaines, joka jalostetaan materiaalien tai energian tuotantoon,
2. luja alusta (pohja), joka kestää ihmisen toimien ja rakenteiden aiheuttamat gravitaatio- ja värinärasitukset,
3. topografia (pinnanmuodostus), joka tarjoaa halutunmuotoisen (jopa esteettisen) alustan eri maankäyttötavoille,
4. reliefi (korkeuserot), joka mahdollistaa painovoiman hyödyntämisen vesivoimana,
5. maanalainen tila, joka tarjoaa suojan tai pinnallista reittiä lyhyemmän tai muuten edullisemman yhteysväylän,
6. uutta pohjavettä jatkuvasti tuottava kallioympäristö,
7. lämpöenergiaa jatkuvasti tuottava kalliomassa,
8. jätteiden piilotukseen tai laimennukseen sopiva kallion huokos-, rako- tai ontelotila.

Eri varatyypit vaihtelevat perusluonteeltaan, mitä ilmentää niiden hyvin vaihteleva asema kolmella eri ominaisuusasteikolla (Niini op. cit.):

1. määrällinen pysyvyys/ehytyvyys (kulumisalttius käytössä),
2. kertakäyttöisyys/uusiutuvuus (uudistumiskyky geologisissa prosesseissa),
3. laadullinen pysyvyys/pilaantuvuus (käytön edellyttämä hoitotarve).

Kaikkien mainittujen geologisten tekijöiden tarkoituksenmukainen hyödyntäminen vaatii lähtökohdaksi luotettavaa luonnonolot inventoivaa tutkimustietoa sekä seikkaperäistä teknis-taloudellis-sosiopoliittista käyttösuunnittelua ja suojelua haaskauksen välttämiseksi ja eettisesti oikeudenmukaisen, mahdollisimman kestäväen käytön varmistamiseksi.

Kaivosgeologisen kallioluokituksen tavoitteiden kannalta kaikkien kalliovarojen yleisluokitus on tarpeettoman laaja; tässä tutkimuksessa rajoitutaan tarkastelemaan 1. ja 5. päätyyppiä lähinnä 1. ja 3. ominaisuusasteikolla.

Kallion rakennustekninen luokittelu

Kaivoksissa, kuten kalliorakentamisessa yleensä, tärkein rakennusaine on luonnontilainen kallio. Se eroaa muista, teollisesti tuotettavista, helposti siirreltävistä rakennusaineista siten, että sen laatua ei juuri voida säädellä kohteen tavoitteiden mukaiseksi. Kallion laadun säätelyn sijasta on säädeltävä itse sijoitusta ja rakennusratkaisuja, eli rakennuskohdetta, sen konstruktioita ja

toteutusmenetelmiä siten, että ne sopeutuvat optimaalisesti kulloiseenkin kalliolaatuun (RIL 1987, Niini 1998). Tätä varten on pystyttävä kuvaamaan ja luokittelemaan luonnontilainen kallio tarkoituksenmukaisesti.

Pelkästään koostumussyksiköiden ja rakenteiden synnyn ja kehityksen selvittämiseen pohjautuva kallion geologinen kuvaus ei sellaisenaan ole riittävä kaivossuunnittelun pohjaksi. Koska sen termit perustuvat vieraskielisiin sanoihin, on se asiaan perehtymättömälle suomenkielisille kaivoshenkilöstölle käsittämätön ilman vaativia erityisopintoja. Sen vuoksi tarvitaan toisenlaista kallion teknistä luokitusjärjestelmää, jonka avulla kallioista saadaan

1. nopeasti ja halvalla tarkka kuvaus kallion vallitsevasta luonnontilasta,
2. tavoitteen kannalta mielekkään joustava ja kielellisesti havainnollinen kallion laatuvarioitujen luokittelu, joka on
3. teknisten toimenpiteiden suunnittelulle ja toteutuksen valvonnalle sopiva kvantitatiivinen perusta.

Näihin tavoitteisiin tähtääminen on vähissä erin johtanut lukemattomiin erilaisiin esityksiin. Monissa kansainvälisissä kongresseissa on aiheutta käsitelty maailmanlaajuisesti ja aikaan onkin saatu tiettyjä laajasti kannatettuja ehdotuksia ja järjestelmiä.

Kallion käytännöllistä luokittelua selvittelevien henkilöiden on siten hyödyllistä ottaa selvää tärkeimmistä maailmalla suosiota saaneista kallioluokitusjärjestelmistä (louhittavuusluokitukset, Q-luokitus, lujitusluokitukset, RQD-luku; Kauranne et al.1972). Monissa on se epäkohta, että vaikka ne ovat laskennallisesti helppoja toteuttaa, ei tiettyjä merkittäviä luokitusperusteiksi periaatteessa sopivia parametreja (kuten esimerkiksi jännitystila) voida luotettavasti saada selville ilman vaativia ja kalliita tutkimusmenetelmiä, kuten kenttä- ja laboratoriokokeita.

Epäyhtenäisyyttä ja kirjavuutta ei silti ole syytä pitää pelkkänä epäkohtana teknisille kallioluokituksille. Käytännössä on todettu, että juuri monimuotoisten ympäristömuuttujien esiintyminen vaatii, että voidaan joustavasti laatia kuhunkin erityistapaukseen sopiva luokitus, jota ei haitallisesti rajoita minkään yleisluokituksen osin turha yksityiskohtaisuus tai väistämätön riittämättömyys (Niini 1998). Myös eri alueiden, esimerkiksi valtioiden, olennaisimmat geologiset ja kielelliset erityispiirteet saadaan tarkoituksenmukaisimmin hyödynnetyiksi tapauskohtaisesti räätälöidyillä luokituksilla. Erillislukitusten välttämättömyyttä korostaa lisäksi luokitusten tarvitsijoiden vaihteleva koulutustausta ja geologisten kallioilmiöiden yleistuntemuksen vaihtelu. Erillislukitukset voivat olla välttämättömiä myös organisaatio-, tarve-, menetelmä- ja työvaihekohtaisille painotuksille.

Ne kaivosten kivi- ja kalliomassan keskeiset geologiset tekijät, joista riippuvat niiden hyödyntämis- eli vaikutusominaisuudet, juontavat juurensa kallioperän monivaiheisesta synty- ja kehityshistoriasta, eli tietyssä järjestyksessä tapahtuneista tuhansia tai satoja vuosimiljoonia sitten alkaneista stratigrafisista ja tektonisista luonnonprosesseista, joista osa jatkuu edelleen.

Teknisesti vaikuttavia ominaisuuksia ovat paitsi yksittäisten kivilajien ominaisuudet, myös eri kivilajien ja kallio-osueiden keskinäisten rajapintojen (kivilajikontaktien) suurrakenteelliset tekijät (Niini & Parkkinen 1995). Ne käsittävät monenluonteisia ja monenkokoisia piirteitä, joita kontrolloivat geologisten materiaalien alkuperäinen järjestys, kerrostuneisuus (stratigrafia), ja niiden synnyssä jähmettynyt tai sen jälkeen mineralogisissa muutoksissa (metamorfoosi) ja liikunnoissa kehittynyt rakenne (deformaatorakenne). Tämä muodonmuutos kattaa myös kaikki kallion jännitystilän aiheuttamat muutokset, toisin sanoen sekä plastisesti että hauraasti (rikkoutumalla) tapahtuneen muokkautumisen (muodonmuutoksen eli deformaation) (Deere 1973).

Luetellut tekijät vaikuttavat kukin omalla tavallaan kaivoksen ja sitä ympäröivän kallion tekniseen hallittavuuteen. Tässä mielessä useimmiten keskeisin kallioperän rakennepiirre on sen rapautumiseen, kulumiseen (eroosioon) ja pintarakenteisiin voimakkaasti vaikuttanut rikkonaisuus, joka käsittää kaikenlaiset

1. ruhjevyöhykkeet,
2. murrokset,
3. halkeamat,
4. siirrokset,
5. raot ja
6. säröt.

Teknisesti eri tavoin vaikuttavia kontaktityyppejä ovat kerros-, intrusiivi-, juoni-, suoni- ja siirroskontaktit. Lisäksi tunnetaan harvinaisempi, terranologiaksi kutsutun tieteenalan määrittelemä aggregaatiokontakti, jossa kaksi tai useampia mannerlaattoja tai mannerlaatan kappaleita eli terraaneja on aggregoitunut yhteen. Kontaktipintojen lisäksi riippuvat kallion koostumusrakenteiden tilatekniset vaikutukset myös erilaisten osueiden keskinäisistä ulottuvuuksista, ts. puhtaiden kivilajitekijöiden keskinäisistä yhdistelmistä.

Kallion tekniseen hallittavuuteen oleellisesti vaikuttavina ovat sen edellä luetellut koostumusrakenteet, ennen kaikkea kontaktien laatu ja asento sekä kivilajien vaihtelun tiheys ja säännöllisyys, jotka ovat aina merkittäviä kallion rakennusteknisen luokittelun peruskriteerejä.

RQD-luokitus

Amerikkalainen RQD (Rock Quality Designation) -luokitus (Deere & Miller 1966) perustuu kairasydännäytteestä arvioitavaan RQD-lukuun, joka lasketaan kaavasta:

$$RQD = 100 \% * \Sigma(X_{l>100 \text{ mm}}) / l_s$$

jossa $X_{l>100 \text{ mm}}$ on yli 100 mm pitkä kairasydännäytteen osa ja l_s on näytteen kokonaispituus. RQD-luokitusta käytettäessä kairasydämen halkaisijan tulisi olla vähintään 54,7 mm. RQD-luvun ja kalliokuutiometrissä olevien rakojen lukumäärällä J_v on seuraavanlainen yhteys:

$$RQD = 115 - 3,3 * J_v$$

Koska RQD-luokitus ottaa huomioon vain rakovälin, se ei ole yksinään luotettava kalliolaadun mittari. Sitä käytetään kuitenkin useiden luokitusten osaparametrina kuvaamaan rakoväliä.

Q-luokitus

Yksi kalliorakennuksessa yleisimmin käytettyjä luokituksia on Q-luokitus eli NGI-luokitus, joka on kehitetty Norjan geoteknisessä instituutissa (Barton et al. 1974). Se perustuu kuuteen lähtöparametriin:

1. RQD-luku ,
2. rakosuuntien lukumäärätekijä J_n ,
3. rakopintojen karkeusluku J_r ,
4. rakopintojen muuttuneisuusluku J_a ,
5. rakojen vedenläpäisevyysluku J_w ,
6. jännitystilaluku SRF.

Q-luku lasketaan kaavasta:

$$Q = (RQD / J_n) * (J_r / J_a) * (J_w / SRF)$$

Näin laskettu Q-luku kuvaa kallion laatua logaritmisella asteikolla, jossa lähellä nollaa sijaitsevat arvot ilmaisevat erittäin heikkoa laatua ja suuret, kertaluokkaa 400 - 1000 olevat Q-arvot erittäin hyvää kalliolaatua. Kaavassa esiintyvä lähtöparametrien ryhmittely sulkulausekkeisiin ilmentää Q-luvun koostumista kolmesta eriluonteisesta tekijästä, joista ensimmäinen kuvaa rikkonaisuuden määrää, toinen rakopintojen laatua ja kolmas rakoilun hydraulista pysyvyyttä ja muutosherkkyyttä.

Alkuperäisen Q-luokituskonseptin parametrintointiin on tehty myöhemmin muutos jännitystilaluvun määrittämisestä koskien (Grimstad & Barton 1993).

Darcyn lain mukaan vedenjohtavuuskertoimen ja hydraulisen gradientin tulo ilmaisee veden virtausnopeuden virtauksen ollessa laminaarinen. Jos virtaus muuttuu turbulentiksi, johon siirtyminen laminaarisesta virtauksesta tapahtuu asteittain, virtausnopeus ei ole verrannollinen hydrauliseen gradienttiin vaan likimäärin verrannollinen sen neliöjuureen.

Koska Q-luokituksen vedenläpäisevyyksiluvun ja Darcyn yleisen vedenjohtavuuskertoimen välinen riippuvuus on lineaarinen, on veden virtausnopeuksia arvioitaessa huomioitava rakosysteemeissä tapahtuvan virtauksen muuttuminen turbulentiksi virtausnopeuden funktiona. Tällöin rakohydrauliikkaa kuvaava parametri J_w ei enää riitä kuvaamaan raon vedenläpäisevyysominaisuuksia (Mustonen et al. 1986).

Edellä kuvatus kalainen turbulenlin virtauksen tilanne synlyy erityisesti kallioilolien, tunneleiden ja kaivosperien läheisyydessä, missä virtauksnopeudet paikallisesti pyrkivät kasvamaan.

Jos Q-luokitusta sovelletaan kaivosgeologiseen kallioluokitukseen, olisi virtauksen hidastuminen turbulenlin virtauksen tilanteessa otettava huomioon vedenläpäisevyyskertoimen osalta käyttämällä Q-luvun kaavassa suuren painegradientin kohdalla sijaitsevilla kivilajiosueissa vedenläpäisevyysluvun neliöjuurta.

Q-luokituksen termiä J_w/SRF on epäkäytännöllisen työlästä ja epätarkkaa mitata, jolloin saadun arvon luotettavuus voidaan asettaa kyseenalaiseksi.

RMR-luokitus

Tunnelirakentamisessa ja kaivoksissa käytetty RMR (CSIR) -luokitus pohjautuu kuuteen lähtöparametriin:

1. kivilajin yksiaksiaalinen murtolujuus,
2. RQD-luku,
3. rakoväli,
4. rakojen laatu,
5. pohjaveden virtaus,
6. rakoilun suunta.

Jokainen lähtöparametri on yhteismitallistettu pisteytysmäärittelyllä, ja lopullinen RMR-luku saadaan laskemalla kaikkien lähtöparametrien pisteet yhteen.

Parametrien pisteytys voidaan suorittaa myös epätarkkojen lähtötietojen tapauksessa arviointimenettelyllä.

Erityisesti 1. parametrin arvo on työlästä määrittää vaihtelevassa kivilajiympäristössä. Myös tilanteiden mukaan vaihteleva 5. parametri on perusluonteensa vuoksi epäkäytännöllinen.

GSI-luokitus

Geological Strength Index, GSI-luku (Hoek et al. 1995), on sama kuin RMR-luku (Bieniawskin 1973 esityksen mukaisesti), mutta siten, että pohjaveden virtauspisteytys määritetään täysin kuivalle kalliolle ja rakosuuntien vaikutus määritellään hyvin edulliseksi. Kuten RMR-luokituksessakin, kivilajin yksiaksiaalisen murtolujuuden työläs saatavuus heikentää luokituksen käyttökelpoisuutta.

Terzaghin kallioluokitus

Itävallassa kehitetty Terzaghin luokitus on kalliokuormitukseen perustuva luokitusmenetelmä jonka sovellusalueena ovat teräskaarin lujitetut kalliotunnelit. Luokituksen yhdeksän luokkaa määräävät teräskaarilla tapahtuvan lujitustarpeen (Terzaghi 1946). Luokituksesta on kokemusta Alppien rautatietunnelien louhinnasta ja Yhdysvalloista. Luokitusmenetelmää on myös myöhemmin paranneltu (Rose 1982) pohjaveden kalliokuormavaikutuksen osalta ja lisäämällä luokitukseen RQD-arvot soveltuvin osin.

Terzaghin luokitus kehitettiin teräskaaritentua silmälläpitäen, eikä se sovi muiden tuentamenetelmien yhteydessä käytettäväksi. Tästä huolimatta Terzaghin luoma luokitusmenetelmä on laatuaan urauurtava, ja sen perustamisvaiheet ovat kallioluokitustutkimuksen kannalta kiinnostavat. Olosuhteiden ja tavoitteiden eron takia tämä luokitus ei kuitenkaan juurikaan sovellu malliksi Suomen kaivoksille.

Laufferin luokitus

Laufferin luokitus pohjautuu lujittamattoman kalliotilan pysyvyysaikaan ja aktiiviseen jänneväliin (RIL 1987). Luokituksen sovelluskohteena ovat erityisesti tunnelit. Laufferin luokituksella voisi olla jotain annettavaa kaivosgeologiselle kallioluokitukselle, mutta se ei sellaisenaan muodosta käyttökelpoista pohjaa uudelle luokittelumetodille.

RSR-luokitus

Tunnelinlouhinnassa käytettävässä Rock Structure Rating -luokituksessa (Wickham et al. 1972) luokitusparametreille annetaan suhteellisella tärkeydellä painotettu pistearvo. Parametrien pisteiden summana saadaan RSR-luku, joka saa maksimissaan arvon 100.

RSR-luokituksen parametrit A, B ja C ovat osaparametreineen seuraavat:

A Kallioalueen yleinen geologinen rakenne:

1. kallion alkuperäinen tyyppi,
2. kallion kovuus,
3. geologinen rakenne.

B Rakotiheys ja rakoilun suunta louhittavaan tilaan nähden:

1. rakoväli,
2. rakoilun suunta,
3. tunnelin louhintasuunta.

C Pohjaveden virtausolosuhteet:

1. luokitustekijöiden A ja B summa,
2. rakojen laatu,
3. vesivuoto.

RSR-luokitukseen kuuluu myös RR-luku (Rib Ratio), joka voidaan laskea kaavasta:

$$RR = (8800/(RSR + 30)) - 80$$

RR-luku kuvaa teräskaarilla lujitetun tunnelin suhteellista (prosentuaalista) lujitustarvetta standarditapaukseen verrattuna, kun standarditapauksena on Terzaghin luokituksen määrittämä tunnelin teräskaarilujitus irtonaisessa hiekassa pohjavesipinnan yläpuolella. Kuten Terzaghin luokitus, on tämäkin olosuhteiden suuren eron vuoksi vaillinaisen sovellettavaksi Suomen kaivosoloihin.

NATM-luokitus

Uusi itävaltalainen New Austrian Tunneling Method määrittelee maankamara-luokituksen, joka jakaa maankamaran seitsemään eri lujuusluokkaan ottaen kantaa lujitustarpeeseen ja -tapaan sekä louhintatapaan.

Tässäkin luokituksessa päämäärä ja kriteerit ovat sen verran erilaiset kuin Suomessa, ettei luokitus käy sovellettavaksi kaivoksissamme.

Rakennusalan kallioluokitus

Rakennusgeologinen kallioluokitus (RG-luokitus) on Suomen oloihin kehitetty järjestelmä kallion ominaisuuksien ilmaisemiseksi lyhytmuotoisesti (Korhonen et al. 1974). Se on kehitetty vuosina 1969-74 valtion teknistieteellisen toimikunnan, valtiovarainministeriön ja VTT:n geotekniikan laboratorion toimesta valtion kalliorakennushankkeissa käytettäväksi. Työn lähtökohtana oli VMY:n kehittämä kallion rakenteellisten ominaisuuksien louhinnallinen selvittely (VMY 1973), jossa päädyttiin moniluokkaiseen vähittäisrajaiseen jaotteluun ennen kaikkea rakojen rajaamien lohkojen koon ja seismisen nopeuden perusteella.

RG-luokituksessa voidaan valita useita eri tarkastelutarkkuuksia riippuen kohteen homogeenisuusyksikön koosta ja rakennushankkeen etenemisvaiheesta (tutkimus, suunnittelu, rakentaminen, käyttö). RG-luokituksen dynaamisen rakenteen ansiosta sen resoluutiota voidaan lisätä minkä tahansa parametrin tarkemmalla geologisella kuvauksella, esimerkiksi rakojen karheuden, mineralogisen muuttuneisuuden ja pohjaveden esiintymistavan osalta.

Silloin kun eri kalliokäsittelytapojen erityistarpeisiin tarvitaan teknisten ominaisuuksien testejä, on geologisiin homogeenisuusyksikköihin perustuva RG-luokitus erinomainen pohja niiden edustavuustarkasteluille ja soveltuvuustulkinnolle.

RG-luokituksen on tarkoitus olla helppokäyttöinen ja kielellisesti ilmeikäs, toisin sanoen se perustuu välittömästi näkyviin geologisiin piirteisiin ja sen termeiksi on valittu sellaiset suomenkieliset sanat, jotka antavat suomenkielisille käyttäjille heti mahdollisimman oikean mielikuvan (Korhonen et al. 1974).

Luokitusta ei ole sidottu jäykkiin raameihin, vaan sen hierarkkisilla eri tasoilla ja eri luokilla käytetään erottelun kriteereinä kulloinkin tarkoituksenmukaisimpia tekijöitä — milloin tiettyä numeerista ominaisuusasteikkoa, milloin puhdasta tyyppiluokittelua.

Rakennusgeologisen kallioluokituksen pääperiaatteena on ilmentää kallion laatua, kalliolaatua, kahden erimittakaavaisen peruspiirteen, niin sanotun luokitusperusteen avulla; nämä kallion luokitusperusteet on nimetty kivilaaduksi ja rakoiluksi, ja ne määritetään seuraavien luokitusominaisuuksien avulla:

Kivilaatu:

1. rapautuneisuus (4 luokkaa),
2. osasten järjestyneisyys (3 luokkaa),
3. vallitseva raekoko (3 luokkaa),
4. päämineraalit (10 ryhmää mielivaltaisine yhdistelmineen).

Rakoilu:

1. rakoilutyyppi (4 valmista tyyppiä),
2. rakotiheys (3 luokkaa),
3. raon laatu (3 ryhmää alaryhmineen).

Kukin luokitusominaisuus määritetään oman systeeminsä mukaan tarpeen vaatiessa hyvinkin yksityiskohtaisesti (esim. Niini 1976). Näin suoritettavan deskriptiivisen analyysin perusteella erilaatuiset kallionkohdat luokitellaan ensin kolmeen rakenteellisen kiinteyden mukaiseen pääryhmään, ne yhteensä kymmeneen rakennetyyppiin ja ne puolestaan kaikkiaan 18 erinimiseen laatuluokkaan, joille on annettu myös yksinkertaiset kirjain-numerosymbolit. Jokainen kohta kalliossa edustaa siis aina jotakin näistä 18 kalliolaadusta (taulukko 1).

Kalliolaatua kuvataan haluttaessa tarkemmin minkä tahansa edellä mainitun luokitusominaisuuden mukaan sekä tarvittaessa minkä tahansa muunkin ominaisuuden mukaan. Kuvauksen kohteena on tarpeen mukaan minkä tahansa kokoinen kallio-osue, ja jos kohteessa on monia kalliolaatuja tulee kuvauksen esittää myös eri kalliolaatujen geometrinen jakautuminen tilassa.

Rakennusgeologista kallioluokitusta on käytetty Suomessa jo yli 25 vuotta. Sitä voidaan ja lienee syytä kehittää, mutta sitä on edelleen pidettävä erilaisten teknisiä tarpeita varten kehitettyjen ja kehitettävien luokitusten lähtökohtana.

Taulukko 1. RG-luokituksen 18 luokkaa symboleineen (Niini & Parkkinen 1995).

Rakenteellinen kiinteys	Rakennetyyppi	Tunnus	Rakoilu	Lisäkritereitä
kiinteä kalli	massa-rakenteinen	Ma1 Ma2 Ma3	harvarakoinen vähärakoinen runsarakoinen	päämine- raalien
	liuske-rakenteinen	Li1 Li2 Li3	harvarakoinen vähärakoinen runsarakoinen	mukaan hauras h,
	seos-rakenteinen	Se1 Se2 Se3	harvarakoinen vähärakoinen runsarakoinen	sitkeä s, pehmeä p,
löyhä kalli	löyhä-rakenteinen	Lö1 Lö2 Lö3	harvarakoinen vähärakoinen runsarakoinen	tai kova k
	rapa-rakenteinen	Ra	tarkempi kuvaus kivilaadun perusteella	
rikkonainen kalli	halkeama-rakenteinen	Ril	jakaa kallion terävästi kahteen erilliseen osaan	
	rakorakenteinen	Rill	runsarakoinen, ei rakotäytettä	
	murros-rakenteinen	Rilll	tiheärakoinen, rakojen täyteisyys vähäistä	
	ruhje-rakenteinen	RilV	runsas- tai tiheä-rakoinen	raoissa savitäytettä
	savirakenteinen	RiV	runsaasti kalliosavea	

H. N. -74

Tutkimuksen ulkoiset puitteet

Aikaisemmat tutkimukset

Aiemmin on tehty yrityksiä kaivoskivilajien ja -kallioperän louhinnalliseksi luokittelumiseksi, mm. Vuorimiesyhdistyksen tutkimusvaltuuskunnan toimesta (mm. VMY 1982). Nämä tutkimukset on julkaistu yhdistyksen A-sarjan julkaisuissa pääkohteinaan kallion rakenteen louhintavaikutusten dynaamisuuden jäsentely (VMY 1973), geofysikaalisten menetelmien käyttö karakterisoimaan yhtäältä kallion heikkousvyöhykkeitä (1985), toisaalta malmi- ja raakkutyyppejä (1986), kallio-ominaisuuksien suorat geologiset havainnointimenetelmät (1988) sekä geologiset muutokset kalliorakentamisessa (1992). Näitä olen erikseen käsitellyt esityksessäni sen edellä mainittuja julkaisuja keskeisesti sivuavissa kohdissa. Näissä tutkimuksissa on päädytty lähinnä tiettyjen osaongelmien hahmottamiseen ja näihin soveltuvien, yleensä aikaa ja rahaa vievien teknisten testien suositteluun. Tulokset ovat myös tuoneet esiin yleisemmäksi pohjaksi tarvittavan nopean systemaattisen kaivosgeologisen luokittelun tarpeen.

Kaikki aikaisemmat kallioluokitustutkimukset ovat pohjautuneet synteettiseen tarkasteluun. Synteettisen tarkastelun heikkous on se, että huomioimatta jääneitä ilmiöitä tai parametreja ei voi helposti huomata. Sen sijaan systeemianalyttisessä tarkastelussa voidaan ottaa aluksi mukaan kaikki tunnetut seikat, jolloin mikään osa-alue ei jää käsittelemättä. Kaikki, mikä jätetään pois tarkasteltavasta systeemistä, on erikseen perusteltu. Tämä vähentää virheiden ja epätasällisyyksien luokitukseen pääsyn mahdollisuutta.

Systeemianalyttisen tarkastelun perusteet

Kallioluokituksen perusteina käytettävät parametrit jakautuvat kahteen ryhmään: ne, jotka ovat jo tiedossa, ja ne, jotka halutaan tietää. Ensimmäiset edustavat lähtöjoukon alkioita ja toiset saapumisjoukon alkioita. Näiden välille voidaan muodostaa alkiokohtainen kuvaus (funktio), joka kuvaa näiden parametrien suhdetta toisiinsa. Joidenkin parametrien välinen funktio voi olla matemaattinen, mutta nominaaliparametrien funktiot voivat olla myös indikaatioita, väljiä rajauskriteerejä tai loogisia riippuvuussuhteita. Laajimmillaan funktiolla voidaan tässä käsittää statistista korrelaatiota. Tutkimalla lähtö- ja saapumisjoukon alkioiden välisiä sidonnaisuuksia voidaan saatujen tulosten perusteella valita luokitusperusteiksi soveltuvat parametrit. Optimaalisessa tilanteessa voidaan tällöin saavuttaa kiven vaikeasti mitattava ominaisuus helpommin saatavien tai jo tiedossa olevien parametrien avulla.

Systeemianalyttisen tarkastelutavan kannalta tämä merkitsee sitä, että kaikki luokitukseen liittyvät parametrit sijoitetaan matriisiin diagonaalisoluihin. Saatua diagonaalimatriisi kuvaa erään luokitteluavaruuden kantavektoreiden (luokitteluparametrien) muodostaman kannan tietyssä luokitteluavaruudessa.

Taulukko 2. Kallion tekniseen hyödyntämiseen tähtäävän hankkeen RES-matriisi täytettynä kirjoittajan näkemyksen mukaan.

Tekniset parametrit	3	4	4	2
2	Taloudelliset parametrit	0	1	2
4	3	Geologiset parametrit	4	2
2	3	0	Turvallisuus-parametrit	1
2	3	0	2	Ympäristö-parametrit

Saatu kanta (diagonaalimatriisi) sisältää keskenään riippuvuussuhteessa olevia jäseniä, jotka tulisi eliminoida. Aina kun yksi tuntematon parametri saadaan eliminoidua tuntemattoman kustannuksella, on yksi luokitteluparametri saatu valituksi ja sen suhde luokiteltavaan ilmiöön kuvattua.

Lähtö- ja kuvajoukon alkioden keskinäisten riippuvuussuhteiden selvittämisen lisäksi on eliminotava keskenään symmetriset parametrit, eli sellaiset parametrit, joilla on joko lähtö- tai kuvajoukon sisällä keskenään voimakas positiivinen korrelaatio molempiin suuntiin. Tällöin toinen parametreistä riittää kuvaamaan sen ilmaisemaa ulottuvuutta.

Mikäli diagonaalilla sijaitsee toisiinsa puhtaassa matemaattisessa suhteessa olevia parametreja, voidaan niiden kesken suorittaa optimointia Gaussin eliminointimenetelmään pohjautuvalla matriisin käänöllä (Väliaho 1980). Tämän edellytyksenä matriisin soluarvojen tulisi kuitenkin sijaita lineaarisella asteikolla, joten ESQ-matriisia ei voi sellaisenaan kääntää.

Edellä mainittujen eliminointitoimenpiteiden lisäksi voidaan kallioluokitusparametreja valittaessa sulkea pois merkitykseltään vähäiset ja merkityksettömät parametrit. Poissuljenta vaatii hyvän perustelun, eikä luokituksella ole tämän jälkeen ilmaisukykyä poistetun parametrin kuvaamassa dimensiossa.

Näin erilaisilla eliminointimenetelmillä on voitu pienentää luokitusproblematiikkaa kuvaavan matriisin kokoa ja yksinkertaistaa luokituksen käsittelyä. Tilanne on analoginen matemaattisen lineaariavaruuden kanta-

matriisin optimointitehtävän kanssa: pienentämällä kantamatriisia päästään lopulta optimaaliseen (pienimpään) riippumattomien kantavektoreiden joukkoon. Tällaisessa optimaalisessa kantamatriisissa jokainen kantavektori määrittelee yhden ulottuvuuden. Samanlaisiksi ulottuvuuksiksi tai vapausasteiksi voidaan käsittää myös jokainen riippumaton luokitusparametri.

Optimoidun RES-matriisin vaikutussuhteiden määrittäminen voidaan suorittaa useilla eri tavoilla. Tässä tutkimuksessa se suoritetaan ESQ-menetelmällä (Expert Semi-Quantitative, Hudson 1992, sivu 48). Siinä diagonaalijäsenten väliset vuorovaikutusintensiteetit koodataan viisitasoiselle asteikolle:

- | | |
|---|---------------------------|
| 0 | ei vuorovaikutusta, |
| 1 | heikko vuorovaikutus, |
| 2 | keskivahva vuorovaikutus, |
| 3 | vahva vuorovaikutus, |
| 4 | kriittinen vuorovaikutus. |

Asteikon looginen jatke olisi arvo viisi, joka ilmaisee täydellistä riippuvuutta eli parametrien identtisyttä. Tällainen riippuvuussuhde esiintyy parametrillä vain itsensä kanssa, joten matriisin diagonaalijäsenten laskennallinen arvo on viisi. Koska jokaisen diagonaalijäsenen riippuvuus itsestään on samansuuruinen (vieläpä symmetrisesti), ei lukuarvolla ole rivi- ja sarakesummaoperaatioissa merkitystä. Kun jokaisen RES-matriisin diagonaalijäsenen vaikutus jokaiseen muuhun diagonaalijäseneseen on määritetty, voidaan pystysarakkeista laskea systeemin vaikutus sarakkeen diagonaaliruudussa sijaitsevaan parametriin ja vastaavasti vaakariviltä sillä sijaitsevan diagonaaliruudun parametrin vaikutus koko systeemiin.

Tietokoneavusteinen luokittelu ja kuvankäsittely

Tietokoneavusteisessa kuvankäsittelyssä analysoidaan digitaalisessa muodossa olevaa kuvaa, joka on tavalla tai toisella tuotettu näytteestä. Näyte voi tällöin olla joko rakennenäyte tai murskattu näyte. Kuvaustavasta riippuen saadaan kuvaan esille erilaisia ominaisuuksia näytteen mineraaleista. Niinpä mittaus- eli kuvaustavan valinnan lisäksi myös näytevalmistelu on tärkeässä asemassa kuvankäsittelyä valmisteltaessa.

Eräiden näytetyyppien ja rakenneilmiöiden kuvaamisessa on lisäksi noudatettava tarkkuutta näytteen asennon suhteen. Tällainen on tilanne esimerkiksi kairasydämistä kuvattavien rakotiheyksien ja suuntien kohdalla. Rakotiheyksiä voidaan lisäksi arvioida reikäkamerakuvauksilla, sähköisillä geofysiikan menetelmillä ja kalliopohjaveden virtausnopeuden mittauksilla. Usean erilaisen aineiston yhdistäminen varmentaa tilaan jakautuneen tiedon todellisuuspohjaa. Avaruuskorrelaation avulla voidaan tällöin muodostaa kolmiulotteinen kalliosisältö- tai rakennemalli geostatistista inversiomallinnusta soveltaen.

Näytevalmistelu

Hyvä näytevalmistelu edellyttää näytteeltä suosiollisia ominaisuuksia: jotta preparaatti voi olla edustava, on myös näytteen oltava edustava. Jotta näytteestä voidaan valmistaa hyvä preparaatti, on näytteen oltava riittävän suuri. Näytevalmistelussa on erityisesti syytä ottaa huomioon kaksi fundamentaalista seikkaa: 1. mitä ominaisuutta näytteestä halutaan mitata, ja 2. kuinka tarkasti.

Murskattu näyte ja rakennenäyte

Murskatussa näytteessä menetetään rakenteellinen tieto, mutta mittauksissa voidaan selvittää määrasuhteet ja yksittäisten rakeiden laatu. Näytteen murskaus on syytä tehdä vain siihen raekokoon asti, missä saavutetaan mahdollisimman monomineraalinen raetulos. Eri näytetyyppien käyttäytyminen murskauksessa vaatii erilaisten murskausmenetelmien käyttöä koostumukseltaan erilaisille näytetyypeille (vrt. SiO_2 -pitoisuus).

Murskausta seuraavassa preparaatin valmistuksessa tulee esille myös eri muotoisten rakeiden hidas vajoaminen preparaatin liimassa. Tämä voi aiheuttaa gravitaatiivisen differentiaation pinta-ala/paino-suhteeltaan toisistaan poikkeavien mineraaliryhmien kesken, tai jopa suorastaan aiheuttaa kerrallisen raekokojakautuman. (Petruk 1989). Murskatun näytteen etu on raerajojen selkeä tunnistettavuus isotrooppisen liiman erottaessa (usein anisotrooppisia) rakeita toisistaan.

Rakennenäytteen kiistaton etu on mahdollisuus kiven rakenneominaisuuksien tutkimiseen. Tekstuurin tunnistaminen kertoo kivilajin muodostavien mineraalitekiteiden tavan liittyä toisiinsa, mikä puolestaan määrää kivilajin mekaaniset kulutus- ja lujuusominaisuudet: kovuuden, sitkeyden, elastisuuden ja

murtolujuudet. Rakennenäyte edustaa kuitenkin aina kaksiulotteista tasoa näytteestä ja vaatii täten kolme toisiaan vastaan kohtisuoraan suunnattua näytettä edustaakseen rakenteen kaikkia dimensioita. Mikäli näyte on selvästi suuntautunut, täytyy yhden näyteleikkeistä olla viivauksen suuntainen.

Raerajojen tunnistaminen ja rakennefaktorit

Raerajojen tunnistaminen voi pohjautua useampaan eri menetelmään. SEM (Scanning Electron Microscope) -analytiikassa rakeen tunnistaminen voidaan suorittaa backscatter-kuvana saadun harmaasävykartan perusteella. Harmaasävyarvo on sitä kirkkaampi, mitä suurempi on rakeen sisältämän mineraalin atomipainojen lukumääräpainotettu keskiarvo.

Polarisaatiomikroskoopin kohdalla tilanne on hieman vaikeampi. Rajat voidaan tunnistaa useamman kuvan yhdistelmällä, esim. yhdistämällä AND-operaatiolla vain läpinäkyviä mineraaleja sisältävän näytteen tasopolaroidussa valossa otettu kuva ja nikolit ristissä otettu kuva. Tällaisten yhdistelmäkuviin käytössä on kuitenkin noudatettava varovaisuutta sellaisten näytteiden kanssa, joissa kahdella tai useammalla mineraalilla on suuruudeltaan lähellä toisiaan olevat taitekertoimet tai kahtaistaitot. Edelleen on huomioitava, että opaakkien mineraalien raerajojen erottelu ei läpivalomikroskopialla ole mahdollista, joten niiden erottelun samasta kuvasta täytyy tapahtua heijastusvalokuvan ja läpivalokuvan yhdistämistä hyväksikäyttäen.

Rakennenäytteen tapauksessa raerajojen tunnistamisen jälkeen voidaan rakenteen karakterisoimiseen käyttää rakennefaktoreita, jotka kuvaavat tyypillisiä tekstuureja. Rakennefaktorit jakautuvat neljään ryhmään:

1. raekoko ja raekokojakauma,
2. yhteenkasvettumisindeksi,
3. koordinaatio,
4. raemuoto ja sen vaihtelu.

Preparaatin tasopinnasta mitattu raekoko ei ole sama kuin kolmiulotteisen kappaleen todellinen raekoko, sillä leikkauspinnalla ilmenevä mineraalirakeen näennäinen halkaisija on keskimäärin vain neljä viidesosaa todellisesta maksimiraekoosta (Niini & Parkkinen 1995, s. 40).

Tilavuuteen pohjautuvaa raekokoarviota tehtäessä voidaan mainittu näennäinen halkaisija korjata kolmiulotteiseksi hyväksikäyttäen tilastollista korjausta, jossa painotetaan raekokojakauman karkeampaa päätä. Jos raemuoto on säännöllinen, voidaan korjauslaskulle antaa yleispätevä numeerinen muoto, mutta malmissa mineraalirakeet ovat usein epäsäännöllisen muotoisia ja sen takia korjauksen tarkka arvo on vaikea määrittää.

Epämääräisistä raemuodoista voidaan raetilavuuden laskennassa käyttää pienimmän ja suurimman raehalkaisijan keskiarvoa, kun säännöllisen muotoisista rakeista on syytä käyttää suurinta halkaisijaa.

Yhteenkasvettumisindeksiä mitataan yleensä sekvenssianalyysin avulla. Näytepintaan perustetaan mittauslinjasto, jonka leikkaamat raerajapinnat lasketaan. Tämän jälkeen saatu lukumäärä jaetaan mineraalirajapintakohtaisesti mittalinjan mineraaliraetta leikkaavan osan pituudella. Näin saadaan ominaisrajapintaluku, joka on sitä suurempi, mitä repaleisempia ja pienempiä mineraalirakeet ovat (Papunen 1981).

Rakeiden tunnistaminen

Rakeiden tunnistaminen voidaan toteuttaa kuvantuottomenetelmästä riippuen joko heijastuskykyyn, valonläpäisykykyyn, taitekertoimeen, alkuaineiden raskausjakaumaan tai kahtaistaittoon pohjautuen. Näistä selkein on juuri mineraalihilassa esiintyvien alkuaineiden atomipainojen keskiarvo elektronimikroskooppisessa backscatter-kuvassa. Kun yhden rakeen koostumus on määritetty energiadiispersiivisellä spektrografialla, voidaan saman harmaasävyarvon omaavien rakeiden pinta-alasuhteita ja muotofaktoreita tarkastella tilastomatematisesti erilaisia kuvankäsittelyohjelmia hyödyntäen.

Optisessa mikroskooppikuvassa rakeiden identifiointi on vaikeampaa. Usein voidaan kuitenkin selkeyttää eri mineraalien identiteettiä kuvassa suorittamalla erilaisia suodatuksia, joista yleisimmin käytetään ns. yli- ja alipäästösuolettimia. Tällaista kuva-alueen luokkiin jakamista kutsutaan segmentoinniksi. Kun segmentointi viedään riittävän tarkaksi, saadaan jokainen mineraali erotetuksi omaksi luokakseen.

Kaivosgeologisen kallioluokituksen työvaiheet

Systeemianalyttisiä tarkastelulähtökohtia (Hudson 1992) soveltaen kaivosgeologisen kallioluokituksen perustavan tutkimuksen työvaiheet muodostuvat suoritusjärjestyksessään seuraavista operaatioista:

1. ensimmäinen työvaihe on tutkittavien ja mitattavien ilmiöiden (sekä niitä kuvaavien parametrien) luettelointi,
2. toisena työvaiheena on mitattavien ilmiöiden parametrisointi,
3. kolmas työvaihe on edustavien parametrien rajaaminen ja keskinäisten riippuvuussuhteiden tarkastelu. Tämä suoritetaan Hudsonin menetelmän rekursiivisella käytöllä, jossa parametrit luokitellaan ryhmiin,
4. neljäntenä työvaiheena on kattavan RES-matriisin diagonaalijäsenten valinta, päällekkäisyystarkastelu ja atlas-matriisin generointi. Atlas-matriisin generoinnin pohjaksi tarvittava tieto saadaan suorittamalla haastattelu geologisen tutkimushenkilökunnan, louhintatekniikan ja rikastustekniikan asiantuntijoiden piirissä,
5. viides työvaihe on RES-matriisin osavaikutussummien sijoittaminen syy-seuraussuhde-diagrammille, jolloin parametrit voidaan jakaa suuruusluokka-vaikutuskohdeasteikolla omiin ryhmiinsä,
6. kuudennessa työvaiheessa valitaan luokitusperusteet parametrien ryhmiin jakautumisen perusteella,
7. seitsemäs työvaihe sisältää luokitusperusteiden kirjaamisen ja varsinaisen luokituksen perustamisen,
8. saatua luokitusta voidaan testata vertaamalla sitä tunnettuihin teknisiin luokitusaineistoihin.

Tutkittavien ilmiöiden luettelointi

Aluksi luetteloidaan kaikki ne ominaisuudet joilla voidaan katsoa olevan merkitystä suunnitellun luokituksen kannalta. Sellaisia ovat

1. vaikuttajaominaisuudet (tekniset ominaisuudet),
2. geologiset (rakeutuvuus)ominaisuudet,
3. kallion rakennusgeologiset ominaisuudet,
4. kivi- ja kallio-ominaisuuksien ero (nominaaliluokat),
5. kallion hyödynnettävyys (laajasti määriteltynä),
6. pohjaveden esiintyminen (esiintymistapa),
7. malmimineraalien esiintymistapa (tekstuuri ja rakennekontrolli),
8. malmin ja sivukiven kontaktityyppi,
9. esiintymätyypin ja louhintakohdetyypin erityispiirteet,
10. kiviaineksen terveydelliset ominaisuudet.

Ilmiöiden parametrisointi

Ilmiöiden parametrisoinnissa valitaan käytettäväksi sellaiset parametrit, jotka kuvaavat mitattavaa ilmiötä siten kuin työn alla oleva luokitus sitä voi parhaalla mahdollisella tavalla hyödyntää. Valinnassa on otettava huomioon myös parametrin muut ominaisuudet, kuten resoluutio, saatavuus ja luotettavuus.

Synteettisten parametrien lisääminen systeemiin

Joitakin parametreja ei voitu huomioida systeemianalyttisen tutkimuksen pohjana toimivassa kyselyssä, ja ne täytyi jälkeinpäin lisätä järjestelmään synteettistä menetelmää soveltaen.

Parametrien lisääminen johtui siitä, että kun kysely on suoritettu käyttäjäkunnan piirissä, ei yksittäisen vastaajan kokemus ole kattanut kuin yhden esiintymän tai parhaassa tapauksessa esiintymätyypin. Näin lisättäväksi jää esiintymätyyppejä kuvaavat parametrit. Esiintymätyypin kuvaajaksi ehdotan käytettäväksi kardinaaliparametria hapan – intermediäärinen – emäksinen – ultraemäksinen, joita edustavina koodeina esiintykööt mainittujen luokkien nimien alkukirjaimet:

H, I, E, U

Mainittu ominaisuus, so. kiven SiO_2 -pitoisuus, on helposti analyyseista saatavilla ja on myös kohtuullisen helposti määriteltävissä kiven tiheyttä ja väriä arvioimalla. Myös kiven teknisillä ominaisuuksilla, kuten esimerkiksi murskattavuudella, on vahva korrelaatio SiO_2 -pitoisuuteen.

Toinen esiintymätyypikohtainen parametriedokas on kiven tekstuurillinen ja mineraloginen muuttumisaste. Metamorfoosin aiheuttamat muutokset näkyvät kivessä sekä rakenteellisenä että mineralogisen koostumuksen muuttumisena, mutta muuttumisen vaikutus kiven teknistä hyödynnettävyyttä kuvaaviin ominaisuuksiin on kuitenkin niin monimuotoinen, että asian tarkempi käsittely vaatii tilastomatemattisia lisätutkimuksia tunnettujen esiintymien aineistoista.

Koska kiven rakenneominaisuudet tulevat huomioiduiksi jo geologisten parametrien osiossa ja mineralogisen muuttuneisuuden arviointi vaatii merkittävää mineralogista ammattitaitoa, ei kiven muuttuneisuus kelpaa sellaisenaan uudeksi luokitusparametriksi, vaan vaatii lisätarkastelua tarkentavissa tutkimuksissa. Erityistä huomiota näissä olisi kiinnitettävä muuttuneisuusslukuihin, jotka ilmaisevat kiven laskennallista muuttuneisuutta, sekä eräiden muuttumista indikoivien mineraalien (esim. talkki, karbonaatit, kloriitti) rikastus- ja louhintateknisiin vaikutuksiin.

Edustavien parametrien rajaaminen ja keskinäisten riippuvuuksien tarkastelu

Parametriryhmistä louhinnan suhteen keskeisimmässä asemassa on geologiset parametrit. Ne saadaan esiintymän hyödyntämistä edeltävässä kartoitus- ja inventointivaiheessa ja niitä tulee edelleen tarkentaa hyödyntämisen edetessä. Tällöin ne ovat looginen osa louhinnan toteutumisen seuranta. Kallion rakenne ja kiven rakenne kontrolloivat kaikkia kiviainekselle tehtäviä työvaiheita ja nousevat kokemuseräisen tiedon perusteella määrääviksi tekijöiksi kaikessa louhintatyössä. Näin ollen niiden tulisi siis muodostaa merkittävä perusta kaivosgeologiselle kallioluokitukselle.

Kronologisessa työvaihejärjestyksessä geologisten parametrien jälkeen seuraavina tulevat kaivoksen työvaihekohtaiset tekniset parametrit, jotka kertovat jokaisen työvaiheen toteutettavuuden suhteessa kivimateriaalin laatuun. Työvaiheparametreilla mitataan ns. vaikuttajaominaisuuksia.

Kallion rakennusgeologisia ominaisuuksia kuvaavat parametrit sivuavat louhintatyön problematiikkaa maanalaisen kalliotilalouhinnan osalta ja rakoilun huomioonottamisessa. Lähtökohtaisesti on selvää, että rakennusgeologiset parametrit tulevat huomioonotetuiksi muissa parametriryhmissä, joiden yksityiskohtaisempaan käsittelyyn ne voidaan jättää.

Kivi- ja kallio-ominaisuuksien ero kuvaa mittakaavatekijää, joka kertoo, ovatko kiviaineksen ominaisuudet riippuvaisia tarkasteltavan kivilajiosueen koosta. Mineraalirakeiden laatu, koko, muoto ja kiinnittyminen toisiinsa määräävät kiviaineksen teknisen lujuuden, joka siis voi vaihdella mittakaavasta riippuen. Eräs samaa asiaa kuvaava termi on homogeenisuusyksikön koko.

Kallion hyödynnettävyys voidaan laajimmillaan ymmärtää työvaiheparametrina yhdelle moneen osasuoritukseen jakautuvalle työvaiheelle: kallion hyödyntämiselle. Sen osaparametrit sisältävät kaikki työvaiheparametrit, joista mikä tahansa kalliorakennushanke koostuu. Näistä parametreista on työn alla olevaan luokitukseen valittu kaivoksen louhinta- ja rikastusteknisten työvaiheiden toteutettavuutta kuvaavat parametrit.

Pohjaveden esiintyminen kaivoksissa tuottaa kahdenlaista harmia. Yhtäältä se heikentää kiviaineksen lujuutta ja toisaalta se täyttää louhittua tilaa, jolloin se pitää pumppuamalla poistaa (Niini & Niini 1995). Edellä mainituista veden aiheuttamista haitoista ensimmäinen on merkittävin, sillä erityisesti kalliosavea sisältävät raot (söyri) muuttuvat liukkaiksi siirrospinnoiksi kosteuden päästessä imeytymään rakoihin. Koska pohjaveden pitäminen louhoksen ulkopuolella on kallion hyödyntämisen kannalta aina edullista (ellei kyseessä ole vesisäiliön louhinta), kuvaavat louhintatekninen tiivistettävyyys ja tuettavuus jokseenkin samaa asiaa. Ne ovat myös luokituksen kannalta yhteismitallisia parametreja, joten pohjaveden esiintyminen voidaan tällä perusteella jättää pois tutkittavista parametreista.

Malmimineraalien esiintymistapa vaikuttaa sekä kiven louhintateknisiin että sen rikastusteknisiin ominaisuuksiin. Esimerkkinä voidaan mainita juonikivissä

esiintyvät malmit, joiden rakenne kontrolloi arvomineraalien esiintymistiheyttä, ja näin myös raakkulaimennusta ja malmitappiota sekä mahdollisen sisäraakun määrää.

Malmin ja sivukiven kontaktityyppi karakterisoi esiintymätyyppiä ja usein myös malmin syntytapaa. Esimerkiksi Oriveden Kutemajärven kultamalmin parhaat pitoisuudet ovat esiintyneet ”viitospiipun” breksian yhteydessä. Muita kullan indikaattoreita ovat olleet mineralogiset seikat, kuten amorfisen hiilen ja omamuotoisten topaasikiteiden ja sferuliittisen pyrofylliitin, sekä hallitsevan (kymmenien modaaliprosenttien) massiivisen andalusiitin esiintyminen.

Malmi-sivukivi-kontaktin avulla voidaan määritellä nominaaliparametri, jolla voidaan kuvata kiven taloudellista potentiaalia, mutta kyseinen parametri on aina esiintymäkohtainen. Tärkeä kontaktityyppi Kutemajärvellä on breksia, kuten edellä on kuvattu, Siilinjärvellä puolestaan äskettäin löydettyä ruskeaa maaperämäistä ”rapamalmia”, jolla on toistaiseksi paras tunnettu apatiittipitoisuus Siilinjärven karbonaattiesiintymässä. Tästä johtuen kontaktityyppi ei siis sovellu luokitteluparametriksi ilman huomattavia tarkempia lisätutkimuksia, joissa otetaan huomioon kaikki Suomen kaivokset.

Esiintymätyypin ja louhintakohdetyypin erityispiirteet ovat parametriryhmiä, jotka kertovat onko kyseessä avolouhos vai maanalainen kaivos, mitä louhintatekniikkaa käytetään, onko kaivos jonkin toisen satelliitti, onko rikastusprosessi yhteinen jonkin toisen kaivoksen kanssa, jne. Näillä parametreilla on useiden esiintymien suhteen suuri paikallinen merkitys, mutta koska parametrin arvo ei vaihdu esiintymän sisällä, ei ole uskottavaa, että tällaisella parametrilla olisi käyttöä muualla kuin sellaisilla rikastustehtailla, jotka saavat syötteensä useista eri kaivoksista, kuten on asia Outokumpu Oy:n Vammalan rikastustehtaalla.

Tällaiset erityiskysymykset onkin usein otettu huomioon itse paikalla, ja ehdotankin tämän asian siirtämistä luokitusproblematiikkaa tarkentaviin jatkotutkimuksiin.

Turvallisuusparametrit kuvaavat kiviaineksen aiheuttamia potentiaalisia terveyshaittoja ja onnettomuusalttiutta. Ne jakautuvat viiteen ryhmään:

1. säteilyturvallisuus,
2. sortuma-alttius,
3. liukkausturvallisuus,
4. kemiallinen turvallisuus,
5. hiukkasturvallisuus (pölyn mekaaninen vaarallisuus).

RES-matriisin diagonaalijäsenten valinta

Diagonaalijäsenten valinnassa ilmaistaan ne parametrit, joilla voidaan kuvata koko prosessin tapahtumat alusta loppuun. Tällainen menettely saadaan aikaiseksi liittämällä jokaiseen peräkkäiseen työvaiheeseen parametri, joka kertoo, kuinka hyvin työvaihe on toteutettavissa suhteessa kiviaineksen ominaisuuksiin. Kun matriisi on täytetty, voidaan laskea matriisin sarakesummat, jotka kertovat, paljonko systeemi vaikuttaa parametriin, ja rivisummat, jotka puolestaan kertovat paljonko parametri vaikuttaa systeemiin (muihin parametreihin).

Porat-tavuus	2	4	1	3	2	0	1	1	3	17
2	Räjäy-tettävyys	3	1	2	2	2	1	2	3	18
4	2	Jyrsit-tävyys	1	1	2	2	1	1	3	17
2	3	3	Rusnat-tavuus	2	1	1	1	0	2	15
1	2	1	1	Lujitet-tavuus	2	2	0	0	3	12
1	2	0	1	3	Tiivistet-tävyys	1	0	0	0	8
1	1	2	2	0	0	Lastat-tavuus	3	3	2	14
1	1	3	1	0	0	3	Siirto-lastat-tavuus	2	1	12
1	1	1	0	0	0	3	2	Kuljetet-tavuus	1	9
2	2	1	3	2	2	3	2	2	Murskat-tavuus	19
15	16	18	11	13	11	17	11	11	18	Σ

Kun rivi- ja sarakesummat on parametrikohteisesti laskettu, voidaan parametrit sijoittaa cause-effect-diagrammille. Tällöin pystyakselille on sijoitettu

parametrin vaikutus systeemiin ja vaaka-akselille systeemin vaikutus parametriin.

Cause-effect-diagrammin luominen ja tulkinta

Cause-effect-diagrammi kuvaa parametrien ja systeemin vuorovaikutussuhteiden voimakkuutta. Diagrammin pystyakselilla esitetään parametrin vaikutus systeemiin (matriisin parametrikohmainen rivisumma) ja vaaka-akselilla systeemin vaikutus parametriin (parametrikohmainen sarakesumma).

Saatua cause-effect-diagrammia tulkitsemalla saamme lasketuksi kaksi parametrikohmaista arvoa: parametrin vuorovaikutusintensiteetin ja sen dominoivuuden (asymmetrisyyden).

Vuorovaikutusintensiteetti lasketaan kaavasta

$$(\Sigma_S \alpha_i + \Sigma_R \alpha_i) / \sqrt{2}$$

Jossa α_i on parametrikohmainen rivi- tai sarakesolun arvo, Σ_S on sarakesumma ja Σ_R rivisumma.

Vastaavasti dominoivuus lasketaan kaavasta

$$(\Sigma_S \alpha_i - \Sigma_R \alpha_i) / \sqrt{2}$$

Lasketuista arvoista voidaan muodostaa uusi diagrammi, jossa parametrikohmaisen pisteen sijoittumisen määräävät pystyakselilla esitettävä vuorovaikutusintensiteetti ja vaaka-akselilla esitettävä dominoivuus.

Saatuja diagrammeja tulkitsemalla voidaan parametrit jakaa ryhmiin vaikutusluonteensa perusteella. Jos parametrin vaikutus systeemiin on merkittävästi suurempi kuin systeemin vaikutus parametriin, sen vuorovaikutusintensiteetti on suuri ja sen dominoivuus on suuri. Diagrammin tulkinnan ja kaivosgeologisen kallioluokituksen suhteen tämä merkitsee sitä, että kyseinen parametri on potentiaalinen luokitusparametri, koska se mittaa vähintään kohtuullisella resoluutiolla toimintaketjun työvaiheiden toteutumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Jos systeemin vaikutus parametriin on suurempi kuin sen vaikutus systeemiin, on parametrin riippuvuus yleensä liian monitahoinen selittämään systeemin yksittäisiä ilmiöitä. Näin ajatellen tällainen parametri ei ole erityisen otollinen kallioluokitusperuste. Mikäli kuitenkin parametrin pieni vuorovaikutusintensiteetti johtuu siitä, että sillä on voimakas riippuvuus vain muutama tai peräti yhteen systeemin muista parametreista, on tilannetta tarkasteltava huolellisesti erikseen. Tällaisessa tapauksessa parametrilla saattaa olla huomattavaakin luokituksellista merkitystä.

Laskennallisesti tätä erikoistapausta varten on muodostettavissa parametrikohmainen suure δ^v seuraavasti:

$$\delta^v = \sum (\alpha_i/4)^v$$

jossa α_i on parametrikohmainen rivisolun arvo ja v on matriisin parametrien (diagonaalijäsenten) määrä eli matriisin aste.

Jakajana toimiva luku 4 normeeraa ESQ-asteikon arvot välille [0,1]. Mikäli laskettu δ^v :n arvo on parametrin kohdalla suuri, se merkitsee vahvoja loogisia syy-seuraussuhteita kyseisen parametrin ja systeemin muiden parametrien välillä. Mainittu suure saa miniminsä nollassa ja maksiminsa v :ssä. Sen tarve tuli esille työvaiheparametrien systeemianalyttisessä tarkastelussa, käytän siitä nimeä parametrin hajautuvuusluku.

Luokitusperusteena toimivien parametrien valinta

Luokitusperusteena toimivien parametrien valinta tapahtuu cause-effect-diagrammin tulkinnan perusteella valikoiduista muuttujista valitsemalla. Varsinainen valinta suoritetaan nyt luokituksen erikoissuuntautumistarpeen ehdoilla, eli valitaan sellaiset jatkoon seuloutuneet parametrit, jotka kuvaavat haluttuja ilmiöitä.

Luokituksen perustaminen

Kaivosgeologisen kallioluokituksen perustaminen tapahtuu joko parametrikohmaisella valinnalla, tai kuten tässä tutkimuksessa, valitsemalla ensin pohjaksi tunnettu käytössäoleva luokitusmetodi, johon tehdään muutoksia, poistoja ja lisäyksiä niiden luokitusratkaisujen kohdalle, joissa havaitaan puutteita, virhetulkinnan mahdollisuuksia tai luokitusproblematiikan kannalta merkityksellisiä piirteitä.

Luokitukseen sisältyvien työvaiheiden toteutus

Tutkittavat ja mitattavat ilmiöt

Edettäessä aikajärjestyksessä aloittaen esiintymän löytämisestä tulevat ensimmäisinä parametriedokkaina vastaan louhittavan kiven geologiset ominaisuudet. Niiden arviointi kaivosteknisten ratkaisujen suhteen on monitahoinen ja vaativa tehtävä, johon tässä tutkimuksessa on pystytty syventymään vain asioiden perusluonnetta pohtivalla syvällisyydellä.

Geologiset ominaisuudet ja rakeutuvuus

Kiven geologiset ominaisuudet ovat moninaiset. Niille on kuitenkin olemassa yksi kaivosgeologisen kallioluokituksen vaatimuksia ilmentävä piirre, joka kuvaa kiven ominaisuutta muuttua louhintaprosessissa pienemmiksi osiksi eli fragmentoitua partikkeleiksi. Kutsun tätä ominaisuutta suomeksi nimellä rakeutuvuus. Se kuvaa kiven geologisten ominaisuuksien suhdetta sen rikkoutumisherkyyteen. Rakeutuvuus on suure, joka liittyy kaikkiin eri mittakaavatasoihin ja eroaa arvoltaan eri mittakaavatarkasteluissa saman kiviaineksen kohdalla.

Rikkonaisuustila

Rikkonaisuustilan luonne määräytyy useimmiten sen syntyvän perusteella. Suomen alueella maan pinnalta poisrapautuneen kallioperäkerroksen paksuuden arviot vaihtelevat kymmenestä kahteenkymmeneen kilometriin. Kun tällainen paino on poistunut aiemmin isotrooppisessa jännityskentässä olleen kallioperän päältä, on siihen anisotrooppisen jännityskentän seurauksena syntynyt vaakasuuntaista laattarakoilua (Niini 1968).

Mitä syvemmälle kallioperässä mennään, sitä paksummaksi laatat näyttävät tulevan. Pinnalla olevat laatat katkeilevat lyhyemmiksi yksiköiksi, millä voidaan katsoa olevan yhteys kuutiorakoihin. Rakojen määrä ja kolmiulotteinen suuntautuneisuus ratkaisevat teknisesti onko kyseessä laatta- vai kuutiorakoihin.

Rikkonaisuuden rajaaman homogeenisuusyksikön vaihtelu aiheuttaa saman esiintymän kalliio-osueisiin huomattavaa rakeutuvuusvaihtelua, jolla on ainakin räjäytysteknistä merkitystä. Myös kivilajin rakenne ja esiintymistapa voivat kontrolloida rikkonaisuusvyöhykkeitä.

Rakeutuvuuden vaikutustekijät

Rakeutuvuuden luonne koostuu rakenteellisesti kahdesta ominaisuusryhmästä: endogeenisistä tekijöistä, joihin luetaan mineralogiset ja tekstuurilliset tekijät, sekä eksogeenisistä tekijöistä, joita ovat jännitystila, lämpötila ja kosteus sekä näissä tapahtuvat muutokset. Eksogeeniset vaikutustekijät ovat jo aiheuttaneet

luokiteltavassa kohteessa rakoilua tai heikkousvyöhykkeiden syntyä. Näitä ilmiöitä voidaan yleensä havainnoida kalliopaljastumilla ja louhintakohteilla. Koska ne (kiven rakenne, kallion rakenne, kiven koostumus) ovat myös tutkimuskyselyssä nousseet keskeisesti systeemiä dominoiviksi parametreiksi, on selvää, että ne tulee ottaa mukaan kaivosgeologiseen kallioluokitukseen.

Endogeeniset tekijät ovat selkeästi systeemiä dominoivia parametreja, ne määräävät systeemin tapahtumien kulkua. Ne ovat siis erityisen sopivia luokitteluparametreiksi systeemianalyttiseltä kannalta. Käyttäjien kannalta ne voivat olla kuitenkin liian vaikeita, mikäli käyttö edellyttää polarisaatiomikroskooppitutkimuksia tai mineraalien tunnistusta röntgendiffraktiomenetelmällä.

Rakennetekijöiden kolmiulotteinen jakautuminen

Suurmuodostumissa

Suurmuodostumista malmigeologisesti merkittävimmät ovat syväkivimassiivit (plutonit ja stokit) ja liuskevyöhykkeet. Ensin mainittujen taloudellinen mielenkiinto koostuu primäärimagmaattisista muodostumista ja Greisen-juonista, liuskevyöhykkeiden malmit ovat puolestaan tyypillisesti metamorfisten liuosten maankuoresta remobiloimien alkuaineiden muodostamia mineralisaatioita, jotka ovat erilaisista fysikaalis-kemiallisista syistä uudelleenkiteytyneet ja rikastuneet liuskejaksoihin.

Syväkivimassiiveissa

Syväkivimassiivien rakennetekijät ovat kolmiulotteisesti jakautuneet tyypillisesti differentiaatiosarjoihin, joita edustavat osueet esiintyvät kallioperän maanpintaleikkauksissa järjestyneinä erilaisiin kokonaisuuksiin riippuen massiivin kivilajin koostumuksesta. Happamalla korkean Si-pitoisuuden omaavilla sulilla on taipumus muodostaa erilainen kiven rakenne riippuen paine- ja lämpögradientin suhteellisesta jyrkkyydestä.

Kuten emäksisemmälläkin kivillä, myös graniiteilla esiintyy kiteytymisdifferentiaation ja kontaminaation aiheuttamaa koostumuksellista evoluutiota, joka ilmenee maanpintaleikkauksessa koostumukseltaan erilaisia sulavariantteja edustavien graniittien lähellä toisiaan sijaitsevinä osueina (tiriliitti, biotiitti-sarvivälkegraniitti, biotiitti-graniitti, topaasipitoinen fluoria sisältävä graniitti).

Koostumukseltaan ja rakenteeltaan toinen ääripää intrusiiviluonteisten kivien keskuudessa ovat emäksiset kerrosintrusiot. Emäksinen sula eroaa happamasta sulasta pienemmän viskositeettinsa suhteen. Juoksevassa emäksisessä sulassa kiteet pääsevät helpommin vajoamaan ja liikkumaan konvektiovirtausten mukana maankuoreen tunkeutuneen sulasäiliön sisällä.

Intruusioiden paikalleenasettumisen yhteydessä syntyneet kerrokset ovat eri tutkimusten yhteydessä saaneet monta erilaista syntyselitystä. Rakenteellisia

todisteita erilaisista kerrosten syntyavoista löytyy monilta intruusioilta. Parikkalan kerrosintruusio, jonka alueella on toiminut yhteensä neljä kaivosta, ilmentää erityisesti konvektiovirtausten aiheuttamia sulasäiliön seinille syntyneitä sulan sisällä tapahtuneen sedimentaation tuottamia rakenteita, mm. virtakerroksellisuutta ja kerrallisuutta.

Intruusioille tyypilliset gravitatiivisen differentiaation tuottamat kumulaattikerrokset ovat taloudellisesti erityisen mielenkiintoisia niissä esiintyvien kromiitin, arvosulfidien, platinan ja kullan takia.

Myös kolmatta kerroksellisuustyyppiä esiintyy, kyseessä on ns. Liesegang-ilmiön tuottama oskilloivan kiteytymisen aiheuttama rytmisen kerrosrakenne (Palmén 1997).

Liuskejaksoissa

Liuskejaksoissa esiintyvien malmien päärakennetekijät ovat luonnollisesti liuskeisuus ja kerroksellisuus. Malmigeneettisesti tämä merkitsee arvoaineita liuottaneiden fluidien mahdollisuutta liikkua liuskeisuuden tai liuskejaksossa esiintyvän rikkonaisuuden muodostamassa vyöhykkeessä.

Tampereen liuskejakson serisiittiliuskeessa esiintyvä Oriveden Kutemajärven kultamalmi on erinomainen esimerkki hydrotermisen synnyn omaavasta metamorfisesta malmista. Sen syntytavassa on myös eräitä yhtymäkohtia Greisen-tyyppiseen malminmuodostukseen, vaikkei esiintymästä olekaan löydetty kassiteriittia.

Eri-ikäisissä muodostumissa

Kolmiulotteisten rakennetekijöiden jakautuminen kiviaineksessa karakterisoi myös jossain määrin tiettyihin ikäluokkiin kuuluvia muodostumia. Emäksiset kerrosintrusiot ovat iältään tyypillisesti arkeisia tai varhaisproterotsooisia. Svekofennisen vuorijonomuodostuksen tuottamat kivilajit ovat tyypillisesti vulkaaniseen saarikaarimiljööseen liittyviä kiviä. Vuorijonomuodostuksen jälkeen tapahtunut graniittinen magmatismi on iältään tyypillisesti 1,6-1,7 Ga vanhaa.

Sedimenttikivien osalta voidaan sanoa, että sedimentaatioympäristö ja lähtökivilajiympäristö olosuhteineen (provenanssi) antavat voimakkaan leimansa syntyvälle kivilajille. Koska Suomen sedimenttikivet ovat kuitenkin voimakkaasti metamorfoituneita, ei näistä hienovaraisista primääritekijöistä ole usein jäljellä muuta kuin sedimenttisyntyistä kokonaiskoostumusta ilmentävien metamorfisten indeksimineraalien porfyroblasteja tai niiden pseudomorfeja.

Presvekofennisen pohjan alueella

Arkeisen ja proterotsooisien kallioperämme esiintymisalueella taloudellisesti merkittäviä esiintymiä ovat lähinnä emäksiset kerrosintruusiot. Ne ovat usein asettuneet laajasti maankuoreen esiintyvän arkeisen pohjagneessin päälle. Esimerkkinä tällaisesta esiintymästä voidaan mainita maamme merkittävin metallimalmikaivos, Keminmaan Elijärven kromiittikaivos.

Svekofennidessä

Svekofennisen vuorijonomuodostuksen aikana asettui paikalleen synorogeenisia syväkivimassiiveja (näihin liittyvien rakennetekijöiden kolmiulotteinen jakautuminen on käsitelty jo edellä). Paineen ja lämpötilan nousun aiheuttama metamorfoosi muutti vuorijonomuodostuksen vaikutusalueella vanhempaa kivilajistoa. Metamorfoosin jättämät jäljet esiintyvät mineraaliparageneesien rajaamina vyöhykkeinä eriasteisen metamorfoosin vaikutusalueita ilmentäen. Vulkaanisten ja klastisten sedimenttien kerrosrakenteet ja deformaation tuottama liuskeisuus aiheuttavat svekofennisiin suprakrustisiin (maan pinnalla syntyneisiin) kiviin voimakkaan suuntauksen (Niini 1992c).

Jotunimuodostumissa

Suomen jotunimuodostumista malmigeologisesti merkittävimmät ovat jotuniset ja subjotuniset diabaasit. Paksuihin emäksisiin diabaaseihin liittyy malmipotentialin lisäksi rakennuskivi-intressejä. Juonikivien tunkeutuminen maankuoren läpi on aiheuttanut niille mahdollisuuden kontaminoitua taloudellisesti merkittävistä alkuaineista. Niiden synty tapa aiheuttaa niille tyypillisen rakenteen, jonka vuoksi louhiminen on harvoin taloudellista suuren raakkulaimennuksen takia.

Paleotsooisissa muodostumissa

Paleotsooisia muodostumia esiintyy Suomessa Enontekiön kunnassa, aivan käsivarren norjimmassa kärjessä, ja lisäksi Ahvenanmaan ja Pohjanlahden sedimenttikivissä. Ainoa mainituilla alueilla koskaan toiminnassa ollut kaivos on Vuoksenniska Oy:n 1950-luvulla rakentama Nyhamnin merenalainen rautakaivos, joka sijaitsee Maarianhaminasta nelisen kilometriä etelään. Kyseinen kaivos ei kuitenkaan sekään sijoitu paleotsooiseen kallioperään, eikä siinä sitä paitsi saatu koskaan käyntiin kannattavaa tuotantoa.

Paleotsooisilla kallioperäosueilla ei siis ole tämän hetken tietämyksen mukaan kaivosgeologian-kallioluokituksesta merkitystä Suomessa.

Kvartäärisissä mineraalimaissa

Kvartäärisissä mineraalimaissa esiintyvät malmit ovat tyypillisesti raskasmineraalien paikallisia alluviaalisia tai eluviaalisia rikastumia. Koska mineraalimaat eivät ole kuitenkaan kalliota, ei niillä ole kallioluokituksellista merkitystä.

Kvartäärysten mineraalimaiden malmit ovat Suomessa harvinaisia, ainoat pientä taloudellista potentiaalia omaavat muodostumat ovat Repojoen, Naruskan, Suomun, Luton, Ivalojoen ja Lemmenjoen latva-alueiden upakulta- (placer) muodostumat. Kyseisten muodostumien suurempi kansantaloudellinen merkitys lienee niiden moni-ilmeisessä virkistyskäytössä.

Erilaisissa hyödyntämiskohteissa

Malmiesiintymissä louhintaratkaisuja kontrolloivat siirrokset, malmion muoto ja sortumariskejä tuottavat rakenteet kuten poimut. Avolouhoksen vaatimukset kolmiulotteisten rakennetekijöiden tuntemukselle ovat suppeammat kuin maanalaiselle kalliotilalouhinnalle, jossa louhosten seinämien ja katon pysyvyys on erityisen herkkä tällaisille tekijöille.

Rakennuskivimassiiveissa

Rakennuskivimassiiveissa tyypillisin rakenteellinen problematikka on se, että muuten isotrooppisessa tasalaatuisessa kiviaineksessa suuntautuneita rakenteita esiintyy eri tavoin. Rakennuskiven louhintatyössä kiviaines pyritään irrottamaan kalliosta mahdollisimman eheänä. Rakennuskiven laadun kannalta on edullisinta, että rakenteelliset ominaisuudet ovat erittäin säännöllisiä.

Rakeutuvuutta edistävistä tai anisotrooppisista rakenneominaisuuksista on rakennuskivissä vain haittaa, eikä rakennuskivimassiivien ominaisuuksilla ole näin suoranaista merkitystä kaivosgeologisessa kallioluokituksessa.

Kalliorakennuskohteissa

Kalliorakennuskohteet ovat analogisia suurten louhostilojen kanssa, sillä niille on yhteistä leveän jännevälin vaatimat tukemismenetelmät ja jännityskentän suhteellisen nopea muuttuminen louhinnan ja ajan kuluessa. Kaivostilaa louhittaessa ei tukemistöitä itse louhoksessa ole helppoa tehdä, joten tukeminen on suoritettava ennakoivasti vajjeripultituksella ja/tai muilla sopivilla menetelmillä.

Geologiset ympäristövaikutukset

Louhintakohteen vaikutus ympäristön vedenjohtavuuteen on merkittävä tekijä. Räjätystöiden ja maansiirtotöiden aiheuttamat hetkelliset ja pitkän aikavälin

muutokset vallitsevassa jännityskentässä aiheuttavat muutoksia rakoihin ja muuttavat näin kalliopohjaveden virtausta. Toisin kuin maaperässä, kalliopohjaveden virtaus muuttuu helpommin, sillä kiven sisällä ei esiinny jatkuvaluonteista transmissiviteettia, vaan virtaus tapahtuu yksinomaan rakosysteemejä pitkin. Kun otetaan huomioon kalliotilaa tai kaivosperää ympäröivän lohkaroitumisvyöhykkeen aiheuttama vuotoriskin lisääntyminen, havaitaan että vesi aiheuttaa myös huomattavan turvallisuusriskin.

Pohjaveden pinnan muutokset saattavat aiheuttaa, että kuivana harmittomien rakopintojen siirrosherkyys lisääntyy niiden kastuessa, mikä aiheuttaa myös sortumariskejä. Sortumariskit ovat tyypillisiä myös siirroksissa.

Lohkaroitumisvyöhykkeen hidas deformaatio ja hiipuma

Lohkaroitumisvyöhykkeen hidas deformaatio aiheuttaa ongelmia erityisesti sellaisilla louhintapaikoilla, joissa louhinta on lopetettu ja alue otettu rakennuskäyttöön. Tästä esimerkkinä mainittakoon Outokummun monien lopetettujen kaivosten alueen rakennuskelvottomuus suuren sortumariskin vuoksi (VMY 1992).

Tutkimusmetodiikan kehitys

Tutkimusmetodiikan kehitys tulee ottaa huomioon luokitusta laadittaessa. Selkein yksittäinen tekijä on se, että luokkanimet voidaan tietokoneavusteisessa käsittelyssä helposti ja selvästi erottaa toisistaan. Koska pääasiallisin kehityssuunta viittaa tietokoneiden kasvavaan käyttöön luokituksen apuvälineenä, on luokitusperusteiksi soveltuvien parametrien valinnassa pohdittava myös niiden mittaamisen automatisoinnin mahdollisuuksia konenäköä ja hahmotunnistusalgoritmeja käytettäessä.

Kolmiulotteista avaruuskorrelaatiota hyväksikäyttävät geostatistiset moniaineistomallitukset lisäävät kallioluokitusten käyttömahdollisuuksia myös sinne, missä varsinaista kiviaineksen tarkastelua ei voida suorittaa. Jotta tämä olisi saavutettavissa, on kallioluokitusparametrien oltava yhteensopivia moniaineistomallinnuksen datan kanssa.

Tekniset ominaisuudet eli vaikuttajaominaisuudet

Tekniset ominaisuudet on käsitelty tarkemmin tämän tutkimuksen myöhemmässä osassa työvaiheparametrikohdaisen systeemanalyyttisen tarkastelun yhteydessä.

Terveydelliset ominaisuudet

Terveydelliset ominaisuudet jakautuvat suoralle radioaktiiviselle säteilylle altistumiseen liittyvän harvinaisen terveysriskin lisäksi hiukkasturvallisuuteen ja loughintaturvallisuuteen.

Hiukkasturvallisuus

Louhinnassa räjäytyksen yhteydessä syntyvä pöly aiheuttaa pieninä määrinä hengitysteihin joutuessaan ärsytystä, ja suurempina määrinä silikoosia ja asbestoosia. Pölykeuhkoriskin lisäksi uhkaa kallioperän rakosysteemejä pitkin kalliotiloihin emanoituva radon kalliotilojen käyttäjiä. Radon on mauton ja hajuton radioaktiivinen kaasu, jonka puoliintumisaika on 3,8 vrk. Se hajoaa edelleen lyhytikäisiksi hajoamistuotteikseen, jotka tarttuvat helposti ilmassa leijuviin hiukkasiin, joita hengitysilman mukana joutuu myös keuhkoihin.

Radonia syntyy välituotteena kallioperän uraanin hajotessa radioaktiivisen sarjan mukaisesti lyijyksi. Uraani on rikastunut SiO_2 -rikkaisiin kiviin (kuten graniitit, granodioriitit), joiden läheisyys usein lisää kalliotilojen radonpitoisuuksia. Radonin torjuntakeinona ovat kalliotilojen tiivistys, vuotovesien poispumppaus ja koneellisen ilmanvaihdon tehostaminen. Ilmanvaihtoon kytketty pölynsuodatus vähentää myös muita pölyämiseen liittyviä terveysriskejä.

Silikaattisten kivilajien pölyämisalttius on karkeasti riippuvainen kiven SiO₂-pitoisuudesta. Korkean SiO₂-pitoisuuden omaavat hauraasti deformatuivat kivet pölyävät räjäytyksessä voimakkaimmin, jolloin kallioperästä emanoituvan radonin tytäralkuaineidenkin kulkeutuminen keuhkoihin tehostuu juuri siellä, missä pölyämisen määrä on suurin. Työntekijöiden turvallisuuteen tähtäävät suojatoimet onkin tarkennettava huolellisimmin juuri tällaisissa kaivoskohteissa tapahtuviin työvaiheisiin.

Ns. haittamineraaleja koskevia terveyshaittatekijöitä on käsitelty tarkemmin kohdassa ”edustavien parametrien rajausta”.

Louhintaturvallisuus

Maanalaiset sortumat ovat omiaan tekemään niiden yläpuolisen tilan epävakaaksi; tämä tietenkin haittaa kaivosalueen ja sen ympäristön käyttöä. Tästä syystä erityisen mielenkiintoinen mineraali on helposti sortumia aiheuttava montmorilloniitti, jota on syntynyt pääasiallisesti Mg-rikkaitten kivilajien kemiallisessa rapautumisessa. Maailmalla tämä on paisuvahilaisuutensa ja liukautensa johdosta monikäyttöinen teollisuusmineraali, bentoniitin (kauppanimi) pääkomponentti. Meillä montmorilloniitin esiintyminen merkitsee louhinnallista ja ympäristöllistä haittaa (Niini & Parkkinen 1996); liukautensa, raoissa ja ruhjeissa esiintymisensä ja veden yhteydessä paisumisensa takia se aiheuttaa louhintakohteissa usein merkittävän sortumariskin. Se haittaa myös kiven teknistä käsittelyä huonontaa malmin saantia ja lisäksi rikastushiekan ja siihen karkaavien arvoaineiden määriä.

Maamassojen siirrot ja vettä käsittelevät prosessit aiheuttavat hydrogeologisten olojen muutoksia. Niiden luonnetta, määrää ja vaikutusalueen ulottuvuuksia voidaan kuitenkin ennakoita ja rajoittaa.

Louhintaturvallisuus on keskeisesti prosessin dominoiva asiakokonaisuus. Henkilökunnan kokeneisuus ja ammattitaito ratkaisevat huomioonotettavat sortumariskit ja työskentelyetäisyydet. Koska tieto on lisäksi kokemuspäistä, ei sitä voida ilman erillistä kyselyä sisällyttää kaivosgeologisen kallio-luokituksen parametreihin.

Ympäristölliset ominaisuudet

Louhinnan suunnittelussa on otettava myös huomioon kalliorakentamisen ja louhinnan geologisiin materiaalivaroihin kohdistamat vaikutukset. Tässä avainsanoina ovat hyödyntäminen, tuhlaaminen ja pilaaminen. Olennaista on pyrkiä kokonaisvaltaisella suunnittelulla hallitsemaan pohjaveden saastumisen estäminen, geologisten muodostumien arvokkaiden mineraaliraaka-aineiden käyttörajoitusten minimointi ja sopivan pinnan tai tilan tuhlaamisen välttäminen.

Yhtenä keinona säästää luonnollista pintaa on maanalainen rakentaminen. Tällöin on geologisina vaikutuksina ensin selvítettävä ja otettava huomioon louhittujen kivimassojen sijoitus ja käyttö sekä pohjaveden pumppauksen aiheuttama vaikutusketju: pohjavesipinnan aleneminen, maakerrosten (ja

kaivojen) kuivuminen, kasvillisuuden kärsiminen, pehmeikköjen tiivistyminen ja epätasainen painuminen, pinnan kaltevuuden ja veden virtauksen muuttuminen, sekä perustus- ja putkirakenteiden rikkoutuminen.

Mainittujen haittojen minimoimiseksi tulisi valita paikka, jossa kallio on mahdollisimman vesitiivistä. Samalla todennäköisesti vähenisi louhintakohteen katto- ja ympäristökallion deformatuminen (lohkaroituminen). Valitettavasti louhintakohteen sijaintiin ei voida juurikaan vaikuttaa, eikä malmin louhintapaikkaa luonnollisestikaan voida valita vedenjohtavuuden mukaan.

Tilojen rakentaminen kallion sisään on yleensä pinnallista rakentamista kalliimpaa mutta sopivan pintatilan puutteessa silti edullista, ja maan alla riittävä tilaa monessa kerroksessa. Maanalaisen kalliotilan hyväksikäyttömahdollisuuksien selvittäminen ja soveltuvien konstruktoiden määrittäminen Suomen peruskallion vaihtelevissa geologisissa olosuhteissa riippuu ennen kaikkea hyväksikäytön perustavoitteesta (Niini 1971), joka voi olla

1. pääsy kallion läpi tai kallionsisäiseen kohteeseen (malmioon tai kalliotilaan),
2. tilantarpeen tyydyttäminen (taloudellisista tai esteettisistä syistä),
3. turvallisuuden hankkiminen,
4. maansisäisen lämmön hyväksikäyttö,
5. riittävien korkeuserojen aikaansaaminen,
6. kiviaineksen otto kallioista,
7. syvällä olevan kalliokohdan tutkiminen itse paikalla (tutkimusperä tai -kuilu).

Lukuun ottamatta kaivostiloja jakautuvat maanalaiset tilat kahteen päätyyppiin, pitkiin kalliotiloihin kulkua tai kuljetusta varten ja leveisiin kalliotiloihin ihmisten, materiaalin tai prosessien sijoitusta varten, ja niiden geologiset edellytykset ovat erilaiset vaatien eriluonteisia tutkimuksia.

Raakun hyödynnettävyys

Raakun hyödyntäminen tapahtuu pääosin tie- ja maarakennuksessa käytettävänä murskeena. Murskeen hyödynnettävyys on kiinni raakun kemiallisesta kestävydestä (sulfidipitoisuus, karbonaattipitoisuus), murskattavuudesta, raekokojakaumasta (pölyävyys) ja kemiallisesta myrkyllisyydestä. Edellä mainitut seikat vaikuttavat myös raakun varastoitavuuteen ja läjitettävyyteen.

Kiisupitoisten mustaliuskeiden kohdalla on huomattava, että vaikka ne ensi tuntumalta ajatellaan huonoiksi murskekiviksi, muodostaa kiisu hyvin tiiviin iskoksen esimerkiksi tiepohjassa. Tällaisen tiepohjan alttius päästää haitallisia aineita pohjaveteen on kuitenkin merkittävä.

Yksi louhitun sivukiven ja cutoffin (taloudellisen rajapitoisuuden) alittavan isäntäkiven (raakun) hyödyntämismuoto on sen käyttäminen louhostilojen täytekivenä. Louhitun kiven tilavuus kasvaa tiiviiseen luonnontilaiseen kallioon nähden 1,5–1,8-kertaiseksi räjäytyksen ja hienonnuksen yhteydessä. Näin täytekiviainesta jää aina kaikilla kaivoksilla reilusti yli täyttötarpeen.

Avolouhoksilla ja rakennuskivilouhimoilla ei täytekiveä käytetä, jolloin louhittu raakku tai rakennuskivilouhimoiden räappi ja sivukivi jäävät joko läjitykseen tai murskekäyttöön. Joissakin tapauksissa on läjitetystä raakusta myöhemmin tullut malmia. Tällaisen tapahtuman ennustettavuus on hyvä, ja se tulisi huomioida raakun läjityksessä ja kiven kaivosgeologisessa luokittelussa.

Maisemoitavuus

Nykyinen ympäristölainsäädäntö määrittelee kaivospiirin haltijalle kaivospiirin loppuessa maisemointivelvoitteen. Maanalaisen kaivoksen kohdalla tämä tarkoittaa paikalle rakennetun infrastruktuurin (murskaamo, rikastustehdas) purkamista ja raakun läjitysalueiden ja rikastushiekka-altaiden maisemointia. Useimmiten kiven laadulla ei ole maisemoitavuuteen suurta merkitystä. Maisemoinnissa on kuitenkin huomioitava myrkyllisyysnäkökohdat ja pintatopografian vaikutus pinta- ja pohjavesien liikkeisiin.

Hyvin myrkyllisessä ympäristössä kasvisto valikoituu voimakkaasti, mikä vaikuttaa maisemoitavuuteen. Esimerkkitapauksena voidaan mainita Kiskon kaivos, jonka raakkukasat hapettuvat edelleenkin pintavesien huuhtomina ilman minkäänlaista kasvipeitettä.

Mikäli geologinen ympäristö sen sallii, voidaan murskaamo ja rikastustehdas rakentaa kallioon, jolloin päästöalttius laskee ja pölyhaitatkin jäävät pienemmiksi.

Avolouhosten maisemoitavuus perustuu paljolti siihen, että louhinnan loputtua ne täyttyvät vedellä. Koska avolouhinnassa joudutaan syvälle mentäessä louhimaan huomattava määrä sivukiveä, on syntyvän louhoksen tilavuus suurempi kuin maanalaisessa louhinnassa, joten se on vaikeammin täytettävissä kuin maanalainen louhos. Avolouhoksien reservimalmivarat jäisivät täytön jälkeen vaille hyödyntämismahdollisuutta, mikä olisi kansantaloudellisesti epäedullista.

Useissa Suomen kaivoksissa on louhinta aloitettu avolouhoksena ja vasta riittävän syvälle mentäessä siirrytty maanalaiseen louhintaan (Outokumpu, Pyhäsalmi, Elijärvi, Hitura). Tämä tuo maisemoitaessa esiin yhdistelmäproblematiikan, jossa molempien louhostyyppien ongelmat täytyy ottaa samanaikaisesti huomioon. Myös Outokummun lukuisat lopetetut kaivokset ovat tuottaneet merkittävän sortumariskin, joita on tutkittu tarkemmin (Mäkelä 1992). Outokummun sortuma-alttiille alueille on esitetty rakennuskieltoa, joten maisemoitavuusaspektilla on myös turvallisuusmerkitys, eikä pelkästään esteettistä merkitystä. Erään lisämerkityksen asialle tuovat ns. suhdannekaivokset, joiden myöhäisempi turvallinen avaaminen voi olla tarpeen kaivoksen tuottaman arvometallin maailmanmarkkinahinnan noustessa. Tästä esimerkkinä mainittakoon Hituran kaivoksen uusi avaaminen vuoden 1999 syyskuussa.

Jälkiseurannan toteutettavuus

Tuotannon loputtua on suoritettava kaivoksen jälkihoito, jonka optimaalinen ennakoiminen edellyttää investointeja jo ennen kaivoksen sulkemista. Tällöin painottuvat erityisesti ympäristö- ja hydrogeologiset tutkimukset. Edellyttäen että jo tuotannon aikana asianmukaisesti eritellään potentiaaliset sivu- ja jäämätuotteet ja huolehditaan niistä haaskausta välttäen, voidaan kaivoksen jäljelläolevan omaisuuden myymisestä saada sievoinen loppuhuipennus kassavirralle (Niini & Parkkinen 1995).

Jälkiseurannan toteutettavuus on riippuvainen prosessin onnistumisesta ja onnistuneesta alasajosta. Jos kaivoksen tuotantovaihetta seuraavan jälkihoidon vaatimukset on huomioitu asianmukaisesti, on jälkiseuranta hyvin toteutettavissa. Jälkiseuranta ei prosessin dominoimana parametrina sovellu luokitusperusteeksi.

Parametrien priorisointi

Parametrin muiden ominaisuuksien lisäksi sille tulee määritellä prioriteetti, joka kuvaa mille taholle tai tahoille parametri on tärkeä. Priorisoinnissa huomioonotettavia tahoja on neljä:

1. parametrien ominaisuudet,
2. käyttökohde (nominaaliparametri),
3. käyttäjäkunta,
4. taloudelliset vaatimukset.

Parametrien ominaisuudet on priorisoinnissa otettava huomioon lähinnä saatavuuden ja käytettävyyden kannalta, käyttökohde soveltuvuuden kannalta, käyttäjäkunta käytettävyyden ja ymmärrettävyyden kannalta ja taloudelliset vaatimukset taloudellisen toteutettavuuden kannalta. Tämä voidaan esittää pelkistetysti Hudsonin vuorovaikutusmatriisina:

Parametrien saatavuus ja käytettävyys	3	3	4
4	Luokituksen käyttökohde	3	4
2	0	Luokituksen käyttäjäkunta	0
4	4	2	Taloudelliset vaatimukset

Mainitut seikat on siis arvioitava kokonaisvaltaisesti jokaisen luokitteluparametriedokkaan soveltuvuutta tutkittaessa. Koska tuotantoprosessi pyrkii taloudellisesti positiiviseen tulokseen, ovat taloudelliset vaatimukset huomattavan dominoivassa asemassa.

Parametrien tarkastelulähtökohdat

Parametreja voidaan tarkastella useista eri lähtökohdista. Kuten kaikki muutkin objektit, nekin voidaan jakaa luokkiin. Eri tarkastelulähtökohtien mukaan parametrit voidaan luokitella niiden ominaisuuksien perusteella. Luokat eivät ole kuitenkaan toisiaan poissulkevia, vaan päällekkäisyyttä ja riippuvuutta esiintyy eri luokkien kesken. Eräitä tällaisia parametriluokkia ovat

1. kokemusperäisesti tunnetut geologiset rakennepiirteet ja tunnistusominaisuudet,
2. kallioperän statistisen tarkastelun tuottama tieto,
3. tekniset parametrit (työvaiheparametrit, vaikutusominaisuudet),
4. kivilajiparametrit,
5. kallioparametrit,
6. fysikaaliset parametrit,
7. kemialliset parametrit,
8. muut parametrit.

Valittaessa RES-matriisiin sopivia diagonaalijäseniä on pyrittävä suorittamaan parametrien luokkajako siten, että luokkien unioni kattaa mahdollisimman suuren osan koko parametrivalikoimasta, ja toisaalta siten että valituissa parametriluokissa on mahdollisimman vähän päällekkäisyyttä.

Parametrisointi

Parametrisoinnilla tarkoitetaan parametrisoitavan ilmiön mittarin valitsemista, eli sellaisen parametrin valitsemista, joka ottaa huomioon luokituksen asettamat vaatimukset. Luokituksen perustamisedot asettavat parametrisoinnille tiettyjä vaatimuksia ja reunaehtoja.

Parametrisoinnille asetettavat vaatimukset

Parametrisoinnille asetetut reunaehdot jakautuvat neljään eri ryhmään: parametrin toivottuihin ominaisuuksiin, käyttäjäkunnan asettamiin vaatimuksiin (rajoituksiin), käyttökohteiden asettamiin rajoituksiin ja yleisiin (taloudellisiin) vaatimuksiin. Nämä seikat on otettava kokonaisvaltaisesti huomioon parametrikohteisessa soveltuvuustarkastelussa.

Parametrin ominaisuudet

Jotta parametri olisi hyödynnettävissä, on sen oltava vaivattomasti käytettävissä. Sanomme että parametrillä on hyvä saatavuus. Tästä ominaisuudesta täysin riippumaton on puolestaan parametrin soveltuvuus kyseisen ilmiön mittaamiseen. Soveltuvuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä samaa kuin

edustavuudella, käsitettä joka kuvaa kuinka hyvin parametri korreloi tarkasteltavan ilmiön kanssa.

Parametrin riippumattomuus on puolestaan kaksitahoinen asia: jos parametri on täysin riippumaton, sitä voidaan käyttää luokitukseen sellaisenaan, eikä sen ilmaisemaa informaatiota tarvitse ottaa huomioon muita parametreja valittaessa. Mikäli parametrilla on kuitenkin riippuvuus- tai korrelaationsuhde toiseen parametriin, sitä voidaan käyttää kyseisen parametrin tilalla luokittelussa. Tällainen tulee kyseeseen erityisesti silloin, kun toisen parametrin saatavuus on parempi.

Parametrin ilmaisukyky ja tarkkuus ilmaistaan resoluutiona. Resoluutio kuvaa parametrin ilmaisukyvyn ylärajan, jonka riittävyttä luokitustarkoitukseen on erikseen arvioitava jokaisen luokitusparametrin osalta erikseen. Samoin on arvioitava resoluution suhdetta saatavuuteen, sillä joidenkin parametrien resoluution kasvattaminen saattaa heikentää niiden saatavuutta.

Mitta-alueen ulottuvuudet

Detalji on pienin mitta-alue mille jakautunutta ominaisuutta voidaan ilmaista parametrilla. Tyypillinen detaljimittakaavainen parametri on mineraalirakeen koostumuksellinen tai muotoon liittyvä ominaisuus.

Suurempaan mitta-alueeseen siirryttäessä detaljien muodostamasta ryhmästä syntyy osue. Osueihin kohdistuvat parametrit esittävät tyypillisesti kivilajille tyypillisiä ominaisuuksia.

Kun siirrytään kivilajiominaisuuksia mittaavien osueiden muodostamaan suurempaan kokonaisuuteen puhutaan kallio-ominaisuuksista. Tällaisia ominaisuuksia kuvaavat parametrit ovat tyypillisesti suurimittakaavaisia rakenneominaisuuksia.

Geofyysikot ja kallioteknikot käyttävät myös mittakaavakäsitettä REV (Representative Elementary Volume), jolla tarkoitetaan tilavuudeltaan suurta kallion homogeenisuusyksikköä (Niemi 1994).

Asteikkotyyppi

Jokaisen mitattavan tai arvioitavan suureen mittaus- tai arviointituloksella eli arvolla voidaan ilmaista erilaisilla asteikoilla. Asteikolla parametrin erilaisten arvojen tulisi erottua toisistaan selkeästi, joten jokaiselle parametrille on yleensä löydettävissä sille esitystavaltaan sopivin asteikko. Luokituksissa yleisimmin käytettävät parametrit jakautuvat ordinaali- ja nominaaliparametreihin.

Ordinaaliasteikko

Ordinaaliparametrit ovat luonteeltaan lukuarvoja, esim. mittaustuloksia. Ne esiintyvät asteikolla siten, että arvojen välimatka on lineaarisessa suhteessa

niiden arvojen erotukseen. Ordinaaliasteikon ei tarvitse alkaa nolasta, vaan sen päätepiisteet voidaan skaalata edustamaan haluttua arvoa asteikon ilmaisukyvyn parantamiseksi.

Kardinaaliasteikko

Kardinaaliasteikolla järjestys ilmaisee suuruusjärjestystä, mutta arvojen välimatka ei kerro kahden arvon erotusta. Tyypillinen kardinaaliasteikko on kilpailun tuloslista.

Relatiivasteikko

Relatiivasteikko on logaritmisesti skaalattu ordinaaliasteikko. Seuraava suurempi arvo on skaalaustekijän logaritmin kantaluvun yhtä yksikköä suurempi potenssi kuin edellinen. Tällaisesta asteikosta esimerkkiä mainittakoon DIN/ISO-asteikko filminherkkyyksien yhteydessä (Jacobsson & Jacobsson 1976).

Nominaaliasteikko

Nominaaliparametrit puolestaan ilmaisevat (ovat arvoiltaan) luokkia joilla ei ole keskinäistä suuruus- tai järjestyssuhdetta, vaikka niillä joku muu suhde voisi ollakin. Esimerkiksi magmakivet, sedimenttikivet ja metamorfiset kivet ovat nominaaliluokkia jotka muodostavat nominaaliparametrin. Nominaaliluokat voidaan useimmiten jakaa lukuisiin alaluokkiin.

Käyttäjien asettamat vaatimukset

Kaivosteknisten kallio-ominaisuuksien selvittäminen ja huomioonottaminen louhintateknisessä tuotantotyössä on usean eri henkilön vastuulla. Selvittämisessä päävastuullisena on usein kuitenkin kaivosgeologi ja kallio-ominaisuuksien huomioonottaminen puolestaan kuuluu suunnittelu- ja käyttöinsinööreille. Geologien ja insinöörien työnjohdollisen yhteistyön onnistuminen on siis prosessin kaikinpuolisen oikean toteutumisen kannalta tärkeää.

Mahdollisena vaarana on, että geologin ja insinöörin erilaisen peruskoulutuksen takia kaivostekniset ominaisuudet eivät saa riittävää huomiota tai osuutta yhteistyössä. Vielä yleisemmin esiintyvä hankaluus on se, että kaivosteknisesti relevanttia tietoa saadaan rutiininomaisen tiedonhankinnan yhteydessä, mutta tieto tulee suunnittelun kannalta liian myöhään ilmi (VMY 1988).

Jotta luokitus olisi soveltuva sekä tuotantoportaiden että työnjohdon yhteistyön suhteen, ei luokituksessa saa olla liikaa parametreja. Parametrien on oltava saavutettavissa ja käsiteltävissä taloudellisesti tietotasoltaan ja orientoitumiseltaan vaihtelevan käyttäjäkunnan keskuudessa. Tämän vuoksi

kaivosgeologisen, kuten minkä tahansa muunkin luokituksen, käyttökoulutuksen on tultava käyttäjän tiedon tasolle.

Käyttökohteiden asettamat vaatimukset

Luokituksen käyttökohteet asettavat harkittavaksi eräitä parametriedokkaita. Eräiden työvaiheparametrien luonne on erilainen riippuen siitä, onko kohde avolouhos vai maanalainen kaivos.

Myös kohteen arvometallien esiintymistapa vaihtelee kaivoskohtaisesti, esimerkkinä mainittakoon Suurikuusikkometsän vielä hyödyntämätön kultamalmi, jonka kulta esiintyy suurelta osin kullan yhdisteinä (auraatit ja telluridi). Vastaavasti Kutemajärven ja Pahtavaaran kultamalmeissa kulta esiintyy enimmäkseen metallisena.

Malmikiven ja sivukiven kontaktityyppi on kaivos- ja esiintymäkohtaisesti vaihteleva parametri. Samassa esiintymässä on usein useita kontaktityyppejä.

Yleiset vaatimukset

Kallioluokituksen helppous, nopeus, sujuvuus ja ymmärrettävyys tukevat kaikki luokituksen ehdottoman ensisijaista vaatimusta ekonomisuutta, jonka pitää toteutua tuotannossa vähintään pitkällä aikavälillä. Jotta pitkän aikavälin muutokset luokittelussa ovat mahdollisia, vaaditaan luokitukselta myös dynaamisuutta, kykyä sopeutua nopeisiin muutostarpeisiin.

Parametrien systeemianalyttinen tarkastelu

Geologiset parametrit (rakeutuvuus)

Kallion rakennusgeologiset erityispiirteet

Kivilajiominaisuudet ja kallio-ominaisuudet

Kivilajiominaisuuksille ja kallio-ominaisuuksille ovat yhteismitallisia seuraavat viisi seikkaa:

1. anisotropia,
2. kerroksellisuus ja liuskeisuus,
3. heterogeenisuus,
4. perän rikkonaisuus ja stabiilius,
5. lujuusrakenteen pysyvyys.

Kivilaji- ja kallio-ominaisuuksien ero

Kallioperän teknisesti tärkeitä parametreja yritetään usein mitata itse paikalla suoritettavilla niin sanotuilla in situ -kokeilla. Ne ovat työläitä, koska ne yleensä vaativat pääsyä kallion sisään (kairausrei'in tai louhittavin sisäänmenoin). Helpompaa ja halvempaa on käyttää epäsuoria menetelmiä, joissa ominaisuudet mitataan laboratorioon tuoduista edustavista näytteistä tai lasketaan tunnettujen tai johdettavien korrelaatioiden avulla geofysikaalisista mittauksista (Peltoniemi 1988). Lähinnä kallion luonnollisen rikkonaisuuden vaikutuksesta kallion tekniset ominaisuudet eroavat kuitenkin kivilajien vastaavista ominaisuuksista (Niini 1998); ero riippuu suuresti tarkasteltavan kallio-osueen koosta ollen yleensä sitä suurempi, mitä enemmän osueeseen mahtuu heikkouselementtejä rakoilua, rapautuneisuutta ja liikuntojen synnyttämää breksiaa (välimassan sitomaa murskaleita sisältävää kiveä).

Miten kukin kallion ja vastaava kivilajin ominaisuus poikkeavat toisistaan, riippuu ominaisuuden luonteesta. Tässä suhteessa ominaisuudet voidaan karkeasti luokitella kolmeen ryhmään (Niini op. cit.), joissa

1. kivilaji- ja kallio-ominaisuus ovat lähellä toisiaan,
2. kallio-ominaisuuden arvo on kaukana vastaavasta kivilajiominaisuudesta mutta omaa siihen tietyn korrelaation,
3. kallio-ominaisuudella ei ole lainkaan korrelaatiota kivilajiominaisuuteen.

Ensimmäisen ryhmän kallio-ominaisuudet on suhteellisen luotettavasti johdettavissa laboratoriossa mitatuista kivilajien ominaisuuksista, kunhan otetaan tarkasti huomioon itse kivilajien vaihtelu kyseisessä kallio-osueessa.

Toisessa ryhmässä kallio-ominaisuuden arvoon vaikuttavat painottuneesti puhtaiden kivilajiosueiden välisten epäjatkuvuusosueiden suuresti erilaiset arvot; korrelaation luonnetta valaisee karkeasti analogia "ketjun lujuus riippuu sen heikoimmasta lenkistä".

Kolmas ryhmä puolestaan käsittää ominaisuudet, joiden osalta kivinäytteen mitassa ja toisaalta luonnollisessa kallio-osueessa vaikuttavat perusilmiöt ovat fysikaalisesti aivan eri ilmiöitä. Esimerkiksi kivessä vetolujuus riippuu mineraalien keskinäisistä ja sisäisistä kiinteistä sidoksista mutta kallio-osueessa nimenomaan jo valmiiksi vetolujuudettomien rakojen esiintymisestä. Jännitystila puolestaan "hellittää", kun kallioista irrotetaan pieni kivinäyte vietäväksi laboratorioon. Vedenjohtavuus on kivessä mineraalirakeiden välisen huokoisuuden funktio, kun taas kallion (paljon suurempi) vedenjohtavuus riippuu ennen kaikkea toisiaan leikkaavista rakosysteemeistä.

Anisotrooppiset ominaisuudet

Anisotropia merkitsee, että kallion ominaisuudet ovat suunnasta riippuvia; epähomogeenisuus puolestaan tarkoittaa, että kallion eri kohdissa sen ominaisuudet ovat erilaisia. Nämä usein epäsäännöllisiltä ja kallion hyötysovelluksissa epäedullisilta vaikuttavat vaihtelut ovat Suomen kallioperälle erittäin luonteenomaisia ja siksi tärkeitä selvittää yritettäessä hyödyntää kalliota

ja käyttää hyväksi sen ominaisuuksia. Tällainen ominaisuuksien vaihtelu kytkeytyy luonnollisesti kallioperän geologisissa syntyprosesseissa ja monivaiheisen kehityshistorian aikana muotoutuneisiin rakenteisiin. Tärkeitä anisotrooppisia ominaisuuksia ovat puristus-, veto- ja leikkauslujuus, muodonmuutosominaisuudet voiman suhteen (puristuvuus, venymä ja kimmomoduuli), veden-, lämmön- ja sähkönjohtavuus sekä seisminen p-aallon (kimmoaallon eli äänen) nopeus.

Kun halutaan määrittää kallio-osueen anisotropia, on aina ensin tarkkaan selvitettävä sen suuntautuneisuuden perusluonne niin rakennuskohteen mitassa kuin mikroskooppisessa kivilajiskaalassa. Sen jälkeen on suoritettava suuntauksen mittaamista itse paikalla sekä siihen kytkeytyvien vaikutusominaisuuksien (kuten erilaiset lujuudet, porattavuus, irtoavuus ja luiskien pysyvyys) arvojen määrittäminen useissa eri suunnissa.

Anisotropialla on kolme osaparametria:

1. dimensio (1- tai 2-ulotteinen),
2. intensiteetti (= suuntautuneen ominaisuuden minimi- ja maksimiarvojen erotuksen itseisarvo) ja
3. asento kiinteässä kolmiulotteisessa koordinaatistossa.

Tunnetuissa geologisissa rakenteissa kallion anisotropia voi ilmetä neljällä eri tavalla:

1. sedimenttikivilajien alkuperäisenä, lähes vaakasuorien patjojen muodostamana tasosuuntauksena, kerroksellisuutena,
2. magmakivien alkuperäisinä tiheinä yhdensuuntaisina koostumus- tai rakennevaihteluina (Raitala 1997),
3. sedimentti- tai magmakivimuodostuman metamorfoosissa mineraalirakeiden suuntautumisena niiden kiteytyessä suunnatussa paineessa ja tekstuurin (kutouksen) muokkauksessa plastisessa deformaatioissa liuskeiseksi. Tähän anisotropiaryhmään kuuluvat deformaatiokivilajit kuten pseudotakylitti, kataklasiitti ja myloniitti.
4. Kallion rakoiluna.

Matemaattisesti ilmaisten kallioperän anisotropia tarkoittaa, että kallion jokin ominaisuus on vektoriominaisuus (Niini op. cit.); anisotropiaa on myös minkä tahansa skalaari- (eli suunnasta riippumattoman) ominaisuuden gradientti (muutos matkaa kohden), joka vaihtelee suunnan mukaan; tällainen anisotropia esiintyy kivilajiosueiden kontaktiyöhykkeillä. Anisotrooppinen ominaisuus saa yleensä ääriarvon yhdessä suunnassa (pyörähdysakseli) ja toisen ääriarvon kaikissa sitä vastaan kohtisuorissa suunnissa, mistä johtuen anisotropia voi olla pyörähdysymmetristä.

Anisotropia voi myös ilmetä moninkertaisena matemaattisena (tensori)käsitteenä (Niini op. cit.); esimerkkinä jännitystila, jossa jokaisella viivasuunnalla (vektorilla) on oma suhteensa jokaiseen erisuuntaiseen tasoon nähden, ja siihen liittyvä leikkauslujuus, joka vaihtelee sekä potentiaalisen leikkaustason että voimavektorin suunnan mukaan; kunkin erisuuntaisen tason kussakin vektorisuunnassa leikkauslujuus vaihtelee lisäksi riippuen tasoa vastaan

kohtisuorassa vaikuttavasta voimasta. Kallion anisotropiarakenteiden merkitys tilojen suunnittelulle on kahdenlainen. Yhtäältä vaikuttaa kallion lujuusominaisuuksiin (ja siis työtekniikkaan) anisotropian voimakkuus, toisaalta sen suunta suhteessa muihin rakenne- ja ympäristön suuntiin.

Suuntautuneisuus vaihteluineen (poimurakenteineen) on merkittävä siksi, että se ilmentää geologisten piirteiden ja samalla louhintateknisten ominaisuuksien alueellista jatkuvuutta (Niini 1998); tällä puolestaan on suuri merkitys niille laaja-alaisille kallioperätutkimuksille, joiden perusteella lyödään lukkoon louhintakohteen edullisin sijoituspaikka. Pienemmässä mitassa eri suuntien keskinäinen suhde vaikuttaa itse louhintakohteessa sekä työtekniikkaan, että yksityiskohtaisten konstruktioiden suuntaukseen.

Kerroksellisuus ja liuskeisuus

Anisotropia-rakenteista kerroksellisuus ja liuskeisuus vaikuttavat kallion hallittavuuteen ilmentämällä kallio-osueiden yleistä suuntaa ja heikentämällä kiviaineksen keskimääräisiä lujuusominaisuuksia (Niini 1998); Suomen voimakkaasti metamorfisissa liuskekilajilajeissa ja gneisseissä on liuskeisuus useimmiten joko yhdensuuntainen alkuperäisen kerroksellisuuden kanssa, tai niin voimakkaasti kallion aikaisempia rakenteita deformatiivisesti, että se hallitsee olennaisesti kallion suuntausominaisuuksia. Koska lisäksi anisotropiarakenteet vaikuttavat aina kallion muodonmuutosominaisuuksiin, vaikuttavat ne myös huomattavasti itse kalliotilakonstruktioiden aiheuttaman kallion sekundaarisen jännitystilan pitkäaikaiseen kehittymiseen.

Emäksisten kerrosintruusioiden eräät kerrostyypit vaikuttavat kiven kestävyys- ja louhinnallisiin ominaisuuksiin huomattavasti vähemmän kuin sedimenttikivien kerrosrakenteet. Primäärimagmaattisen kerroksellisuuden merkitys malmikaivoksissa korostuu erityisesti Kemin Elijärven kromiittikaivoksella, Mustavaaran jo suljetulla vanadiinikaivoksella ja useilla Pohjois-Suomen platina-aiheilla, jotka sijaitsevat kerrosmaisina horisontteina kerrosintrusioissa.

Poimuttuneisuus

Kallion suuntautuneisuuden säännöllisyys vaikuttaa merkittävästi sen työstettävyyden ja pysyvyysominaisuuksiin. Suuntaus voi olla sama laajalla alalla, jolle mahtuvat kaikki suunnitellun kalliotilan eri sijoitusvaihtoehdot. Suuntausrakenteet ovat kuitenkin yleensä poimuttuneet siten, että suuntaus on erilainen eri kohdissa. Poimutuksen akselisuunta on yleensä sama kuin liuskeisuuspinnoilla mahdollisesti esiintyvä viivasuuntaus (lineaatio).

Haluttaessa erikseen tietää paljastumattomalle kohdalle rakennettavan kalliotilan ominaisuudet on selvittävä poimurakenteiden koko ja säännöllisyys ympäristön kalliojaljastumista. Tämä on vaikeaa, jos poimutus on tiheää ja epäsäännöllistä, kuten on monin paikoin Suomessa yleisten graniitti- ja pegmatiittipahkujen yhteydessä, joiden reunaosat ovat kivisulan paikalleentunkeutumisen aikana murskanneet ja temmanneet mukaansa (breksioineet) sivukiveä sekä väännelleet

liuskeisia sivukiviä. Poimuttuneisuus on seurausta kallioperän voimakkaasta pitkäaikaisesta puristuksesta. Näin ollen se osoittaa myös, kuinka anisotrooppinen kolmiakselinen jännitystila kykenee deformaamaan kallioperää tulevaisuudessakin.

Heterogeenisuus

Riippumatta kallion suuntautuneisuuden vaihtelusta sen homogeenisuus voi vaihdella suuresti. Yleensä vaihtelu on ainakin jonkin ominaisuuden suhteen niin tiheätä, että muutamaa kymmentä metriä laajempia homogeenisia osueita on vaikeaa löytää. Kallion tyypillinen heterogeenisuus onkin nähtävissä sekä koostumusosueiden että rikkonaisuuden yleensä suurena vaihteluna kaikissa mahdollisissa mittakaavoissa.

Karakterisoitaessa kallion heterogeenisuutta on syytä ensin määrittää rakennushankkeen tavoitteen ja kohteen suhteen mielekäs toleranssi eli sallittava vaihtelu ja sen jälkeen mitata täten homogeenisen kallio-osuuden ulottuvuudet; muoto ja asento. Kallion pintaosassa, jossa vaakasuorahko laattarakoilu on yleistä ja melko tiheätä, myös vaihtelu on tiheähköä, ts. homogeenisuusosueet ovat yleensä sangen pieniä (Niini 1974); niiden ulottuvuuksien suuruusluokka on enimmäkseen vain kymmenistä satoihin metrejä. Syvemmällä, mihin pintatopografian pienpiirteisistä vaihteluista riippuva tiheä rakoilu ja pinnallinen rapautuneisuus vain poikkeuksellisesti ulottuvat, homogeenisuusosueet ovat käytännöllisesti ottaen huomattavasti suurempia.

Kallioperän rikkonaisuus ja stabiilius

Kun kallioperä alkoi sada kiinteän olomuotonsa pari - kolme vuosimiljardia sitten, syntyi siihen samalla kolmiakselialinen jännitystila. Aika ajoin jokin jännityskomponentti ylitti kallion lujuuden vastaavassa suunnassa, jolloin kallio murtui. Jo kuumen kallioperän ensimmäistä kertaa jäähtyessä alkoi syntyä rakoilua, mutta varsinainen tektoninen rikkonaisuus on kuitenkin yhteydessä maankuoren laattojen myöhempiin liikkeisiin ja poimutukseen, joihin liittyy aina joissain kohdissa myös maanjäristyksiä ilmeneviä siirrosliikuntoja (Niini 1998); myös pelkkä maanpinnan eroosioon liittyvä jännitystilan muutoskin aiheuttaa vähin erin lisää rakoja ja siirroksia kallion hauraaseen pintaosaan.

Kallion jännitystila vaikuttaa edelleenkin rikkoutumisriskinä kallionkäsittelyssä. Etenkin leikkausjännitysten kasvu ja vetojännitysten syntyminen saattavat geologisista seikoista riippuen lisätä kiven säröilyä kalliotilojen pinnan lähellä jolloin kallio lohkaroituu. Tämä voi johtaa sortumiin sekä erityisesti rakoilun vedenjohtavuuden kasvuun. Mittakaavan puolesta kallion rikkonaisuus on tarkoituksenmukaista jakaa neljään suuruusluokkaan (Niini & Parkkinen 1995):

1. alueellinen ruhjetektoniikka, joka käsittää laajoja alueita lävistävät kymmenien ja satojenkin kilometrien pituiset siirros- ja ruhjevyöhykkeet ja joka vaikuttaa erityisesti kalliotilojen sijoituksen alustavassa suunnittelussa,

2. paikallisrikkonaisuus, joka käsittää yksittäiset ruhjeet ja siirrokset sekä rakotihentymät, ja jonka tuntemusta tarvitaan eritoten tilojen yksityiskohtaisessa suunnittelussa,
3. kohteen rakoilu, joka käsittää työkohteen, esimerkiksi seinän tai katon, rakoilupiirteet vaikuttaen määrällään ja varsinkin suunnallaan kohteen lujuus- ja pysyvyysominaisuuksiin,
4. mikrorakoilu, joka käsittää ehjännäköisten lohkojen sisäisen rakoilun voiden aiheuttaa kivelle taipumuksen lohkeilla helposti tiettyyn suuntaan eli muodostaa niin sanotun lustan.

Kallion lujuusrakenne on inhimillisesti katsoen varsin pysyvä. Silti tietyt geologiset ilmiöt saattavat muuttaa sitä pitkällä aikavälillä. Nekin on otettava huomioon, kun suunnitellaan kalliotiloja pitkäikäisten radioaktiivisten jätteiden loppusijoitusta varten. Näistä geologisista ilmiöistä tärkeimmät ovat seuraavat kolme (Niini 1998):

1. kallioperän tektoninen rikkoutuminen,
2. vesipintojen (merenpinnan) suhteelliseen laskuun liittyvä eroosio,
3. vertikaaliliikuntoihin kytkeytyvä pohjaveden painegradientin kasvaminen.

Kalliotilan rakentamisen aiheuttamat pienetkin jännityskenttämuutokset, toisin sanoen jännitystilän sekundaarimuutokset, voivat tietyissä kalliorakenteissa johtaa sarjaan pitkäaikaisia ja riskialttiita kallion deformaatioita. Tällöin myös keskeinen kriteeri vedenjohtavuus voi muuttua vaikutuksiltaan negatiiviseen suuntaan. Näistä syistä on pitkäikäiseksi aiotun kalliotilan sijoitus pyrittävä valitsemaan minimoiden kallion geologiseen lujuusrakenteeseen liittyvät riskit. Suomen kallioperässä on kuitenkin kohtuullisen hyvät mahdollisuudet tähän minimointiin.

Tutkimusvaiheet ja kallion hyödyntäminen sekä niihin liittyvät tekniset parametrit

Yksittäisen kallioteknisen hankkeen eri vaiheissa on painotettava eri tekijöitä eri tavoin; tutkimusten kuusi perättäistä päävaihetta ovat suunnitelmien ja niiden tavoitteiden mukaan seuraavat (RIL 1976):

1. hanketutkimus, joka keskittyy yleisen toteutettavuuden selvitykseen,
2. paikanvalintatutkimus, jossa eri muodostumien vertailut ovat keskeisiä,
3. kohteen detaljitutkimus, joka kattaa myös ympäristövaikutusten arvioinnin; tuloksena päätös toteutuksesta ja toimenpiteistä,
4. rakennusaikainen tutkimus suunnitelmien detaljiparanteluun,
5. käytönaikainen valvonta; tavoitteena haittailmiöiden minimointi ja käyttövaurioiden korjaus,
6. (jälki)tarkkailu; tavoitteena haitallisten ympäristövaikutusten minimointi ja jälkien kunnostus.

Kalliorakennushankkeen toteutus voidaan jakaa yksikköprosesseihin, jotka muodostavat prosessiketjun. Edellinen prosessi on aina seuraavan edellytys ja lähtökohta, esimerkiksi:

1. poraus – porattavuus (kulutuspehmeys),
2. irrotus – irrotettavuus (sitkaus),
3. rusnaus – rusnattavuus (vrt. 2),
4. lujitus – lujitettavuus (rikkoutuneisuus),
5. lastaus – lastattavuus (pölyäminen, myrkyllisyys),
6. kuljetus – kuljetettavuus (vrt. 5),
7. murskaus – murskattavuus (vrt. 2),
8. rikastus – rikastettavuus (arvometallien esiintymistapa, raekoko, tekstuuri eli kutous).

Mainitut tekniset parametrit ovat jaettavissa useisiin vaikutustekijöihin. Näitä ovat kivilajiominaisuuksien lisäksi mm. seuraavat kallio-ominaisuudet: kalliotopografia, mineraalikoostumus, rakotiheys, anisotropia, rapautuneisuus, jännitystila ja (pohja)veden esiintyminen.

Systeemianalyttisen tarkastelun lähtökohtana käytetään työvaihekohtaista parametrisointia, joka sisältää kronologisessa järjestyksessä kaikki esiintymän tutkimiseen ja hyödyntämiseen sekä jälkitarkkailuun liittyvät tapahtumat ja osatapahtumien sarjat. Työvaihekohtaisesta parametrisoinnista saadut parametrit kuvaavat jokaisen työvaiheen toteutettavuutta suhteessa hyödynnettävään kivimateriaaliin. Olettamalla kaikki työvaiheet onnistuneiksi saadaan perustettava luokitus toimimaan aluksi olosuhteissa, joissa ei esiinny virheitä. Myöhemmässä vaiheessa voidaan perustetun luokituksen virheenkesto kasvattaa havainnoimalla tunnettujen aineistojen luokittuvuutta ja suorittamalla tarpeelliset muutokset luokitusperusteisiin.

Geologinen tieto

Geologisella tiedolla tarkoitetaan sitä tietoa joka kivistä ja esiintymästä saadaan kallioperäkartoituksen ja esiintymän inventoinnin yhteydessä. Tietoja voidaan tarkentaa edelleen hyödyntämisen edetessä, jolloin louhintasuunnittelussa voidaan huomioida rakenteellisista ja mineralogisista seikoista riippuvat louhintatekniset seikat, kuten louhimisjärjestys ja räjäytettävyyys.

Kiven koostumus

Kiven koostumus voidaan esittää kahdella merkittävällä tavalla. Kemiallinen koostumus kertoo kiven sisältämien mineraalien keskimääräiset alkuaineiden määrasuhteet kivilajissa. Informaatiosta jää kuitenkin puuttumaan näiden alkuaineiden esiintymiseen liittyvä hapetusluku. Lisäksi joidenkin alkuaineiden suhteen tiedot ovat analyysimenetelmästä riippuen epäluotettavia, mikä on erityisen merkittävää kullan ja platinametallien analytiikan kohdalla (Juvonen 1999).

Kiven mineraalikoostumus puolestaan kertoo ”koko totuuden” myös eri alkuaineiden hapetusluvuista näytteessä, mutta vain mikäli kaikkien mineraalirakeiden kemiallinen koostumus on määritetty. Tämä on tarpeellista siksi, että vaikka mineraaliparageneesit pyrkivät termodynaamiseen tasapainoon, eivät ne reaktioiden hidastumisen vuoksi useinkaan pääse perille. Kivessä voi siis olla saman mineraalin erilaisia koostumusvariantteja tai jopa keskenään epätasapainossa olevia parageneesejä, joiden kiteytymistapahtumassa vallinnut reaktiokinetiikka ei ole sallinut edetä tasapainoon asti.

Edellä mainitusta johtuen joudutaan luokitusproblematiikassa nostamaan esiin muutamia merkittäviä koostumusparametrejä, joiden saatavuutta ja muita ominaisuuksia on tarkasteltava erikseen.

Mineraalikoostumus

Jalostusprosesseja haittaavat mineraaleista varsinkin talkki, kloriitti, serpentiini, grafiitti, savimineraalit (montmorilloniitti, kaoliniitti) ja karbonaatit (kalsiitti, dolomiitti), jotka ovat rikastusominaisuuksiltaan lähellä arvomineraaleja tai jotka muuttavat malmilietteen pH:ta häiritsevästi. Näiden oikullinen esiintyminen on omiaan vähentämään arvoainesaantia, ja siten ne lisäävät rikastushiekan ja mahdollisesti myös reagenssien määrää (Niini & Parkkinen 1996).

Metamorfisten mineraalien esiintyminen ja rakeiden omamuotoisuusaste vaikuttavat prosessin toteutumiseen. Mineralogisesti metamorfoosia ilmentävät granaatti, sillimaniitti, kyaniitti, andalusiitti, staurolitti, epidoottiryhmän mineraalit, kloriitti, suuntautunut muskoviitti ja biotiitti, talkki, serpentiinimineraalit (antigoriitti, krysotiili, lizardiitti), metamorfiset pyrokseenit ja amfibolit. Metamorfisten kivien porfyroblastit edustavat rakenteellisesti kestävämpää faasia kuin niiden välitilaan jäävä, yleensä kiillerikas kiviaines

(Vernon 1999). Tämä on nähtävissä erityisesti metamorfoosin jälkeisen deformaation tuottamassa rakoilussa.

Laskennalliset ominaisuudet

vickers-kovuus on I-pöydällä kiilamaisella terällä mineraalirakeen pinnasta suoritettavan terän jättämien jälkien läpimittojen keskiarvojen käänteisarvo. Se kuvaa mineraalirakeen kovuutta ja korreloi siten kyseisen rakeen mekaanisen kulutuskestävyyden kanssa. Kun kiven mineraalirakeiden vickers-kovuuksien keskiarvo painotetaan mineraalirakeiden modaalikoostumuksen mukaisella esiintymistiheydellä, saadaan laskennallinen arvo joka korreloi jossain määrin kiven pinnan mekaanisiin kulutuskestävyysominaisuuksiin. Lasketusta arvosta jää kuitenkin pois informaatio kiven muodostavien mineraalien välisten rajapintojen muodosta sekä tavasta ja lujuudesta jolla ne ovat kiinnittyneet toisiinsa. Viimeksi mainitusta ominaisuudesta, tekstuurista, on käytetty myös osuvaa suomenkielistä sanaa kutous (Kauranne et al. 1972, VMY 1994).

Painotetulla vickers-kovuuksien keskiarvolla on etuna sen kohtuullisen hyvä saatavuus, mutta toisaalta se ottaa porattavuuden lisäksi huomioon lähinnä rakennuskivelle tärkeitä ominaisuuksia, eikä näin käy suoraan kaivosgeologisen kallioluokituksen käyttöön. Kiven suuntautuneisuus ja kiillemineraalien määrä ovat tyypillisiä asioita joita ei painotetussa vickers-kovuuksien keskiarvossa voida huomioida. Molemmilla tekijöillä on merkittävä osuus sekä kaivosgeologisessa mielessä, että rakennuskiviominaisuuksien mittarina, joten kyseiset ilmiöt on parametrisoitava toisin. Selkein tapa tehdä tämä on määritellä geologiisiin työvaiheparametreihin *kiven rakenne* ja suurimittainen *kallion rakenne*.

Kiven normatiivinen koostumus lasketaan kemiallisesta koostumuksesta tarkoin määritellyn algoritmin mukaisesti. Saatu laskennallinen mineraalikoostumus ei kuitenkaan kerro kiven ominaisuuksista paljoakaan, sillä se ei ota huomioon kiven syntyolosuhteita ja sen jälkeistä mahdollista metamorfoosia, puhumattakaan mineraalirakeiden välisten rajapintakontaktien pinta-alasuhteesta tai toisiinsa kiinnittymisen lujuudesta.

Normatiivisen ja modaalisen mineraalikoostumuksen ero puolestaan osoittaa luokituksen kannalta tärkeiden metamorfisten mineraalien osuutta koostumuksellisessa tekijässä. Kun tähän lisätään tieto kiven tekstuurista, saadaan määritellyksi varsin monipuolinen, joskin vaikeasti saatavissa oleva kiven muuttumisastetta kuvaava parametri.

Toinen rakennusgeologisesti merkittävä parametri olisi saatavissa yhdistämällä vickers-kovuus, kiven suuntautuneisuusaste ja kiillemineraalien laskennallinen määrä yhdeksi laskennalliseksi parametriksi. Kyseistä yhdistelmäparametriä lienee mahdollista käyttää myös *sortuma-alttiuden* määrittämiseen.

Yleisten ja taloudellisesti merkittävien mineraalien ominaisuuksia on tiivistetty taulukkomuotoon liitteessä 1.

Kemiallinen koostumus

SiO₂-pitoisuus korreloi murskattavuuteen, räjäytettävyyteen ja louhittavuuteen. Sillä on siis huomattavaa merkitystä kaivosgeologisena luokitusparametrinä.

Kiven vesipitoisuus korreloi vesipitoisten silikaattien; kiilteiden, kloriitin ja talkin (sekä kidevedellisten zeoliittien) esiintymisen kanssa. Nämä mineraalit puolestaan aiheuttavat rakenteen anisotrooppista heikkoutta ja lustasuuntia. Erityisesti silikaatteihin sitoutuneen veden määrä kertoo kiven kyvystä rikkoutua heikkousvyöhykkeitä pitkin.

Alumiinin runsas pitoisuus veden kanssa indikoi muskoviitin esiintymistä kivessä. Serisiittiliuskeessa tämä saattaa merkitä huomattavaa suuntausta ja siten louhintateknisiä vaikeuksia räjäytettävyyden heikkenemisenä ja sortumalltiutena. Kun kiven voimakas suuntaus otetaan asianmukaisesti huomioon louhintasuunnitelussa, saadaan oikeilla louhintaratkaisulla haitta kääntymään hyödyksi, kuten Kutemajärven kaivoksella on tapahtunut. Siellä tunneli on louhittu malmia ympäröivään kovaan kiveen spiraalimaisesti malmipiippujen ympärille.

Kiven rakenne

Kiven rakenteen oleelliset tekijät liittyvät sen kiteytymisenaikaiseen synty tapahtumaan, sen jälkeisiin deformaatioihin ja metamorfisiin reaktioihin joissa kiven mineraloginen koostumus on termodynaamisesti tasapainottunut vastaamaan uusia vallitsevia paine- ja lämpötilaolosuhteita. Kiven rakenteen vaikutus kiviaineksen tekniseen työstettävyyteen riippuu mineraalirakeiden oman sitkauden lisäksi mineraalirakeiden välisten liitospintojen muodosta ja rakeiden välisten liitosten lujuudesta. Mineraalirakeiden voimakas suuntaus aiheuttaa rakenteessa heikkoussuunnan, joka noudattaa venymän suuntaa. Jos venymä liittyy poimutukseen, voi heikkousvyöhyke syntyä myös akselitasoliuskeisuuden suuntaan, kohtisuoraan venymää vastaan.

Mikäli kiven rakenne koostuu pitkänomaisista rakeista jotka sitovat toisiaan ristikkäisesti, on tuloksena sitkas kokonaisrakenne. Sen työstettävyyys (porattavuus, jyrättävyys) voi olla hyvä, mutta räjäytettävyyys heikko. Tällaista tekstuuria esiintyy erityisesti mafisten kivien talkittomilla muuttumistuloksilla, serpentiniiteillä.

Kiven rakenteen tutkimuksia varten on näytepreparaatin (ohuthie, pintahie) valmistuksessa huomioitava venymän suunta, jonka lisäksi on valmistettava kaksi preparaattia jotka ovat kohtisuoraan ensimmäistä preparaattia vastaan ja kohtisuoria toisiaan vastaan. Vasta kun tiedetään venymän suurin arvo ensimmäisestä preparaatista, voidaan laskea venymän todellinen arvo. Jos ensimmäistä preparaattia ei valmisteta venymän suunnassa, ei todellista venymää voida rakeen mittasuhteista arvioida.

Kallion rakenne

Kallion rakenne käsittää suurimittaiset siirrokset, poimut, kontaktit ja rakoiluvyöhykkeet. Nämä ovat tekijöitä jotka usein ilmenevät hyvin pintatopografiassa, mikä helpottaa paljastumakohtaista havainnointia geologisessa kartoitus- ja tutkimusvaiheessa. Kartoitushavaintoihin pohjautuva tieto on kuitenkin liian pinnallista esiintymän kolmiulotteiseen inventointiin ja louhinnan suunnitteluun, joten sopivaa luokitteluparametria valittaessa on syytä ottaa huomioon viivamaisten ja tasomaisten rakennetekijöiden jatkuvuudet.

Rakovyöhykkeiden sijainnin selvittämiseen ja niiden laadulliseen luokitteluun on Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunnan tutkimuksissa käytetty mm. kairanreikäaineistoihin pohjautuvaa pääkomponenttianalyysiä (Korkealaakso et al. 1994). Menetelmää on käytetty kallion vedenjohtavuuden selville saamiseksi, mikä on myös keskeinen tekijä louhinnan suunnittelussa. Kallion rakenteella on merkittävä vaikutus sen räjäytettävyyteen ja louhittavuuteen. Mikäli räjäytys on oikein suoritettu ja kiven rakenne huomioitu, on myös kiven lastattavuus hyvä.

Virheellisellä panostuksella ja huonosti suunnitellulla louhinnalla voidaan luonnollisesti aiheuttaa (tahattomia) vaikeuksia kaikkiin aikajärjestyksessä myöhäisempiin työvaiheisiin. Kaivosgeologisen kallioluokituksen kannalta on kuitenkin tehtävä lähtöoletus, että kaikki työvaiheet onnistuvat siinä määrin, että seuraava työvaihe voidaan suorittaa. Vain onnistuvien työvaiheiden muodostamassa toimintamallissa kaivosgeologisesta kallioluokituksesta voi olla relevanttia käytännöllistä hyötyä. Kallioluokituksen perustamisen jälkeen tulee sen virheenkestävyyttä kehittää; tämä kuuluu kuitenkin systeemianalyysin toiseen vaiheeseen, riskienhallintaan.

Kallion rakenteen osaparametrien saatavuus on hyvä, erityisesti kallioperäkartoituksen yhteydessä. Kartoitustuloksen edustavuus ei kuitenkaan riitä louhintasuunnitteluun ja inventointiin, joten tarkempia arvioita olisi syytä suorittaa esimerkiksi soveltamalla pääkomponenttianalyysimenetelmää inventointikairausten tuloksiin.

Pääkomponenttianalyysillä selvitetty kallion rakenteessa esiintyvä rakoiluominaisuus on edustava, mutta sen saatavuus on heikko ja siitä koituvat kustannukset merkittävät. Suurimittaisen ominaisuuden sitominen pienimittaisen lohkareroon kivilajikappaleeseen on arveluttavaa, sillä kun kivi on irrotettu ympäristöstään, ei mainittu rakenneominaisuus näy kooltaan ilmiön mitan alittavassa lohkarossa, jolloin mainittu luokitteluparametri on hyödytön kiven ominaisuuksia jälkeinpäin tunnistettaessa esim. rikastamon syöttestä.

Rakoiluominaisuuksien huomioonottaminen olisi kaivosgeologisessa kallioluokituksessa näiden perusteiden valossa suoritettava kiven rakenteen osaparametrissa, ei kallion ominaisuutena.

Louhintatekninen hyödynnettävyys

Louhintatekninen hyödynnettävyys koostuu louhinta- ja hyödyntämisvaiheen työvaiheiden järjestyksellistä toteutettavuutta kuvaavista osaparametreista. Jokaisen parametrin arvon saamisen edellytys on, että edellinen työvaihe on onnistunut ja seuraava voidaan aloittaa. Toisin sanoen edellinen työvaiheparametri on saanut arvon. Työvaiheparametreja arvioitaessa ei voida huomioida systeemin virheenkestävyyttä, vaan on oletettava työvaiheet onnistuviksi. Kun luokitusperusteet on valittu, voidaan luokituksen virheenkestoisuutta muokata luokituksen oman dynaamisuuden asettamissa rajoissa, mutta ei yleisessä parametritarkastelussa.

Porattavuus

Kallioteknisen geologian sanasto (VMY 1994) määrittelee porattavuuden porausnopeuteen ja poran terän kulumiseen vaikuttaviksi kivilaatu- ja kallio-ominaisuuksiksi.

Porattavuus on kulutuskestävyyden käänteisparametri. Se korreloi usein kiven väriin siten, että tummien ja vihreiden kivien porattavuus on parempi kuin vaaleiden kvartsirikkaiden kivien. Hienorakeiset kovat hauraat kivet ovat huonommin porattavia kuin sitkaasti deformatuivat tummat kivilajit. Poikkeuksen tästä muodostavat kuitenkin emäksiset hienorakeiset muuttumattomat (afaniittiset ja lasiset) vulkaniittit ja tummat saostumissedimentit (musta kvartsiserti). Porattavuus on täten asia, jonka arviointia voidaan suorittaa muihin parametreihin pohjautuen. Koska tieto kiven porattavuudesta on louhinnassa hyödyllinen, on se huomioitava kaivosgeologisen kallioluokituksen parametrialinnassa.

Porattavuuteen vaikuttaa myös oikeantyyppisen terän käyttö, liian pieniurainen terä tukkiutuu liian pehmeässä kivessä haitaten poran etenemistä. Toisaalta myös liian karkea terä toimii kovassa kivessä huonosti verrattuna suuren työstöpinta-alan omaaviin hienojakoisempiin teriin. Tämä koskee sekä timanttikairausta, että poraustekniikoita. (VMY 1988)

Räjäytettävyys

Räjäytettävyys kuvaa kiven käyttäytymisen ennustettavuutta panostuksen ja räjäytyksen yhteydessä. Jotta kivi voi olla hyvin räjäytettävää, on sen oltava myös hyvin panostettavaa. Panostamisen onnistuessa hyvin räjäytettävä kivi käyttäytyy ennustettavasti ja räjäytystuloksena syntyvä lohkarokokojakauma on suunnitellun mukainen. Räjäytettävyyttä kontrolloivat voimakkaasti kiven rakoilu, tiiviys ja isotrooppisuus sekä kallion homogeenisuus (Vuolio 1980).

Räjäytettävyys on merkittävässä osassa Siilinjärven avolouhinnassa, siihen kohdistuva muiden prosessin osatekijöiden kokonaisvaikutus on suurempi kuin minkään toisen osaparametrin vastaanottama kokonaisvaikutus (liite 3). Räjäytettävyys riippuu muusta prosessista huomattavasti myös muilla

tutkimuskohteilla, mutta esimerkiksi Oriveden Kutemajärven kaivoksella räjäytettävyyden ohi nousivat lujitettavuus, tiivistettävyyys ja raakun hyödynnettävyys. Räjäytettävyyys vaikuttaa räjäytyksen oikean toteutumisen kautta prosessissa voimakkaasti lastattavuuteen.

Räjäytettävyyttä oleellisesti heikentävä tekijä on onteloiden ja huokostilojen esiintyminen. Joskus suuretkin kideontelot voivat aiheuttaa panostuksessa yllätyksiä, ja räjäytyksen tuloksena saattaa olla vaarallinen työmaa. Räjäytysten jälkeen kideonteloiden seinät irtoavat laattoina ja aiheuttavat helposti vaaratilanteita.



Kuva 1. Lohjan Tytyrin kaivoksen Lohjanjärven alla sijaitsevaan Solhemdolomiittiosuueeseen liittyvää kideonteloverkoston koiranhammaskalsiittia (ditrignisia skalenodreja) syyskuussa 1999. Kuvassa kirjoittaja.

Räjäytettävyyden ollessa huono on räjäytyssuunnittelussa ja panostuksessa noudatettava erityistä lisätarkkaavaisuutta. Räjäytyksen onnistuminen on systeemianalyttisen tarkastelun mukaan eräs prosessin kulminaatiopiste.

Jyrsittävyys

Jyrsittävyys otettiin mukaan tähän tutkimukseen siltä varalta, että jyrsintää joskus vielä Suomessa käytettäisiin. Tämä Englannin hiilikaivoksissa laajemmassa käytössä ollut menetelmä osoittautui olevan selvästi systeemin dominoiva parametri (systeemi vaikuttaa siihen enemmän kuin se systeemiin). Koska jyrsintä ei ole menetelmänä käytössä Suomessa, ei parametrillä ole tämänhetkistä luokittelullista merkitystä, mutta se voidaan varata tulevaisuuden luokitteluoptioksi. Esimerkkinä potentiaalisesta jyrsittävästä kivistä voisivat olla erityisen löyhärakenteiset kivet, kuten Siilinjärven kaivoksen ”rapamalmi” ja

työstökovuudeltaan pehmeät mutta sitkaasti käyttäytyvät kivet, kuten kalkkikivi joissakin kaivoksissamme (esim. Kerimäen Louhen kaivos).

Rusnattavuus

Rusnattavuus riippuu kiven sitkeydestä ja tektoniikasta riippuvasta taipumuksesta jättää louhostilan kattoon helposti irtautuvia ”jälki-ilmoittautuneita”, kuten sanonta Louhen kaivoksella kuuluu. Louhen kaivos on siinä mielessä sopiva esimerkki, että siellä on tuentaa tehty poikkeuksellisen vähän, vain muutamia kymmeniä vajeripultteja koko kaivoksen historiassa (kaivosmittaajan henkilökohtainen tiedonanto). Räjähdyksen jälkeen kattoon jää paljon irtonaisten näköistä tavaraa, mutta koska kappaleiden rajapinnat ovat hyvin karheat, ei kiveä tule alas usein voimakkaallakaan rusnauksella. Tämä voi tuottaa joskus vaikeita vaaratilanteita ja harmillisia lisäkustannuksia.

Lujitettavuus

Kiven lujitettavuus on monitahoinen asia. Se riippuu toisaalta kallioseinämän työstöpinnan tai räjäytysjäljen karkeudesta ja lohkeiluhalukkuudesta, sekä toisaalta myös käytetyn tuentamenetelmän soveltuvuudesta. Sitkeään kiviainekseen tehtävä kiila- ja vajeripultitus on kestävämpää kuin hauraaseen kiveen tehty, toisaalta myös lohkaroitumisrakojen pintojen karkeus vaikuttaa lohcareiden irtoavuuteen seinämästä, jolloin hauraankin kiven lujitettavuus voi olla hyvä vajeripultituksella kiinnitettävän seinäverkotuksen ja ruiskubetonoinnin yhdistelmää käytettäessä. Räjähdyksen jäljiltä louhitun tilan kallioympäristöön jäävät pirstekartiorakenteet vaikeuttavat lujitustyötä erityisesti kovilla hauraasti käyttäytyvillä kivilajeilla.

Tiivistettävyyys

Tiivistettävyyden osatekijät ovat hyvin samanlaiset kuin tuettavuuden, mutta kuitenkin kriteereiltään ankarammat, sillä lujittamalla tuettu rakenne ei ole vielä välttämättä tiivis. Koska tiivistyksen päämääränä on veden pitäminen poissa louhittavasta tai muulla tavoin hyödynnettävästä kallioatilasta, täytyy veden tuloreittien monimuotoisuuden kontrolloida vedentuotannon määrää. Mitä vähemmän on tuloreittejä, sitä paremmin tiivistettävä kallioaines. Toisaalta tietyllä tavalla huokoiset kalliomassat voivat olla hitaasti vettä läpäiseviä, ja niiden tiivistettävyyys voi siitä huolimatta hyväkin, jos ruiskubetonointi imbrikoituu riittävän tukevaksi kerrokseksi louhittavan tilan vettä läpäisevään seinämän osaan.

Tunneliin tai louhosperään vuotavan pohjaveden määrää voidaan arvioida yksinkertaisella kaavalla (Anttikoski & Saarelainen 1976):

$$Q = k^1 h_w,$$

jossa Q = vuotovesimäärä tilan pituussuuntaista metriä kohti [m^4/s],
 k = kalliomassan vedenjohtavuus [m/s],

h_w = vedenpaine kalliotilan pohjatasolla [m].

Oletettaessa kallio homogeeniseksi ja maanpinta tasaiseksi voidaan summittaisesti arvioida, että puolet kalliotilaan valuvasta vuodosta tulee vyöhykkeeltä, jonka leveys on kaksi kertaa kalliotilan syvyys vedenpinnasta.

Lastattavuus

Panostuksen ja räjäytyksen tulos näkyy kiven lastattavuudessa. Liian pieni panos tai panoksen väärä sijoittaminen tuottaa laajan lohkekokojakauman, joka vaikeuttaa lastattavuutta. Lohkekeroon optimointi on räjäytyssuunnittelun keskeisiä tehtäviä (Hautsalo 1986).

Siirtolastattavuus

Syvissä kaivoksissa nosto voi tapahtua joko kumipyöräkuljetuksella tai hissinnostolla tai molemmilla. Lastattaessa materiaalia siirtolaitteesta toiseen mahdollisesti ahtaassakin tilassa, kohdistuu kivimateriaalin ominaisuuksiin suuremmat vaatimukset kuin lastattavuus-parametrin tapauksessa. Sekä lohkekokojakaumalle että pölyävyydelle on asetettava tällöin tiukemmat rajat kuin pelkkää maanpinnalla tapahtuvaa lastausta kuvaavan lastattavuus-parametrin arvioinnissa. Siirtolastattavuus jakautuu samoihin osaparametreihin kuin lastattavuus.

Kuljetettavuus

Louhitun kiviaineksen kuljetettavuus, oli sitten kysymys malmista tai sivukivistä, riippuu sen pölyävyydestä. Ääriesimerkkinä voidaan mainita Rautuvaaran kaivokselta Kolarista lähteneen ensimmäisen malmijunan saapuminen lähes tyhjänä perille, kun tuuli oli puhaltanut hienojakoisen rikasteen radanvarteen.

Pölyävyyden kannalta on hävikin lisäksi huomioitava kuljetettavan materiaalin (pölyävän materiaalin) päästöluonne ja mahdolliset terveysvaikutukset.

Murskattavuus

Kiven louhintatekninen murskattavuus riippuu kiven sitkeydestä, joka on suoraan riippuvainen kiven tekstuurista ja yksittäisten mineraalirakeiden hauraudesta. Tekstuurivaikutuksen osaparametreina ovat mineraalirakeiden yhteisten rajapintojen suuruudet suhteessa rakeiden tilavuuteen sekä tapa ja voimakkuus, jolla mineraalirakeet ovat tarttuneet toisiinsa yhteisellä rajapinnalla.

Murskattavuutta voidaan tutkia useilla erilaisilla mekaanisilla puristus- ja iskulujuuskokeilla, joiden saatavuus on kuitenkin kaivostyössä huono. Vaikka

aikaisemmat kallioluokitustutkimukset ovat päätyneet suosittamaan luokitusperusteiksi tällaisia testejä, on tulosten huonon saatavuuden vuoksi selvää, ettei tällaista testiparametriä voida käyttää operatiivisessa luokituksessa ilman huomattavia lisäkustannuksia. Mikäli menetelmällä voitaisiin saavuttaa suuria säästöjä, joko ekonomisesti tai turvallisuutta lisäämällä, olisi sen käyttö perusteltua.

Raakun hyödynnettävyys

Raakun hyödynnettävyys nousi tutkimuksen mukaan voimakkaasti systeemin dominoimaksi parametriksi. Tämä merkitsee siis sitä, että raakun hyödynnettävyys on vahvasti riippuvainen muun prosessin toteutettavuudesta. On selvää, että jos raakkua ei synny, sitä ei voida hyödyntää. Kyselyssä lähdettiin kuitenkin tilanteesta, jossa kaikki työvaiheet olivat toteutettavissa, eikä raakun syntymistä täten kyseenalaistettu.

Kun raakkua syntyy louhintaprosessissa, on muun prosessin vaikutus raakun myrkyttömyyteen louhintatarkkuuden toteutumisen kannalta merkittävä. Asian tekee tärkeäksi ns. rajamalmin läjitys, joka täytyy suunnitella ja toteuttaa huomioiden raakkukasojen sijoitus ja ympäristöpäästöjen estäminen.

Raakun ja rajamalmin lisäksi myös rikastushiekka-altaiden sijoitus suhteessa pintavesien valuma-alueeseen ja pohjavesiympäristöön on merkittävä erityisesti silloin, kun rikastusprosessissa käytetään myrkyllisiä reagensseja, kuten esimerkiksi kullan syanidiuutossa.

Rikastustekninen hyödynnettävyys

Rikastusteknisten työvaiheiden toteutettavuutta kuvaavat osaparametrit painottuvat kuvaamaan mahdollisuutta muokata rikastamon syötteestä ominaisuuksiltaan halutun kaltainen tuote.

Jauhettavuus

Jauhettavuus on monitasoinen parametri, jonka arvo riippuu toivotusta jauhantatuotteesta. Mineraalien rakekoko asettaa merkittävän rajan jauhannalle, sillä yksittäisten mineraalirakeiden jauhaminen vaatii merkittävästi enemmän energiaa kuin eri rakeiden irrottaminen toisistaan (fragmentoimalla). Fragmentoinnin riippuvuus geologiasta hahmottuu suuruusluokaltaan, kun muistetaan, että eri malmi- ja hyötykiviesiintymien isäntä- ja sivukivet sekä maanalaisten tilojen kalliomateriaalit (mahdollisine haitta-aineineen) koostuvat aina mineraaleista, joita eri variaatioineen tunnetaan noin 10 000. Nämä mitä moninaisimpina, erirakenteisina ja -koostumuksisina sekä eri ominaisuuksia omaavina yhdistelminä esiintyvät mineraalit muodostavat kaiken fragmentoimalla hyödynnettävän kivimateriaalin.

Kiven jauhettavuudessa on huomattavaa vaihtelua riippuen suunnitellun tuotteen raakoosta. Erityisesti kvartsipitoisten kiviainesten jauhettavuus huononee keskeisesti siirryttäessä kiven alkuperäistä rakekokoja pienempiin jauhantatuotteisiin.

Seulottavuus

Seulottavuus on parametri johon vaikuttavat sekä seulan rakenne että seulottavien rakeiden muoto ja kokojakauma. Jos seulan reiät ovat pyöreät, ei seula tukkiudu niin helposti kuin verkkoseulalla. Toisaalta seulalla on taipumus kulua seulonnan yhteydessä, ja pyöreäreikäisen seulan reikien on taipumus kasvaa hitaasti käytössä. Kulmikkaat karkeat rakeet kuluttavat seulaa eniten.

Myös raekokojakauma muuttuu seulonnan aikana, kun mineraalirakeet hiertävät toisiaan. Tällöin syntyvä pöly voi olla jatkoprosessin tai tutkimuksen kannalta haitallinen.

Koska eri kivimateriaalit fragmentoituvat erimuotoisiksi partikkeleiksi, on jokaiselle esiintymätyypille haettava oma seulontamenetelmänsä. Kovia, teräväkulmaisesti tai munuaismaisesti lohkeavia, kaivoksissa yleisesti esiintyviä mineraaleja ovat mm. kvartsi, kalimaasälpä ja topaasi.

Rikastettavuus (eroteltavuus)

Murskauksen ja seulonnan tuottama raekokojakauma ratkaisee rikastusprosessin erotusvaiheen toteutumisen vaahdotuksessa ja gravitatiivisessa erotuksessa.

Mineraalien rikastusominaisuudet puolestaan ratkaisevat erotusmenetelmän ja sen toiminnan optimointiin vaikuttavien osaparametrien valinnan, esimerkiksi vaahdotuskemikaalien valinnan.

Veden poistettavuus

Veden poistettavuus riippuu siitä, onko vesi kidevetenä vai huokosvetenä, kuinka hienojakoista materiaali on, kuinka kuivaa tuotteen täytyy jatkoprosessin kannalta olla, kuinka suuri on tuotteen lämpökapasiteetti ja kuinka pölyävää tuote on.

Jätteen käsiteltävyys

Jätteen käsiteltävyyteen olennaisena vaikuttavat tekijät ovat rikastusprosessin valinnassa. Magneettisen erotuksen ja gravitatiivisen erotuksen tapauksessa ei rikastusjätteeseen jää prosessin tuottamia jäämiä, ainoa mahdollinen jäämä on yleensä varsinainen hyötymineraali tai sen seuralaisena esiintyvä hyödytön malmimineraali, jonka hapettumistulos voi olla ympäristölle haitallinen. Tällaisten mineraalien esiintyminen on kuitenkin varsin yleistä lähes kaikilla kaivoksilla. Asia on syytä huomioida jätekiven läjitysalueen valinnassa valuma-alueen suhteen.

Jätekasojen ja jätealaiden ympäristövaikutuksia on tutkittu mm. Ylöjärven, Vuonoksen, Virtasalmen, Vihannin, Vammalan, Saattoporan, Rautuvaaran, Pyhäsalmen, Paukkajanvaaran, Otravaaran, Otanmäen, Orijärven, Mustavaaran, Makolan, Luikonlahden, Kärvasvaaran, Kylmäkosken, Kotalahden, Korsnäsin, Keretin, Kemin, Hituran, Haverin, Hammaslahden, Enonkosken ja Aijalan kaivoksilla (Kuusisto 1991).

Mikäli rikastusprosessissa käytetään vaahdotusta, riippuu jätteen luonne käytetyistä reagensseista. Mikäli jätekiveen (rikastushiekkaan) jää haitallisia aineita, on niiden poistoa varten perustettava oma prosessi.

Koska jätteen käsiteltävyyttä dominoi keskeisesti prosessissa suoritettavat ratkaisut, ei sillä ole keskeistä merkitystä kaivosgeologisen kallioluokituksen parametrina ja se voidaan jättää luokituksen ulkopuolelle.

Synteettisen menetelmän tuottamat lisäparametrit

Synteettisellä menetelmällä voidaan lisätä kaivoskyselyn tuottamiin parametreihin esiintymätyyppikohtaisia parametreja sekä sellaisia parametreja, jotka eivät ole orientoituneita kiviaineksen hyödyntämisprosessin kronologisuuteen.

Esiintymätyyppikohtaiset parametrit

Joitakin parametreja ei voitu kyselyssä huomioida ja ne täytyi jälkeenpäin lisätä järjestelmään synteettistä menetelmää soveltaen. Parametrien lisääminen johtui siitä, että kun kysely on suoritettu käyttäjäkunnan piirissä, ei yhden vastaajan kokemus ole kattanut kuin yhden esiintymän tai parhaassa tapauksessa esiintymätyypin. Jotta tutkimuksen kattavuus voitaisiin laajentaa koskemaan kaikkia kaivoksia, on laajempaa merkitystä omaavat parametrit lisättävä ad hoc.

Esiintymän hyödyntämistapa ja esiintymätyyppi

Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen louhinnassa nousevat esille erilaiset seikat. Esiintymän hyödyntämistavan määräävät kuitenkin ensisijaisesti ekonomiset tekijät, joiden yhteys geologisiin kivilaji- ja kallio-ominaisuuksiin on komplisoitu, eikä hyödyntämistapaa voida sisällyttää luokitteluun.

Esiintymätyypin kuvaajaksi ehdotan käytettäväksi kardinaaliparametria hapan – intermediäärinen – emäksinen – ultraemäksinen, joita edustavina koodeina esiintyköön mainittujen luokkien nimien alkukirjaimet.

Kiven SiO₂-pitoisuus on helposti analyyseistä saatavilla ja on myös kohtuullisen helposti määriteltävissä tiheyttä ja väriä arvioimalla. Myös kiven teknisillä ominaisuuksilla, kuten esimerkiksi murskattavuudella ja räjäytettävyydellä on vahva korrelaatio SiO₂-pitoisuuteen.

Toinen esiintymätyyppikohtainen parametriedokas on kiven tekstuurillinen ja mineraloginen muuttumisaste. Metamorfoosin aiheuttamat muutokset näkyvät kivessä sekä rakenteellisena että mineralogisen koostumuksen muuttumisena, mutta muuttumisen vaikutus kiven tekniisiin hyödynnettävyyttä kuvaaviin ominaisuuksiin on kuitenkin niin monimuotoinen, että asian tarkempi käsittely vaatii tilastomatemattisia lisätutkimuksia tunnettujen esiintymien aineistoista.

Koska kiven rakenneominaisuudet tulevat huomioiduiksi jo geologisten parametrien osiossa ja mineralogisen muuttuneisuuden arviointi vaatii merkittävää mineralogista ammattitaitoa, ei kiven muuttuneisuus kelpaa sellaisenaan uudeksi luokitusparametriksi, vaan vaatii lisätarkastelua tarkentavissa tutkimuksissa.

Malmin ja sivukiven kontaktityyppi

Malmin kontaktityyppi sivukiveen määrää monta louhintateknistä yksityiskohtaa. Jos kontakti on terävä ja koostumus muuttuu voimakkaasti kontaktin yli mentäessä, on kontakti todennäköisesti sortumisherkkä ja siinä saattaa jo valmiiksi esiintyä siirrostumista.

Louhinnan etenemiseen kytketty kaivosperien kartoitus

Kaivosperien kartoitettavuus on ennen kaikkea turvallisuuteen liittyvä parametri. Yleensä kaivuskartoituksen tekee kaivosgeologi, mutta rakomittausten ja heikkousvyöhykkeiden havainnointiin on mahdollista käyttää tarkoitukseen koulutettuja kaivuskartoitusryhmiä ja kaivosmittaajia. Näin on menetelty mm. Kemin Elijärven kaivoksessa (VMY 1988).

Systemaattista kalliomekaanisen tiedon keräämistä kaivosperistä on suoritettu maamme kaivoksissa ainakin Pyhäsalmen Cu-Zn-Pb-kaivoksesta ja Kemin Elijärven kromiittikaivoksesta.

Atlasmatriisi

Tämän kallioluokitustutkimuksen haastatteluaineistosta syntynyt atlasmatriisi on esitetty tutkimuksen liitteessä 3 (takakannen taskuun sijoitettu lakana). Sen sisältämät ESQ-asteikolla (0-4) esitetyt arvot edustavat tutkimuksen aikana eri asiantuntijoiden kanssa käytyjen keskustelujen yhteydessä kirjoittajan saamia vaikutteita. Atlasmatriisi on jaettu kolmeen eriväriseseen osamatriisiin, joista vihreä edustaa geologista tutkimusta, punainen louhintateknistä osaprosessia ja sininen osamatriisi rikastusteknistä osaprosessia.

Haastattelututkimuksen tuottamat aineistot cause-effect-diagrammeineen ja interaktiivisuus-dominoivuus-diagrammeineen esitetty liitteessä 2.

Edustavien parametrien raja

Ihannetilanne valittavaksi parametriksi on luonnollisesti se, että jokin aikaisemmista työvaiheista tai siihen liittyvistä mitattavista ilmiöistä kuvaa toista, myöhemmin prosessissa esiintyvää ilmiötä joko positiivisella tai negatiivisella korrelaatiolla. Tällaiset selvässä indikaatiosuhteessa ilmiöihin olevat parametrit ovat valitettavan harvinaisia, ja esiintyessään usein ilmentävät kalliolaadun suhteen vähemmän käyttökelpoista tietoa.

Edustavien parametrien rajauksessa on käytävä parametrikohtaisesti läpi jokainen parametri yksityiskohtaisine syy-seuraus-suhteineen. Systeemi-analyttisin menetelmin voidaan kuitenkin osoittaa joidenkin osaparametrien ilmeinen tärkeys ja dominoivuus.

Tutkimuksen perusteella keskeisiksi parametreiksi nousivat geologiset parametrit: kiven rakenne, kallion rakenne ja kiven koostumus. Näiden parametrien voidaan todeta olevan kiistattomasti kaivosgeologisen kallioluokituksen kannalta tärkeimmät parametrit.

Muuttuneisuusastetta voidaan arvioida mineralogisilla havainnoilla, mutta eri mineraalien merkitystä täytyy erikseen tutkia, ennen kuin kallioluokitusperusteisiin voidaan viedä selkeästi rajattu ryhmä mineraaleja. Ehdokkaita mineraaleiksi ovat kuitenkin ns. haittamineraalit. Malmiesiintymän geologinen arviointi käsittää myös ne mineraalit, jotka aiheuttavat haittoja

1. jalostusprosessille,
2. mineraaleja käsitteleville ihmisille,
3. kaivoksen ympäristölle.

Jalostusprosesseja haittaavat varsinkin talkki, kloriitti, serpentiini, grafiitti, savimineraalit (montmorilloniitti, kaoliiniitti) ja karbonaatit (kalsiitti, dolomiitti), jotka ovat rikastusominaisuuksiltaan lähellä arvomineraaleja tai jotka muuttavat malmilietteen pH:ta häiritsevästi. Näiden oikullinen esiintyminen on omiaan vähentämään arvoainesantia, ja siten ne lisäävät rikastushiekan ja mahdollisesti myös reagenssien määrää.

Toisen haittamineraaliryhmän muodostavat tuotteisiin jääneet ihmisille haitalliset mineraalit. Lääketieteellisten tutkimusten mukaan tietyt sairaudet ovat kuituisten mineraalien aiheuttamia (Niini 1992b). Pölymäisen hienoina kuitupartikkeleina nämä vahingoittavat keuhkoja ja voivat myös olla karsinogeenisia. Vaarallisin tällaisista ”mineraaleista” on asbesti. Muina riskialttiina mineraaleina on pidetty wollastoniittia, erioniittia, attapulgiittia ja sepioliittia. Kolme viimeksi mainittua ovat Suomessa vähämerkityksisiä. Erioniittia (K–Ca–Na-zeoliitti), attapulgiittia eli palygorskiittia (Mg–Al-fyllosilikaatti) ja sepioliittia, (Mg-fyllosilikaatti) on tavattu Suomessa vain harvinaisina ja niin pienissä esiintymissä, että niiden hyväksikäyttö ei ole koskaan tullut meillä kysymykseen.

Wollastoniittia, CaSiO_3 -inosilikaattia, on Suomesta löydetty muutamasta kalkkikiviesiintymästä. Lappeenrannassa sitä louhitaan tuotannollisesti. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa wollastoniittia ei ole kuitenkaan todettu karsinogeeniseksi (Huuskonen et al. 1983). Näyttää siltä, että wollastoniitin lääketieteellinen vaikutus on samanlainen kuin kvartsin: suurina määrinä se aiheuttaisi lähinnä kemiallisesti silikoosin tapaisia vaurioita keuhkokudokseen ja keuhkopussiin. On epätodennäköistä, että wollastoniitin vaikutuksilla olisi tekemistä mineraalin kuitumaisuuden kanssa.

Useimmat Suomen asbestiriskiesiintymistä edustavat jo suljettuja kaivoksia. Asbestin merkitys käytännössä liittyy siis vain aiemmin käyttöön otettujen asbestituotteitten käsittelyyn. Keskeistä on tällöin asbestin erottaminen ja eristäminen muista aineista näiden tuotteiden uusimisen yhteydessä.

Kolmannen ryhmän haittamineraaleja muodostavat jalostusprosesseissa pieninä määrinä ympäristöön pääsevät raskasmetallit (kuten Ni, Pb, Cr, Cu, Sn, Zn ja Hg, samoin As). Näiden haittavaikutukset ympäristön maaperän ja pohjaveden

kemiallisiin ominaisuuksiin on Suomessa onnistuttu pitämään kurissa, eikä niitä ole syytä pitää erityisenä Suomen kaivosten ympäristögeologisena ongelmana (Niini & Parkkinen 1996).

Luokitusperusteiden valinta

Luokituksen perustaksi valittavien parametrien tutkimisen lisäksi on kiinnitettävä huomio luokituksen käytön maantieteelliseen levinneisyyteen. Uuden luokituksen perusteeksi on sen käytettävyyden lisäämiseksi valittava pohjaehdotukseksi jokin jo käytössä oleva luokitus, joka on myös laajennettavissa tai/ja rajattavissa mukautumaan uuden luokituksen tarpeisiin.

Tällaisia ehdokkaita ovat työn edetessä ehdottaneet useammat alan ammattilaiset ja tutkijat. Mikäli perustettava kaivosgeologinen kallioluokitus olisi käyttöalueeltaan kansainvälinen, sopisi pohjaehdotukseksi esimerkiksi Q-luokitus.

Q-luokituksen parametrien saatavuus on kuitenkin heikko ja sitä on lisäksi modifioitu sopivaksi eri käyttökohteissa, joten sen yleispätevyyden voidaan ymmärtää joiltain osin tarvitsevan jatkotutkimuksia. Esimerkkinä mainittakoon veden esiintymisen vaikutus ja turbulaarisen virtauksen huomioonottaminen vedenläpäisevyyskerrointa arvioidessa louhinnan kohteena olevien kalliotilojen läheisyydessä.

Q-luokituksesta on käytössä myös versio, josta termi J_w /SRF on jätetty pois. Tätä osaluokitusta voitaisiin käyttää uuden luokituksen pohjaehdotuksena, jota voitaisiin laajentaa lisäparametreilla. Koska riisutusta Q-luvusta on kokemusta vasta lyhyehköltä ajanjaksolta, vaatii asia perusteellista tutkimusta.

Toinen selkeä pohjaehdotus on rakennusgeologinen kallioluokitus. Se on valmiiksi orientoitunut kalliorakennustekniseen geologisten rakenteiden huomioonottamiseen ja sen sovellusalueena on lähtökohtaisesti Suomi.

Rakennusgeologinen kallioluokitus on toisaalta helposti laajennettavissa ja osa parametreista on korvattavissa kemiallisella koostumustiedolla. Luokituksen suunnittelussa on alunpitäen otettu huomioon luokkanimien kuvaavuus ja luokkien erotettavuus toisistaan. Selväkielisten luokkanimien lisäksi luokituksessa on käytössä myös lyhyt kirjain-numero-koodi, jolla asia voidaan ilmaista lyhyesti.

Edellä esittämieni perusteiden nojalla pohjaan tekemäni kaivosgeologisen kallioluokituksen VTT:n kehittämään rakennusgeologiseen kallioluokitukseen eli RG-luokitukseen.

Luokituksen perustaminen ja yhteenveto

Kaivosgeologisen kallioluokituksen perustamisen pohjana on siis rakennusgeologinen kallioluokitus sen sisältämien kaivosgeologisen kallioluokituksen kannalta keskeisten geologisten parametrien vuoksi.

RG-luokitus on lisäksi valmiiksi orientoitunut kalliorakennustekniseen problematiikkaan, millaisena kaivostekninen louhintatyökin omine erityispiirteineen voidaan nähdä. RG-luokituksen valinta on perusteltavissa myös sillä, että se on paraikaa käytössä ja sen käytöstä on myös pitkäaikaista kokemusta.

Luokituksen pohjana olevaan ratkaisuun lisätään eräitä louhintateknisesti ja rikastusteknisesti merkittäviä parametreja. Tulevissa tutkimuksissa näitä voidaan edelleen tarkentaa ja parantaa sekä lisätä uusia parametreja luokituksen ilmaisuvoiman kasvattamista silmälläpitäen.

Ensimmäinen lisättävä parametri kuvaa kiven koostumusta, joka nousi tutkimukseen liittyvässä kyselyssä keskeiseksi parametriksi. Parametri on kiven happamuus–emäksisyys, joka on geologisen määritelmän mukaisesti kiven piidioksidipitoisuus painoprosentteina oksideina ilmoitetussa kokokivi-analyysissä. Kyseinen arvo jaetaan neljään eri luokkaan: H, I, E ja U. Nämä ovat ensimmäiset kirjaimet kivilajiluokkien nimistä:

Hapan	SiO ₂ 65 % - 100 %
Intermediäärinen	SiO ₂ 54 % - 65 %
Emäksinen	SiO ₂ 45 % - 54 %
Ultraemäksinen	SiO ₂ 0 % - 45 %

Tämä kirjainluokka liitetään jokaisen RG-luokituksen luokkakoodin eteen.

Kokenut geologi osaa helposti määrittää käsinäytteen happamuusluokan. Myös muu kaivoshenkilökunta on kohtuullisen vähäisin toimenpitein koulutettavissa suorittamaan kyseinen arvio. Perustetulla uudella parametrilla on voimakas korrelaatio kiven haurauteen ja sitkauteen siten, että happamat kivet ovat kovia ja hauraita ja ultraemäksiset pehmeitä mutta usein sitkeitä.

Happamuus–emäksisyys-parametri kuvaa malmin esiintymäkohtaista luonnetta. Se jakaa myös eri malmityypit ryhmiin, esimerkiksi kultamalmia louhitaan pääosin happamista ja intermediäärisistä kivilajiympäristöistä, poikkeuksena kuitenkin Pahtavaaran kultamalmi, joka esiintyy komatiittia leikkaavissa kvartsijuonissa.

Toinen keskeinen lisättävä parametri on muuttuneisuusaste, jota mittaamaan on syytä valita muuttumista ilmaisevan mineraalin esiintyminen käsinäytteestä. Koska mineraalin tarkka tunnistaminen vaatii asiantuntemusta, sisällytän tämän parametrin kaivosgeologiseen kallioluokitukseen vain lisäoption muodossa. Ilmaisutavaksi ehdotan mineraalien virallisia kirjainlyhenteitä (Saltikoff 1976). Ne liitettäköön tarvittaessa luokituskoodin perään siten, ettei niitä ole vaarana sekoittaa muihin luokituksen koodeihin.

Kolmas lisättävä parametri on pohjaveden esiintymisen paineriippuvuus. Q-luokituksessa käytetty, joissakin yhteyksissä epäilemättä toimiva, mutta turhan voimakkaasti yksinkertaistettu vedenläpäisevyysluku vaatii tarkempaa tutkimusta ennen käyttökelpoisuutensa hyväksymistä. Pohjaveden esiintymisen ja sen virtauksen mallintaminen tuntuu olevan eräs vaikeimmista yksittäisistä osaongelmista, joita kaivosgeologisen kallioluokituksen tutkimuksissa on tullut esille.

Monien muidenkin parametrien kohdalla olisivat syventävät lisätutkimukset olleet tarpeellisia. Erityisesti rakotiheyksien kolmiulotteisia arvoja estimoivat menetelmät sekä rakoilua ja heikkousvyöhykkeitä indikoivien mineraalien esiintyminen kaipaavat lisäselvitystä, johon tämän tutkimuksen resurssit eivät riittäneet.

Jatkotutkimuksen tarve

Syventävien tutkimusten tarve on selkeä. Kun huomioidaan aiheen dynaamiset yhteydet koko geologisten tieteiden muodostamaan laajaan tutkimusyhteyteen, on selvää etteivät yksittäisen tutkimuksen resurssit riitä tuottamaan aiheesta tyhjentävää tutkimusselvitystä. Eräiden erityiskysymysten osalta jatkotutkimusten tarve näytti niin selvältä, että olen koonnut ne tähän yhdeksi kokonaisuudeksi.

Atlasmatriisin valkoisten osien kartoittaminen kyselyllä

Tämän tutkimuksen yhteydessä on kaivosgeologisen kallioluokituksen potentiaaliselle käyttäjäkunnalle suoritettu lomakekysely, josta on selvinnyt vastaajien käsitys eri työvaiheparametrien välisistä riippuvuussuhteista.

Jatkotutkimuksia ajatellen asiantuntijoiden kokemuksen kerääminen tärkeiden kohteiden keskinäisistä sidonnaisuuksista olisi ensiarvoisen tärkeää. Paras tapa kehittää tutkimusta olisi epäilemättä tehdä uusi tarkennettu kyselykierros, jolla voitaisiin selventää keskeisiksi nousseiden parametrien sisäistä rakennetta (sisäistä muotoa) ja niiden keskinäisiä riippuvuuksia, sekä vielä vastauksista jäänyttä atlasmatriisin osaa louhintateknisten parametrien vaikutuksesta rikastusteknisiin ominaisuuksiin.

Kyselytutkimus jaettiin kaivosgeologeille ja louhinta- sekä rikastusinsinööreille Kemian Eläjärven kromiittikaivoksella, Oriveden Kutemajärven kultakaivoksella, Pyhäsalmen kaivoksella ja Siilinjärven karbonaattiilouhoksella, sekä lisäksi Vammalan Stormin rikastustehtaalla. Kaikilta ei valitettavasti kuitenkaan saatu vastauksia.

Vastauksien paremmaksi saamiseksi on jatkotutkimuksissa mahdollisesti hyvä suorittaa palkitsevaa motivointia.

Kyselyn laajentaminen koskemaan kaikkia Suomen kaivoksia

Esiintymätyypin ja louhintakohdetyypin erityispiirteet ovat parametriryhmiä, jotka kertovat onko kyseessä avolouhos vai maanalainen kaivos, mitä louhintatekniikkaa käytetään, onko kaivos jonkin toisen satelliitti, onko rikastusprosessi yhteinen jonkin toisen kaivoksen kanssa, jne. Näillä parametreilla on useiden esiintymien suhteen suuri paikallinen merkitys, mutta koska arvo ei vaihdu esiintymän sisällä, ei ole uskottavaa, että tällaisella parametrilla olisi käyttöä muualla kuin sellaisilla rikastustehtailla jotka saavat syötteensä useista eri kaivoksista, kuten on asia Outokumpu Oy:n Vammalan rikastustehtaalla.

Tällaiset erityiskysymykset onkin otettu huomioon paikan päällä, ja ehdotan tämänkin asian siirtämistä luokitusproblematiikkaa tarkentaviin jatkotutkimuksiin.

Hudsonin ESQ-asteikon linearisoiminen lineaarialgebrallista tarkastelua varten.

Saadun RES-matriisin (atlasatriisi) lineaarialgebrallisen tarkastelun olen jättänyt pois tästä esityksestä, koska se vaatisi tutkimuksessa käytetyksi lineaarisen asteikon. Koska ESQ-asteikon lineaarisuus on vähintäänkin kyseenalainen, on tähänkin erityisongelmaan syytä syventyä tulevissa asiaa koskevissa tutkimuksissa. Asteikon linearisointi lienee mahdollinen, mutta vaatinee samalla uuden kyselyn.

Kiviaineksen muuttuneisuuden arviointi mineralogisin perustein

Koska mineralogisen muuttuneisuuden arviointi vaatii merkittävää mineralogista ammattitaitoa, ei kiven muuttuneisuus kelpaa sellaisenaan uudeksi luokitusparametriksi, vaan vaatii lisätarkastelua tarkentavissa tutkimuksissa. Erityistä käytettävyyden lisäselvitystä kaipaavat muuttuneisuusluvut, joita käytetään esimerkiksi metamorfisessa petrologiassa kiven muuttuneisuuden mittarina.

Luokituksen parametrien herkkyyys ja virhekestoisuus

Kun luokitusta lähdettiin suunnittelemaan tehtiin lähtöoletus, että prosessin osatyövaiheet onnistuvat aina vähintään siinä määrin, että seuraava työvaihe saadaan toteutetuksi. Erilaiset virheet tutkimus- ja tuotantoprosessissa voivat kuitenkin aiheuttaa virhetilanteen myös perustetussa kaivosgeologisessa kallioluokituksessa. Tällaiset virheet voivat olla joko mittauksen tai arvioinnin tuottamaa luonnollista epätarkkuutta tai oikeita virheitä. Oikeat virheet johtuvat aina virheellisestä menettelystä, jonka seurauksena saatu informaatio ei ole oikeaa.

Tällaisia oikeita virheitä esiintyy eri parametrien yhteydessä hyvin monitahoisesti, virhe voi johtua tietokoneohjelman tai ihmisen virheellisestä toiminnasta tai väärän työtavan soveltamisesta. Tällaisiin tekijöihin on kiinnitettävä erityistä huomiota luokitusta sovellettaessa, mutta myös luokitusta voidaan kehittää siihen suuntaan, että käyttövirheiden toteutumista voidaan vähentää. Tällaista virhekestoisuudeksi nimittämääni ominaisuutta voidaan lisätä erityisesti parametrivalinnoilla ja luokitusperusteiden selkeydellä.

Jotta virhekestoisuutta voitaisiin luokituskohtaisesti kehittää, tarvitaan käytännön kokemusta luokituksen soveltamisesta ja virhetilanteiden esiintymisestä. Usein virhetilannetta läheltä tarkastelleilla henkilöillä on mielessään ratkaisu kyseiseen ongelmaan, mutta palaute luokituksen suunnittelijataholle tapahtuu harvoin spontaanisti. Tämän vuoksi jatkotutkimuksissa esitettävissä kyselylomakkeissa pitäisi huomioida mahdollisuus vaivattomasti ilmaista syntyneet virhetilanteet ja niihin esitetyt ratkaisumallit.

Parametrikohmainen mittausherakkyys määrittää puolestaan sen yhteydessä esiintyvän mitta-arvojen luontaisen epätarkkuuden, parametrien resoluution ylärajan, mikä on otettu huomioon jo luokituksen aikana. Epätarkkuudesta syntyvät virheet ovat luonteeltaan tilastollisia, ja perustetun luokituksen tulee jo perustettaessa olla niille tunteeton.

Kiitokset

Kiitän avusta Insinöörigeologian ja geofysiikan laboratorion henkilökuntaa: Heikki Niiniä työn ohjauksesta, Markku Peltoniemeä, Bengt Söderholmia, Matti Viikaria, Esa Ärmästä, Eevaliisa Lainetta, Tero Hokkasta ja Nuria Marcasia mielipiteistä ja rakentavasta keskustelusta, Jalle Tammenmaata, Ari Kuismaa, Jussi Leskistä, Taisto Tuokkoa, Tuija Mäkistä, Juhani Aavia ja Pekka Salovaaraa ammattimaisesta ja ystävällisestä suhtautumisesta työhöni ja kannustavasta tuesta työn kestäessä.

Haluan myös lausua kiitoksen Sakari Monoselle, Petri Pitkäselle, Jyri Liimataiselle, Olavi Seloselle, Tapio Ruotoistenmäelle ja Meri-Liisa Airolle antoisista keskusteluista tutkimuskeskeisessä työympäristössä ja joskus kosteammissakin olosuhteissa.

Kiitän lämpimästi saamistani palautteista ja arvioinneista Riku Raitalaa, Annika Hagrosia, Markku Väisästä, Saku Vuorta, Pasi Heikkilää, Jyrki Bergströmiä, Tuija Elmistä, Mika Pirttivaaraa, Taija Huotaria, Sonja Voipiota, Laura Fomin-Niemistä, Mirko Sorosta, Jannis Mikkolaa, Eero Hurmalaista, Vadim Falcónia, Janne Immosta ja Markus Karlssonia.

Kiitollisuuteni saavat myös kyselylomakkeeseeni vastanneet Ossi Leinonen, Olli Härmälä, Olavi Paatsola, Jaakko Kilponen, Heikki Saarnio, Juha Antikainen ja Alpo Seppänen.

Erityinen kiitos lankeaa John ”Rock” Hudsonille ja Robert Pirsigille heidän valaisevista teoksistaan, jotka ovat innoittaneet minua tielläni kohti luokitustutkimuksen systeemianalyttistä tarkastelutapaa.

Espoossa 28.10.1999

Jorma Palmén

Viiteluettelo

- Anttikoski, Usko & Saarelainen, Seppo, 1976.** Kalliossa oleva pohjavesi. Luku 10.23 teoksessa Maa- ja kalliorakennus, RIL 98.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974.** Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics. December 1974. Vol. 6 No. 4. Springer Verlag. Wien, New York. Sivut 189-236.
- Bieniawski, Z. T. 1973.** Engineering classification of jointed rock masses. Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs. 15. Sivut 335-344.
- Bucher, Kurt, Frey, Martin. 1991.** Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 6. Edition. Complete Revision of Winklers Textbook Springer-Verlag, (Revised version of **Winkler, Helmut G.F., 1974** Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 5. Edition. Springer-Verlag)
- Deere, D.U. 1973.** "The Foliation Shear Zone: An Adverse Engineering Geologic Feature of Metamorphic Rocks." J. Boston Soc. Civil Eng. (October).
- Deere, D.U., & R.P. Miller. 1966.** Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock (Technical Report AFWL-TR-65-116). Kirtland AFB: Air Force Weapons Laboratory.
- Grimstad, E., Barton, N., 1993.** Updating of the Q-system for NMT. Proceedings of Sprayed Concrete, 18-21 December 1993. Fagernäs. Norway.
- Hautsalo, Risto, 1986.** Lohkarekoon optimointi. Diplomityö. TKK/Kalliotekniikan laboratorio. Espoo. 54 s.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden, W. F., 1995.** Support of Underground Excavations in Hard Rock. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Hudson, John, A., 1992.** Rock engineering systems theory and practice. Rock Engineering Consultants and Imperial College, University of London. 185 s.
- Huuskonen, M. S. & Järvisalo, J. & Koskinen, H. & Nickels, J. & Räsänen, J. & Asp, S., 1983.** Preliminary results from a cohort of workers exposed to wollastonite in a Finnish limestone quarry. Scand. J. Work Environ. Health 9: 2.
- Jacobsson C. I., Jacobsson R. E. 1978.** Developing, The Negative Technique. Focal Press, London. 422 s.
- Juvonen, Riitta, 1999** Analysis of gold and the platinum group elements in geological samples. Geological Survey of Finland, Chemical Laboratory, Espoo. 54 s.
- Kauranne, L. K., Korpela, Kauko, Gardemeister, Reijo & Mälkki, Esko 1972.** Rakennusgeologia II, TKY 304.

- Korhonen, K-H, Gardemeister, Reijo, Jääskeläinen, Heikki, Niini, Heikki & Vähäsarja, Pentti, 1974.** Rakennusalan kallioluokitus. VTT GEO 12, 78 s. + liitteitä.
- Korkealaakso, Juhani, Vaittinen, Tiina, Pitkänen, Petteri, Front, Kai, 1994.** Fracture zone analysis of borehole data in three crystalline rock sites in Finland – the principal component analysis approach. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies. VTT Communities and infrastructure. Report YJT-94-11.
- Kuusisto, Erna, 1991.** Metalli- ja rikkimalmikaivosten ja louhosten jätealtaiden ja jätekasojen vaikutusta ympäristöön tutkivan hankkeen esiselvitys. Geologian tutkimuskeskus. 88 s.
- MTR 1988.** Kalliorakentamisen mahdollisuudet. Päätoim. Kari Saari. Maanalaisten tilojen rakentamisyhdistys r.y. – Finnish Tunneling Association. 207 s.
- Mustonen, Seppo, Kuusisto, Esko, Leskelä, Heino & Vakkilainen, Pertti, 1986.** Sovellettu hydrologia, sivut 101-184, Vesiyhdistyksen julkaisuja, Helsinki. 503 s.
- Mäkelä, Jukka, 1992.** Geologiset ympäristövaikutukset louhinnassa . Abstract: Geological factors affecting the environment in connection with underground excavation. Vuorimiesyhdistys - Bergsmannaföreningen r.y., tutkimusseloste, sarja A100, 84 s. + 2 liit.
- Niemi, Auli, 1994.** Modelling flow in fractured medium, Uncertainty analysis with stochastic continuum approach. VTT Publications, 188 s.
- Niini, Heikki, 1968.** A study of rock fracturing in valleys of Precambrian bedrock. Fennia 97: 6, 60 s., myös: RGY, julkaisuja 3: 26.
- Niini, Heikki 1971.** Kallioperän käyttömahdollisuudet. Kalliotilat ja tunnelit. Inskon julkaisu V 45-71.
- Niini, Heikki 1974.** Engineering-geological classification and measurement of the brokenness of bedrock in Finland. Proceedings 2nd international congress I.A.E.G. Brazil, Aug. 17-24, 1974, 7 s.
- Niini, Heikki 1976.** Kalliolaadun luonnollinen vaihtelu ja rakotiheyden mittaaminen. Rakennusgeologinen yhdistys – Byggnadsgeologiska föreningen ry:n julkaisuja Vol. 11, kirjoitus n:o 79. Kalliomekaniikan päivät 1976 ”kalliotilojen pysyvyys”. 25 s.
- Niini, Heikki, 1992a.** Geologiset varat. Geologi 43:2, s. 31-36.
- Niini, Heikki, 1992b.** Geologia, tekniikka ja yhteiskunta. Jatkokoulutusjulkaisu TKK-IGE-B-18, 201 s.
- Niini, Heikki, 1992c.** Rock Construction and Geology. Glacial Stratigraphy, Engineering Geology and Earth Construction. Geological Survey of Finland, Special Paper 15. sivut 125-131.

- Niini, Heikki, 1998.** Kallioperän rakennusgeologian luentomoniste, Helsingin yliopisto. 28 s.
- Niini, Heikki & Suvi Niini, 1995.** Vesigeologia (hydrogeologia). Opetusjulkaisu TKK-IGE-C-17, 176 s.
- Niini, Heikki, Parkkinen, Jyrki, 1995.** Tuotantogeologia. Jatkokoulutusjulkaisu TKK-IGE B20. 150 s.
- Niini, Heikki, Parkkinen, Jyrki, 1996.** Mineraalituotannon ympäristögeologiaa. Vuoriteollisuus 54:1, sivut 28-32.
- Niini, Heikki & Uusinoka Raimo 1978.** Weathering of Precambrian Rocks in Finland. Proceedings of the 3rd International Congress I.A.E.G., 4-8 september 1978 Sec. 11, vol 1, pp. 77-83.
- Palmén, Jorma, 1997.** Sallan emäksisen intruusioryhmän geologiasta. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopiston geologian laitos, geologian ja mineralogian osasto. 72 s.
- Papunen, Heikki, 1981.** Malmien mikroskooppinen rakennetutkimus. Suomen luonnonvarain tutkimussäätiö. 30 s.
- Peltoniemi, Markku, 1988.** Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo n:o 515, 411 s.
- Petruk, William (toim.), 1989.** Short Course on Image Analysis Applied to Mineral and Earth Sciences. Mineral Association of Canada. Ottawa, May 1989. 156 s.
- Pirsig, Robert M. 1986.** Zen ja moottoripyörän kunnossapito, WSOY 1996, 457 s.
- Raitala, Riku, 1997.** Hyvinkään emäksinen kerrosintruusio. Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto, geologian laitos, geologian ja mineralogian osasto. 73 s.
- RIL 98, 1976.** Maa- ja kalliorakennus. Kalliorakennusosa. Suomen rakennusinsinööriliitto r.y. 520 s.
- RIL 154-1 1987.** Tunneli- ja kalliorakennus I. 363 s.
- Rose, D. 1982.** Revising Terzaghi's Tunnel Rock Load Coefficients. Proceedings of the 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, AIME, New York, 1982, s. 953-960.
- Salminen, Pertti, 1986.** Teollisuusmineraaliesiintymien raakku- ja malmityyppikartointi geofysikaalisten menetelmien avulla. Vuorimiesyhdistyksen tutkimusseloste A76, 59 s. + liitt.
- Saltikoff, Boris, 1976.** Mineraalinimisanasto. Geologisen tutkimuslaitoksen tutkimusraportti n:o 11. 82 s.
- Terzaghi, K. 1946.** Rock Defects and Loads on Tunnel Support. Rock Tunneling with Steel Supports, edited R. V. Proctor & T. White, Commercial Shearing Co., Youngstown, OH, 1946, s. 15-99.

- Uusinoka, Raimo, 1968.** Eräitten kivilajien mekaanisesta rapautumisesta sekä siihen vaikuttavista ominaisuuksista. Pro gradu -tutkimus. Helsingin yliopisto, Geologian laitos, Geologian ja paleontologian osasto, 66 s.
- Vernon, R. H. 1999.** Porphyroblast-matrix microstructural relationships – recent approaches and problems. In: Daly, J. S., Cliff, R. A. and Yardley, B. W. D. (editors); Evolution of Metamorphic Belts. Geological Society of London, Special Publication 43, sivut 83-102.
- Vieno, Timo, Hautojärvi, Aimo, Raiko, Heikki, Ahonen, Lasse & Salo, Jukka-Pekka, 1994.** Report YJT-94-21. Application of the RES Methodology for Identifying Features, Events and Processes (FEPs) for Near-Field Analysis of Copper-Steel Canister. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies. December 1994. 32 s.
- VMY 1973.** Kallion rakenteellisten ominaisuuksien vaikutus louhittavuuteen (toim. P. V. Maijala, L. K. Kauranne, O. Lindholm, R. Matikainen & J. Mustala & H. Niini & E. Peltola). Vuorimiesyhdistyksen tutkimusseloste A27, 134 s.
- VMY 1986.** Heikkousvyöhykkeiden geofysikaaliset tutkimusmenetelmät (toim. Veikko Dammert & Anne Väättäinen). Vuorimiesyhdistyksen tutkimusseloste A75, 100 s.
- VMY 1988.** Näytteenotto ja havainnointeiko kaivosteknisten kallio-ominaisuuksien selvittelyssä (toim. Pentti Markkanen, Ole Lindholm, Matti Rajalahti, Raimo Uusinoka & Heikki Niini). Vuorimiesyhdistyksen julkaisuja, tutkimusseloste A84, 52 s.
- VMY 1982.** Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja (vastaava toimittaja Raimo Matikainen), Vuorimiesyhdistyksen julkaisu B29, 801 s.
- VMY 1994.** Kallioteknisen geologian sanasto, Geologisk ordlista för bergteknik, Glossary of Geology Related to Rock Engineering. Fi-Sv-E, Toim. Saikkonen, Reijo, Niini, Heikki, Härmälä, Olli, Parkkinen, Jyrki, Eklundh, Carola 1994. Vuorimiesyhdistyksen julkaisuja B 55 1994 Espoo. 68 s.
- VMY 1999.** Evaluointimallit malminetsinnässä. Kansainvälisten käsitteiden, standardien ja luokittelujen tarkastelua. Jyrki Parkkinen & Heikki Niini, 1999. Vuorimiesyhdistyksen julkaisu A113, 44 s.
- Vuolio, Raimo, 1980.** Louhintaräjäytysten suunnittelu ja suorittaminen. Suomen maarakentajien keskusliitto r.y. 188 s.
- Väliaho, Hannu 1980.** Lineaarialgebra. Limes ry. 208 s.
- Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. & Skinner, E. H. 1972.** Support Determination Based on Geologic Predictions. Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, AIME, New York, 1972, s. 43-64.
- Winkler, Helmut G.F 1974** Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 5. Edition. Springer-verlag). 318 s.

YK 1997. United Nations International Framework Classification for
Reserves/Resources – Solid Fuels and Mineral Commodities – Final Version
Economic and Social Council. Energy/WP.1/R.70 17. Feb. 1997, 23 s.

Liiteluettelo

1. Yleisimpien ja taloudellisesti merkittävien mineraalien ominaisuuksia.
2. Työvaiheparametrien välisiä riippuvuuksia selvittäneen tutkimuksen kyselylomake.
3. Kyselytutkimuksen vastausaineisto matriiseina, cause-effect-diagrammeina ja vuorovaikutusintensiteetti-dominoivuus-diagrammeina.
4. Atlasmatriisi kaikista kyselytutkimuksen tiedoista koostettuna.

Liite 1

Ryhmä	Mineraali	Koostumus	Kovuus	Om.paino	Väri	Viiru	Metallikiilto	Muita ominaisuuksia
<u>Alkuaineet</u>	Rikki	S	1.5-2.5	2.1	keltainen	-	-	hauras, rombisia kiteitä
	Kulta	Au	1.5	19.3	kullanvärinen	kulta	+++	juonissa hopean kanssa lejeerinkinä, hippuina maaperässä, harvoin kiteisenä
	Grafiitti	C	1	2.2	harmaanmusta	musta	+	suomuinen, tahraava
<u>Sulfidit</u>	Lyijyhohde, galeniitti	PbS	2.5	7.6	sinertävänharmaa	musta	+	kuutiollinen lohkeavuus
	Sinkklvälke, sfaleriitti	(Zn,Fe)S	3.5-4	4.1	kellertävän ruskea	ruskea	+(+)	useita lohkosuuntia
	Kuparikiisu	CuFeS ₂	3.5-4	4.2	vihertävän messinginkeltainen	musta	++	hapettuu usein kirjavaksi
	Magneetikiisu, pyrrotiitti	Fe _{1-x} S	3.5-4.5	4.6	ruskean messinginkeltainen	musta	++	yleensä heikosti magneettinen
	Pentlandiitti	(Ni,Fe) 8S ₉			ruskean messinginkeltainen	musta	++	ei magneettinen, oktaedrinen lohkeavuus, usein yhteenkasvettumina magn.kiisussa
	Rikkikiisu, pyriitti	FeS ₂	6-6.5	5	messingin keltainen	musta	++	hauras usein kuutioll. kiteitä, ei lohkosuuntia
	Arseenikiisu, arsenopyriitti	FeAsS	5.5-6	6.1	hopeanvalkea	musta	++	sipulin haju iskettäessä
	Sinooperi	HgS ₂	2-2.5	8.1	punainen	pun.	-	erill.kiteissä metallikiilto
	Molybdeenihohde	MoS ₂	1-1.5	4.7	sinertävänharmaa	musta	++	suomuinen, tahraava (rasvamainen)
<u>Oksidit</u>	Magnetiitti	Fe ₃ O ₄	5.5-6.5	5.1	musta	musta	+	voimakkaasti magneettinen
	Kromiitti	(Mg,Fe)Cr ₂ O ₄	5.5-6	4.5-5.1	musta (ruskea)	musta	+	mukana voi olla viol. kiillettä (kämmereriitti)
	Hematiitti	Fe ₂ O ₃	5-6	5.2	harmaanmusta	pun.	+	rakeinen tai somuinen (voimakas kiilto)
	Ilmeniitti	FeTiO ₃		4.8	sinertävänharmaa	musta	+	puhtaana ei magneettinen, mutta esiintyy magnetiitin kanssa jolloin vaikea identifioida
	Korundi	Al ₂ O ₃	9	4	harmaa	valk.	-	kiteet heksagonisia prismoja joissa värillisiä vyöhykkeitä, parting-lamellit tyypillisiä
	Kassiteriitti	SnO ₂	6-7	7	ruskea-musta	harm.	++	pieniä kiteitä, usein kaksost.
	Pikivälke, uraniniitti	UO ₂			musta-ruskea-vihertävä-harmaa			kiteet oktaedreja ja kuutioita, erittäin radioaktiivinen
	<u>Hydroksidit</u>	Goethiitti	4-5.5	3-4	ruskea-musta	kelt.	(+)	kuituinen, munuaism. muotoja, multamainen, kovuus < 3
		Bauksiitti			valkea			
<u>Halidit</u>	Fluoriitti	CaF ₂	4	3.2	väritön, violetti, vihertävä, keltainen			oktaedrinen lohkeavuus
<u>Karbonaatit</u>	Kalsiitti	CaCO ₃	3	2.7	väritön, valkoinen, kellertävä, punertava			romboedrinen lohkeavuus
	Sideriitti	FeCO ₃	4	3.9	ruskea			romboedrinen lohkeavuus
	Dolomiitti	CaMg(CO ₃) ₂	3.5-4	2.9	väritön, valkoinen, kellertävä, ruskehtava			Romboedrinen lohkeavuus
	Magnesiitti	MgCO ₃	3.5-4					
	Malakiitti	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂	3.5-4	4	tummanvihreä-vaaleanvihreä			munuaismaisia muotoja (konkoidinen tekstuuri)
	<u>Sulfaatit</u>	Baryytti	3-3.5	4.5	valkoinen, väritön, punertava			selvät rombiset lohkosuunnat
<u>Fosfaatit</u>	Kipsi	CaSO ₄ · 2H ₂ O	2	2.3	väritön, valkoinen, punertava			levymäinen, tai kuituinen, samansuuntaiset kuidut toimivat valokuidun tapaan
	Apatiitti	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F, Cl, OH)	5	3.2	yleensä vihertävä, kellertävä, karbonaattijäsen ruskehtava			hauras, ei selviä lohkosuuntia
<u>Silikaatit</u>								
<u>Nesosilikaatit</u>	Oliviini	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	6.5	3.2-4.3	vihreä, ruskeanvihreä			usein rakeinen, ei kvartsin yht.
	Granaatti (ryhmä)	(Ca,Mg,Fe,Mn) ₃ (Al,Fe,Cr) ₂ (SiO ₄) ₃	7-7.5	3.6-4.3	punainen, musta, ruskea, vihreä ym.			hauras, ei lohkosuuntia, omamuot. kuutioll.kiteitä
	Kyaniitti	Al ₂ (O/SiO ₄)	4-5//c, 6-7//b	3.6	sinertävä			sälöinen (kvartsin yhteydessä)
	Sillimaniitti	Al ₂ (O/SiO ₄)	7	3.2	valkoinen			kuituinen (vrt. wollastoniitti)
	Andalusiitti	Al ₂ (O/SiO ₄)	7.5	3.1	valkoinen punertava			esiint. kyhmyinä liuskeissa
	Topaasi	Al ₂ SiO ₄ (OH,F) ₂	8	3.5	väritön, sinertävä, kellertävä, punertava			hyvä lohkosunta // 001
	<u>Nesojohdannaiset</u>	Stauroliitti	7	3.7	ruskea			Esiint. omamuot. rombisina kiteinä (kaksosia) liuskeissa
<u>Rengassilikaatit</u>	Epidootti	Ca ₂ (Al,Fe)Al ₂ O(SiO ₄)(Si ₂ O ₇)(OH)	7	3.3-3.6	kellavihreä			esiintyy usein rakopinnoilla, rakeinen, massamainen, neulasmainen
	Berylli	Be ₃ Al ₂ Si ₆ O ₁₈	8	2.6-2.9	kellertävä, vihertävä, sinertävä punertava			ei selviä lohkosuuntia, esiintyy joskus heksagonisina prismoina

Ryhmä	Mineraali	Koostumus	Kovuus	Om.paino	Väri	Muita ominaisuuksia
Inosilikaatit <i>Pyrokseenit</i>	Turмалиini (ryhmä)	XY₃Z₆ (BO ₃) ₃ (Si ₆ O ₁₈)(OH,F) ₄ X= Ca, Na ja/tai K,Y= Al, Fe, Li, Mg ja/tai (Mg,Fe) ₂ Al ₃ (AlSi ₅ O ₁₈)	7.5 Mn,Z= Al, Cr, Fe ja/tai V 7	3-3.2 2.6-2.7	musta, vihreä, sininen, punainen,ym musta jäsen on yleensä schörl (Fe – jäsen) violetti,tummansininen,harmaa	kiteet trigonisia prismoja jotka pituussuunnassa viirukkeisia. Kiteiden päät voivat olla erilaisia ja värillinen vyöhykkeinen rakenne on yleistä pleokroinen, läpikuultava, "kvartsimainen"
	Kordieriitti					
	Hypersteeni	(Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆	6	3.2-3.9	musta tummanruskea	selvät lohkosuunnat, rombinen
<i>Pyrokseenidit</i>	Diopsidi	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆	6	3.3-3.6	vihreä, ruskeanvihreä, valkoinen	selvät lohkosuunnat, monokliininen
	Augiitti	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	6	3.3-3.6	musta, tummanruskea	esiintyy syväkivissä ja laavoissa, monokliininen
	Wollastoniitti	CaSiO ₃ t. Ca ₃ (Si ₃ O ₉)	5	2.9	valkoinen	sälöinen tai kuituinen, esiintyy kalkkikivissä
<i>Amfibolit</i>	Rodoniitti	MnSiO ₃ t. Mn ₄ Ca(Si ₅ O ₁₅)	6	3.5-3.7	punainen (marjapuuron väri)	rakeinen, musta rapautumispinta
	Antofylliitti	(Mg,Fe) ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	6	2.9-3.3	harmaa, valkoinen, vihertävä	usein kuituinen, asbestimainen, rombinen
	Tremoliitti-aktinoliitti	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	n. 6	3-3.5	valkoinen, vihertävä, harmaa	kuituinen, sädekivi
Fyllosilikaatit <i>Savimineraalit</i>	Sarvivälke	Ca ₂ (Mg,Fe) ₄ Al(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH,F) ₂	6	3-3.4	musta, tummanvihreä	sälöinen, jauhe vihertävä
	Kaoliniitti	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2	2.6	valkoinen	massamainen, tuoksuu savelle kostutettaessa
	Montmorilloniitti	(Ca, Na) _{0.3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	1-2	2.6	harmaa-vihreä-kellertävä-punertava-ruskea	paisuvahilainen mineraali jonka tiheys riippuu kosteudesta
<i>Kiilteet</i>	Serpentiini(ryhmä)	(Mg,Fe,Ni) ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2.5-5	2.5-2.6	vihreä, kellanvihreä	massa- tai asbestimainen, tummuu kostutettaessa
	Talkki	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	1	2.8	valk., vihertävä, ruskehtava	tuntuu rasvaiselta, liukas sormien välissä
	Muskoviitti	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH,F) ₂	2.5/4	2.8-2.9	väritön, kellert., vihert.	etevä levymäinen lohkeaminen, suomet taipuisia läpikuultavia
Silikamineraalit	Biotiitti	K(Mg,Fe) ₃ (Al,Fe)Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	2.5/4	2.8-3.4	musta, ruskea	etevä levymäinen lohkeaminen, suomet taipuisia mutta eivät läpikuultavia
	Kloriitti(ryhmä)	(Mg,Fe,Al) ₆ (Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	2.5	2.6-3.3	vihreä	etevä levymäinen lohkeaminen, suomet eivät ole taipuisia
	Kvartsi	SiO ₂	7	2.65	väritön, valkoinen, violetti. jne.	ei lohkosuuntia, murros yleensä kupurainen tai simpukkamainen
Hohkasiliikaatit		Matala-kvartsi	7	2.65	Kärkikolmiot trigonisia	
		Korkea-kvartsi	7	2.65	(kit.lämpötila > 573°C), romboedrin kärkikolmiot heksagonisia	korkea-kvartsikiteissä c-akselin suuntaiset prismapinnat ovat lyhyet
	Kalimaasälpä	KAlSi ₃ O ₈	6	2.56	punertava, valkoinen, sininen, harmaa, turkoosi	selvät lohkosuunnat, pertiittilamelit, korin pohjakaksostus (mikroskoopissa)
	Sanidiini	KAlSi ₃ O ₈	6	2.56		sanidiini esiintyy vain laavoissa ja metamorfisissa kivissä
	Ortoklaasi	KAlSi ₃ O ₈	6	2.56	Kuukivi	kalimaasälvän monokliininen muoto
	Mikrokliini	KAlSi ₃ O ₈	6	2.56	turkoosi muunnos amatsoniitti	kalimaasälvän trikliininen muoto
	Plagioklaasi	(NaSi,CaAl)AlSi ₂ O ₈	6	2.62-2.73	valkoinen, harmaa, sinertävä,musta	selvät lohkosuunnat, kaksosviirukkeisuus
	Albiitti	NaAlSi ₃ O ₈	6			labradorisointi (irisointi)
	Anortiitti	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	6			spektroliitti
<i>Foidit</i>	Skapoliitti		6	2.6-2.8	valkoinen, vaaleanharmaa, vihertävä	ei selviä lohkosuuntia, puumainen lohkeavuus, tetragoninen
	Marialiitti-	Na ₄ Al ₃ Si ₉ O ₂₄ Cl	6			
	Meioniitti	Ca ₄ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ (CO ₃ ,SO ₄)	6			
	Nefeliini	(Na,K)AlSiO ₄	6	2.6	valkoinen, harmaa	esiintyy alkalikivissä: hiukan rasvamainen kiilto, ei selviä lohkosuuntia
	Sodaliitti	Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ Cl ₂	6	2.3	sininen	esiintyy alkalikivissä
	Zeoliitit	Leusiitti	6	2.5	väritön, valkoinen, harmaa	laavoissa ikositetraedrisia kiteitä
	Natrolitiitti	Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ 2H ₂ O			valkoinen	Laavaonteloissa kuituisia sferuleja
	Heulandiitti	(Na,Ca) ₂₋₃ Al ₃ (Al,Si) ₂ Si ₁₃ O ₃₆ · 12H ₂ O	4	2.2	valkoinen (punertava)	omamuotoisia kiteitä laavaonteloissa
	Stilbiitti	NaCa ₂ Al ₅ Si ₁₃ O ₃₆ · 14H ₂ O	4	2.2	valkoinen, kellertävä, punertava	lyhyitä kuitukimppeja laavaonteloissa

M. Lehtinen & J.Palmén 1999 Yleisimpien - ja taloudellisesti merkittävien mineraalien ominaisuuksia

Jakelu: Heikki Niini, Juha Antikainen, Sakari Mononen, Vesa Kirjavainen, Esa Ärmänen, Timo Mäki, Heikki Saarnio, Jaakko Kilponen, Alpo Seppänen, Olli Härmälä, Olavi Paatsola, Ossi Leinonen

Vastaajan nimi: _____

Puhelinnumero: _____

Sähköpostiosoite: _____

KYSELY PARAMETRIEN RIIPPUVUUKSISTA

Pyrin tällä kyselyllä selvittämään mikä on eri asiantuntijoiden näkemys eräiden teknisten osaparametrien keskinäisistä vaikutussuhteista. Kyse on (potentiaalisista) ominaisuuksista, ei työn suorituksista. Johdatukseksi aiheeseen olen esittänyt lyhyesti parametrien sisäisen hierarkian. Varsinaiset vastaukset merkitään numerokoodilla 0, 1, 2, 3 tai 4 kyselyn lopussa esitettyyn kahteen (kolmeen) matriisiin tekstissä esitetyllä tavalla.

Parametri **kallion hyödynnettävyys** koostuu osaparametreista:

- 1. Louhintatekninen hyödynnettävyys** (koostuu osaparametreista)
- 2. Rikastustekninen hyödynnettävyys** (koostuu osaparametreista)

Parametri **louhintatekninen hyödynnettävyys** koostuu seuraavista osaparametreista:

- 1. Porattavuus (kulutuspehmeys)**
- 2. Irrotettavuus (hauraus, sitkeys)**
- 3. Louhintajäljen parannettavuus (hyvän jäljen saatavuus)**
- 4. Siirrettävyys**
- 5. Murskattavuus**

Parametri **irrotettavuus** koostuu seuraavista osaparametreista:

- 1. Räjätettävyys (hauraus)**
- 2. Jyrsittävyys (hauraus, sitkeys)**

Parametri **louhintajäljen parannettavuus** koostuu seuraavista osaparametreista:

- 1. Rusnattavuus (vrt. räjäytettävyys ja jyrsittävyys)**
- 2. Lujitettavuus (rikkoutuneisuus, huokoisuus)**
- 3. Tuettavuus**
- 4. Tiivistettävyys (vedenjohtavuus, lujitettavuus)**

Parametri **siirrettävyys** koostuu osaparametreista:

1. **Lastattavuus (lohkarekoko, rikotusmenetelmä, pölyäminen)**
2. **Siirtolastattavuus (hissinostossa)**
3. **Kuljetettavuus (pölyhävikki)**

Parametri **rikastustekninen hyödynnettävyys** koostuu osaparametreista:

1. **Jauhettavuus**
2. **Seulottavuus**
3. **Erotettavuus (vrt. seulottavuus)**
4. **Veden poistettavuus**
5. **Jätteen käsiteltävyys**

Mainittujen parametrien lisäksi on matriiseihin merkitty kolme **geologista parametria**:

1. **Kiven koostumus (mineraalikoostumus, kemiallinen koostumus)**
2. **Kiven rakenne (mikroskooppinen rakenne, tekstuuri)**
3. **Kallion rakenne (tektoniikka, rikkonaisuus)**

Ja lisäksi louhintateknisen hyödynnettävyyden matriisiin yksi tekninen parametri

1. **Raakun hyödynnettävyys**

Optimoidun RES-matriisin vaikutussuhteiden määrittäminen voidaan suorittaa useilla eri tavoilla. Tässä tutkimuksessa se suoritetaan ESQ-menetelmällä (Expert Semi-Quantitative, Hudson 1992, sivu 48). Siinä diagonaalijäsenten väliset vuorovaikutusintensiteetit koodataan viisitasoiselle asteikolle:

- | | |
|----------|-----------------------------------|
| 0 | Ei vaikutusta |
| 1 | Heikko vaikutus |
| 2 | Keskivahva vaikutus |
| 3 | Vahva vaikutus |
| 4 | Erittäin voimakas vaikutus |

Numerokoodi merkitään parametrien rivin ja sarakkeen risteyskohtaan seuraavan esimerkin mukaan: riville jolla sijaitsee parametri **porattavuus** merkitään kuinka paljon porattavuus vaikuttaa sarakkeessa sijaitsevaan parametriin, vaikkapa sarakkeeseen jossa sijaitsee **lujitettavuus** merkitään porattavuuden vaikutus lujitettavuuteen. Eli siis jos kallio on porattavaa, niin seuraako siitä että se on lujitettavaa.

Tällä tavoin arvioiden tulisi käydä läpi koko taulukko ruutu ruudulta. Jokaiseen ruutuun pitäisi saada arvo, mutta jos et millään saa muodostettua mielipidettä, jätä kyseinen ruutu tyhjäksi. Tässä kyselyssä on kyse henkilökohtaisesta näkemyksestäsi. Toivon että harkitset mielipiteesi huolellisesti, jotta voin ottaa ne huomioon kaivosgeologisen kallioluokituksen perustamisessa.

Kiitos avustasi ja kärsivällisyydestäsi!

Jorma Palmén, FM, tutkija

Louhintatekninen hyödynnettävyys 14X14 RES-matriisissa, täytä tyhjätsolut arvoilla 0-4. Jos olet eri mieltä valmiiden merkintöjen suhteen,merkitse niiden viereen oma mielipiteesi!

Poratavuus		4								0	0	0		
	Räjätettävyy									0	0	0		
4		Jyrsittävyys								0	0	0		
			Rusnattavuus							0	0	0		
				Lujitettavuus						0	0	0		
					Tiivistettävyy			0	0	0	0	0		
						Lastatavuus				0	0	0		
							Siirtolastatavuus			0	0	0		
								Kuljetettavuus		0	0	0		
									Murskattavuus	0	0	0		
										Kivenkoostumus				
											Kivenrakenne			
	4											Kallion rakenne		
1	2	2	1			2	2	2	2	0	0	0	Raakunhyödynnettävyys	
														Σ

Rikastustekninen hyödynnettävyys 8X8 RES-matriisissa, täytä tyhjät solut (0-4).

Jauhetavuus					0	0	0	
	Seulotavuus				0	0	0	
		Erotetavuus			0	0	0	
			Veden poistotavuus		0	0	0	
0	0	0	0	Jätteen käsiteltävyys	0	0	0	
					Kiven koostumus			
					0	Kiven rakenne		
					0		Kallion rakenne	
								Σ

Puuttuiko tästä kyselystä jokin mielestäsi keskeinen parametri tai useampia?

Miten nimeäisit kyseiset parametrit?_____

Jakaisitko jonkin parametrin pienempiin osaparametreihin kaivosgeologisessa kallioluokituksessa huomioonotettavaksi? _____

Mitä osaparametreja katsot tarpeelliseksi lisätä?_____

Kirjoita lisätyt osaparametrit RES-matriisiin lävistäjärutuuihin.
