

GEOLOGINEN TUTKIMUSLAITOS

Ydinjätteen sijoitustutkimusten projektiryhmä

Tiedonanto 25 G - 1.5

Pekka Patrikainen

SUOMEN KIVILAJIEN MERKITTÄVIMMÄT MATERIAALIOMINAISUUDET
YDINJÄTTEEN LOPPUSIJOITUKSEN KANNALTA

Abstract: The most important material properties of the Finnish rocks in respect of the final disposal of the radioactive waste



Espoo, heinäkuu 1983

GEOLOGINEN TUTKIMUSLAITOS

Ydinjätteiden sijoitustutkimusten projektiryhmä

Tiedonanto 25 G - 1.5

Pekka Patrikainen

SUOMEN KIVILAJIEN MERKITTÄVIMMÄT MATERIAALIOMINAISUUDET YDIN-
JÄTTEEN LOPPUSIJOITUKSEN KANNALTA

Osa kauppa- ja teollisuusministeriön energiaosaston
rahoittamasta projektista

Espoo, heinäkuu 1983

PP/tj

SUOMEN KIVILAJIEN MERKITTÄVIMMÄT MATERIAALIOMINAISUUDET YDINJÄTTEEN LOPPUSIJOITUKSEN KANNALTA

Pekka Patrikainen

SISÄLLYSLUETTELO	sivu
Abstract	3
1. JOHDANTO	6
2. LUOKITUSOMINAISUUDET	7
2.1 Yleistä	7
2.2 Raekoko	7
2.3 Raemuoto	8
2.4 Lohkeavuus	8
2.5 Huokoisuus	9
2.6 Ominaispaine, tiheys ja tilavuuspaine	10
3. LUJUUS- JA MUODONMUUTOSOMINAISUUDET	12
3.1 Yleistä	12
3.2 Kitkakulma ja koheesio	13
3.3 Puristuslujuus	13
3.4 Vetolujuus	14
3.5 Taivutuslujuus	15
3.6 Kimmomoduuli	15
3.7 Suppenemisluku	15
3.8 Jäykkyysmoduuli	16
3.9 Lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien merkitys	16
4. MINERALOGIS-KEMIAALLISET OMINAISUUDET	18
4.1 Rapautuminen	18
4.2 Radioaktiivisuus ja lämmöntuotto	19
4.3 Sorptio	20
5. HYDROGEOLOGISET OMINAISUUDET	22
5.1 Vesipitoisuus	22
5.2 Vedenjohtavuus ja -läpäisevyys	23
5.3 Hydrogeologisten ominaisuuksien merkitys	24
6. TERMISET OMINAISUUDET	24
6.1 Yleistä	24
6.2 Ominaislämpökapasiteetti	25
6.3 Lämmönjohtavuus	26
6.4 Lämpötilan diffuusiokerroin	27
6.5 Lämpölaajeneminen	27
6.6 Termisten ominaisuuksien merkitys	28
7. GEOFYSIKAALLISET OMINAISUUDET	29
7.1 Yleistä	29
7.2 Akustinen johtavuus	30

7.3 Sähkönjohtavuus	31
7.4 Magneettisuus	31
8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTELMÄT	32
9. LÄHDELUETTELO	34

ABSTRACT

The aim in disposing of nuclear wastes in the Finnish Precambrian basement is to isolate them from the biosphere. After isolating the wastes in repositories, they should not pose any radioactive threat to the biosphere, and still require a minimum amount of special long-term attention.

So far, only preliminary studies have been carried out in Finland concerning properties of rock types favorable for the final disposal of radioactive wastes. Wider and more detailed studies have lately been conducted abroad, but these results are not directly applicable in the Finnish bedrock conditions.

The material properties of the Finnish rocks have been studied only in a few special investigations. Relevant research work concerning the most important material properties of the Finnish rock types has not yet been carried out.

The principal aim of this study has been to evaluate the most important material properties of the Finnish rock types in the final disposal of radioactive wastes. This study is based on appropriate literature and the results of some special investigations.

This study consists of a general inquiry into the principles of the material properties of the Finnish Precambrian rocks, the special investigations and literature, and the functions of material properties of the rock in the final disposal of radioactive wastes.

The most important material properties of the rocks are the mineralogical, chemical, physical, mechanical and elastic properties. Due to their low porosity, the Finnish Precambrian rocks are nearly watertight. Therefore, the hydraulic conductivity in the compact rock material itself is not considered as one of the most important properties. On the contrary, the most important

hydrogeological factor of the Finnish basement rock formations is fracturing. The fractures in the rock form the permeable paths through the rock massive.

Physical tests carried out in the laboratory yield correlative results to the results of site investigations carried out in the field.

This report consists of the preliminary studies of some material properties of rocks. The results of this report stand primarily for the results of the work report itself, and therefore complementary and more specialized studies are required in further investigations.

ALKUSANAT

Geologisessa tutkimuslaitoksessa ydinjätteiden sijoitusta tutkivan projektiryhmän eräänä osatehtävänä on ollut selvittää ydinjätteiden loppusijoitukseen merkittävimmin vaikuttavia Suomen kivilajien tavanomaisia materiaaliominaisuuksia.

Kyseistä aihetta on Suomessa aikaisemmin projektiryhmän toimesta käsitelty mm. julkaisuissa Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunnan raportti YJT-82-36 /7/. Kyseisessä selvityksessä on analysoitu ja vertailtu korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen kannalta merkittäviä geologisia tekijöitä. Geologisista tekijöistä on myös käsitelty yleisesti Suomen kivilajien materiaaliominaisuuksia.

Tämä selvitys, joka käsittelee Suomen kivilajien merkittävimpiä materiaaliominaisuuksia ydinjätteiden loppusijoituksen kannalta, on tehty kauppa- ja teollisuusministeriön energiaosaston rahoittamana tutkimuksena. Tutkimusaineiston kokoamisen, käsittelyn ja raportoinnin on suorittanut tutkija, FM Pekka Patrikainen vuosien 1981 - 1983 aikana. Puhtaaksikirjoituksen on tehnyt vs. toimistos sihteeri Tuula Junninen.

Geologisessa tutkimuslaitoksessa 8.7.1983

Pekka Patrikainen

1. JOHDANTO

Ydinjätteen loppusijoituksella kallioperään tarkoitetaan jätteen sijoittamista kallioon siten, että sitä varten rakennetut tilat voidaan lopullisesti sulkea ja ydinjäte voidaan turvallisesti jättää tiloihin ilman valvontaa. Loppusijoituksen tarkoituksena on radioaktiivisia aineita sisältävän ydinjätteen eristäminen biosfääristä siten, ettei siitä koskaan aiheudu haittavaikutusta ympäristön luonnolle.

Turvallisuus ydinjätteen loppusijoituksessa tilojen sulkemisen jälkeen perustuu toisiaan seuraavien barriäärien periaatteeseen. Tällä tarkoitetaan sitä, että radioaktiivisten aineiden on läpäistävä useita perättäisiä, toisiaan täydentäviä esteitä ennen kuin ne voivat päästä loppusijoitustilasta elollisen luonnon piiriin. Tällaisia radionuklidien vapautumisen esteitä ovat jätetuote, jätepakkaus, loppusijoitustilan rakenteet ja täyteaineet sekä kallioperä /12/.

Kivilajit jaetaan tavallisesti neljään pääluokkaan: sedimenttikivilajeihin, vulkaniitteihin, syväkivilajeihin ja metamorfisiin kivilajeihin. Suomen kallioperä koostuu pääasiallisesti syvä- ja metamorfisista kivilajeista. Sedimenttikiviä esiintyy vain kahdella pienellä ja rajatulla alueella, Porin - Kokenmäen ja Kempeleen - Hailuodon seuduilla. Täysin muuttumattomia, metamorfoitumattomia vulkaniitteja ei Suomessa tavata.

Kivilajit luokitellaan geologisesti lähinnä syntymistavan, mineraalikoostumuksen, rakenteen ja muuttumisasteen mukaisiin yksiköihin, jotka usein muodostavat vaihtuvia kivilajisarjoja.

Suomen kallioperän pinta-alasta yli 50 % koostuu syväkivilajeista, joita ovat mm. graniitti, dioriitti, gabro ja peridotiitti. Metamorfiset kivilajit peittävät noin 40 % Suomen kallioperästä. Yleisimpiä metamorfisia kivilajejamme ovat gneissit, amfiboliitit, liuskeet, kvartsiitit ja leptiitit.

Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta Suomen kivilajien tärkeimpiä materiaaliominaisuuksia ovat luokitusominaisuudet, lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet, mineralogis-kemialliset, hydrogeologiset, termiset ja geofysikaaliset ominaisuudet, joita käsitellään seuraavassa tarkemmin. Nämä ominaisuudet vaihtelevat suuresti kivilajien syntyhistorian, geologisen esiintymisen, ulottuvuuksien ja keskinäisen aseman mukaan. Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta löytyy Suomen kivilajien materiaaliominaisuuksista tietoa varsin niukasti.

2. LUOKITUSOMINAISUUDET

2.1 Yleistä

Kullakin kivilajilla on tietty ominainen mineraalikoostumus. Tämän lisäksi kivilajeilla on joukko fysikaalis-kemiallisista ominaisuuksista koostuvia materiaaliominaisuuksia. Näistä luokitusominaisuuksiin luetaan kuuluviksi mm. raekoko, raemuoto, rakeiden lohkeavuus, huokoisuus, ominaispaino, tiheys ja tilavuuspaino. Luokitusominaisuudet saattavat olla samanlaiset läpi koko kiven, jolloin kivilaji on homogeeninen tai ominaisuudet voivat vähitellen vaihettua tai jyrkästi muuttua. Tällöin kivilaji on epähomogeeninen.

2.2 Raekoko

Kivilajin raekoko ilmaistaan keskimääräisenä tai vallitsevana raekokona. Suomen kivilajit ovat yleisimmin keskirakeisia (\varnothing 1 - 5 mm). Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta edullisimpia olisivat lasimaiset, tiiviit (\varnothing 0,05... 1 mm) kivilajit. Lasimaiset kivilajimuodostumat ovat kuitenkin harvinaisia ja loppusijoituksen kannalta kooltaan liian pieniä ja rikkonaisia.

2.3 Raemuoto

Raemuodoltaan kivilaji on rakeinen kun sen rakeiden ulottuvuudet ovat kaikkiin suuntiin jokseenkin samansuuruisia. Suomaisissa kivilajeissa mineraalinyksi ulottuvuus on huomattavasti muita ulottuvuuksia pienempi. Kivilaji on mineraalirakenteeltaan sälöinen, kun mineraalien yksi ulottuvuus on muita suurempi. Kivilaji on kuituinen jos mineraalirakeiden pituus on muihin ulottuvuuksiin nähden erittäin suuri ja leveys sekä paksuus tuskin havaittavia.

Mineraalirakeiden muoto vaikuttaa mm. siihen, kuinka lujasti kivilajin rakeet liittyvät toisiinsa. Epämääräisen muotoiset rakeet ja sekaisin olevat sälöiset ja kuituiset rakeet aikaansaavat lujemman rakenteen kuin samat mineraalit pyöreäköinä ja sileäpintaisina.

Kivilajien rakeiden muoto ydinjätteen loppusijoituksessa vaikuttaa lähinnä kivilajin lujuusominaisuuksien välityksellä loppusijoitustilojen louhintatapaan ja louhinnan tilojen pysyvyyteen. Kivilajien rakeiden muodolla on merkitystä ominaispinta-alan ja täten myös sorptio-ominaisuuksien kannalta.

2.4 Lohkeavuus

Lohkeavuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä kivilajeja muodostavien mineraalien kykyä lohjeta tietyissä suunnissa tasaisin pinnoin. Lohkosuuntien lukumäärä, selkeys sekä lohkopintojen väliset kulmat ovat kullekin mineraalille tunnusomaisia. Lohkosuuntien puuttuessa mineraali rikkoutuu epätasaista ja särmiäkstä pintaa myöten.

Mineraalien lohkeavuus vaikuttaa kiven lujuuteen. Mineraalit noudattavat toisinaan kimmoteoriaa vain vaikuttavien voimien ollessa pieniä. Jos voimat kasvavat, muuttuu mineraalien

käyttyäytyminen aluksi plastiseksi ja sitten viskoelastiseksi. Tähän vaikuttaa mineraalia muodostavien hilojen dislokaatio (loksahdus) ilman, että mineraalikide hajoaa.

Helposti lohkeavien ja joustavien mineraalien (mm. maasälvät, kiilteet) runsas esiintyminen kivilajissa lisää kivilajien mikrorakoilun alttiutta ja siten saattaa vähentää kiven lujuutta.

2.5 Huokoisuus

Huokoisuudella tarkoitetaan kiviaineksen sisältämien huokosten ja mikrorakojen prosentuaalista tilavuutta. Huokokset voivat olla joko veden tai ilman täyttämiä. Huokoisuus voidaan ilmaista myös huokoslukuna, jolla tarkoitetaan kiviaineksen kokonaistilavuuden suhdetta kiinteän kiviaineksen tilavuuteen.

Huokoisuus ilmentää kivilajin tiiveyttä. Kivilajin huokoisuus on kääntäen verrannollinen kivilajin tiiveyteen.

Ydinjätteidien loppusijoituksen kannalta negatiivista merkitystä kivilajin huokoisuuden kasvamisessa on kivilajin lujuuden väheneminen ja vesipitoisuuden ja migraation lisääntyminen. Toisaalta huokoisuuden kasvamisessa on positiivista, että mm. sorptiota edistävä pinta-ala lisääntyy ja kivilajin lämmönjohtavuus, lämpödiffuusio sekä lämpölaajeneminen usein vähenevät.

Kivilajien rapautuminen lisää huokoisuutta. Rapautuminen on voimakkainta kallion pintaosassa, mutta rapautuneita rako- ja ruhjevyyöhykkeitä on tavattu useiden satojen metrien syvyydessäkin. Ydinjätteidien loppusijoituksen kannalta rapautumisella, varsinkin korkea-aktiivisen ydinjätteen pitkänä aktiivisuusaikana tapahtuvalla rapautumisella loppusijoitustilan lähistössä on negatiivista merkitystä kivilajin lujuuden vähenemisen ja migraation lisääntymisen muodossa, mutta toisaalta positiivista merkitystä sorptiokyvyn lisääntymisen muodossa.

Taulukossa 1 on esitetty eräiden tyyppillisten suomalaisten kivilajien huokoisuuksien keskiarvoja /8/.

Tuloksista voidaan todeta, että esimerkiksi sedimenttikivilajeihin nähden syvä- ja metamorfisten kivilajien huokoisuudet ovat rapautumisvaikutusta lukuunottamatta varsin alhaisia.

Taulukko 1. Esimerkkejä suomalaisten kivilajien keskiarvoisista huokoisuuksista /8/.

Kivilaji	Huokoisuus (n) %
graniitti, pienirakeinen, Teisko	0,31
graniitti, keskirakeinen, Myrskylä	0,53
graniitti, " Loimaa	0,62
granodioriitti, keskirakeinen, (rapautunut), Jyväskylä	2,05
granodioriitti, keskirakeinen, Jyväskylä	0,42
dioriitti, keskirakeinen, (tumma), Metsämaa	0,26
dioriitti, " , (vaalea), Kuru	0,38
gabro, " , Hyvinkää	0,97
amfiboliitti, Ylöjärvi	0,31
kiillegneissi, Hollola	0,39
kiilleliuske, Outokumpu	5,42
kvartsiitti, Lahti	0,21

2.6 Ominaispaino, tiheys ja tilavuuspaino

Kivilajin ominaispainolla käsitetään mineraaleista koostuvan kivilajin painon kertalukua verrattuna samaan määrään vettä. Puhtaan veden ominaispaino on yksi. Ominaispaino on dimensioton suure.

Kivilajin kiintotiheys on tiiviin (ei huokostiloja) kivilajimassan paino tilavuusyksikköä kohti. Numeroarvoina kivilajien ominaispaino ja kiintotiheys vastaavat toisiaan.

Kiintotiheyttä pienempi kivilajin tiheysarvo on irtotiheys, joka ilmaisee huokoisen (huokostilat mukaanluettuna) kivilajimassan painon tilavuuden suhteen. Taulukossa 2 on esitetty eräitä Suomen yleisempien rapautumattomien kivilajien tavallisia irtotiheyksien vaihteluarvoja /7/.

Taulukko 2. Eräiden Suomen kivilajien tavallisimpien irtotiheyksien vaihteluarvoja /7/.

Kivilaji	Irtotiheys \bar{d} Mg/m ³
graniitti	2,57...2,75
granodioriitti	2,59...2,79
dioriitti	2,64...2,83
gabro	2,78...2,96
graniittigneissi	2,58...2,78
kiillegneissi	2,66...2,88
amfiboliitti	2,72...2,89
kvartsiitti	2,61...2,67
kiilleliuske	2,62...2,84

Kivilajien tilavuuspainon määräävät lähinnä kivilajin mineraalikoostumus ja tiheys sekä huokoisuus ja vesipitoisuus. Kivilajin kuivatilavuuspainolla tarkoitetaan kiven kuivapainon ja tilavuuden suhdetta ja vastaavasti märkätilavuuspainolla vedellä kyllästetyn kiven (märkäpainon) ja tilavuuden suhdetta.

Suomen tavallisimpien kivilajien kuivatilavuuspainot ovat lukuarvoltaan yleensä noin kymmenkertaiset irtotiheyteen nähden, (huom. mittayksiköt). Huokosten sisältämästä vedestä johtuen märkätilavuuspainot ovat luonnollisesti kuivatilavuuspainoihin nähden hieman korkeampia. Taulukossa 3 on esitetty eräiden Suomen kivilajien tilavuuspainojen yleisimpiä vaihteluarvoja /7/.

Taulukko 3. Eräiden Suomen kivilajien tavallisimpia tilavuuspainojen vaihteluarvoja /7/.

Kivilaji	Kuivatilavuuspaino \bar{d} kN/m ³	Märkätilavuuspaino \bar{d} sat kN/m ³
graniitti	25,7...27,5	26,2...28,0
granodioriitti	25,9...27,9	26,2...28,3
dioriitti	26,4...28,3	26,6...28,6
gabro	27,8...29,6	28,0...29,8
graniittigneissi	25,8...27,8	26,0...27,0
kiillegneissi	26,6...28,8	26,9...29,1
amfiboliitti	27,2...28,9	27,6...29,4
kvartsiitti	26,1...26,7	26,3...26,9
kiilleliuske	26,2...28,4	26,8...29,3

Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta kivilajin ominaispainon, tiheyksien ja tilavuuspainojen merkitys rajoittuu lähinnä laskentaparametreiksi määriteltäessä kivilajien termisiä ominaisuuksia sekä suunniteltaessa loppusijoituksen tilarakenteita.

3. LUJUUS- JA MUODONMUUTOSOMINAISUUDET

3.1. Yleistä

Kivilajin lujuudella yleensä tarkoitetaan suurinta jännitysarvoa tietyissä olosuhteissa, joka jatkuessaan johtaa kiven murtumiseen. Jännitystilasta riippuen yleisimmin käytettyjä kiven lujuusparametrejä ovat puristus-, veto-, leikkaus- tai taivutuslujuus.

Kivilajin lujuus mekaanista jännitystä vastaan riippuu kivilajin muodostavien mineraalien laadusta, lujuudesta, lohkeavuudesta, murtumistaipumuksesta, raekoosta ja yhteenliittymistavasta, rapautuneisuudesta sekä tietenkin rakenteesta. Myös ulkoiset tekijät, kuten lämpötila, kosteus, mekaanisen jännityksen kasvunopeus ym. vaikuttavat kiven lujuuteen kestää mekaanista jännitystä.

Kivilajien muodonmuutosominaisuuksilla tarkoitetaan sitä, millä tavalla kiven muodonmuutos riippuu jännityksestä. Muodonmuutosominaisuuksia voidaan kuvata erilaisia tunnuslukuja käyttäen. Tärkeimmät näistä ovat kimmomoduuli, suppenemisluku ja jäykkyysmoduuli. Nämä kiven muodonmuutosominaisuuksia kuvaavat lukuarvot eivät ole vakioita, vaan vaihtelevat samassakin kivilajissa kuorimitustilanteen mukaan verrattain suurissa rajoissa.

3.2. Kitkakulma ja koheesio

Kivilajin lujuusominaisuuksiin vaikuttavia rakenneparametrejä ovat kivilajin sisäinen kitkakulma ja koheesio. Eräiden suomalais-ten kivilajien (kuiva kivi) kitkakulman ja koheesio arvoja on esitetty taulukossa 4 /8/.

Taulukko 4. Eräiden Suomen kivilajien koheesio ja kitkakulman arvoja /8/.

Kivilaji	Koheesio (MN/m ²)	Kitkakulma (°)
graniitti	12...20	75...90
granodioriitti	10...17	70...80
dioriitti	10...15	75...85
gabro	15...25	50...70
gneissi	10...20	25...85
kvartsiitti	15...20	60...85
liuskeet	5...15	10...85

3.3 Puristuslujuus

Kivilajin puristusrakennemuoto on toisiaan vastaan kohtisuorien puristusjännitysten erisuuruudesta johtuva leikkausrakennemuoto. Homogeeninen kivilaji ei rikkoudu jos siihen kohdistuu joka puolelta yhtä suuret puristusjännitykset, olivatpa nämä kuinka suuria tahansa /10/.

Liuskeisuuden voimakkuudesta, kiillemäisten mineraalien runsaudesta ja liuskeisuustasojen säännöllisyydestä sekä kuormituksen suunnasta riippuen kiven puristusrakennemuoto vaihtelee varsin huomattavasti. Yleensä kivi sallii suurimmat puristusjännitykset liuskeisuutta vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Pääjännityksen ollessa liuskeisuuden suuntainen alenee puristuslujuuden maksimimurtolujuus keskimäärin puoleen liuskeisuuden vastaiseen puristusrakennemuotoon nähden. Puristusrakennemuoto pienenee asteettain yhdensuuntaisesta liuskeisuuden ja pääjännityksen puristusrakennemuotoarvosta puristuslujuuden minimiarvoon, joka saadaan pääjännityksen ja liuskeisuuden ollessa n. 45° kulmassa toisiinsa nähden /7/.

Taulukossa 5 on esitetty eräiden Suomen kivilajien tavallisimpia puristusrakenteiden puristuslujuuksien vaihteluarvoja /6, 8/. Nämä arvot edustavat tosin vain ohjeellisia lukema-arvoja ja saattavat käytännössä vaihdella taulukossa esitettyä paljon suuremmissakin rajoissa.

Taulukko 5. Eräiden suomalaisten kivilajien tavallisimpia puristusrakenteiden puristuslujuuksien arvoja /6, 8/.

Kivilaji	Puristusrakenteiden puristuslujuus (MN/m ²)
graniitti	200...350
gneissi	150...300
gabro	260...350
amfiboliitti	150...450
kvartsiitti	200...300
kiilleliuske	100...250
leptiitti	200...450
kalkkikivi	50...150
rapakivi	100...250

3.4. Vetolujuus

Suomen kivilajeista tehdyissä vetomurtolujuuskokeissa saatujen tulosten sekä likiarvolaskelmien perusteella on todettu, että vetomurtolujuus on yleensä 5...10 % vastaavan kivilajin puristusrakenteiden puristuslujuudesta. Kallioteknisesti tällä on oleellinen merkitys ydinjätteen loppusijoituksen tilarakenteita ja niiden lujituksia suunniteltaessa.

Voimakkaasti liuskeisissa kivissä on liuskeisuuden vastainen vetomurtolujuus vain vähäinen osa vastaavansuuntaisesta puristusrakenteiden puristuslujuudesta.

Suomalaiset kivilajit liuskeita ja fylliittejä lukuunottamatta kestävät yleensä hyvin leikkausjännityksiä. Tavallisimpien ja keskinkertaisen homogeenisten kivilajien leikkausrakenteiden puristuslujuus on 20...40 % vastaavansuuntaisesta puristuslujuuden arvosta /7/.

3.5. Taivutuslujuus

Kiven taivutusmurtolujuus on Suomessa varsin harvoin käytetty kivilajin lujuusominaisuusparametri. Tavallisimpien kivilajien taivutusmurtolujuudet vaihtelevat välillä 15...35 % puristusmurtolujuudesta /10/.

3.6 Kimmomoduuli

Kimmomoduulilla tarkoitetaan kiveen vaikuttavan jännityksen suhdetta jännityksen suuntaiseen muodonmuutokseen. Suomen kivilajit käyttäytyvät yleensä kuormitettaessa aluksi kimmoisesti. Kuormitusjännityksen voimakkuuden, kuormitusajan ja lämpötilan kasvaessa kiven käyttäytyminen muuttuu enemmän viskoelastiseksi ja sitten plastiseksi.

Kivilajien liuskeisuus ja poimutus ilmentävät luonnossa tapahtuneita suuria muodonmuutoksia korkeassa lämpötilassa ja paineessa pitkän ajan kuluessa. Kuitenkin lyhytaikaisessa aksiaalissa kuormituksessa suomalaisten kivilajien kimmomoduuli on verrattain suuri.

Suomen kivilajeilla tehdyissä kokeissa kimmomoduulien arvot ovat asettuneet välille $20...160 \text{ GN/m}^2$ keskimääräisen arvon ollessa $60...70 \text{ GN/m}^2$ /10/.

3.7. Suppenemisluku

Suppenemisluvulla (Poissonin luku) tarkoitetaan jännitystä vastaan kohtisuoran muodonmuutoksen suhdetta jännityksen suuntaiseen muodonmuutokseen.

Teoreettisesti suppenemisluku voi olla alueella 0...0,5 kiven käyttäytyessä elastisesti. Käytännössä suppenemisluku vaihtelee tavanomaisilla suomalaisilla kivilajeilla yleensä rajoissa

0,1...0,4, asettuen useimmiten rajoihin n. 0,20...0,25. Kvartsi ja maasälpärikkäillä, ns. vaaleilla kivilajeilla suppenemisluku jää usein alle 0,15. Tummillä kivilajeilla suppenemisluku on yleensä yli 0,25. Rapautuneiden ja pehmeiden kivilajien suppenemisluku noudattelee yleistä keskiarvoa ollen luokkaa 0,20...0,25. Suppenemisluvulla on taipumusta kasvaa jännitystason kasvaessa /7, 10/.

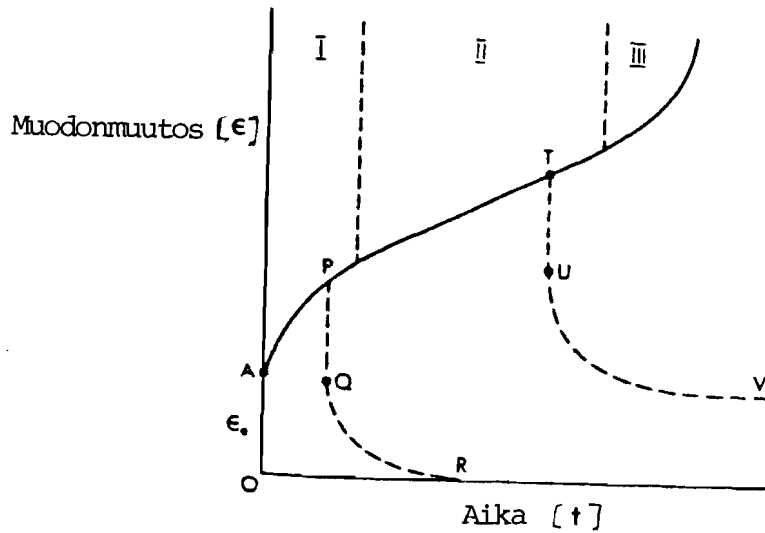
3.8. Jäykkyysmoduuli

Jäykkyysmoduulilla tarkoitetaan kiveen vaikuttavan leikkausjännityksen suhdetta leikkausjännityksen aiheuttamaan muodonmuutokseen. Jäykkyysmoduulia käytetään tavallisimmin kallio-tilojen ja -rakenteiden suunnittelussa erilaisten elementtinetelmien lähtöarvona. Tavallisilla suomalaisilla kivillä jäykkyysmoduuli on tavallisesti noin 40 % vastaavasta kimmo-
moduulista /10/.

3.9. Lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien merkitys

Ydinjätteiden loppusijoituksen kannalta tulevat kivilajien lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet olemaan merkityksellisiä lähinnä loppusijoitustilojen ja niihin liittyvien rakenteiden suunnittelussa ja rakentamisessa. Myöskin pysyvien tilarakenteiden mahdollisia lujitus- ja tiivistämistoimenpiteitä määritettäessä on joskus tarpeellista selvittää jotkin kiven lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet.

Loppusijoituksen kalliossa aiheuttamien mahdollisten muodonmuutosten kannalta korostuu aikatekijän merkitys. Kuormitusajan vaikutus kiven lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin on ilmeisen erilainen eri kivilajeilla. Kuvassa 1 on periaatepiirros kuormitusajan vaikutuksesta hiipumaan (ajalliseen muodonmuutokseen) /1/.



Kuva 1. Periaatepiirros kuormitusajan vaikutuksesta hiipumaan /1/.

Kuvassa muodonmuutosakseli on jaettu kolmeen hiipumavyöhykkeeseen:

Vyöhyke I on primäärin hiipuman vyöhyke, II sekundäärin hiipuman vyöhyke ja III tertiäärin hiipuman vyöhyke.

Heti kuormituksen alkaessa syntyy kimmoinen muodonmuutos (ϵ_0), joka kuormituksen lakattua palautuu välittömästi. Primäärin hiipuma on se osa muodonmuutosta, joka palautuu hitaasti kimmoinen muodonmuutoksen palautumisen jälkeen. Kuormitusajan kasvaessa syntyy sekundäärin hiipuma eli palautumaton muodonmuutos (plastinen muodonmuutos), joka pitkinä ajanjaksoina on huomattava. Tertiäärin hiipumassa kivi alkaa heiketä lähestyessä murtopistettä /1/.

Kivilajien hiipuma- eli reologisia ominaisuuksia on tutkittu toistaiseksi varsin vähän, etupäässä erilaisilla mallikokeilla. Kivilajien hiipuman systemaattinen tutkiminen ja tulostus toistaiseksi puuttuvat, eikä edes suuntaa-antavia arvoja kriittisille reologisille ominaisuuksille voida esittää.

Ydinjätteiden loppusijoituksessa hiipuman määrittäminen tulee tarpeelliseksi, kun kysymyksessä on kiven lujitusten ja täytemateriaalin muodostaman liittorakenteen pitkäaikaisen toimivuuden selvittäminen. Hiipumaan ja liittorakenteen toimivuuteen vaikuttaa myös jätteiden aiheuttamat termiset jännitykset. Reologisten tutkimusten suorittamista käytännön tarpeisiin rajoittavat kokeiden edellyttämät erityisen pitkät havaintoaajat.

4. MINERALOGIS-KEMIALLISET OMINAISUUDET

4.1 Rapautuminen

Rapautuminen on ilmiö, jossa kiinteä ja terve kivilaji muuttuu löyhäksi ja irtonaiseksi aineeksi. Rapautumisilmiöt jaetaan yleensä kolmeen pääluokkaan: mekaaniseen, kemialliseen ja biologiseen rapautumiseen. Suomalaisissa kivilajeissa merkittävimpiä ovat mekaaninen ja kemiallinen rapautuminen. Biologista rapautumista ilmenee aivan kallion pintaosassa ja vain muutamassa kivilajissa.

Kivilaji voi rapautua kemiallisesti tai mekaanisesti. Mekaanisessa rapautumisessa kivilajilohkojen tai mineraalien liitokset heikkenevät tai katkeavat niin, että kivilaji murenee lohkariksi tai vielä pienemmiksi osiksi. Kemiallisessa rapautumisessa kiderakenne heikkenee tai hajoaa, jolloin kivilajista tulee pehmeä, huokoinen ja se liukenee.

Kivilajien mekaaninen rapautuminen johtuu lähinnä mineraalien erilaisesta lämpölaajenemisesta tai pintaosassa veden jäätymisestä huokosiin ja hiusrakoihin. Suomen karkearakeiset kivilajit rapautuvat mekaanisesti nopeammin kuin hienorakeiset kivilajit. Tämä johtuu lähinnä karkearakeisten kivilajien lämpölaajenemisen aiheuttamista suuremmista jännityksistä hienorakeisiin kivilajeihin verrattuna.

Kemiallisessa rapautumisessa yleensä erotetaan neljä prosessia: liukeneminen, hydrolyysi, ioninvaihto ja hapeuttuminen. Näiden prosessien edellytyksenä on riittävän vesimäärän virtaaminen kiven läpi, mikä puolestaan edellyttää merkittävää kiven huokoisuutta. Tämän johdosta jää kemiallisten prosessien merkitys Suomen kivilajeissa varsin vähäiseksi. Jossain määrin kemiallista rapautumista kivilajeissa tapahtuu, mistä ovat osoituksena yleisempien mineraalien, maasälpäiden serisiittiytyminen ja saussuriittiutuminen (kemiallinen muuttuminen kiillemineraaleiksi ja epidootiksi) sekä tummien mineraalien, etenkin biotiitin, kloriittiutuminen.

Yleisesti voidaan todeta, että Suomen kivilajit eivät ole alttiita rapautumiselle ja nykyisen rapautumisen merkitys ydinjätteen loppusijoituksessa jää varsin vähäiseksi. Kuitenkin pitkien aikojen kuluessa syntyneet, kivilajimassiiveja leikkaavat, rapautuneet ruhjevyöhykkeet, joita saattaa esiintyä syvälläkin kalliossa vaikuttavat ydinjätteen loppusijoituksessa loppusijoitustilojen sijoitteluun ja rakenteisiin mm. kallion teknisten seikkojen, vedenjohtavuuden kasvamisen ja radionuklidien pidättymiskyvyn kasvamisen muodossa.

4.2 Radioaktiivisuus ja lämmöntuotto

Useimmissa Suomen kivilajeissa esiintyy vähäistä radioaktiivisuutta (taustasäteilyä). Tämä taustasäteily johtuu kiven sisältämistä radioaktiivisista mineraaleista ja aktiivisuuden määrä näiden mineraalien runsaudesta. Suomen kivilajeissa yleisimmin esiintyviä radioaktiivisia mineraaleja ovat kalimaasälpä, zirkoni ja pikivälke, joissa esiintyy radioaktiivista kaliumia (^{40}K), rubidiumia (^{87}Rb), uraania (^{235}U ja ^{238}U), toriumia (^{232}Th) sekä uraanin (^{238}U) radioaktiivisia tytärameita radonia (^{222}Rn) ja radiumia (^{226}Ra) /7/.

Kivilajien tärkeimpiä radionuklideja sisältävät mineraalit ovat rikastuneet maankuoren pintakerrokseen, ns. pii-aluminium eli sial-kehään, jossa ne myös tuottavat pääosan maankuoren lämmöstä.

Suomen kivilajeista ydinjätteen loppusijoituksen kannalta lämmöntuotto on merkityksellisintä graniiteissa ja graniittisissa gneisseissä. Näiden kivilajien lämmöntuotto on suuruusluokkaa 1000×10^{-12} W/kg. Tummista mineraaleista rikkaiden kivilajien mm. gabro, peridotiitti, amfiboliitti, lämmöntuotto on selvästi alhaisempi vaihdellen välillä $1,5 \dots 150 \times 10^{-12}$ W/kg /4/.

Taulukkoon 6 on koottu muutamien syväkivien keskimääräisiä uraani-, torium- ja kaliumpitoisuuksia ja lämmöntuottoarvoja /4/.

Taulukko 6. Esimerkkejä muutamien kivilajien U-, Th- ja K-pitoisuuksista sekä lämmöntuottoarvoista /4/.

Kivilaji	Näyt- teitä	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Lämmön- tuotto (10^{-12} W/kg)
Peridotiitti		0,003	0,005	0,03	1,5
Gabro (Kogan et al. /5/)		0,5	3,0	0,85	160
Dioriitti		1,8	7,0	2,31	450
Graniitti		3,5	18,0	3,34	950
Viipurin rapakivi (Kivekäs /3/)					
Viborgiitti	51	5,9	23,1	4,8	1370
Tasarakeinen rapakivi	10	14,3	47,5	5,2	2860
Laitilanrapakivi (Vorma /13/)					
Normaali rapakivi	11	4,5	23,2	4,5	1220
Biotiittirapakivi	13	7,6	43,6	4,6	2080

Ydinjätteen loppusijoituksessa muodostaa sijoituskohteen kivilajien taustasäteilyn lisäksi huomioonotettavan tekijän myös kivilajien lämmöntuotto ja näiden tekijöiden yhteisvaikutus loppusijoitustilaan, rakenteisiin ja ympäristöön.

4.3 Sorptio

Sorptiotutkimuksien avulla selvitetään radionuklidien pidättymistä ja kulkeutumisen hidastumista geologisissa väliaineissa, joita ovat sijoitustilojen täyteaine, kallioperä ja viime kädessä kallioperää peittävä maaperä. Nuklidien kulkeutumisnopeus kiviaineksen läpi on kertaluokkia pienempi kuin pohjaveden virtausnopeus yleensä kalliossa. Tämä johtuu nuklidien jaympäröivän kiven välillä tapahtuvista kemiallisista ja fysikaalisista prosesseista kuten:

- ioninvaihto
- adsorptio
- reversiibeli saostuminen
- irreversiibelit reaktiot kiviaineksen kanssa
- mineralisoituminen

Kaikkia näitä prosesseja kutsutaan yhteisnimellä sorptio /14/.

Tärkeimmät kivilajista riippuvat sorptioilmiöt ovat ioninvaihto ja adsorptio.

Kivilajin ioninvaihto-ominaisuudet riippuvat ensisijaisesti mineraalikoostumuksesta, huokoisuudesta, raekoosta sekä vesipitoisuudesta ja veden laadusta. Yleisimmät vaihtuvat kationit ovat Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , ja Na^+ . Myös eräitä anioneja kuten SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , PO_4^{3-} ja NO_3^- voi adsorboitua mineraalirakeisiin kiteen paikallisen varaustasapainon saavuttamiseksi. Mikä ioni kulloinkin pystyy vaihtumaan toiseen ioniin tai iskostumaan kivilajiin, riippuu paitsi mineraaleista myös pohja- ja huokosveden fysikaalisista ja kemiallisista tekijöistä kuten pH:sta ja elektrolyyttipitoisuudesta /15, 16/.

Absorboituneet ionit voivat vaihtua toisiin saatavissa oleviin ioneihin ja sen vuoksi niitä kutsutaan vaihtuviksi eli vaihtokykäisiksi ioneiksi. Kivilajin ioninvaihtokapasiteetilla tarkoitetaan sitä ionimäärää, jonka se kykenee adsorboimaan. Vaihtuvien ionien määrä on yleensä esitetty milliekvivalentteina 100 g kiviainesta kohti (me/100 g).

Sorption vaikutusta nuklidien kulkua hidastavana tekijänä kivesssä kuvataan viivästystekijällä K_1 , joka arvo ilmoittaa kuinka monta kertaa hitaammin nuklidi kulkeutuu kivessä verrattuna pohjaveden virtausnopeuteen.

Kivilajille, jossa on huokosia ja mikrorakoja viivästystekijä voidaan esittää myös massaan perustuvalla tasapainotekijällä K_d :

$$K_d = \frac{\text{Nuklidien määrä kalliassa (mol/kg)}}{\text{Nuklidien määrä pohjavedessä (mol/m}^3\text{)}}$$

Koska tasapainotekijä riippuu sekä nuklideja lähettäneen ydinjätteen että kivilajin ominaisuuksista, määräytyy viivästystekijä aina erikseen erilaisille jätteille ja kivilajeille /14/.

Ydinjätteiden loppusijoituksen kannalta merkityksellisimpiä ominaisuuksia on kivilajin radionuklideja sitova sorptioaktiivisuus. Sorptio-ominaisuudet määräytyvät lähinnä kiven mineralogisesta koostumuksesta ja rakenteesta. Loppusijoituksen kannalta edullisimpia kivilajeja ovat ne kivilajit, jotka koostuvat runsaasti tärkeimpiä radionuklideja sitovista ja mahdollisimman paljon vapaata pintaa omaavista mineraaleista. Suomen kivilajien vähähuokoisuudesta ts. vapaiden mineraalipintojen vähäisyydestä johtuen merkittävin sorptio tapahtuukin kivilajin raontäyte- ja rako-pintamineraaleissa. Tällä hetkellä sorptiotutkimusten osalta ollaan vielä perustutkimuksen alkuvaiheessa, mutta varsinkin OECD/NEA:n käynnistämä kansainvälinen sorptiotiedosto antaa reaalisia toiveita relevanttien tulosten saamiseksi lähitulevaisuudessa.

5. HYDROGEOLOGISET OMINAISUUDET

5.1 Vesipitoisuus

Vesi esiintyy kivilajeissa kemiallisesti eri mineraaleihin sitoutuneena vetenä sekä mineraalien välisissä ja sisäisissä mikro-
raoissa ja huokosissa vapaana vetenä. Kivilajin huokoisuuden, varsinkin mineraalien rapautumisen myötä sekä mikrorakoilun lisääntyessä myös kivilajin vesipitoisuus lisääntyy. Pohjavedenpinnan alapuolella kivilajin kyllästymisaste on yleensä lähes 100 %. Kiven kyllästymisasteella tarkoitetaan kiven huokosissa ja mikro-
raoissa olevan vesimäärän suhdetta kiven huokosten ja mikrorakojen kokonaistilavuuteen.

Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta kivilajin huokoisuuden ja mikrorakoilun ja näiden myötä mahdollisen vesipitoisuuden lisääntyminen ovat negatiivisia ilmiöitä, koska nämä ominaisuusmuutokset kivilajissa mm. heikentävät kiven lujuusominaisuuksia ja edistävät veden tihkumista kiven läpi. Ko. ominaisuusmuutokset tulevat merkityksellisiksi lähinnä loppusijoitustilojen kalliorakenteiden pysyvyyttä ja radionuklidien kulkeutumista selvitettäessä.

5.2 Vedenjohtavuus ja -läpäisevyys

Kivien vedenjohtavuutta (hydraulic conductivity), jolla ymmärretään veden tihkumista kiven läpi ilmaistaan yleensä vedenjohtavuuskertoimella k . Tämän laatu on m/s (L/T). Kiven vedenjohtavuus on riippuvainen aikaisemmin mainittujen kiven rakenneominaisuuksien lisäksi myös läpivirtaavan veden viskositeetista ja tiheydestä, jotka puolestaan ovat riippuvaisia mm. veden lämpötilasta sekä kemiallisesta ja fysikaalisesta konsentraatiosta /10/.

Kivilajien läpäisevyys (permeability) on riippumaton kiven läpi tihkuvan veden ominaisuuksista. Kivilajin läpäisevyys on riippuvainen pelkästään kiven rakenteesta, jonka läpi vettä tihkuu. Kiven läpäisevyys on suoraan verrannollinen kivilajin poikkipinta-alalla olevien huokosten ja mikrorakojen pinta-alaan sekä niiden läpimitan neliöön. Läpäisevyys ilmaistaan merkinnällä K ja sen laatu on m^2 (L^2).

Kiven hydraulisen johtavuuden (k) ja läpäisevyyden (K) välinen yhteys voidaan esittää yhtälöllä /11/:

$$k = \frac{\rho \times G}{\mu} \times K$$

ρ = nesteen tiheys

G = maan vetovoiman kiihtyvyys

μ = nesteen viskositeetti

Veden tihkumista kivessä ja mahdollisesti radionuklidien kulkeutumista tämän kiven läpi tihkuvan veden mukana säätelevät lähinnä kivilajin huokoisuus, mikrorakoilu ja rakenneominaisuudet, mineralogis-kemialliset ominaisuudet sekä veden fysikaalis-kemialliset ja termiset ominaisuudet.

Suomessa esiintyvien tavanomaisten, rapautumattomien kivilajien vedenjohtavuus ja -läpäisevyysarvot ovat alhaisia ja käytännössä lähes merkityksettömiä ts. itse kivilajit ovat lähes vettäläpäisemättömiä. Kivilajin vedenjohtavuus jää ydinjätteiden loppusijoitukseen vaikuttavana tekijänä näin ollen täysin kalliomassiihin rikkonaisuusrakenteista riippuvaiseksi. Tällaisia rakenteita ovat siirrokset, ruhjevyöhykkeet ja rakoilu.

5.3 Hydrogeologisten ominaisuuksien merkitys

Kivilajin hydrogeologisten ominaisuuksien merkitys ydinjätteiden loppusijoituksessa tulee oleelliseksi lähinnä vain vesipitoisuuden aiheuttaman kiven lujuusominaisuuksien selvittämisessä loppusijoitustilojen pysyvyyttä tarkasteltaessa sekä vähäisessä määrin loppusijoitustilojen lähivyöhykkeen mahdollisen rapautumisalttiuden kasvamisen ja tilojen aukaisun aiheuttamassa mikrorakoilun vedenjohtavuuden lisääntymisen tarkasteluissa.

Suomessa kivilajin vedenläpäisevyys ydinjätteiden loppusijoituksessa on varsin merkityksetön ympäröivän kalliomassiihin rakenteista aiheutuviin vedenläpäisevyys- ja hydrogeologisiin ominaisuuksiin verrattuna.

6. TERMISET OMINAISUUDET

6.1 Yleistä

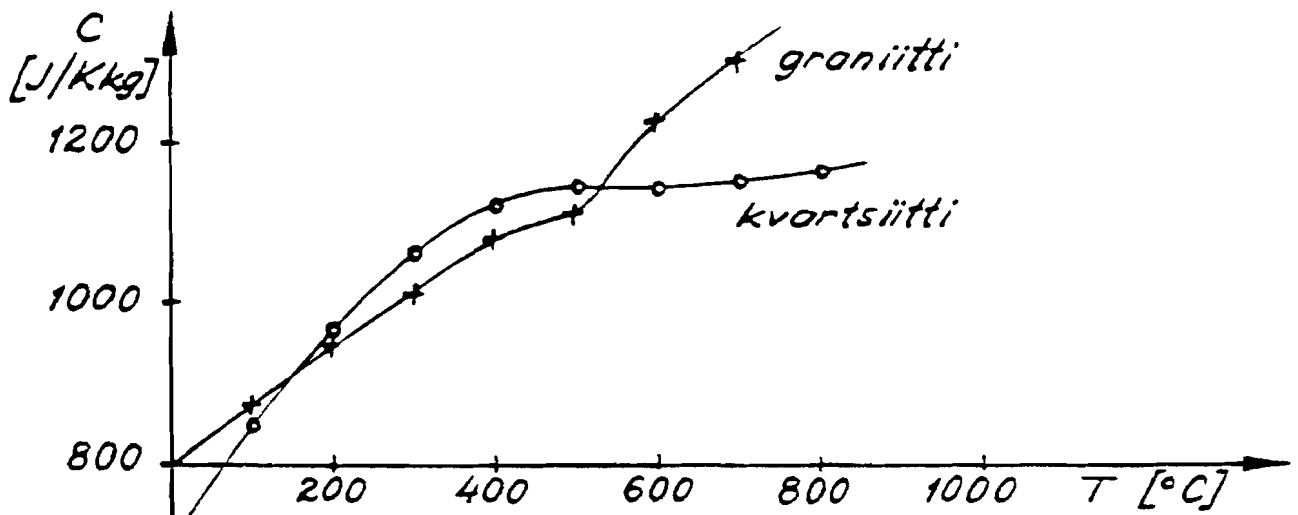
Ydinjätteen loppusijoituksen kannalta merkittävimpiä kivilajien lämpö- eli termisiä ominaisuuksia ovat ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja lämpölaajeneminen.

6.2 Ominaislämpökapasiteetti

Lämpömäärä, joka tarvitaan, että kivilajin massayksikön lämpötila nousee yhden asteen, on ko. kivilajin ominaislämpökapasiteetti. Ominaislämpökapasiteetti ilmentää siten kivilajin kykyä varastoida lämpöä.

Tiiviillä ja kuivalla kivilajilla on yleensä hieman alhaisempi ominaislämpökapasiteetti kuin huokoisella ja huokostilat vedellä täyttyneellä kivilajilla. Esim. Jyväskylän alueen keskirakeisen, kuivan graniittisen ja granodioriittisen kiven ominaislämpökapasiteetti vaihtelee välillä 700...800 J/K x kg /8/.

Tavallisimpien kivilajien ominaislämpökapasiteettien arvot eivät eroa merkittävästi toisistaan. Yhteisenä piirteenä on kuitenkin todettu, että kivilajien lämpötilan noustessa niiden ominaislämpökapasiteetti myös kasvaa. Kuvassa 2 on esitetty graniitin ja kvartsiitin ominaislämpökapasiteetin riippuvuus lämpötilasta /4/.



Kuva 2. Graniitin ja kvartsiitin ominaislämpökapasiteetin riippuvuus lämpötilasta /4/.

6.3 Lämmönjohtavuus

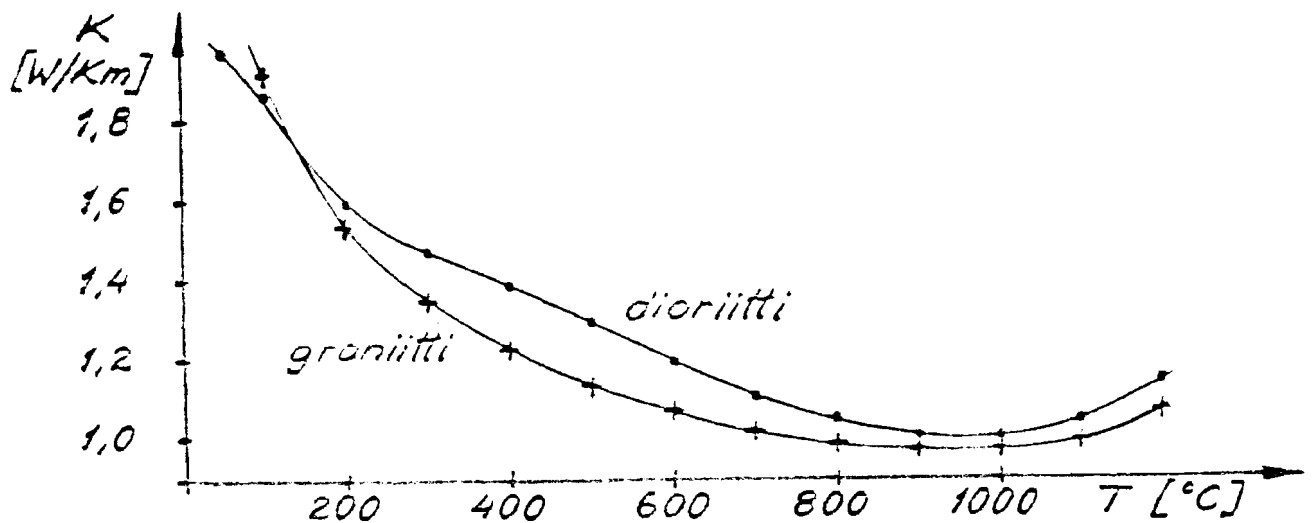
Lämmön siirtyminen kivilajeissa tapahtuu pääasiassa johtumalla. Kuumemmassa kohdassa kiveä ovat molekyylit voimakkaassa lämpöliikkeessä ja törmätessään luovuttavat energiaa kiven kylmemmässä kohdassa oleville molekyyleille. Jos kivilajikerroksen paksuus, jonka läpi lämpöä johtuu on d ja sen lähtö- ja tulopintojen lämpötilat T_1 ja T_2 siirtyy pinta-alan A läpi johtumalla lämpöä /4/.

$$Q = \lambda \times A (T_1 - T_2) / d$$

λ = lämmönjohtavuus (W/K x m)

Kivien lämmönjohtavuus on noin satakertainen verrattuna kaasujen lämmönjohtavuuteen, mutta on vain noin sadasosa metallien lämmönjohtavuudesta. Kivilajin liuskeisuuden ja kerroksellisuuden suunnassa lämmönjohtavuus on useimmiten parempi kuin kohtisuorassa sitä vastaan.

Lämmönjohtavuus pienenee lämpötilan kasvaessa. Kuvassa 3 on esitetty graniitin ja dioriitin lämmönjohtavuuden riippuvuus lämpötilasta /4/.



Kuva 3. Graniitin ja dioriitin lämmönjohtavuuden riippuvuus lämpötilasta /4/.

6.4 Lämpötilan diffuusiokerroin

Kivilajin lämpötilan diffuusiokerroimesta riippuu lämpötilan muutosten tunkeutuminen kiveen. Mitä suurempi lämpötilan diffuusiokerroin on, sitä nopeammin lämpötilan muutos etenee kivilajissa.

Kivilajien lämpötilan diffuusiokerroin on alhainen ja vaihtelee yleensä välillä $0,5...3,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ /4/.

6.5 Lämpölaajeneminen

Kivilajin lämpölaajeneminen määritetään yleensä lämpötilakertoimella eli kiven suhteellisena kasvuna lämpötilan muutosta kohden. Tilavuuden lämpötilakertoimen γ ja pituuden lämpötilakertoimen välillä pätee likimain kaava $\gamma = 3 \times \alpha$.

$$\gamma = \frac{1}{V} \times \frac{\Delta V}{\Delta T} = \text{tilavuuden lämpötilakerroin}$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \times \frac{\Delta L}{\Delta T} = \text{pituuden lämpötilakerroin}$$

$$\Delta V/V = \text{tilavuuden suhteellinen muutos}$$

$$\Delta L/L = \text{pituuden suhteellinen muutos}$$

$$\Delta T = \text{lämpötilan muutos}$$

Kivilajien lämpölaajeneminen on riippuvainen mm. kivilajin mineraalikoostumuksesta, rakenteesta, raakoosta, anisotropiasta, huokoisuudesta, tiheydestä, vesipitoisuudesta ja rapautuneisuudesta.

Rapautumaton kivilaji reagoi lämpötilan vaihteluihin venymällä ja kutistamalla yleensä sitä enemmän, mitä hienorakeisempi kivi on. Pituuden lämpötilakertoimen ja raakoon keskinäistä riippuvuutta kuvaava käyrä jyrkkenee kivilajin raakoon pienetessä. Mineraaleilta raakooltaan ja rakenteeltaan samanlaisten kivilajien lämpölaajenemiseen saattaa varsinkin rapautuneisuus aiheuttaa merkittäviäkin eroavaisuuksia /8/.

Suomen tavallisimpien kivilajien pituuden lämpötilakertoimet vaihtelevat yleensä siten, että karkeahkoilla graniittisilla kivilajeilla (graniitti ja rapakivi) sekä graniittivaltaisilla migmatiiteilla eli seoskivilajeilla lämpötilakerroin on luokkaa $3...5 \times 10^{-6} K^{-1}$, kun taas sekä hienorakeisemmilla että tummia mineraaleja enemmän sisältävillä kivilajeilla kuten granodioriiteilla, leptiiteillä, gneisseillä, amfiboliiteilla, vihreäkivillä ja vuolukivillä lämpötilakerroin on luokkaa $5,5...7,5 \times 10^{-6} K^{-1}$ ja hyvin hienolla fylliitillä jopa yli $8 \times 10^{-6} K^{-1}$ /7/.

Taulukossa 7 on koottu eräiden rakeisuudeltaan erilaisten suomalaisten kivilajien keskimääräisiä pituuden lämpötilakertoimia /8/.

Taulukko 7. Eräiden rakeisuudeltaan erilaisten suomalaisten kivilajien keskimääräisiä pituuden laajenemiskertoimia /8/.

Kivilaji	Raekoko (mm)	Pituuden lämpötilakerroin 1/K
kark.rak. graniitti	6,0	$4,9 \times 10^{-6}$
porfyyrinen graniitti	4,0	$3,0 \times 10^{-6}$
keskirak. graniitti	1,2	$5,7 \times 10^{-6}$
rapakivi	8,0	$4,9 \times 10^{-6}$
granodioriitti	1,3	$5,5 \times 10^{-6}$
migmatiitti	12,0	$4,3 \times 10^{-6}$
kiillegneissi	1,2	$5,3 \times 10^{-6}$
amfiboliitti	1,0	$5,7 \times 10^{-6}$
vihreäkivi	0,5	$6,8 \times 10^{-6}$
leptiitti	0,3	$7,0 \times 10^{-6}$
suonigneissi	0,4	$7,4 \times 10^{-6}$

6.6 Termisten ominaisuuksien merkitys

Taulukossa 8 on yhteenvetona muutamien esimerkki kivilajien termisiä ominaisuuksia /4/.

Taulukko 8. Esimerkkejä kivilajien termisistä ominaisuuksista /4/.

Kivilaji	Mittaus- lämpö- tila (°C)	Ominais- lämpö- kapasi- teetti (J/Kkg)	Lämmön johta- vuus (W/Km)	Lämpötilan diffuusio- kerroin (10 ⁻⁶ m ² /s)
Syväkivilajit				
Peridotiitti	50		3,60	
Gabro	25		2,29	
Dioriitti	20		1,91	0,947
Granodioriitti	20	1089	2,03	0,719
Graniitti	20	1130	2,36	0,887
Metamorfiset kivilajit				
Gneissi				
- liuskeisuuden suunnassa	50		2,93	
- kohtisuoraan liuskeisuutta vastaan	50		2,09	
Kvartsiitti	50	787	6,18	2,952
Sedimenttikivilajit				
Savikivi	50	883	2,38	1,218
Kalkkikivi	50	854	2,21	1,054
Dolomiitti	50	955	3,34	1,117
Hiekkakivi	50	825	3,24	1,645

Lämmön siirtymisellä, sen jakautumisella eri kivilajeista koostuvassa kalliassa on merkitystä mm. ydinjätteen loppusijoitusrakenteiden kalliotekniselle käyttäytymiselle, ja ne vaikuttavat kallion hydrogeologisiin, rapautumis- ja sorptio-ominaisuuksiin.

7. GEOFYSIKAALISET OMINAISUUDET

7.1 Yleistä

Ydinjätteen loppusijoituksessa merkittävimpiä kivilajin geofysikaalisia ominaisuuksia ovat akustinen johtavuus, sähkönjohtavuus ja magneettisuus.

7.2 Akustinen johtavuus

Kivilajin materiaaliominaisuutena akustisella materiaaliominaisuudella tarkoitetaan kimmoaaltojen ominaista etenemisnopeutta.

Ydinjätteen loppusijoituksessa kivilajin akustisen johtavuuden määrittämisellä on merkitystä mm. arvioitaessa kivilajin tiheyttä, huokoisuutta ja rapautuneisuutta. Määrityksillä saadaan myös eri kivilajien ominainen akustinen johtavuus vertailuarvoksi useista kivilajeista koostuvia kalliomassiiveja tutkittaessa.

Kivilajin akustisen johtavuuden perusteella voidaan arvioida mahdollisen mikroskooppisen rapautuneisuuden ja mikrorakoilun runsautta lähinnä kiven migraatio- ja sorptio-ominaisuuksia selvitetäessä. Myös loppusijoitustilojen rakenteiden lujitusten laadun ja tarpeellisuuden selvittämisessä voidaan hyödyntää akustisen johtavuuden mittaustuloksia.

Taulukossa 9 on esitetty näiden eri asteisesti rapautuneiden ja rapautumattomien kivilajien laboratoriossa suoritettuja akustisen johtavuuden mittaustuloksia /8/.

Taulukko 9. Eräiden kivilajien akustisen johtavuuden mittaustuloksia /8/.

Kivilaji	Akustinen johtavuus Cp m/s	
graniitti	3150	rapautunut
"	4600	alkavaa rapautumista
"	5180	ei rapautunut
"	5400	ei rapautunut
granodioriitti	2910	rapautunut
"	3840	rapautunut
"	4950	alkavaa rapautumista
"	5600	ei rapautunut
"	6100	ei rapautunut
migmatiitti	2900	rapautunut
"	3850	rapautunut
"	4500	alkavaa rapautumista
"	4800	alkavaa rapautumista
"	5050	ei rapautunut
"	5400	ei rapautunut

7.3 Sähkönjohtavuus

Kivilajien sähkönjohtavuuden erot johtuvat pääasiassa kivilajin huokoisuudesta, kosteudesta, elektrolyyttipitoisuudesta ja mineralogisista ominaisuuksista. Varsinkin malmimineraalien runsaus lisää oleellisesti kivilajin sähkönjohtavuutta.

Kivilajin sähkönjohtavuuden käänteissuureen, ominaisvastuksen, määrittämisellä on merkitystä ydinjätteiden loppusijoituksessa mm. kivilajien vedenjohtavuutta lisäävän huokoisuuden ja rakoilun sekä nopeasti rapautuvien ja pohjaveden aggressiivisuutta lisäävien malmimineraalien runsauden, pohjaveden suolaisuuden sekä joissakin tapauksissa myös pohjaveden johtavuuden selvityksissä /7/.

Taulukossa 10 on esitetty muutamien suomalaisten kivilajien tyypillisiä ominaisvastusarvoja /9/.

Taulukko 10. Esimerkkejä eräiden kivilajiryhmien tyypillisistä ominaisvastuksista /9/.

Kivilajiryhmä	ominaisvastus	(Ωm)
graniitit, dioriitit ja vastaavat gneissit	5 000...20 000	
gabrot ja peridotiitit	10 000...40 000	
kvartsiitit	5 000...10 000	
serpentiinitit ja vihreäkiivet	50... 1 000	
grafiittiliuske, mustaliuske ja fylliitti	0,1... 100	

7.4 Magneettisuus

Kivilajien magneettisuuden eli magneettisen susceptibiliteetin vaihtelut aiheutuvat pääasiassa kivilajin sisältämästä magnetiitista (Fe_3O_4). Muita, joskin heikommin magnetoituvia mineraaleja ovat ilmeniitti (FeTiO_3), magneettikiisu (FeS) ja hematiitti (Fe_2O_3). Kiven magneettisuutta saattavat joissakin tapauksissa aiheuttaa myös limoniitti (rautahydroksidi) ja rautapitoiset siliikatit kuten sarvivälke.

Magneettiset kartat ilmentävät kivilajien alueellisia susceptibiliteettiarvoja ja samalla antavat kuvan kallioperän rakenteesta ja kivilajivaihteluista.

Merkitystä magneettisen susceptibiliteetin määrittämisellä on myös silloin kun halutaan selvittää loppusijoituskohteen kivilajin tai sen välittömään läheisyyteen sijoittuvien kivilajien sisältävien magneettisten mineraalien mahdollinen olemassaolo ja niiden runsauden haittamerkitys ydinjätteiden loppusijoitukselle.

8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTELMÄT

Ydinjätteen loppusijoituksessa kallioon radioaktiivisia aineita sisältävä jäte eristetään biosfääristä sellaisella varmuudella, että loppusijoitettu ydinjäte kalliotilojen sulkemisen jälkeen ei aiheuta haittavaikutuksen vaaraa ympäristön luonnolle eikä edellytä erityisiä valvonta- ja seurantatoimenpiteitä.

Suomen kivilajien materiaaliominaisuuksia ydinjätteiden loppusijoituksessa on tutkittu vasta alustavina perusselvityksinä. Ulkomailta asiaa on jo useiden vuosien ajan selvitetty, mutta näitä tutkimustuloksia ei voida yksikantaan korreloida suomalaisiin kivilajeihin.

Suomen kivilajien materiaaliominaisuuksista on tutkimustuloksia saatavissa vain muutamista erityisselvityksistä. Yhtenäistä ja tärkeimmät materiaaliominaisuudet kattavaa kokonais selvitystä ei toistaiseksi ole tehty.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää kirjallisuuteen ja yksittäistutkimusten tuloksiin perustuen Suomen kivilajien tärkeimpien materiaaliominaisuuksien perusteita ja näiden ominaisuuksien merkitystä ydinjätteen loppusijoituksessa.

Selvityksessä on kirjallisuuteen perustuen tarkasteltu yleisesti tärkeimpiä Suomen prekambristen kivilajien materiaaliominaisuuksien perusteita ja merkitystä ydinjätteiden loppusijoituksessa.

Ydinjätteiden loppusijoituksen kannalta Suomen kivilajien materiaaliominaisuuksista tärkeimpiä ovat mineralogis-kemialliset, termiset sekä luokitus-, lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Vähähuokoisten ja siten tiiviiden prekambristen kivilajien hydrogeologisten ominaisuuksien tutkimus keskittyy kivilajia rikkovaan rakoiluun ja siitä aiheutuviin hydrogeologisiin tekijöihin. Kivilajien geofysikaalisten ominaisuuksien merkitys ydinjätteiden loppusijoituksessa on laboratoriomittakaavaisissa tutkimuksissa tehtävien pienten näytekappaleiden materiaaliominaisuuksien selvittämisessä korrelaatiotuloksiksi kivilajien ja kallioperän laaja-alaisimmille loppusijoitustutkimuksille.

9. LÄHDELUETTELO

- /1/ Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Fundamentals of Rock Mechanics. Chapman and Hall Ltd, London 1971. 513 s.
- /2/ Kauranne, L.K., Gardemeister, R., Korpela, K., Mälkki, E., Rakennusgeologia II. TTK:n moniste n:o 304, Otaniemi 1972.
- /3/ Kivekäs, L., Prospecting for geothermal energy in Finland: geothermal data. Sivut 112...119 teoksessa Nordic Symposium on Geothermal Energy. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, May 29-31, 1978, 158 s.
- /4/ Kivekäs, L., Lämpö kalliiossa. Kalliomekaniikan päivä 1980. Rakennusgeologian yhdistyksen julkaisuja Vol. 14 VI, Helsinki 1980, 13 s.
- /5/ Kogan, R.M. et al., Gamma Spectrometry of Natural Environments and Formations. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 1971, 337 s.
- /6/ Korhonen, K.H., Gardemeister, R., Jääskeläinen, H., Niini, H., Vähäsarja, P., Rakennusalan kallioluokitus, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 12. Otaniemi 1974, 78 s.
- /7/ Niini, H., Hakkarainen, V., Patrikainen, P., Korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen geologiset tekijät. Raportti YJT-82-36, Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta, tammikuu 1982, 189 s.
- /8/ Patrikainen, P., Tutkimustuloksia lisensiaattityöstä (keskenäinen) (1976-1982).
- /9/ Peltonen, E., Rouhiainen, P., Kallioperän tutkimusmenetelmät ydinjätteen loppusijoituksessa. Osa II, Menetelmäkuvaukset. Raportti YJT-80-08. Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta, 1980, 28 s.
- /10/ Särkkä, P., Johansson, E., Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja, Osa 3 Kalliomekaniikan Vuorimiesyhdistys, Helsinki 1982. ss. 45...129.
- /11/ Saari, K., Kallion läpäisevyys ja vedenjohtavuus. Kalliomekaniikan päivä 1979, Rakennusgeologisen yhdistyksen julkaisuja vol. 13 II, Helsinki 1979, 8 s.
- /12/ Voimalaitosjätteiden loppusijoitus. Olkiluodon sijoituspaikkaraportti. Raportti YJT-82-28, Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta, kesäkuu 1982.
- /13/ Vormaa, A., On the petrochemistry of rapakivi granites with special reference to the Laitila massif, southwestern Finland. Geological Survey of Finland, Bulletin 285, Geologinen tutkimuslaitos, Espoo 1975.
- /14/ Ydinjätteselvitys. Imatran Voima Oy ja Teollisuuden Voima Oy, 1978.

- /15/ Nikula, A., Käytetyssä polttoaineessa olevien nuklidien sorptio kiteisessä kallioperässä. Raportti YJT-82-40, Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta, lokakuu 1982, 55 s.
- /16/ Nikula, A., Suomen yleisimpien maalajien ja eräiden kallion rakotäytteiden sorptio-ominaisuuksia. Raportti YJT-82-60, Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta, joulukuu 1982, 57 s.

