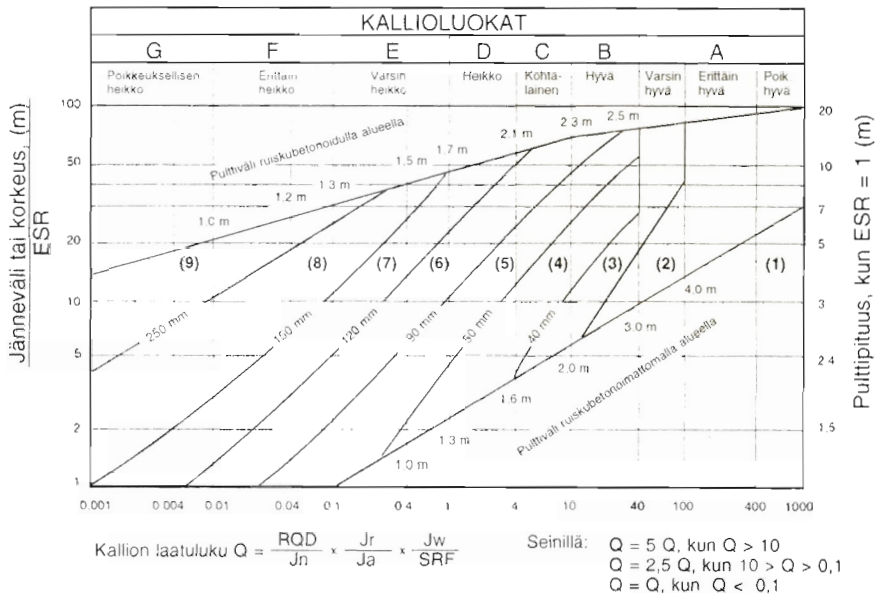
TIEDOTE 72/1996



Kallion laatuluku $Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF}$

Seinillä: Q = 5 Q, kun Q > 10
Q = 2,5 Q, kun 10 > Q > 0,1
Q = Q, kun Q < 0,1

LUJITUSLUOKAT
1) Lujittamaton
2) Hajapultitus
3) Systemaattinen pultitus
4 Systemaattinen pultitus ja 40...100 mm raudoittamaton ruiskubetoni
5) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 50...90 mm ja pultitus
6) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 90...120 mm ja pultitus
7) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 120. .150 mm ja pultitus
8) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, >150 mm ja ruiskubetonoidut teräsbetonikaaret sekä pultitus
9) Valettu betonivuoraus

KALLIOLUOKITUSMENETELMIEN KÄYTTÖ TUNNELIEN LUJITUKSESSA

Arto Wegelius & Raimo Viitala

HELSINGIN KAUPUNKI
KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNINEN OSASTO

ALKULAUSE

Kallion laadun yksiselitteinen kuvaaminen on tärkeätä kaikille osapuolille kalliorakennushankken eri vaiheissa. Aikaisemmin kallion laatua on kuvailtu yleisesti lähinnä geologisin termein. Vuonna 1972 otettiin käyttöön rakennusgeologinen kallioluokitus, joka on palvellut kuvailevana menetelmänä hyvin maamme kalliorakentamista. Kuitenkin on yhä enemmän ilmennyt tarvetta luokitukseen, joka tarjoaisi sekä numeerisia lähtöarvoja kalliomekaanisille laskelmille että yhteyden kalliolujituksiin. Tällaisia menetelmiä ovat mm. Q- ja RMR-luokitukset.

Myös kalliorakennusalan kansainvälistyminen on tekijä, joka on tehnyt tarpeelliseksi perehtymisen ulkomaisiin luokitusmenetelmiin. Q- ja RMR-luokitukset ovat maailmalla yleisesti tunnettuja kalliolaadun mittareita. Ne toimivat keskustelukielenä, jota ymmärtävät kalliorakennushankkeiden kaikki eri osapuolet eri puolilla maailmaa.

Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisessä osastossa päätettiin tutkia näiden luokitusten soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Tutkimuksen tuloksena on laadittu yksityiskohtaiset ohjeet Q- ja RMR-kallioluokituksien määrittämiseksi. Työn tarkoituksena on osaltaan edistää kansainvälisten kallioluokitusmenetelmien käyttöä Suomessa.

Tämä tiedote perustuu tekn.yo. Arto Wegeliuksen diplomityöhön Kallioluokitus Q- ja RMR-menetelmillä ja käyttö suunnittelun apuna, joka on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston tutkimustyönä. Työn valvojana toimi professori Raimo Matikainen Teknillisestä korkeakoulusta ja työn ohjaajana toimi DI Raimo Viitala Helsingin kaupungin geoteknisen osastolta. Tutkimuksen tekoa varten koottiin ohjausryhmä, johon kuuluivat:

Tekniikan lisensiaatti Erik Johansson, Insinööritoimisto Saanio & Riekkola Oy
Tekniikan lisensiaatti Jukka Pöllä, VTT, Yhdyskuntatekniikka.
Diplomi-insinööri Pauli Syrjänen, Teknillinen korkeakoulu, Kalliotekniikan laboratorio
Filosofian maisteri Juha Salmelainen, Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd
Tekniikan tohtori Pekka Särkkä, Concave Oy

Tutkimuksen tekoa varten kutsuttiin Norjan geoteknisestä instituutista (NGI) geologi Fredrik Løset opastamaan kallioluokitusten tekoa teoriassa ja käytännössä.

Geotekninen osasto on kokeillut vuoden 1996 aikana Q-luokitusta ja sen antamia lujitussuosituksia mm. Töölö-Alppilan vesijohtotunnelissa ja Pasila-Sörnäinen kaukolämpöjohtotunnelissa. Luokitusten antamia lujitussuosituksia on verrattu nykyisin käytössä olevaan lujituskäytäntöön. Vertailun perusteella voidaan todeta nykyisen lujituskäytännön ja Q-luokituksen lujitussuositusten vastaavan toisiaan yllättävän hyvin.

Suurimmat erot tulevat heikkousvyöhykkeiden lujituksissa ja tilanteissa joissa kallion laatu on erityisen hyvä. Hyvälaatuisessa kalliossa Q-luokitus ei anna lainkaan lujitussuositusta, mutta nykyisen käytännön mukaan sitäkin lujitetaan ohuella ruiskubetonikerroksella, tavoitteena huoltovapaa tunneli. Lisäksi luokitukset eivät anna yksittäisten lohkojen lujitussuosituksia, joiden lujitus määritetään tapauskohtaisesti.

Helsingissä 2.1.1997

Usko Anttikoski
osastopäällikkö

Julkaisija
HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNINEN OSASTO
MALMIN ASEMATIE 3 A 00700 HELSINKI
PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555
http://www.kv.hel.fi/geo

Julkaisusarja, numero ja julkaisuaika
Geoteknisen osaston tiedotteet 72/1996
Marraskuu 1996

Projektinumero(t)
6502

Tekijä(t)
Arto Wegelius
Raimo Viitala

Toimeksiantaja(t)

Nimike

Kallioluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa

Tiivistelmä

Kallion laatua ja kalliomekaanisia ominaisuuksia voidaan arvioida kallioluokitusten avulla. Q- ja RMR-luokitukset ovat yleisimmät ja monipuolisimmat nykyisin käytetyistä kansainvälisistä kallioluokitusmenetelmistä. Työn tuloksena on laadittu yksityiskohtaiset ohjeet Q- ja RMR-kallioluokituksien määrittämiseksi. Työn tarkoituksena on osaltaan edistää kansainvälisten kallioluokitusmenetelmien käyttöä Suomessa.

Ohjeissa on esitetty uusimmat parametrien määritystaulukot. Koska parametrit eivät ole yksiselitteisiä, näissä ohjeissa on esitetty myös yksityiskohdat, joiden perusteella parametrit määritetään.

Q- ja RMR-luokituksen tuloksena saadaan kallion laadusta riippuva numeerinen arvo, jota voidaan käyttää määrittäessä kalliotilan kalliomekaanista käyttäytymistä. Koska kalliomekaanisella pysyvyydellä ja lujituksella on yleensä keskinäinen yhteys, voidaan kallioluokitusta käyttää apuna myös tarvittavan lujituksen suunnittelussa. Luokitukset kuuluvat empiirisiin suunnittelumenetelmiin, joissa käytetään hyväksi aikaisempia kokemuksia vastaavista olosuhteista.

Työn kokeellinen osa käsittää luokitusten määrityksiä valituissa kohteissa. Luokituksia on määritetty kalliopaljastumista, tunnelin seinästä louhinnan aikana ja valmiista tunnelista sekä kairasydämien perusteella. Q- ja RMR-luokitusten määrittäminen kalliosta on melko vaivatonta ja menetelmiä voidaan käyttää kalliorakennushankkeen eri vaiheissa. Kun tiedot kalliomassasta ja sen ominaisuuksista tarkentuvat, voidaan myös luokitusta tarkentaa.

Tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että Q- ja RMR-luokitukset sopivat varsin hyvin Suomen olosuhteisiin, joskin kokemukset näiden luokitusten käytöstä Suomessa ovat vielä vähäisiä.

Avainsanat
kallioluokitus, Q-luokitus, RMR-luokitus, lujitus

ISSN	ISBN	Luokitus (UDK)
0788-6209	951-772-861-1	624.12

Kieli	Sivuja
suomi, engl. tiivistelmä	86 s. + liitt. 27 s.

Published by
HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT
GEOTECHNICAL DIVISION
MALMIN ASEMATIE 3 A FIN-00700 HELSINKI
PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555
http://www.kv.hel.fi/geo

Series title, number and date
Research Notes of the Geotechnical Division 72 / 1996
marraskuu 1996

Project number(s)
6502

Author(s)
Arto Wegelius
Raimo Viitala

Commissioned by

Title

The use of rock classification for tunnel support

Abstract

Rock quality and rock mechanical properties can be estimated with rock classification systems. Q- and RMR-classifications are the most common and sophisticated rock classification systems which are in use at present. The result of this study is to introduce detailed instructions for determining rock classification with Q- and RMR-systems. The purpose of this study is also to encourage the use of international rock classifications in Finland.

The most recent tables for determining parameters have been appended to these instructions. Because the parameters are ambiguous, details for determining them have also been introduced in the instructions.

The results of Q- and RMR-classifications are numerical values depending on rock quality, which can be used for determining the rock mechanical behaviour of a rock cavern. Because there is compatibility between stability and support, rock classifications can be used to help in designing the rock support. Rock classifications belong to the empirical methods, which take advantage of earlier experiences in equivalent circumstances.

Field tests for the study deal with determining classifications in chosen targets. Classifications have been determined from rock exposures, tunnel walls, and roof and drill cores. Determining Q- and RMR-classifications is quite easy and these methods can be used in different stages of tunnel projects. When the information about the rock mass and its properties are specified, classification can be re-evaluated.

According to this study, it seems that Q- and RMR-classifications are well suited to Finnish rock conditions, although there is not much experience of using them in Finland.

Keywords
rock classification, Q-classification, RMR-classification, rock support

ISSN	ISBN	Class (UDC)
0788-6209	951-772-862-X	624.12

Language	Pages
Finnish, Engl. abstr.	86 p. + app. 27 p.

KALLIOLUOKITUS Q- JA RMR-MENETELMILLÄ JA KÄYTTÖ SUUNNITTELUN APUNA

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LIITELUETTELO

SYMBOLILUETTELO

ESIPUHE

1 JOHDANTO 1

2 KALLIOLUOKITUKSET 2

2.1 Yleistä kallioluokituksista 2
2.2 RQD-luku 8
2.3 Q-luokitus 8
2.4 RMR-luokitus 9
2.5 Q- ja RMR-luokitusten välinen yhteys 11
2.6 Louhinnan vaikutus kallioluokitukseen 12
2.7 Suomessa tehdyt luokitusmääritykset 14

3 MÄÄRITYSOHJEET 16

3.1 Kalliokartoitus 16
3.2 Kallionäytekairaus ja luokittelu 18
3.3 Q-luokitus 19
3.3.1 RQD-luku 21
3.3.2 Rakosuuntien lukumäärätekijä J_n 26
3.3.3 Rako-ominaisuudet J_r ja J_a 28
3.3.3.1 Rakopinnan karkeusluku J_r 29
3.3.3.2 Rakopintojen muuttuneisuusluku J_a 32
3.3.4 Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w 33
3.3.5 Jännitystilaluku SRF 35
3.4 RMR-luokitus 40
3.4.1 Kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus 41
3.4.2 RQD-luku ja rakoväli 43
3.4.3 Pohjaveden pisteytys 45
3.4.4 Rakojen laatu 45
3.4.5 Rakosuuntien vaikutus 48
3.5 Luokituksen määritys seismisen nopeuden perusteella 48

4 LUJITUSSUOSITUSTEN MÄÄRITTÄMINEN LUOKITUKSEN PERUSTEELLA 51

4.1 Q-luokitus 51
4.1.1 Kalliotilan pysyvyys 51
4.1.2 Jännevälin määritys 53
4.1.3 Käyttötarkoituksen vaikutus 54
4.1.4 Lujitussuositukset 55
4.1.5 Pienten heikkousvyöhykkeiden lujitus 56
4.1.6 Louhinnan aikaisen lujituksen määritys 57
4.1.7 Lujitusrakenteisiin kohdistuva kuormitus 58
4.2 RMR-luokitus 59
4.2.1 Kalliotilan pysyvyys 59
4.2.2 RMR-luokituksen lujitussuositukset ja lujituskuormat 60

5 LUOKITUSTEN MÄÄRITTÄMINEN KÄYTÄNNÖN KOHTEISSA 62

5.1 Forumin pysäköintiluolan laajennus 62
5.2 Maunulan väestönsuoja 65
5.3 Otaniemen keskusväestönsuoja 67
5.4 TVO:n syväkairaukset 70
5.5 Töölö-Alppila vesijohtotunneli 71
5.6 Vuosaaren jäähdytysvesitunneli 73
5.7 Vuosaaren öljysäiliön ajotunneli 75

6 LUOKITUSTEN ARVIOINTI 76

7 JOHTOPÄÄTÖKSET 80

8 YHTEENVETO 81

KIRJALLISUUSVIITTEET 83

LIITTEET

LIITELUETTELO

Liite 1 Q-luokituksen lähtöparametrit
Liite 2 RMR-luokituksen lähtöparametrit
Liite 3 NGI:n tunnelin kartoitus- ja lujituslomake
Liite 4 Kartoitusmerkinnät
Liite 5 Lähtöparametrien koontilomake tunnelikäyttöön
Liite 6 RMR-luokituksen lähtötietolomake
Liite 7 Kallionäytekairausten luokitusten lähtöparametrien kokoomalomake
Liite 8 NGI:n käyttämä kaavake geotekniselle tiedolle
Liite 9 JRC-luvun määritys
Liite 10 Esimerkkejä Q-luvun määrityksestä pintapaljastumien avulla

SYMBOLILUETTELO

a	rakoavauma (mm)
a/L	rakopinnan karkeuden amplitudi/pituus (mm/m)
b	heikkousvyöhykkeen leveys (m)
b_t	heikkousvyöhykkeen leveys tunnelin pituusakselin suuntaisesti (m)
B	kalliotilan jänneväli (m)
D_e	kalliotilan laskennallinen jänneväli (m)
E	kimmokerroin, deformaatiokerroin (GPa)
ESR	kalliotilan käyttötarkoituksesta riippuva vakio (excavation support ratio)
f	rakotäytteen paksuus (mm)
h	syvyys, kalliokaton paksuus (m)
H	kalliotilan korkeus (m)
J_a	rakopintojen muuttuneisuusluku
JCS	rakopinnan puristuslujuus (MPa)
J_n	rakosuuntien lukumäärätekijä
J_r	rakopintojen karkeusluku
JRC	rakopinnan karkeustekijä
J_v	kuutiometrissä kalliota olevien rakojen lukumäärä
J_w	rakojen vedenläpäisevyysluku
K	kalliomassan vedenläpäisevyys (m/s)
l	rakopituus (m)
L	kalliopultin pituus (m)
P	lujitusrakenteisiin kohdistuva kuormitus (MPa)
Q	kallion laatuluku Q-luokituksessa
Q_b	lujituksen raja-arvon Q-luku
Q_m	Q-luvun keskiarvo
Q_r	heikkousvyöhykkeiden välisen kallion Q-luku
Q_w	muunnettu kallion laatuluku seinien lujitusta varten
Q_z	heikkousvyöhykkeen Q-luku
RMR	Rock Mass Rating, kallion luokitus arvo, geomekaaninen luokitus
RQD	Rock Quality Designation, kallion rakoilua kuvaava luku
S	rakoväli (m)
S_1, S_2, S_3...	eri rakosuuntien keskimääräisiä rakovälejä
SRF	jännitystilaluku
V_p	seismisen P-aallon (pitkittäisaallon) nopeus (m/s)
w	rapautumisaste
α/β	raon kaade/kulku
γ	tiheys (kivilajin tiheys)
λ	rakoluku (kpl/m)
σ_1	suurin pääjännitys
σ_3	pienin pääjännitys
σ_c	kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus
σ_n	rakopintaan kohdistuva normaalijännitys
σ_t	kalliotilan suurin reuna (tangentiaali-) jännitys
τ	leikkauslujuus
Φ_b	peruskitkakulma
Φ_p	huippu kitkakulma (peak)
Φ_r	jäännös kitkakulma (residual)

ESIPUHE

Tämä työ on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston tutkimustyönä.

Työn valvojana ja tarkastajana toimi professori Raimo Matikainen. Kiitän häntä työtäni kohtaan osoittamastaan mielenkiinnosta ja saamistani neuvoista ja ohjeista.

Erityisen kiitoksen haluan sanoa työni ohjaajalle Raimo Viitalalle hyvästä ohjauksesta sekä osastopäällikkö Usko Anttikoskelle mahdollisuudesta mielenkiintoiseen tutkimukseen. Lisäksi kiitän kaikkia Helsingin kaupungin geoteknisen osaston työntekijöitä.

Tutkimuksen tekoa varten koottiin ohjausryhmä, johon kuuluivat:

Tekniikan lisensiaatti Erik Johansson, Insinööritoimisto Saanio & Riekkola Oy
Tekniikan lisensiaatti Jukka Pöllä, VTT, Yhdyskuntatekniikka.
Diplomi-insinööri Pauli Syrjänen, Teknillinen korkeakoulu, Kallioteknikan laboratorio
Filosofian maisteri Juha Salmelainen, Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd
Tekniikan tohtori Pekka Särkkä, Concave Oy

Esitän parhaat kiitokset ohjausryhmän jäsenille asiantuntevista neuvoista ja opastuksesta.

I'm truly grateful to Mr Fredrik Løset from Norwegian Geotechnical Institute (NGI) for his information and advice concerning rock classification and Q-system.

Lisäksi haluan kiittää rakennusmestari Esa Kuikkaa Helsingin kaupungin energialaitokselta, diplomi-insinööri Asko Mäenpäätä Helsingin kaupungin rakennuttamistoimistosta ja diplomi-insinööri Reijo Riekkolaa Insinööritoimisto Saanio & Riekkola Oy:stä positiivisesta suhtautumisesta työtäni kohtaan.

Helsingissä 20.08.1996

Arto Wegelius

1 JOHDANTO

Kalliomassan mekaanisten ominaisuuksien johtaminen teoreettiselta pohjalta on hankalaa, koska kallion rakenne on monimuotoinen ja siten vaikeasti tutkittava. Tämän vuoksi käytetään usein kokemusperäisiä kallioluokitusmenetelmiä, joiden avulla kalliomassa voidaan jakaa samalla tavalla käyttäytyviin osa-alueisiin. Luokitusten avulla voidaan suunnittelussa, louhinnassa ja lujitusten määrityksissä käyttää hyväksi aiempia kokemuksia vastaavista olosuhteista (Hoek 1995). Niillä ei tule kuitenkaan korvata laskennallisia suunnittelumenetelmiä, vaan eri menetelmiä on käytettävä rinnan etenkin vaativimmissa kohteissa.

Kallioluokitusmenetelmiä on maailmalla käytössä lukuisia erilaisia ja erityyppisiä. Tunnetuimmat näistä ovat Terzaghin-, Laufferin-, RQD-, RSR-, RMR- ja Q-luokitukset. Suomessa käytetään yleisesti rakennusgeologista kallioluokitusta (Korhonen ym. 1974), joka on lähinnä kuvaileva geologinen kallioluokitus, eikä sillä ole selvää korrelaatiota kalliomekaanisen käyttäytymisen kanssa.

Tämä tutkimus keskittyy Q- ja RMR-luokituksiin, ja niiden käyttöön kalliorakennuskohteissa. Kyseisten luokitusten erilaisia jatkokehitelmiä ei käsitellä tutkimuksen yhteydessä. Q- ja RMR-luokitukset ovat laajoihin referenssikohteisiin perustuvia kallioluokitusjärjestelmiä. Niiden kehittelyssä on käytetty hyväksi myös aiempia kallioluokitusmenetelmiä ja niistä saatuja kokemuksia. Q-luokituksessa on tässä työssä huomioitu myös viimeisimmät vuonna 1995 parametrien määrityksissä tehdyt muutokset, jotka on esitetty norjankielisissä ennakkovedoksissa (Løset 1995a). Myös suullisissa keskusteluissa ja kirjeenvaihdossa Norjan Geoteknillisen Instituutin (NGI) kanssa on saatu runsaasti uutta tietoa ja täsmennyksiä.

Tutkimuksen yhteydessä on laadittu yksityiskohtaiset ohjeet kallioluokituksen määrittämiseksi kalliopaljastumista, -leikkauksista, louhittavan kalliotilan seinistä ja katosta sekä kairasydännäytteistä. Myös kallioluokitusten määrittäminen seismisten menetelmien avulla ja kalliotilan lujitussuositusten määritys kallioluokitusten perusteella esitetään tutkimuksessa. Siinä on myös arvioitu Q- ja RMR-luokitusten soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Tutkimuksen tarkoituksena on omalta osaltaan edistää kansainvälisten kallioluokitusmenetelmien käyttöä Suomessa. Kalliorakennusalan kansainvälistyessä yhtenäisten luokitusmenetelmien käyttö tulee yhä merkittävämmäksi osaksi kalliorakentamista.

Q- ja RMR-luokitusten määrityksiä on selvitetty aluksi kirjallisuustutkimuksen avulla, jossa on tarkasteltu tarvittavia lähtöparametreja ja niiden määritysmenetelmiä. Täsmällisempien määritysohjeiden tekoa varten pyydettiin NGI:stä geologi Fredrik Løset opastamaan luokitusten määritystä teoriassa ja käytännössä. Vierailun jälkeen on oltu useaan kertaan yhteydessä NGI:hin varsinkin Q-luokitukseen liittyvien parametrimääritysten osalta. Q- ja RMR-luokitusten käytännön määrityksiä on suoritettu seuraavissa kohteissa:

- Forumin pysäköintiluolan laajennus
- Kallionäytekairauksista 400 - 900 m syvyydeltä Länsi-Suomen alueella
- Maunulan väestönsuojan kalliotutkimuskairaukset
- Otaniemen keskusväestönsuoja
- Töölö-Alppila vesijohtotunneli
- Vuosaaren B-voimalan jäähdytysvesitunneli ja öljysäiliön ajotunneli

Kohteissa määritettiin kallioluokitus kalliopaljastumista, -leikkauksista, kalliotilan seinistä ja katosta sekä kairasydänten ja seismisten tutkimusten perusteella.

2 KALLIOLUOKITUKSET

2.1 Yleistä kallioluokituksista

Jotta kalliorakentamisessa pystyttäisiin paremmin hyödyntämään eri kohteista saatuja aiempia kokemuksia ja vertailemaan lujitusmääriä keskenään, on kehitetty erilaisia kallioluokitusmenetelmiä. Jotta luokitusjärjestelmä on käyttökelpoinen sen on oltava riittävän yksinkertainen. Sen on perustuttava parametreihin, jotka on yksinkertaisesti ja edullisesti määritettävissä kenttäolosuhteissa. Kallioluokitus voidaan suorittaa useilla eri perusteilla. Näitä ovat mm:

1. Alkuperän tai syntytavan mukainen luokitus, jossa kallio jaetaan syväkiviin, metamorfisiin kiviin ja sedimenttikiviin.

2. Geologinen tai litologinen luokitus, jossa kallio jaetaan geologisten ominaisuuksien, rakenteen ja mineralogian perusteella eri luokkiin.

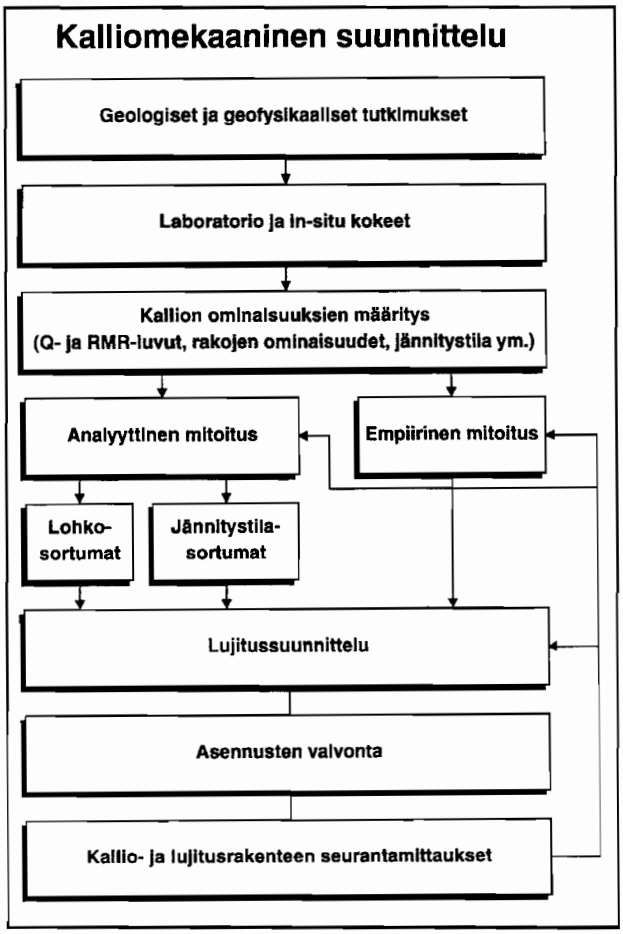
3. Kalliomassan rakenteelliseen lujuuteen perustuva luokitus, jossa kalliomassa jaetaan luokkiin mm. kalliomassan ominaisuuksien, rakoilun ja jännityksen perusteella. Tällaisia luokituksia ovat mm. RMR- ja Q-luokitus.

4. Näiden tekijöiden yhdistelmät, joissa luokitus voi huomioida myös useampia eri tekijöitä, kuten kalliomassan lujuuden, geologisen rakenteen ja alkuperän.

Kalliomekaaninen suunnittelu voidaan jakaa analyyttisiin eli laskennallisiin ja empiirisiin eli kokemusperäisiin menetelmiin. Kallioluokitusten käyttö suunnittelun apuna on esimerkki empiirisistä menetelmistä. Empiirisiä menetelmiä käytetään yleensä analyyttisten menetelmien rinnalla kalliomekaanisessa suunnittelussa. Suunnittelussa on huomioitava myös hankkeen laajuus. Pienissä kohteissa ei yleensä käytetä kalliita ja suuritöisiä mitoitusmenetelmiä.

Kallioluokitus on tehokas apuväline rakennushankkeen kaikissa eri vaiheissa hankesuunnittelusta urakkavaiheeseen ja jälkilaskentaan (kuva 2.1). Se auttaa arvioimaan kalliolaatua ja siten lujitus- ja tiivistyskustannuksia. Kallioluokitus voidaan määrittää jo hankkeen alkuvaiheessa kalliopaljastumista, kallioleikkauksista ja aiemmin samalle alueelle rakennetuista kalliorakennuskohteista. Luokitusta voidaan tarkentaa suunnittelun edetessä ja kalliomassasta saatavien tietojen karttuessa. Luokitusta voidaan omalta osaltaan käyttää apuna kun pyritään optimoimaan kalliorakennuskohteen sijoittelua maastoon.

Kalliotutkimusten edistyessä kallioluokitus voidaan määrittää kohtuullisella tarkkuudella kairasydännäytteistä. Luokitusta voidaan tarkentaa kenttähavainnoilla ja erilaisilla kalliotutkimusmenetelmillä esimerkiksi geofysiikan ja reikätutkimusten avulla. Työn aikana tarkempi luokitus saadaan louhitun kalliotilan seinistä tai katosta.

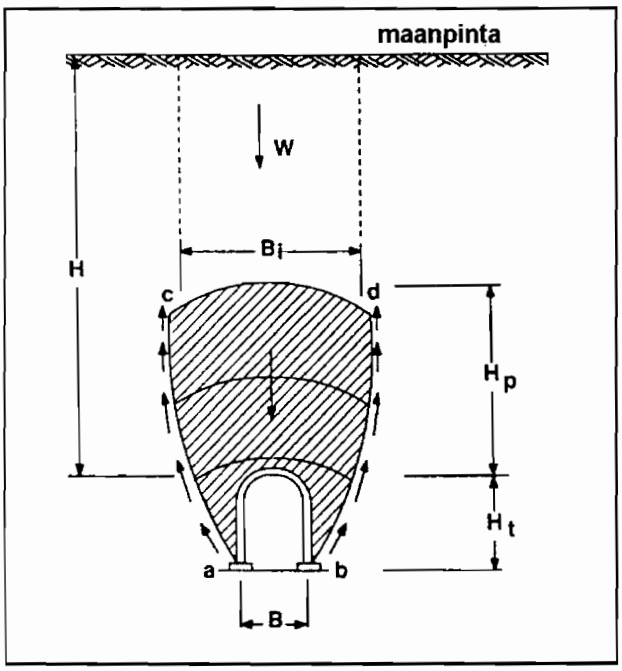


Kuva 2.1. Kalliorakennussuunnittelun osa-alueet (Syrjänen ym. 1995)

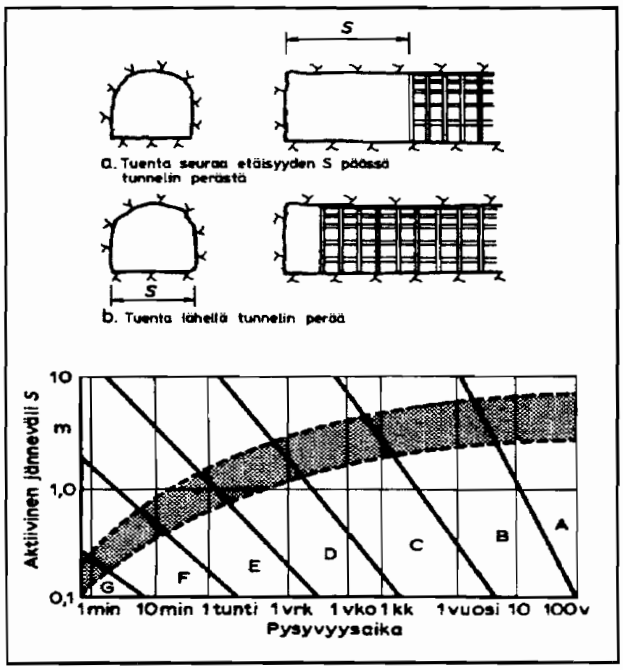
Tässä työssä on tarkasteltu vain kalliomassan rakenteelliseen lujuuteen pohjautuvia luokituksia, joista on keskitytty Q- ja RMR-luokituksiin. Tutkimuksessa on kuvattu lisäksi lyhyesti eräitä muita luokituksia, jotka ovat olleet tärkeitä vaiheita kallioluokitusten kehittämisessä.

Kallion luokituksen kalliorakentamista varten voidaan katsoa alkaneen vuonna 1879, jolloin Ritter julkaisi teoksen Die Statik der Tunnelgewölbe (Ritter 1879). Ritter yritti muodostaa kokemusperäisen yhteyden tunnelin louhimisen ja tuentamenetelmien sekä kalliolaadun välille.

Terzaghi kehitti laajalti käytetyn kallioluokitusjärjestelmän vuonna 1946 (Terzaghi 1946). Hänen luokitusjärjestelmänsä pohjana olivat kokemukset Alpeilla louhituista rautatietunneleista sekä pienoismallikokeet. Luokituksessa on yhdeksän kallioluokkaa ja se on tarkoitettu lähinnä pehmeisiin ja lohkaroituviin kalliomassoihin. Luokituksessa tunnelin leveys ja korkeus määrittävät tunnelin kalliokuorman, joka yhdessä kalliolaadun kanssa antaa lujitussuosituksen. Luokituksen antamat lujitussuositukset perustuvat teräskaarilujituksiin ja ovat nykykäsityksen mukaan ylimitoitettuja. Luokitusta on käytetty Yhdysvalloissa erittäin paljon ja sitä on myöhemmin kehitelty useaan otteeseen (esim. Deere ja Rose). Luokituksen avulla voidaan määrittää myös rakenteisiin kohdistuva kuormitus. Luokitus ei sovellu käytettäväsi Suomen olosuhteissa, koska suomalaiset kivilajit eivät pääsääntöisesti ole luokitusalueelle soveltuvia. Lisäksi se on liian yleistävä eikä se sisällä riittävästi tietoa kalliomassan ominaisuuksista.



Kuva 2.2. Terzaghin kallioluokitus (Terzaghi 1946)



Kuva 2.3. Laufferin luokitus (kuva lähteestä RIL 154-I 1987)

Lauffer esitti lujittamattoman tunnelin pysyvyysaikaan ja aktiiviseen jänneväliin perustuvan kallioluokituksen (Lauffer 1958). Pysyvyysajalla tarkoitetaan aikaa jonka tukematon tunneli kestää sortumatta. Aktiivinen tukematon jänneväli on joko tunnelin leveys tai etäisyys tunnelin perästä tuetun osan etureunaan, jolloin etäisyys ei ylitä tunnelin leveyttä. Pysyvyysaikaan tietylle aktiivisille tukemattomalle jännevälille vaikuttaa myös kallion laatu. Laufferin luokituksessa kallio on jaettu laadun mukaan seitsemään luokkaan. Laufferin jännevälin ja pysyvyysajan välistä suhdetta on käytetty pohjana myös muissa luokituksissa.

RSR-luokitus (Rock Structure Rating) on kehitetty Yhdysvalloissa (Wickham ym. 1972) Bureau of Minesin tutkimustyönä. Luokituksen pohjana on 53 lähinnä Yhdysvaltain länsiosissa 1970-luvun alussa louhittua kohdetta, jotka on jaettu osa-alueisiin. Yhteensä määriteltyjä alueita on 190, joista valtaosa on lujitettu teräskaarin. Osa-alueista 26 on lujittamattomia, 14 on lujitettu pultituksella ja vain kolmessa on käytetty ruiskubetonia (Skinner 1988). Luokitus tarjoaa kvantitatiivisen menetelmän kuvailla kallion laatua pisteiden avulla. Yksittäisille parametreille annetaan parametrin suhteellisen tärkeyden mukaan painotettu pistearvo. Parametrin pisteiden summana saadaan RSR-luku eli RSR = A + B + C. RSR-luku vaihtelee välillä 0...100 pistettä. RSR-luokituksen luokituspe-rusteet ovat (Skinner 1988):

1. Parametri A, kallioalueen yleinen geologinen rakenne

a) kallion alkuperäinen tyyppi
b) kallion kovuus
c) geologinen rakenne

2. Parametri B, rakotiheys ja rakoilun suunta louhittavaan tilaan nähden

a) rakoväli
b) rakoilun suunta
c) tunnelin louhintasuunta

3. Parametri C, pohjaveden virtausolosuhteet

a) luokitustekijöiden A ja B summa
b) rakojen laatu
c) vesivuoto

RSR-luokituksessa käytetään useita parametreja. Se on ensimmäinen kvantitatiivinen kallioluokitus, jossa kallion laatu määritetään numeerisella arvolla. Koska luokitus perustuu pieneen vertailuaineistoon ja voimakkaasti yksinkertaistettuihin teorioihin, sen antama lujitussuositus ei ole tarkka. RSR-luokituksen lujitussuositukset perustuvat teräskaarituentaan. Luokitusta voidaan tietyin varauksin käyttää myös pultituksen ja ruiskubetonoinnin yhteydessä (Skinner 1988). RSR-luokitusta pidetään yleisesti vanhanaikaisena, eikä sitä ole enää syytä käyttää lujituksen perustana, mutta se on ollut kallioluokitusten kehittämisen merkittävä edistysaskel. Joskin esim. Sinha katsoo sen olevan vain Terzaghin luokituksen parannus, eikä oma luokitusjärjestelmä (Kirkaldie 1988). RSR-luokituksen tunnelin rakosuunnan vaikutusta on käytetty RMR-luokituksen pohjana (Bieniawski 1988).

Tärkeimmät nykyisin käytettävät kallioluokitusmenetelmät on kehitetty 1970-luvulla. Tunnetuimmat näistä ovat mm. Bartonin kehittämä Q-luokitus ja Bieniawskin kehittämä RMR-luokitus, jotka on käsitelty yksityiskohtaisesti kohdassa 3. Kummastakin luokituksesta on tehty lukuisia jatkokehitelmiä erilaisiin käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi kaivoskohteissa käytetään yleisesti Laubscherin vuonna 1977 kehittämää sovellutusta, MRMR-luokitusta. Koska kalliorakennuskohteet ovat yleensä lähellä maanpintaa, jolloin kallioperän jännitykset ovat pieniä, ei alkuperäinen RMR-luokitus huomioi jännityksen vaikutuksia kallion luokitukseen. RMR-luokituksen kaivossovellutuksia voidaan käyttää kohteissa jotka ovat syvällä tai suurissa jännitystiloissa (Laubscher 1977).

Pysyvyys diagrammi menetelmä on Q-luokituksesta kaivoskäyttöön kehitetty sovellutus (Mathewin 1980, Potvin ym. 1988 ja 1992). Menetelmä huomioi Q-luokitusta paremmin kallion suuntautumisen ja kalliotilan dimensiot. Menetelmä perustuu kokemuksiin yli 350 kaivoksesta Kanadassa. Menetelmä perustuu lujuustekijän N' ja hydraulisen säteen S määrittämiseen. Näiden tekijöiden perusteella voidaan arvioida louhoksen pysyvyyttä. Lujuustekijä N' saadaan kaavalla:

$$N' = Q' * A * B * C \qquad (2.1)$$

jossa Q' on modifioitu Q-luku, A on jännitystekijä, B on suunnan vaikutustekijä ja C on louhoksen suuntatekijä. Hydraulinen säde S on louhoksen analysoitavan pinnan poikkipinta-ala jaettuna piirillä. Useimmat moniparametriset luokitusjärjestelmät (Q-, RMR- ja RSR-luokitukset) ovat kehitetty kalliorakennuskohteissa. Syvällä olevissa kaivoskohteissa kallion rapautuminen ja pohjavesiolosuhteet eivät ole yhtä merkittäviä ja voidaan usein jättää huomioimatta.

Uutena luokituksena voidaan mainita RMi (Rock Mechanical Index) (Palmström 1995). Se ei ole varsinainen kallioluokitus samalla tavalla kuten esim. Q- ja RMR-luokitukset. Sen avulla määritetään rakoilleen kalliomassan puristuslujuus, joka muodostuu kivilajin yksiaksiaalisesta puristuslujuudesta ja kallion rakoilusta, ja jota voidaan edelleen käyttää lähtötietoina kalliomekaanisissa laskelmissa. Myös GSI (Geological Strength Index) määrittää kalliomassan lujuuden. GSI voidaan määrittää myös muunnettujen RMR- tai Q-luokituksen avulla (Hoek ym. 1995).

Suomessa on laadittu rakennusgeologinen kallioluokitus (Korhonen ym. 1974) kuvailemaan kalliomassaa ja sen ominaisuuksia. Siinä kallio on jaettu luokkiin kivilaadun ja rakoilun perusteella. RG-luokitus perustuu tutkijan visuaalisiin havaintoihin kiviaineksesta ja kalliosta. Se voidaan tehdä

kalliopaljastumista, kairasydännäytteistä tai tunnelin seinästä. Tarvittaessa luokitusta voidaan täydentää laboratoriotutkimuksilla.

RG-luokitus kuvastaa kallion rikkonaisuutta ja louhinnan vaikeutta. RG-luokituksen korrelaatiota lujituksen kanssa on tutkitttu eri yhteyksissä (Ahola 1991, Wegelius ja Viitala 1995). Näissä tutkimuksissa on todettu, että jonkinlainen korrelaatio voidaan havaita, erityisesti Ri-vyöhykkeiden osalta, mutta hyvän kalliolaadun osalta ei ole havaittu selvää korrelaatiota tarvittavan lujituksen kanssa. RG-luokituksen yhteydessä on julkaistu taulukko, jossa on esitetty yhteys työmaatapahtumien ja kalliolaadun välillä.

Edellä esitetyistä luokituksista pisimmälle kehitetyt ovat Q- ja RMR-luokitukset, jotka kuvailevat kalliomassan perustuen tilan kalliomekaaniseen pysyvyyteen vaikuttaviin geologisiin ominaisuuksiin. Ne soveltuvat sekä kovaan että pehmeään kiveen ja pohjautuvat laajoihin referenssitiedostoihin. Molempien luokitusten tarkoitus on antaa suunnittelijoille käsitys kalliomassasta ja sen luonteesta.

Vähärakoisessa kalliossa, jossa rakoilu on epäedullisesti suuntautunut voi muodostua erillisiä lohkoja, jotka on lujitettava erikseen (Løset 1995a). Näiden lohkojen lujitus on tehtävä rakoanalyysin avulla, koska kallioluokitus menetelmät eivät anna aina riittäviä lujitussuosituksia lohkojen osalle. Erityisen merkittävää lohkojen lujitus on, jos kyseessä on avainlohko, jonka putoaminen tai liukuminen voi saada aikaan toisten lohkojen irtoamisen ja tunnelin sortumisen. Kun kalliossa esiintyy vähintään kolme rakosuuntaa, on lohkojen esiintyminen todennäköistä.

Nykyisin on tehty erilaisia tietokoneohjelmia, joiden avulla voidaan etsiä mahdollisia vaarallisia lohkoja. Toinen menetelmä lohkojen analysointiin on käyttää apuna puolipallokoordinaatistoa, johon merkitään mahdollisten rakojen kulut ja kaateet sekä rakopintojen kitkakulma (Stacey ja Page 1986).

Taulukkossa 2.1 on esitetty lyhyesti yleisimmät käytetyt kallioluokitusmenetelmät sekä Q- ja RMR-luokitusten jatkosovellutuksia.

Taulukko 2.1. Eräitä yleisiä kallioluokitusmenetelmiä (Bieniawski 1993, Hoek ym 1995, Syrjänen 1993).

Kallioluokitusmenetelmä	**Kehittäjä**	**Käyttötarkoitus**
Kalliokuormitus (Rock load)	Terzaghi, 1946, USA	Teräskaarin lujitetut tunnelit
Pysyvyysaika (Stand-up time)	Lauffer, 1958, Itävalta	Tunnelit
NATM	Rabcewitz, Pacher ja Müller, 1964, Itävalta	Tunnelit
RQD (Rock quality designation)	Deere ym., 1967, ja Deere ym., 1970, USA	Kallionäytekairaukset, tunnelit.
RSR-menetelmä	Wickham ja muut, 1972, USA	Tunnelit.
RMR-menetelmä	Bieniawski, 1973, -74, -76, -79, -89, Etelä-Afrikka, USA	Tunnelit, kaivokset, luiskat, perustukset.
RMR-menetelmän muunnoksia	Weaver, 1975, Etelä-Afrikka	Rakoilu.
	Laubscher 1977, Etelä-Afrikka	Kaivokset.
	Olivier, 1979, Etelä-Afrikka	Rapautuvuus, louhittavuus
	Ghose ja Raju, 1981, Intia	Hiilikaivokset.
	Moreno Tallon, 1982 Espanja	Tunnelit.
	Newman. 1985, USA	Hiilikaivokset
	Kendorski ym. 1983, USA	Kovan kiven kaivokset.
	Nakao ym., 1983 Japani	Tunnelit.
	Serafi ja Pereira, 1983, Portugali	Perustukset.
	Gonzales de Vallejo, 1983, Espanja	Tunnelit
	Unal, 1984, USA	Kalliopultitus hiilikaivoksissa.
	Romana, 1983, Espanja	Kallioluiskat.
	Newman, 1985, USA	Hiilikaivokset.
	Sandback, 1985, USA	Porattavuus.
	Smith, 1986, USA	Murskautuvuus
	Venkateswarlu, 1986, Intia	Hiilikaivokset.
	Robertson, 1987, Kanada	Kallioluiskat.
Q-luokitus	Barton ym., 1974,1986 Norja viimeisin versio 1993, Norja	Tunnelit, kalliotilat, kuilut.
Q-luokituksen muunnoksia	Kirsten, 1982, Etelä-Afrikka	Louhittavuus.
	Kirsten 1983, Etelä-Afrikka	Tunnelit.
	Roesner ym. 1983 USA	Kuilunajo.
	McCracken ja Stacey. 1989, UK	Täysprofiilinousut.
	Mathew ym. 1980 Kanada	Kaivokset.
	Potvin ym., 1988, Kanada	Vaijeripultitus, kaivokset.
	Nickson 1992, Kanada	Vaijeripultitus, kaivokset.
Lujuus-koko (Strength-size)	Franklin, 1975, Kanada	Tunnelit.
Rock Mass Index, RMi	Palmström, 1995, Norja	Kalliomassan lujuus
ISRM	ISRM, 1981	Yleinen, kuvaileva.
Protodyakonovin luokitus	Protodyakonov, 1974, Neuvostoliitto	Tunnelit
Yhtenäisluokitus (Unified classification)	Williamson, 1984, USA	Yleinen, kuvaileva.
Rakennusgeologinen kallioluokitus (RG-luokitus)	Korhonen ym., 1974, Suomi	Yleinen, kuvaileva.

2.2 RQD-luku

RQD-luku on kalliomassan rakoilun määrään perustuva likimääräisesti kallion laatua kuvaava arvio (Deere 1963) . Deere on esittänyt myös RQD-lukuun perustuvan kallioluokituksen vuonna (Deere 1964). RQD-luvulla on myös korrelaatio erilaisten kalliomassan ominaisuuksien kanssa (Deere ym. 1967). RQD-lukua ja siihen liittyviä lujitussuosituksia tutkittiin ja kehitettiin 1960-luvun loppupuolella ja 1970-luvun alkupuolella. 1970-luvulla RQD-lukua alettiin käyttää RMR- ja Q-luokitusten osaparametrina.

Kairasydännäytteestä määritettyyn RQD-lukuun vaikuttaa kairauksen suunnan suhde kallion rakoiluun. RQD-luku ei ole luotettava kalliolaadun mittari, koska se ei huomioi lainkaan muita kalliomassan ominaisuuksia kuin rakojen määrän. Se ei huomioi lainkaan esim. rakojen laatua, kallion jännitystilaa tai kivilajin ominaisuuksia. Luokituksen käytössä on rajoituksensa erityisesti kallioissa joissa on savitäytteisiä tai rapautuneita rakoja. Nykyisin RQD-lukua käytetään lähinnä rakoilun määrää kuvaavana lähtöparametrina sekä Q- että RMR-luokituksissa.

RQD-luku on pituudeltaan yli 100 mm:n kairasydännäytteiden osuus prosentteina kokonaispituudesta määritettynä luonnonrakojen perusteella. Suositeltava näytekoko on vähintään 54,7 mm, mutta se voidaan tehdä myös muiden kairasydänkokojen perusteella. Määrittelyn tarkkuus kärsii halkaisijan pienentyessä. RQD-luku voidaan määrittää myös kalliopinnasta ilman kairasydämiä rakoilun määrän tai keskimääräisen rakovälin perusteella kappaleen 3 mukaisesti.

2.3 Q-luokitus

Q- eli NGI-luokitus laadittiin Norjan geoteknisessä instituutissa vuonna 1974 (Barton ym. 1974). Vuonna 1974 luokitus perustui 212 referenssikohteeseen, vuonna 1986 kohteita oli jo 450. Vuonna 1990 analysoitiin 440 uutta kohdetta (Løset 1990). Nykyisin Q-luokitus perustuu 1 050 eri kohteeseen (Grimstad ja Barton 1993). NGI ylläpitää ja kehittää Q-luokitusta jatkuvasti ja se on tehnyt useaan otteeseen tarkennuksia ja parannuksia lujitussuosituksiin ja parametrimäärityksiin. Q-luokitus on kallioluokitusmenetelmä, joka on saavuttanut suurimman kansainvälisen kattavuuden.

Q-luokituksessa saadaan kallion laatua kuvaava numeerinen arvo, Q-luku, sijoittamalla kalliosta saadut lähtöparametrit kaavaan 2.2 Q-luvun vaihteluväli on 0,001...1000. Mitä korkeampi arvo on, sitä parempi on kalliotilan kalliomekaaninen pysyvyys. Q-luokituksessa kallion laatu kuvataan kallion rakoilun, rakopintojen leikkauslujuuden ja jännitystilan perusteella käyttäen apuna kuutta erikseen määritettävää parametria. Q-arvo saadaan kaavalla (Barton ym. 1974):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} x \frac{J_r}{J_a} x \frac{J_w}{SRF} = Lohkarekoko \times Rakojen\ leikkauslujuus \times Kallion\ jännitystila \qquad (2.2)$$

Kartoitettaessa yksittäisten parametrien arvot määritetään taulukoista. Kalliorakenteen pysyvyys muodostuu monen eri osatekijän summasta, joista erityisen merkittäviä ovat lohkarekoko, rakojen leikkauslujuus ja kallion jännitystila.

Q-luokitus ei sisällä rakosuuntien vaikutusta erillisenä terminä, vaan tämä huomioidaan parametrien valinnassa. Parametrit J_r ja J_a valitaan heikoimmasta merkitsevästä raosta yleensä epäedullisimman rakosuunnan ominaisuuksien mukaan. Bartonin mukaan kalliomassan muut ominaisuudet ovat tärkeämpiä pysyvyyden kannalta. Rakosuunnan vaikutuksen lisäys olisi tehnyt järjestelmästä liian vaikeakäyttöisen (Barton ym. 1974).

Ennen luokitusta tulee määritettävä kallio jakaa osa-alueisiin, joissa kallio on homogeenista. Luokitus määritetään kustakin osa-alueesta erikseen. Q-luokitusta voidaan käyttää lähes kaikenlaisissa kallio-olosuhteissa. Se sopii sekä koviin rakoilleisiin kallioihin että hyvin pehmeisiin kallioihin. Järjestelmä huomioi paitsi kallion jännitystilan, myös heikkousvyöhykkeet, kokoonpuristuvan ja paisuvan kallion.

Q-luvun ja lujituksen välillä on todettu olevan yhteys (Barton ym. 1974). NGI on laatinut kalliotilojen lujitussuositustaulukon, jonka lähtötietoina ovat Q-luku, tunnelin koko ja tunnelin käyttötarkoitus (kuva 4.5). Q-luokituksen avulla voidaan määrittää myös lujitukseen kohdistuva kuormitus (kuva 4.6) ja tarvittava työnaikainen lujitus. Luokituksen antamaa lujitussuositusta ei tule pitää kirjaimellisena lujitusohjeena, vaan sitä on käytettävä muiden menetelmien rinnalla.

Suositukset perustuvat lujituksiin, joita luokituksen perusteena olevissa kohteissa on käytetty. Vuoden 1974 versio perustui vanhempaan lujitustekniikkaan, jossa käytettiin pultitusta ja teräsverkolla vahvistettua ruiskubetonia. Vuonna 1986 esitettiin lujitussuositukset, jotka perustuivat kuituvahvisteiseen ruiskubetoniin ja pultitukseen. Myös vuoden 1993 versio perustuu samaan tekniikkaan. Uutena lujitusvaihtoehtona huonon kalliolaadun alueille on esitetty lujitetut ruiskubetonikaaret (RRS). Molemmissa versioissa huonoimmat alueet lujitetaan teräsbetonisilla valukaarilla. Käytettäessä vanhempia lujitusmenetelmiä, ovat vuoden 1974 version lujitussuositukset, täsmennyksineen ja lisähuomautuksineen edelleen käyttökelpoisia. Huonoimpien kalliolaatujen osalta sen antamat lujitussuositukset ovat Løsetin mukaan ylimitoitettuja.

2.4 RMR-luokitus

Bieniawski kehitti RMR-luokituksen 1973 Etelä-Afrikassa CSIR-tutkimuslaitoksen (Counsil for Scientific and Industrial Research) palveluksessa. Bieniawski itse käyttää nimeä RMR-luokitus (Rock Mass Rating) tai geomekaaninen luokitus (Geomechanics Classification). Luokitusta on parannettu vuosina 1974, 1975, 1976, 1979 ja 1989. Alkuperäinen luokitus perustui 49 verrattain rapautuneeseen kalliomassaan louhittuun kohteeseen. Nykyisen luokituksen pohjana on 351 referenssikohdetta erityyppisissä kallioissa.

RMR-luokituksessa on lähinnä täsmennetty parametreja ja niiden pisteytystä. Vuonna 1989 luokitusta on tarkennettu jakamalla rakojen laatu viiteen erilliseen rako-ominaisuuteen, joille on laadittu erillinen pisteytys. Vuonna 1989 tarkennettiin myös muita pisteytyksiä RMR-luokituksessa esim. puristuslujuuden ja rakovälin osalta.

Bieniawskin mukaan RMR-luokituksen tarkoituksena on (Bieniawski 1989):

1. tunnistaa merkittävimmät kalliomassan käyttäytymiseen vaikuttavat ominaisuudet
2. jakaa tietty kalliomassa eri luokkiin kallion laadun perusteella
3. tarjota perusta ymmärtää kunkin kallioluokan ominaisuuksia
4. antaa kvantitatiivista tietoa kalliomekaanisen suunnittelun tueksi
5. muodostaa yhteisen perustan kommunikaatiolle

RMR-luokituksen tuloksena saadaan numeerinen arvo, joka kuvastaa kallion laatua ja kalliomekaanista pysyvyyttä. Luokitus perustuu seuraaviin lähtöparametreihin:

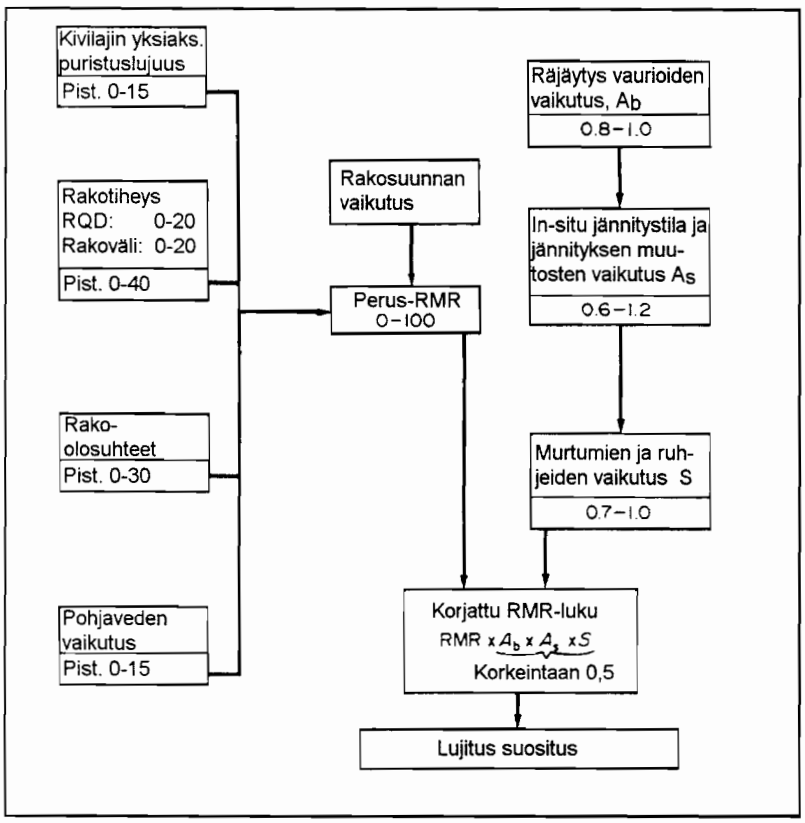
1. kivilajin yksiaksiaalinen puristusmurtolujuus.
2. RQD-luku.

3. rakoväli
4. rakojen laatu.
5. pohjavesi
6. rakoilun suunta.

Lähtöparametreille määritetään pisteet taulukoista kuvailun tai mitattavien suureiden mukaisesti ja RMR-luku saadaan laskemalla lähtöparametrien pisteytykset yhteen.

RMR-luokituksen viisi ensimmäistä parametria muodostavat perus-RMR-luvun. Kuudes parametri saadaan tunnelin suuntauksesta kallioon nähden. Tämä luku vaihtelee tunneleissa välillä 0...-12 suuntauksesta riippuen. Tämä arvo vähennetään perus-RMR-luvusta jolloin saadaan kokonais-RMR-luku, joka vaihtelee välillä 0...100. Alkuperäisessä RMR-luokituksessa ei ole muita korjaustekijöitä kuin rakoilun suunnan vaikutus.

Kalliorakennuskohteissa rakosuunnan vaikutus on yleensä riittävä korjaus perus-RMR-luvulle. Kaivoskohteissa voidaan tarvita muitakin korjauskertoimia (kuva 2.4). Kaivoskohteet ovat usein melko syvällä suurissa jännitystiloissa. Tällöin on syytä käyttää korkeista jännitystiloista johtuvaa korjauskerrointa. Myös merkittävistä ruhjeista ja räjäytyksistä johtuvia korjauskertoimia voidaan tarvita. Näitä kertoimia voidaan käyttää tarvittaessa myös kalliorakennuskohteissa.



Kuva 2.4. RMR-luokituksen muunnos kaivossovellutuksia varten Laubscherin ja Kendorskin mukaan (Bieniawski 1988)

RMR-luokitus on alunperin kehitetty käytettäväksi kovassa kalliolaadussa lähellä maanpintaa olevissa tunneleissa, mutta sitä on menestyksekkäästi sovellettu myös luiskan vakavuuteen, perustuksiin, hiilikaivoksiin ja kovan kiven kaivoksiin. Luokituksen tuloksena saadaan kallion pysyvyysaika, kuormitus, suurin jänneväli, kimmo-moduli, koheesio ja kitkakulma. Luokituksen yhteydessä on laadittu yksityiskohtainen lujitussuositus poraus-räjäytysmenetelmällä louhitulle

"hevosenkengän" muotoiselle tunnelille, jonka jänneväli on 10 metriä ja pystyjännitys < 25 MPa. Luokituksen antama lujitussuositus on varsin konservatiivinen (Bieniawki 1988). Q-luokituksen antama lujitussuositus on tarkempi ja monipuolisempi sekä vastaa paremmin totuttua suomalaista lujituskäytäntöä.

2.5 Q- ja RMR-luokitusten välinen yhteys

Kalliorakennushankkeessa on syytä käyttää vähintään kahta eri kallioluokitusmenetelmää. Tämä pienentää virhemahdollisuutta, näin voidaan tarkistaa tehty luokitus toisen avulla. Eri luokituksien käytön avulla huomioida kaikki merkittävimmät ominaisuudet kohteen kallioperästä, koska ne muodostuvat eri parametreista. Yleisimmin käytetyt kallioluokitukset ovat Q- ja RMR-luokitus. Nämä luokitukset ovat osoittautuneet helppokäyttöisiksi ja ne kuvaavat kalliomassan lujuusominaisuuksia ja pysyvyyttä melko hyvin (Hoek ym. 1995). Yksittäisten parametrien määrittämisen lisäksi kartoituksessa on kuvailtava kallion geologiset piirteet ja ominaisuudet.

Eri luokitusten välillä vallitsevaa yhteyttä on tutkittu useissa yhteyksissä (esim. Kaiser ym. 1986). Tutkimusten perusteella on kehitetty erilaisia muunnoskaavoja, joilla luokitus muunnetaan toiseksi. Q- ja RMR-luokitusten välistä yhteyttä on tutkittu monissa yhteyksissä. Tutkimuksissa on saatu eri olosuhteisiin sopivia muunnoskaavoja, joilla Q-luokitus voidaan muuttaa RMR-luokitukseksi.

Taulukko 2.2. Muunnoskaavoja RMR- ja Q-luokituksen välillä (Syrjänen 1993)

Kaava	Lähde	Käyttökohteet
RMR = 9 ln Q + 44	Jethwa ym., 1982, Intia	Tunnelit
RMR = 10,5 ln Q + 42	Abad ym., 1983, Espanja	Kaivostunnelit, pehmeä kivi
RMR = 13,5 log Q + 43	Rutledge ja Preston, 1978, Uusi Seelanti	Tunnelit
RMR = 12,5 log Q + 55,2	Moreno, 1982, Espanja	Tunnelit
RMR = 5 ln Q + 60,8	Cameron-Clarke ja Budavari, 1981, Etelä-Afrikka	Tunnelit
RMR = 9,19 ln Q + 43,89	Tamades Celada, 1983, Espanja	Kaivostunnelit, pehmeä kivi
RMR = 12,11 log Q + 50,81	Udd ja Wang, 1985, Kanada	Kaivostunnelit, kova kivi
RMR = 8,7 ln Q + 38	Kaiser ym., 1986, Kanada	Tunnelit, sedimenttikivet
RMR = 10 ln Q + 39	Choquet ja Charette, 1988, Kanada	Kaivostunnelit, kova kivi
RMR = 15 log Q + 50	Barton, 1996, Norja	Tunnelit

Q- ja RMR-luokituksen välisen riippuvuuden yleinen kaava on (Afrouz 1992):

$$RMR = x\,^{a} ln Q + y\,^{b} \qquad (2.2)$$

jossa x, y, a ja b ovat kallion rakoilusta ja kivilajista riippuvia vakioita siten, että:

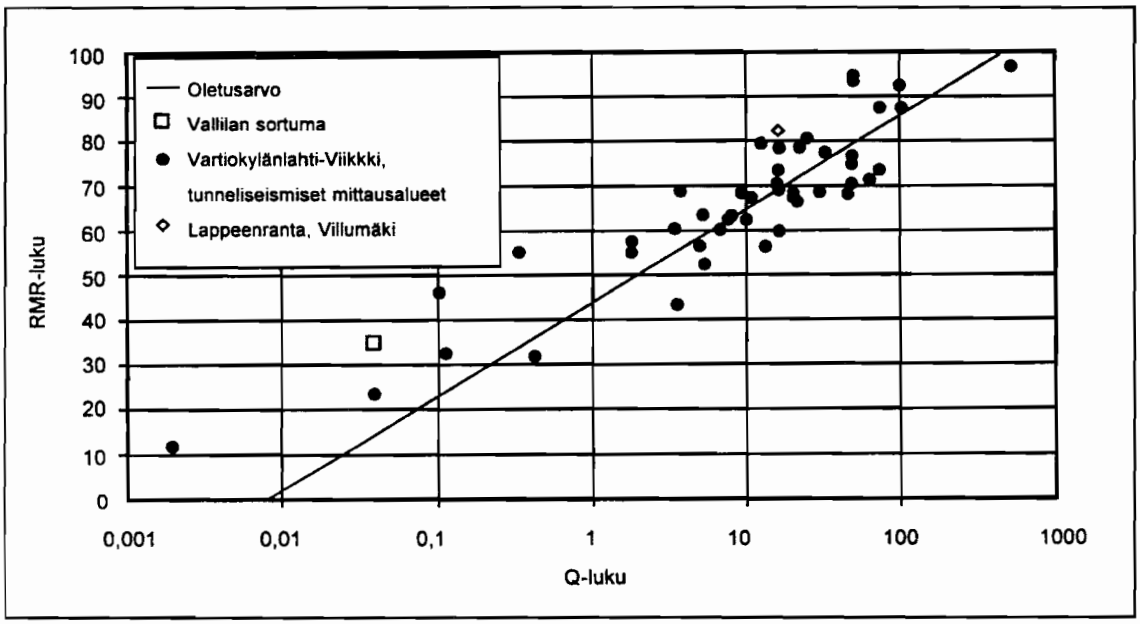
$x^a = 5...13.5$

$y^b = 26...62$

Kokemusten mukaan Suomen olosuhteissa parhaiten toimiva kaava on (Syrjänen 1993)

$$RMR = 9 ln Q + 44 \qquad (2.3)$$

Huonoista kalliolaaduista on valitettavasti liian pieni aineisto, jotta meidän oloihin parhaiten sopiva kaava voidaan määrittää riittävän tarkasti. (Kuva 2.5).



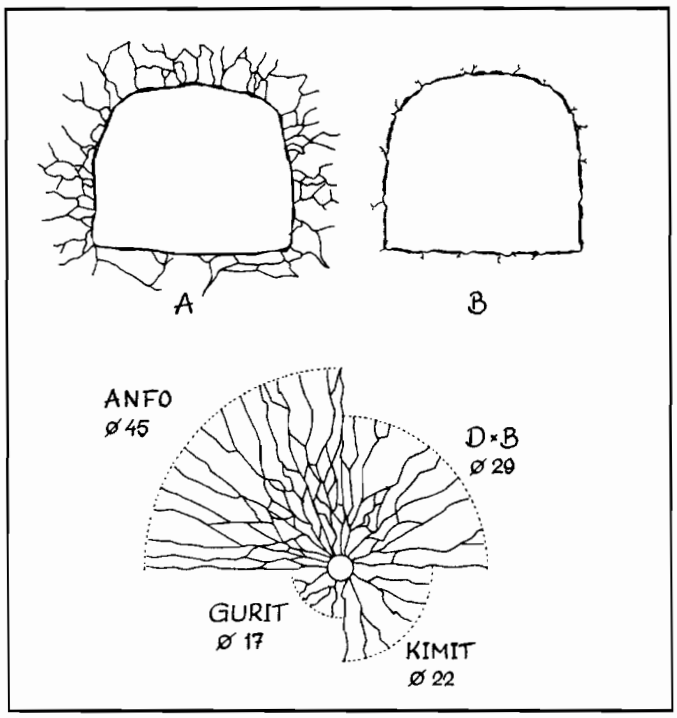
Kuva 2.5. Q- ja RMR-luvun välinen yhteys suomalaisten tutkimusten mukaan (Syrjänen 1993).

2.6 Louhinnan vaikutus kallioluokitukseen

Häiriintymätön kallio on aina selvästi parempaa kuin tunnelissa tai kairasydännäytteiden perusteella luokiteltu. Tunnelin louhiminen aiheuttaa aina uusien rakojen syntymistä, erityisesti poraus räjäytysmenetelmää käytettäessä. Räjäytyksen yhteydessä syntyvät kaasun paineet pyrkivät avaamaan jo olemassa olevia rakoja, sekä aikaansaa uusia rakoja. Tarkkuuslouhinnan avulla pyritään vähentämään räjäytyksen synnyttämää rakoilua. Kallioon voi syntyä uusia rakoja myös louhinnan jälkeen kalliomekaanisten muutosten johdosta.

Räjähdysaineen laatu, panostusaste ja porareiänkoko vaikuttavat räjäytyksen yhteydessä syntyvän rakoilun määrään (kuva 2.6). Nopeat räjähdysaineet ja korkea panostusaste lisäävät kallion rikkoutumista. Suuri reikä suhteessa patruunakokoon vähentää kallion rikkoutumista.

Tutkittaessa kallioperää kairaamalla sydännäytteitä, saadaan käsitys kallion rakoilusta ennen louhintaa. Kairauksen yhteydessä syntyviä vaurioita voidaan vähentää käyttämällä korkealuokkaista kairauskalustoa, riittävän suurta näytekokoa sekä ammattitaitoista kairaushenkilökuntaa. Kairasydännäytteistä voidaan usein rakopinnan perusteella päätellä onko näytteen rako luonnonrako vai keinotekoinen.



Kuva 2.6. Rikkoutumisvyöhykkeen laajuus riippuu käytetyn räjäytysaineen määrästä. Myös reunareikää seuraavat ja avarrusreiät voivat aiheuttaa kallion rikkoutumista. (Stillborg 1986).

TBM-menetelmällä kallion vaurioituminen louhinnan yhteydessä on vähäisempää kuin poraus-räjäytysmenetelmän yhteydessä. TBM-porauksessa syntyvä tärinä voi löyhdyttää tietyissä olosuhteissa kalliota, mutta vaikuttaa kallioon kuitenkin huomattavasti vähemmän kuin räjäytysten yhteydessä syntyvä tärinä ja painevaikutus. Koska TBM-tunneleissa kallio näyttää paremmalta kuin poraus-räjäytysmenetelmällä louhitussa tunnelissa, putoavia lohkareita ei ole niin helppo paikallistaa kuin poraus-räjäytysmenetelmällä louhitussa tunnelissa. Osa lohkoista saattaa aiheuttaa vaaratekijän työn aikana tai jäädä huomioimatta lopullisessa lujituksessa.

Poraus-räjäytysmenetelmällä tehtyjä tunneleita lujitetaan keskimäärin enemmän kuin TBM-tunneleita. Osaksi tämä johtuu myös siitä, että TBM-tunneli näyttää paremmalta kuin poraus-räjäytysmenetelmällä tehty tunneli. Norjalaisten kokemusten mukaan tarvittavat lujitusmäärät kasvoivat esim. Svartisen tietunnelissa keskimäärin yli 60 % laajentaessa räjäyttämällä TBM-tunnelia (Løset 1992). Pultitusmäärä kasvoi 77 % ja ruiskubetonointi 64 %. Keskimääräinen Q-arvo pieneni 20,5:stä 18,5:teen. Pinta-alan kasvun merkitys tarvittavan lujituksen kannalta oli vähäisempi. Suurin kasvu tapahtui hyvässä kalliolaadussa, kun Q = 4...30. Muilla alueilla louhintamenetelmän vaikutus lujitustarpeeseen oli vain vähäinen. Louhinnan vaikutuksen myötä RQD-luku yleensä pienenee, muut parametrit eivät muutu (Løset 1992, 1996).

Ruotsissa on tehdyssä ZEDEX-tutkimuksessa Äspössä Q-arvo on määritetty samassa kalliossa kairasydämistä, poraus-räjäytysmenetelmällä louhitusta tunnelista sekä TBM-tunnelista. Kairasydämissä Q-arvo oli keskimäärin 24,0, TBM-tunnelissa 22,0 ja poraus-räjäytysmenetelmällä louhitussa tunnelissa 21,5 (Løset 1996).

2.7 Suomessa tehdyt luokitusmääritykset

Q- ja RMR-luokitusta on jonkin verran käytetty Suomessa jo aiemmin. Luokitukset voidaan jakaa hankkeen alkuvaiheessa tehtyihin alustaviin luokituksiin ja louhinnan aikana tehtyihin yksityiskohtaisiin luokituksiin.

Kampin sähköasema

Kalliosuunnittelu Oy on käyttänyt Q- ja RMR-luokitusta Kampin sähköaseman suunnittelun apuna (Syrjänen ym. 1994 ja Syrjänen 1995). Kohteessa on suoritettu yksityiskohtainen kallioluokitus sekä kairasydämistä että tunnelin seinästä holvin tasalta. Luokituksia on myös vertailtu toisiinsa. Tunnelista ja kairasydämistä tehdyt määritykset erosivat hieman toisistaan. Jo kairasydännäytteiden perusteella tehdyt tutkimukset antoivat hyvän kuvan kohteen kallion rakenteesta, mutta lopullinen varmuus kallion laadusta saatiin vasta kalliotilasta tehdyn in-situ määrityksen yhteydessä.

Q-luokituksessa saadut arvot vaihtelivat kairasydänmäärityksessä välillä 0,02...20,0 ja tunnelin holvista tehdyssä määrityksessä välillä 0,01...24,3. RMR-arvo on määritetty vain kairasydämen perusteella ja se vaihteli välillä 20,5...78. Kohteessa on määritetty Q-arvo myös seismisen nopeuden perusteella.

Vartiokylänlahti-Viikinmäki viemäritunneli

Vartiokylänlahti-Viikinmäki viemäritunneli on luokitettu 250 metrin pituudelta liittyen kalliorakentaminen 2000 projektiin (Salmelainen 1994a). Tutkimuksessa on tutkittu kalliolaadun ja seismisen P-aallon nopeuden välistä yhteyttä. Q- ja RMR-luokitus on tehty tunnelissa tietyillä osilla. Saadut Q-arvot vaihtelevat välillä 0,002...533. RMR-luokituksesta saadut arvot vaihtelivat välillä 12...96.

Reijo Riekkolan diplomityö

Reijo Riekkola määritti diplomityössään (Riekkola 1975) kallion Q-luokituksen useissa kalliorakennuskohteissa. Työssä on tutkittu luokitusmenetelmän soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin sekä toteutuneiden lujitusten ja luokituksen antamien lujitussuositusten vastaavuutta. Tutkimuksessa Q-luokitus tuotiin ensimmäisen kerran Suomessa yleiseen tietoisuuteen ja käännettiin Suomen kielelle.

Luokitus suoritettiin seitsemässä eri kohteessa, joissa kussakin tehtiin useita määrityksiä. Saadut Q-arvot vaihtelevat välillä 0,0083...22,2. Tutkimuksessa luokituksen todettiin sopivan tietyin ehdoin hyvin suomalaisten vesitunnelien lujitussuunnittelun apuvälineeksi. Työn johtopäätöksenä oli, että suomalaisessa lujituskäytännössä kalliolaadun muuttumista ei oteta kovin voimakkaasti huomioon, jolloin huonot kalliolaadut alilujitetaan ja hyvät ylilujitetaan.

Viikinmäen keskuspuhdistamon luokitukset

Viikinmäen keskuspuhdistamosta on määritetty sekä Q- että RMR- luokitus. Määritysten yhteydessä on kartoitettu puhdistamon eteläosa suurelta osin. Saadut Q-arvot vaihtelevat välillä 0,01...100. Q-luokitus on tehty vuoden 1974 version mukaan. Alueella on tehty myös RMR-luokitus, jonka arvot vaihtelivat välillä 30...80.

Muut määritykset

Muina määrityksinä voidaan mainita mm. Maunulan väestönsuojan kairasydämien RMR-luokitus (Laine 1988). Luokitus on tehty vuoden 1976 version mukaisesti. Kohde käsitellään tarkemmin kohdassa 5.5 Maunulan väestönsuoja.

Helsingin Vallilassa sattui louhinnan aikana sortuma viemäritunnelissa vuonna 1993. Tunnelissa suoritettiin Q- ja RMR-luokitus sortumisen jälkeen. Viemäritunnelin sortuma johtui paisuvahilaisesta kalliosavesta. Heikkousvyöhykkeen alueelta on määritetty sekä Q- että RMR-luokitus. Saadut arvot ovat seuraavat (Syrjänen 1993):
Q = 0,04 ja RMR = 35

Suunnittelun aikana tehtäviä alustavia kallioluokituksia on tehty mm. seuraavissa kohteissa: Lappeenrannan Villumäki, Kuusankosken Kymintehtaan koulu, Ylitornio ja Herttoniemen väestönsuoja. Kohteiden edistyessä niissä tullaan todennäköisesti tekemään yksityiskohtainen kallioluokitus.

3 MÄÄRITYSOHJEET

3.1 Kalliokartoitus

Kallio on pyrittävä kuvaamaan kartoituksen yhteydessä mahdollisimman hyvin. Kartoitus kannattaa tehdä erityisesti sitä varten tehdyille lomakkeille (liitteet 3...6). Tällöin tunnelista kartoitetaan kallion laatu, kivilaji, rakoilu sekä heikkousvyöhykkeet. Karttaan merkitään rakoilun kulku ja kaade. Näiden rakohavaintojen perusteella voidaan laatia tarvittaessa Schmidt-diagrammi. Lisäksi karttaan merkitään merkittävimpien rakojen sijainnit ja tyypit. Karttaan merkitään heikkousvyöhykkeet, niiden sijainnit ja rakenteet. Lisäksi samaan karttaan voidaan merkitä kallion laatua osoittava luokitus ja luokituksen lähtöparametrit. On tärkeää kirjata ylös aina lähtöparametrit, eikä vain luokitusarvo, jotta tiedetään syy esimerkiksi alhaiseen Q-lukuun. Parametrille voidaan antaa sama numeerinen arvo, vaikka ominaisuudet poikkeavat. Tarvittavat lujitusratkaisut ovat erilaisia eri tilanteissa. Esim. onko huono arvon syynä korkea jännitystila vai paisuva savi tms. Yhteen lomakkeeseen kirjataan yleensä kartoitustiedot 25 tai 50 metrin matkalta tunnelia. Tarvittaessa kartoitusta voidaan tarkentaa esittämällä yhdessä kartassa 5 metrin osuus.

NGI merkitsee kartoituslomakkeeseen myös tarvittavan lujituksen. Lomakkeessa on paikka sekä työnaikaiselle että lopulliselle lujitukselle. Kartoituksen lisäksi määritetyt parametrit voidaan kerätä tarkoitusta varten laadittuun ohjelmaan, joka antaa tulosteena määritetyt parametrihavainnot ja kallion luokituksen. Lomakkeesta nähdään myös havaintojen jakautuminen (Liite 3).

Likainen kallionpinta on pestävä ennen kartoitusta. Norjassa geologi on usein työmaalla ja kartoittaa kallion välittömästi katkon räjäytyksen jälkeen. Tässä yhteydessä geologi myös luokittaa kallion ja määrittää tarvittavan lujituksen. Luokitus tehdään rusnauksen, porauksen tai panostuksen aikana, siten ettei varsinainen louhintatyö häiriinny.

Luonnollisesti tehdessä luokituksia tarvitaan henkilökohtaiset suojavälineet ja hyvä valaisin. Kartoittaessa korkealla olevaa holvia, on käytettävä apuna nostolavaa. Lisäksi mukana on oltava muistiinpanovälineet. Muistiinpanot voidaan tehdä joko vihkoon tai käyttää erityisiä tarkoitusta varten tehtyjä lomakkeita. Kirjoitusalusta on myös käyttökelpoinen. Parametrien määrittämiseksi on pidettävä mukana määritystaulukoita (liitteet 1 ja 2).

Geologin vasaran avulla havaitaan onko kallio kiinteätä vai löyhää. Vasaran avulla voidaan saada myös hyvin karkea käsitys kivilajin lujuudesta. Poistamalla pieniä irtolohkareita nähdään paremmin rakopinnat ja rakotäytteet likaisestakin kalliosta. Kivilajin kovuuden määrittämisen apuna voidaan käyttää esimerkiksi Schmidt-vasaraa. Kapea veitsi on hyödyllinen tutkittaessa kalliorakoja ja niiden täytteitä. Veitsen avulla saadaan pienestäkin raosta rakotäytettä. Täytteestä nähden sen laatu ja raekoko. Rakohavaintoja varten tarvitaan geo kompassi, jossa on myös klinometri eli kaltevuuskulman osoitin. Malmikivissä on huomioitava, että kompassi voi näyttää väärin maan alla. Tällöin suunnat on määritettävä kalliotilan suuntien perusteella.

Rakopintojen karkeuden arvioimiseen voidaan käyttää apuna muotokampaa eli profilometria. Se kopioi halutun rakopinnan, jota voidaan verrata mallirakopintoihin karkeuden ja parametrien J_r tai JRC määrittämiseksi. Vertailtaessa profilometria mallirakopintoihin on muistettava, että parametrin J_r mallirakopinta ei ole mittakaavallinen, mutta JRC-pinnat ovat mittakaavallisia.

Koska kallion kartoitus ja luokitus on tärkeää erityisesti kalliotilan holvissa, on se korkeissa tiloissa syytä tehdä jo louhinnan alkuvaiheessa.

Kallion jakaminen osa-alueisiin

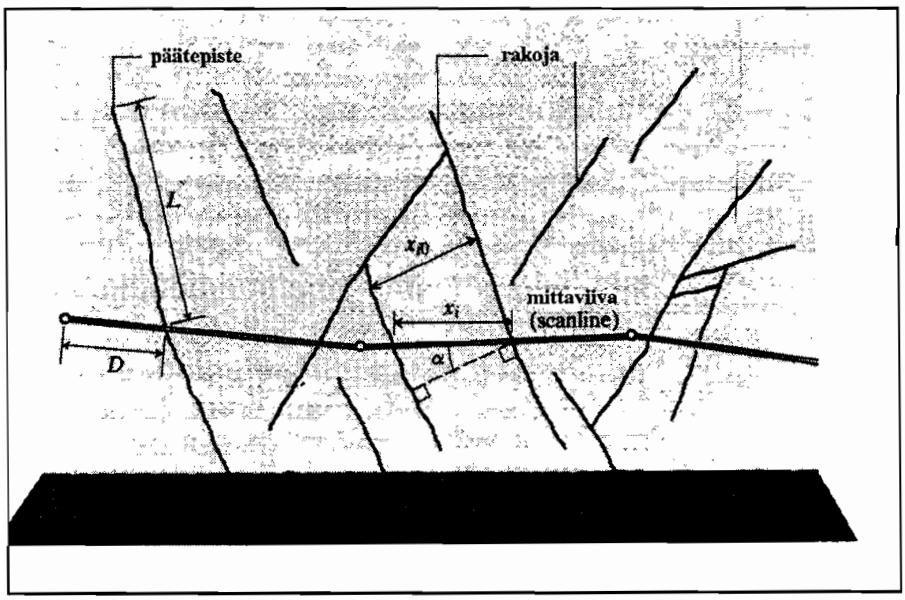
Kartoittaessa kallio jaetaan silmämääräisesti osa-alueisiin kalliolaadun mukaan. Kun yhdessä tai useammassa parametrissa tapahtuu merkittävä muutos, muodostetaan alueesta oma osa-alue (Geo Mapping Unit, GMU). Osa-alueet jaetaan periaatteessa samalla tavoin eri luokituksissa. Mitä herkempi luokitus on kalliolaadun muutoksille, sitä tarkempaa jakoa osa-alueisiin voidaan käyttää.

Heikkousvyöhykkeille määritetään oma luokitus yleensä silloin, kun ne tarvitsevat oman lujituksen. Jos kallion heikkousvyöhyke on kapea ei sille määritetä yleensä omaa luokitusta vaan huomioidaan alueen luokituksessa. Luokittaessa voidaan merkitä parametrien enimmäis- ja vähimmäisarvot kartoitusalueella, joiden perusteella voidaan laskea luokituksen vaihteluväli. Lujitussuosituksia varten valitaan alueelle tyypillinen arvo. Jos luokitus määritetään erikseen heikkousvyöhykkeen alueelle, voidaan keskimääräisen Q-arvon laskemisessa käyttää kaavaa 4.11, jossa lasketaan tarkka luokitusarvo alueelle (Løset 1990).

RMR-luokituksessa määritetään kartoitusalueen keskimääräinen luokitus pinta-alojen suhteessa. Jos määritysalueella on kahta erityyppistä kalliota sekaisin, määritetään kummallekin tyypille oma RMR-luku. Alueen RMR-luku saadaan laskemalla pinta-alalla painotettu keskiarvo.

Scanline-menetelmä

Eräs kalliokartoituksen perusmenetelmistä on scanline-menetelmä, jossa kalliopinnan tutkittavalle alueelle asetetaan pitkä mittanauha (kuva 3.1). Menetelmässä kartoitetaan kaikki mittaviivan leikkaavat raot ja niiden ominaisuudet. Tietojen keräystä varten voidaan laatia erillinen lomake, katso esim. (Brady ja Brown 1993). Menetelmää käytettäessä on huomioitava, että rakoilun määrä riippuu suuresti scanline-mittaviivan suuntautumisesta kallion rakoiluun nähden, aivan kuten kairauksissakin (Sen ja Kazi 1984). Yleensä mittaviiva asetetaan kohtisuoraan vasten tiheintä rakosuuntaa. Menetelmä on hankala voimakkaasti vaakarakoilleessa kalliossa. Scanline-menetelmän suuntautumista kallion rakoiluun nähden koskee samat näkökohdat kuin kairasydämen osalta.



Kuva 3.1. Scanline-mittaviiva (Brady ja Brown 1993)

3.2 Kallionäytekairaus ja luokittelu

Kairasydännäytteiden avulla saadaan arvokasta tietoa kallioperän geologiasta. Kun kairaukset on suoritettu tulee näytteistä tehdä huolellinen geologinen kuvaus. Tämä on tehtävä järjestelmällisesti siten, että se on yhtenäinen. Kairauksista määritettävät tiedot vaihtelevat kohteen mukaan. Kairausmenetelmä valitaan sen mukaan mitä parametreja kallioperästä halutaan määrittää.

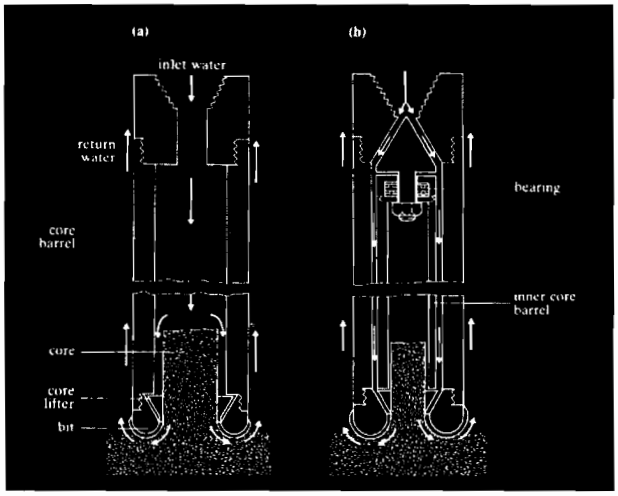
Käytettyjen kairasydännäytteiden halkaisija vaihtelee välillä 30 mm ja 100 mm. Suositeltava näytteen halkaisija on yli 50 mm. Riittävän suuri näytekoko helpottaa parametrien määritystä, parantaa tuloksen tarkkuutta ja pienentää näytteen vaurioitumisriskiä kairauksen ja käsittelyn aikana. Näytekoon kasvaessa rakotäytteen poishuuhtoutuminen kairauksen yhteydessä vähenee. Suurempien näytekokojen haittana on työn hidastuminen ja kustannusten kasvaminen.

Yksiputkista kairauslaitteistoa käytetään vain poikkeuksellisen hyvälaatuisessa kalliossa ja suurien näytekokojen yhteydessä. Yksiputkisella kairauslaitteistolla kairasydän voi vahingoittua pyörivän putken ja huuhteluveden vuoksi. Nykyään kairaukset tehdään yleensä kaksiputkisella kalustolla, jolloin kairasydän häiriintyy vähemmän (kuva 2.2). Haluttaessa kalliosta häiriintymätön kairasydännäyte, kairaus suoritetaan erityislaitteistolla. Melko hyvään tulokseen päästään esim. T6S-kalustolla, jossa sisäputki muodostuu kahdesta puoliskosta. Kärkikappaleen rakenteen ja huuhtelureikien sijoittelun ja mitoituksen avulla voidaan myös vähentää näytteen häiriintymistä. Savisten kallioiden kairausta varten on kehitetty erityisiä joustavia sisäholkkeja kairaterän yhteyteen. Myös kolmiputkista kalustoa tai näytettä ympäröivää muovisukkaa voidaan käyttää vähentämään häiriintymistä.

Rikkonaisessa tai rapautuneessa kalliossa voidaan kallioperä injektoida kairauksen yhteydessä. Tällaisessa nk. lujitusirtikairauksessa kairataan ensin pieniläpimittainen reikä, mistä tehdään reiän ympäristön injektointi. Kovettumisen jälkeen kairataan suuremmalla teräkoolla varsinainen näyte. Tällöin ongelmana voi olla kalliolohkojen liikkuminen injektointipaineen johdosta, joka muuttaa rakoavaumia. Menetelmä auttaa lähinnä rapautuman läpäisyä, ei tutkimista. Tarkkoja rakoavaumia määrittäessä voidaan käyttää menetelmää, jossa kairataan juotetulla harjateräspultilla vahvistettuja kairasydämiä. Tällöin käytetty pultinreikä on oltava riittävän pieni ja kairasydämen riittävän suuri. Menetelmä on kuitenkin hankala ja kallis.

Rapautuneessa kalliossa kairauksen huuhteluveteen voidaan sekoittaa erilaisia lisäaineita helpottamaan kairausta ja parantamaan näytteensaantia. Lisäaineet pienentävät kitkaa ja tukevat reikää. Huuhteluvettä sakeuttavia lisäaineita voidaan käyttää kalustossa jonka huuhtelureiät ovat riittävän suuret esim. T6, T6s ja wire line-kalustot. Lisäaineiden ja lietteiden käyttöön kallioluokituksen yhteydessä tulee suhtautua kriittisesti, koska ne voivat muuttaa rakotäytteiden koostumusta. Esimerkiksi bentoniitin käyttö lisäaineena voi antaa virheellisen tiedon paisuvahilaisesta rakotäytteestä.

Tärkeimmät tekijät hyvässä kairauksessa on huolellisuus ja ammattitaito. Kairaajille on kerrottava kairauksen tarkoitus, koska vaatimukset ovat erilaiset malminetsinnässä ja kalliorakentamisessa. Kalliolaatua määrittäessä kallion rakoilun määrä ja laatu ovat tärkeimmät tekijät. Malmin etsinnässä kiinnostaa lähinnä kivilajin mineraloginen koostumus. Luokitusta varten tehtävä kairaus tulee suorittaa riittävällä varovaisuudella. Kriittisissä kohteissa voidaan käyttää suurempaa näytekokoa ja kehittyneempää kairauskalustoa. Kairaustulosta heikentää yleensä kiire ja huolimattomuus.



Kuva 3.2. Yksi- ja kaksiputkinen kairauskalusto (Brady ja Brown 1993)

Yleensä kairasydämet asetetaan metrin mittaisiin laatikoihin, joihin laitetaan 5-10 metriä kairasydämiä. Luokitettaessa kairasydämiä käytetään erityisesti sitä varten tehtyjä lomakkeita. Lomakkeisiin merkitään määritetyt lähtöparametrit sekä muut lähtötiedot kuten rakosumma, vesimenekkikoe, sydänhukka, rakokulmat, kivilajit, rapautuminen jne.

Määritettävät kairasydämet tulee myös valokuvata laatikoissaan. Laimennettua suolahappoa voidaan käyttää apuna luokitusta haittaavan kalkkisälvän poistamiseksi. Rakopintojen karkeuden ja JRC-arvon määrittämisessä voidaan käyttää apuna muotokampaa. Kairasydämen ja rakojen väliset kulmat voidaan mitata kompassin tai astelevyn avulla.

Luokituksen alkuvaiheessa kairasydän on jaettava sopiviin osa-alueisiin kalliolaadun mukaan. Alueet käsitellään kokonaisuuksina, joilla on samat lähtöparametrit. Parametri määritellään alueen keskimääräisen arvon mukaan. Jos valitun alueen sisällä esiintyy vaihtelua jonkun lähtöparametrin arvoissa, käytetään sekä vähimmäis- että enimmäisarvoja.

3.3 Q-luokitus

Q-luokitus antaa kallion laatua kuvaavan numeerisen arvon. Mitä korkeampi arvo, sitä parempi on kallion laatu ja kalliotilan kalliomekaaninen pysyvyys.

Q-luokituksessa kallion laatu kuvataan kallion rakoilun, rakopintojen leikkauslujuuden ja jännitystilan perusteella, käyttäen apuna kuutta erikseen määritettävää parametria. Q-arvo saadaan kaavalla:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \; x \; \frac{J_r}{J_a} \; x \; \frac{J_w}{SRF} \qquad (3.1)$$

jossa,

RQD on	kallion rakoilua kuvaava luku
J_n	rakosuuntien lukumäärää kuvaava luku
J_r	rakopintojen karkeutta kuvaava luku
J_a	rakopintojen rapautuneisuutta, täytettä ja avautuneisuutta kuvaava luku
J_w	pohjaveden vaikutusta (painetta) kuvaava luku
SRF	kallion jännitystilan vaikutusta kuvaava luku

Taulukko 3.1. Kallion laatuluokat Q-luokituksessa (Grimstad ja Barton ym. 1993)

Kallion laatuluokka	Kuvaus	Q-luku
G	Poikkeuksellisen heikko (exceptionally poor)	0,001...0,01
F	Erittäin heikko (extremely poor)	0,01...0,1
E	Varsin heikko (very poor)	0,1...1
D	Heikko (poor)	1...4
C	Kohtalainen (fair)	4...10
B	Hyvä (good)	10...40
A	Varsin hyvä (very good)	40...100
	Erittäin hyvä (extremely good)	100...400
	Poikkeuksellisen hyvä (exceptionally good)	400...1000

Parametrien arvot määritetään taulukoista, joissa kalliota kuvaaville ominaisuuksille on annettu numeeriset arvot. Parametrit voidaan määrittää kalliopaljastumista, kairasydännäytteiden perusteella tai tunnelin seinistä. Kalliolaatuun vaikuttavat seuraavat tekijät:

Suhdeluku RQD/J_n kuvaa kallion rakoilun määrää ja keskimääräistä lohkarekokoa. Suhdeluku vaihtelee välillä 10/20 ja 100/0,5, mikä vastaa karkeasti keskimääräistä lohkarekokoa 0,5...200 cm.

Suhdeluku J_r/J_a kuvaa kalliolohkojen välistä kitkavoimaa siten, että leikkauslujuus $\tau \approx \tan^{-1}(J_r/J_a)*\sigma_n$. "Kitkakulman" vaihteluväli 2,4°...79°. Koska kovissa kivilajeissa kalliomassan muodonmuutokset tapahtuvat pääsääntöisesti kallion rakoja pitkin, on rakopintojen kitkaominaisuudet kallion vakavuuden kannalta erityisen tärkeitä. Rakopintojen kitkaominaisuudet määräytyvät rakopintojen karkeuden, rakotäytteen ja rakoavauman perusteella. Pehmeissä kivilajeissa, joissa kalliomassan muodonmuutokset tapahtuvat myös kallion rakoilusta riippumatta, rakopintojen kitkaominaisuuksilla ei ole yhtä suurta merkitystä.

Jos rakopinnat ovat kiinni toisissaan tai rakotäyte on hyvin ohut, rakopinnan leikkauslujuus on lähellä huippulujuutta ja leikkaussiirtymän tapahtuessa rakopinnan dilataatiot ovat merkittäviä. Tällainen rakopinta on erittäin suotuisa kalliotilan pysyvyyden kannalta. Rakopintojen leikkauslujuus pienenee merkittävästi, jos rakopinnoilla on ohut savipeite tai rakotäytteenä on ohuita savikerroksia. Pienen leikkaussiirtymän jälkeen tapahtuva rakopintojen kosketus voi olla merkittävä tekijä estäämään tunnelin sortumista.

Jos rakoavauma on suuri, eivätkä rakopinnat kosketa toisiaan leikkaussiirtymän jälkeen, rakopinta on erittäin epäsuotuisa kalliotilan pysyvyyden kannalta. Parametrien määritystaulukkojen antama "kitkakulma" on tällöin hieman pienempi kuin saven jäännöskitkakulma, koska savivyöhykkeet tai raot pyrkivät yleensä konsolidoitumaan leikkaussiirtymän yhteydessä. Tämä tapahtuu ainakin normaalikonsolidoituneella tai pehmenevällä ja paisuvalla savella. Myös paisuvahilaisen saven paisuntapaine vaikuttaa kitkakulmaan.

Suhde J_w/SRF kuvaa kalliossa vaikuttavia jännityksiä. Kallion jännitykset riippuvat pääasiassa syvyydestä, mutta monissa tapauksissa tektoniset jännitykset ovat merkittävimpiä. Jännitystilatekijä SRF voi muodostua kalliotilan lävistävän savirakenteisen heikkousvyöhykkeen aiheuttamasta löyhtymiskuormasta, ehjän kallion jännitystilasta tai heikon plastisen kallion kokoonpuristumiskuormista. Parametri J_w kuvaa vedenpainetta, jolla on epäedullinen vaikutus leikkauslujuuteen, koska

se pienentää rakojen normaalijännitystä. Vesi voi lisäksi aiheuttaa rakotäytteen poishuuhtoutumista ja pehmenemistä.

3.3.1 RQD-luku

RQD-luku vaihtelee välillä 0...100. Kiinteässä kalliossa RQD = 100 ja rakoilun lisääntyessä RQD-luku pienenee. Q-luokituksen yhteydessä pienin mahdollinen RQD-luku on 10.

Taulukko 3.2. RQD luokat ja niiden merkitykset (Barton ym. 1974)

1. RQD luokat ja niiden merkitykset			
Laatuluokka		**Rakojen lukumäärä / m³ J_v**	**RQD-luku (%)**
A	Erittäin voimakkaasti rakoillut	> 27	0-25
B	Voimakkaasti rakoillut	20-27	25-50
C	Kohtalaisesti rakoillut	13-19	50-75
D	Vähän rakoillut	8-12	75-90
E	Erittäin vähän rakoillut	0-7	90-100
Huom. 1) Jos määritetty RQD ≤ 10, käytetään arvoa 10 **Huom. 2)** RQD-luku on riittävän tarkka ilmaistuna viiden yksikön välein (100, 95, 90...) **Huom. 3)** RQD-luku on yli 100 mm:n kairasydännäytteiden osuus kairasydämen kokonaispituudesta luonnonrakojen kukaan. **Huom. 4)** Jos kairasydäntä ei ole käytettävissä, voidaan RQD-luku määrittää kaavalla RQD = 115-3,3J_v ja J_v=1/S_1+1/S_2+1/S_3+...			

RQD-luku on yli 100 mm:n kairasydännäytteiden osuus määrittelyalueen (>1,5 m) kokonaispituudesta prosentteina määritettynä luonnonrakojen perusteella (yhtälö 8). Suositeltava näytekoko on vähintään 54,7 mm, mutta se voidaan tehdä myös muiden kairasydänkokojen perusteella. Määrittelyn tarkkuus kärsii halkaisijan pienentyessä.

$$RQD = \frac{\Sigma x_i > 100mm}{L} \qquad (3.2)$$

jossa,

Σx_i on yli 100 mm:n pituisten kairasydännäytteiden yhteenlaskettu pituus määrittelyvälillä

L kairasydämen kokonaispituus määrittelyvälillä.

RQD-luvun ja kuutiometrissä olevien rakojen lukumäärällä J_v on seuraava yhteys (Afrouz 1992):

$$RQD = A^x - B^y J_v \qquad (3.3)$$

jossa,

J_v on rakojen kokonaismäärä kalliossa / m³. A, B, x, y = olosuhteista riippuvia vakioita siten, että: A^x = 105...120 ja B^y = 2...12.

Määrittäessä arvoa tunnelin seinästä in-situ savettomassa kalliossa, voidaan käyttää Palmströmin 1974 esittämää kaavaa 3.4 (Barton ym. 1974 ja Palmström 1982). Kokemusten mukaan kaavaa toimii hyvin myös suomalaisissa kallio-olosuhteissa.

$$RQD = 115 - 3{,}3J_v \qquad (3.4)$$

Jos J_v < 4,5, niin RQD = 100 %.

Rakovälin S ja rakojen lukumäärän J_v välillä on seuraava yhteys (Barton ym. 1974):

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \ldots \qquad (3.5)$$

jossa,
S_1, S_2, S_3 jne. ovat eri rakosuuntien keskimääräisiä rakovälejä.

Kaavat 3.4 ja 3.5 ovat myös käytännössä helppokäyttöiset. Ne voidaan syöttää tietokoneen taulukkolaskentaohjelmaan tai jopa ohjelmoitavaan taskulaskimeen. Näin saadaan rakohavaintojen perusteella tarkka arvio RQD-luvusta.

RMR-luokituksen yhteydessä on esitetty graafisesti yhteys rakoilun ja RQD-luvun välillä. Määritystä voi käyttää apuna muissakin yhteyksissä.

RQD-lukua voidaan estimoida myös keskimääräisen rakoluvun λ (kpl/m) perusteella kaavan 3.6 avulla (Priest ja Hudson 1976). Tätä yhteyttä voidaan käyttää arvioitaessa RQD-lukua in-situ scanline-mittaviivan avulla tai kairasydämestä. Menetelmä ei ole kovin tarkka, koska mittaviivan tai kairauksen suunta ja rakoilun jakautuminen kairasydämessä voivat vaikuttaa saatuihin arvoihin huomattavasti (Sen ja Kazi 1995). Menetelmän avulla saadaan karkea arvio kallion RQD-luvusta nopeasti ja helposti.

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1) \qquad (3.6)$$

Arvoilla λ = 6... 16 kpl/m saadaan varsin hyvä lineaarinen approksimaatio kaavalla:

$$RQD = -3,68\lambda + 110,4 \qquad (3.7)$$

Edellä mainittujen kaavojen avulla saadaan arvio RQD-luvusta. On tilanteita, joissa alkuperäinen RQD-luvun määritys voi antaa virheellisen kuvan kallion rakoilusta. Esimerkiksi tapaukset joissa on kerroksellista kalliota, jossa kerrospaksuus on 90 mm ja 110 mm ja kairaus on tehty kohtisuoraan rakoilua vasten. Tällöin ensin mainitussa tapauksessa RQD = 0 ja toisessa tapauksessa RQD = 100. Kuitenkin kalliot eivät juurikaan eroa toisistaan. Jos käytetään tällaisessa tapauksessa edellä mainittuja kaavoja saadaan lohkarekoon ja kalliomekaanisen käyttäytymisen kannalta realistisemmat RQD-arvot. Kaavan 3.6 mukaan saadaan RQD-luvun arvoiksi 70 ja 77. Jos ko. kalliota tarkastellaan kolmiulotteisesti kuutiona, kaavojen 3.4 ja 3.5 mukaan saadaan RQD-luvun arvoiksi 78 ja 85. Jos edellä mainitussa tapauksessa, jossa kerrospaksuus on 90 mm, kairaus suoritetaan esimerkiksi 40 asteen kulmassa rakoiluun nähden, saadaan rakoväliksi 137 mm, jolloin kairasydämestä saatu RQD = 100.

RQD-luvun määritys kalliopinnasta

Monissa tapauksissa parhaaseen tulokseen päästään tarkastelemalla kalliota tunnelissa kolmiulotteisesti. Tällöin nähdään kaikki rakosuunnat ja saadaan tarkin kuva kallion rakoilusta.

Alkuperäisessä kairasydämestä tehtävässä RQD-luvun määrityksessä vain luonnonraot huomioidaan. Tunneliolosuhteissa kaikki raot, riippumatta sen syntytavasta, vaikuttavat tunnelin pysyvyyteen. Tämän takia tunneliolosuhteissa kartoittaessa huomioidaan kaikki raot. Kartoittaessa on erotettava luonnonraot räjäytyksen yhteydessä syntyneistä. Räjäytysraot ulottuvat vain noin 1-2 metrin etäisyydelle tunnelin pinnasta, eivätkä siksi vaikuta niin paljon tunnelin kokonaispysyvyyteen kuin luonnonraot (Løset 1995a). Yksittäisten lohkojen pysyvyyden kannalta räjäytysraot ovat sitä vastoin merkittäviä.

Koska RQD-luku määritetään teoriassa 5 %:n tarkkuudella, esitetään myös tarkempi taulukko RQD-luvun määritystä varten (taulukko 3.3). Parhaaseen tulokseen päästään määrittämällä RQD-luku kairasydämestä tai kaavojen 9 ja 10 perusteella. Nopeampaan määritykseen voidaan käyttää taulukkoa 7, jossa on esitetty RQD-luku ja sitä vastaava rakoilun määrä. Ensimmäisessä sarakkeessa on RQD-luku ja toisessa lukua vastaava rakoilun määrä kuutiometrissä kalliota. Tällöin on huomioitava kaikki rakosuunnat esim. katosta ja holvista tai seinän nurkasta laskemalla. Helpompi tapa on katsoa suoralla linjalla olevien rakojen keskimääräinen rakoväli tai rakojen lukumäärä metriä kohti. Menetelmää voidaan käyttää scanline-menetelmän ja kairasydänmääritysten yhteydessä. Tällöin on huomioitava mittaviivan tai kairasydämen ja rakoilun välisen kulman vaikutus lopputulokseen.

Taulukko 3.3. RQD-luku rakojen lukumäärän mukaan

RQD-luku (%)	**In-situ kallionpinnasta**	**Rakojen määrä pituusyksikköä kohden tai rakoväli, scanline tai kairasydän**	
	Rakojen lukumäärä J_v / (m^3)	**Keskim. rakoväli s / (mm)**	**Rakojen lukumäärä λ / (m)**
(5)	(33)	21	48
10	32	25	39
15	30	29	34
20	29	33	30
25	27	37	27
30	26	41	25
35	24	45	22
40	23	49	20
45	21	54	19
50	20	59	17
55	18	65	15
60	17	72	14
65	15	80	13
70	14	90	11
75	12	103	10
80	11	119	8
85	9	144	7
90	8	184	5
95	6	274	4
100	5	1000	0

Käytännössä pienet virheet RQD-luvun määrityksessä eivät vaikuta kovin paljoa Q-lukuun. Kokenut määrittäjä oppii nopeasti arvioimaan kallion RQD-luvun silmämääräisesti, mikä nopeuttaa luokitusta huomattavasti.

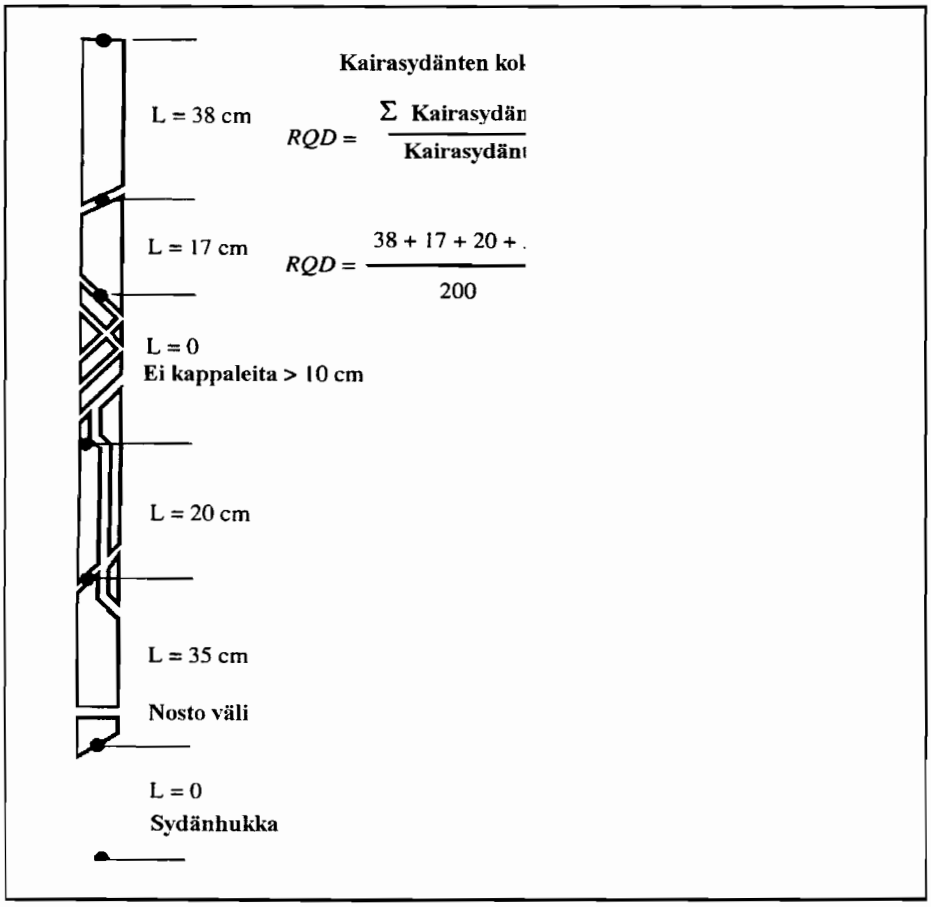
Jos kalliossa on täytteisiä yhteenkasvaneita rakoja, voi niiden luokittelu olla ongelmallista. Eräät mineraalit kuten kloriitti, kiilteet, savi ja karbonaatit muodostavat heikon sidoksen rakopintojen välillä. Epidootti-, kvartsi-, maasälpä- ja plagioklaasitäytteiset yhteenkasvaneet raot eivät välttämättä heikennä kalliota, jolloin niitä ei lasketa raoiksi. Jos välissä on kalliota, lasketaan raot erillisiksi, vaikka ne olisivat hyvinkin lähellä toisiaan. Raon yleinen tunnusmerkki on, että rako on joko avoin tai rakotäyte on ympäröivää kalliota pehmeämpää ainesta. Rako lasketaan yleensä heikkousvyöhykkeeksi, jos sen paksuus > 100 mm (Bieniawski 1989).

Heikot kivilajit voivat deformoitua raoista riippumatta. Yksittäiset heikot kivilajit voivat sisältää hyvin harvoja rakoja, jolloin RQD-luku on määritelmän mukaan korkea. Sellaisessa kivilajissa deformaatio voi olla riippumaton raoista, jotka voivat ilmetä korkeilla SRF-arvoilla. Näin voi tapahtua savivyöhykkeissä, voimakkaasti rapautuneissa tai vähän konsolidoituneissa kallioissa ja maankaltaisissa massoissa.

Voimakkaasti kerroksellisissa tai liuskeisissa kivilajeissa kalliossa vain harvat liuskeisuustasot voidaan laskea raoiksi. Liuskeisuustaso on kivilajin heikkoustaso, mutta ei ole aina rako. Liuskeiset kivilajit voivat pinnan rapautumisen yhteydessä halkeilla ohuiksi viipaleiksi, mutta joitakin metrejä pinnan alla kivilaji voi olla kokonaan massiivista. Liuskeisissa kivilajeissa voi olla hyödyllistä tarkastella tunnelista räjäytettyä kivilouhetta jonka lohkarekoko voi antaa indikaation RQD-luvusta.

RQD-luvun määritys kairasydännäytteestä

Kairasydämen mittaus tapahtuu näytteen keskilinjaa pitkin siten, että näytteen suuntainen rakopinta ei vähennä muuten massiivisen kiven arvoa. RQD-luku määrittäessä mitataan > 100 mm:n kairasydännäytteiden osuus kokonaispituudesta. Mitattavien näytteiden pituus ei riipu näytteen halkaisijasta, koska määrittäessä erotetaan luonnonraot keinotekoisista. Oikealla poraustekniikalla kairasydänkappaleet ovat saman pituisia riippumatta halkaisijasta, koska luonnonrakojen paikat eivät voi vaihtua halkaisijan mukaan. Koska kairauksen yhteydessä syntyneiden rakojen erottaminen luonnonraoista voi olla vaikeaa, pienillä näytekoilla saadaan yleensä pienempi RQD-luku kuin isoilla.



Kuva 3.3. RQD-luvun määritys kairasydämestä (Deere 1988)

Määrittäessä RQD-arvoa on tärkeätä erottaa luonnonraot keinotekoisista raoista, jotka ovat syntyneet porauksen tai käsittelyn yhteydessä. Jos porauksen tai käsittelyn aikana syntyy rakoja, on

katkenneet kappaleet yhdistettävä ja laskettava yhtenä kappaleena. Raon laadusta voidaan päätellä onko se luonnollinen vai käsittelyn aikana tullut tuore rakopinta. Seuraavia kriteereitä on ehdotettu rakojen erottelemiseksi (Brown 1981):

1) Karkea hauras pinta, jossa yksittäisten mineraalien rapautumattomat lohkopinnat indikoivat keinorakoa.
2) Yleensä sileä hieman rapautunut pinta , jossa pehmeämpiä pinnoitteita tai rakotäytteitä, kuten kipsi, talkki, kloriitti, kiille tai kalsiitti indikoivat selvästi luonnonrakoa.
3) Liuskeisessa tai kerroksellisessa kalliossa voi olla vaikea erottaa luonnonrakoja keinotekoisista kun kallion liuskeisuus on rakoilun suuntaista. Jos kairaus on suoritettu huolellisesti silloin kyseenalaiset raot lasketaan luonnonraoiksi. Näin saatu arvo on ennemmin konservatiivinen kuin optimistinen.
4) Kairauskalustosta riippuen osa kairasydämestä voi pyöriä kairausputken sisällä ja hioa rakopintoja ja aiheuttaa murtumia. Heikoissa kallioissa voi olla tällöin hyvin vaikeata erottaa luonnonrakoja ja keinotekoisia rakoja toisistaan. Konservatiivisessa arviossa raot oletetaan luonnon raoiksi.
5) Liuskeisissa metamorfisissa kivissä ja heikoissa sedimentti kivissä voi olla hyödyllistä kirjata erikseen keinotekoisten rakojen taajuus räjäytysten mahdollisten vaikutusten arvioimiseksi.

Mm. savikivissä on suhteellisen heikosti kehittyneitä diageneettisiä sidoksia, jolloin RQD-lukuun ja rakosummaan saattavat vaikuttaa mittausajankohta ja kosteus. Ilmiö voi johtua jännityksen vapautumisesta, paisumisesta, kuivumisesta tai kemiallisesta reaktiosta johtuvasta halkeilusta. Ilmiötä ei ole tavattu Suomessa.

Kallion rapautuneisuuden vaikutus

ISRM jakaa suosituksessaan (Brown 1981) kallion rapautumisen mukaan kuuteen luokkaan I-VI. Kun rapautuminen on tapahtunut koko kalliomassassa, eikä vain rakopinnoissa, voidaan luokat I (rapautumaton) ja II (hiukan rapautunut) laskea kokonaan mukaan RQD:n määrityspituuteen. Luokka III (keskinkertaisesti rapautunut) voidaan laskea mukaan tietyissä tapauksissa. Luokkia IV (voimakkaasti rapautunut), V (täysin rapautunut) ja VI (maankaltainen) ei lasketa kairasydänpituuteen. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että kairasydäntä ei lasketa mukaan jos se voidaan murentaa käsin (Deere 1988). Tämä pitää paikkansa vain yli 50 mm:n halkaisijalla.

Määrittelyalueen pituuden vaikutus

RQD-lukuun voi vaikuttaa määrittelyalueen pituus. Esimerkiksi 300 mm voimakas ruhjealue hyvässä massiivisessa kalliossa voi antaa RQD-luvuksi 90 %, 80 %, 40 % tai 0 % kun vastaavat määrittelyalueen pituudet ovat 3 m, 1,5 m, 0,5 m tai 0,3 m. Mitä pienempi määrittelyalue on, sitä herkempi RQD-luku on heikkousvyöhykkeen vaikutukselle ja sitä pienempi RQD-luku on. Deere suosittelee, että RQD-luvun määritys perustuu todellisiin kentällä käytettyihin kairasydänten pituuksiin, ei kuitenkaan mielellään pitempiin kuin 1,5 metriä (Deere 1988). Kairauksen yhteydessä tulee alhaisen RQD-arvon vyöhykkeet kuvailla ja määrittää niille tarvittaessa RQD-luku erikseen. Huonossa kalliossa voidaan kairauksen nostoväliä pienentää saatavuuden parantamiseksi ja kairasydänten rikkoutumisen vähentämiseksi.

3.3.2 Rakosuuntien lukumäärätekijä J_n

Parametrin J_n arvot vaihtelevat välillä rakoilemattoman kallion arvosta 0,5 täysin murskaantuneen maamaisen kallion arvoon 20 (taulukko 3.4).

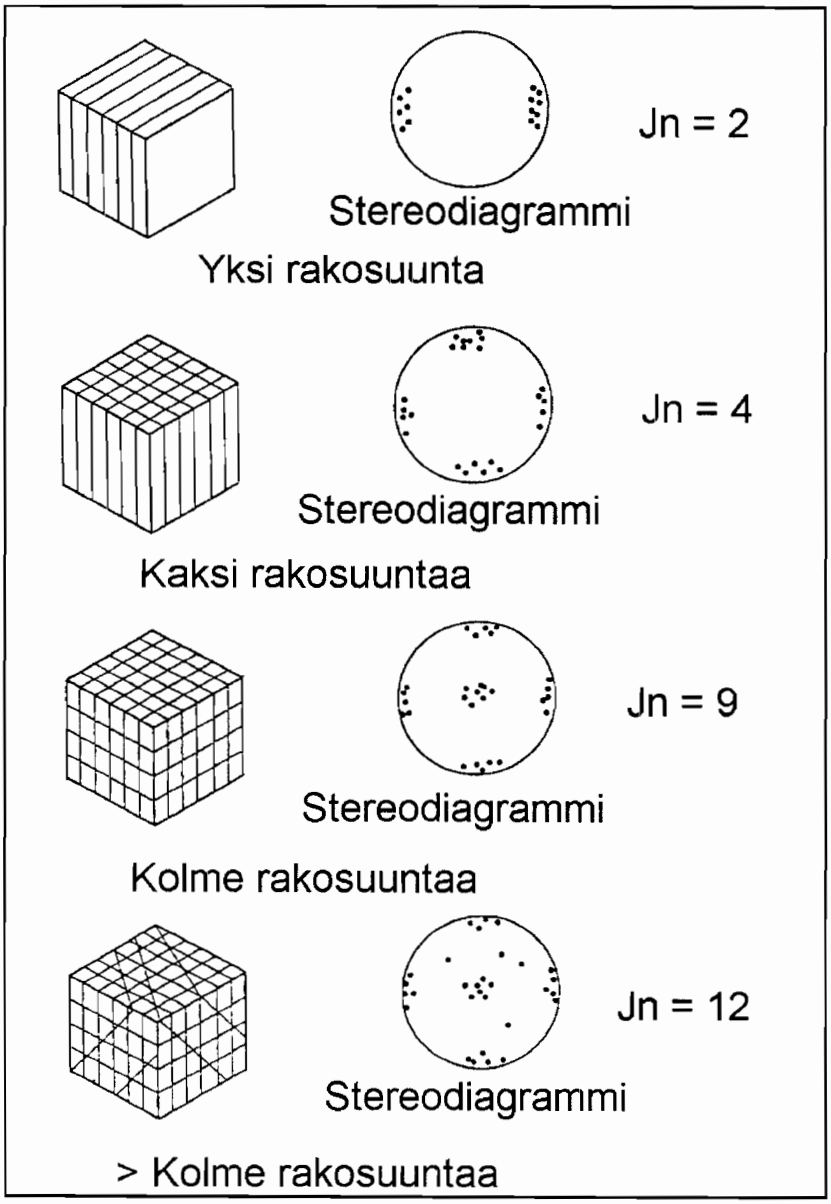
Taulukko 3.4. Rakosuuntien (joint set) lukumäärätekijä J_n (Barton ym. 1974). Rakosuunta muodostuu yhdensuuntaisista tai lähes yhdensuuntaisista raoista.

2. Rakosuuntien lukumäärätekijä J_n		**J_n**
A	Kiinteä kallio, ei rakoja tai vain muutamia rakoja	0,5...1
B	Yksi rakosuunta	2
C	Yksi rakosuunta ja satunnaista rakoilua	3
D	Kaksi rakosuuntaa	4
E	Kaksi rakosuunta ja satunnaista rakoilua	6
F	Kolme rakosuuntaa	9
G	Kolme rakosuuntaa ja satunnaista rakoilua	12
H	Neljä tai useampia rakosuuntia, satunnaista, voimakasta rakoilua, "sokeripaloja", jne.	15
J	Kallio murskaantunutta, maan kaltaista	20
Huom. 1) Risteyksissä käytä (3,0 x J_n) **Huom. 2)** Sisäänmenoaukoissa, käytä (2,0 x J_n)		

Tavallisesti kalliossa on 2...4 päärakosuuntaa ja useimmat raot ovat yhdensuuntaisia tai lähes yhdensuuntaisia niiden kanssa, jolloin niitä käsitellään yhtenä rakosuuntana. Satunnaiset rakosuunnat ovat sellaisia päärakosuunnista selvästi poikkeavia rakosuuntia, joita ei esiinny säännöllisesti määritysalueella. Myös säännölliset raot voidaan laskea satunnaisiksi jos niiden välimatka on useita metrejä. Tällöin on arvioitava niiden vaikutus tunnelin kalliomekaaniseen pysyvyyteen.

Rakosuuntien lukumäärä ja satunnaisten rakosuuntien esiintyminen määritetään silmämääräisesti kalliopinnalta. Jos rakoilu on kauttaaltaan sekarakoilua, on arvioitava kuinka monta rakosuuntien vapausastetta kyseinen rakoilu vastaa. Jos kalliossa on esimerkiksi yksi selvä rakosuunta ja useita satunnaisia rakosuuntia, voidaan olettaa kallion vastaavan esimerkiksi kahta rakosuuntaa. Jos kalliossa on kaksi rakosuuntaa ja paljon satunnaista rakoilua, voidaan sen tulkita vastaavan kolmea rakosuuntaa.

Jos tutkittavasta kalliosta on tehty rakokartoitus ja Schmidt-diagrammi, voidaan niitä käyttää apuna J_n-parametrin määrittämisessä. Schmidt-diagrammista on tulkittavissa rakopinnat havaintokasautumina. (kuva 3.4).



Kuva 3.4.J_n-parametrin määritys rakosuuntien mukaan (Løset 1995a).

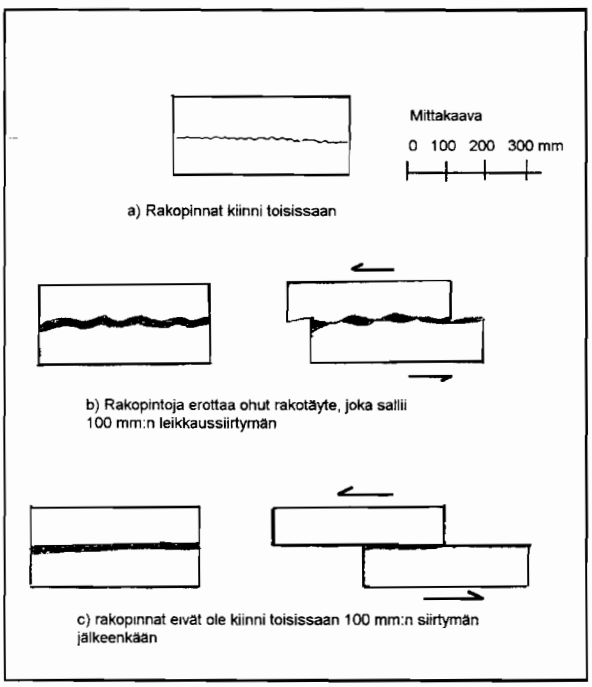
Vaikka Q-luokituksessa ei ole erillistä parametriä raon pituudelle eli jatkuvuudelle, kartoituksen yhteydessä arvioidaan aina myös rakojen pituudet, koska ne vaikuttavat tunnelin pysyvyyteen. Pitkät koko tunnelia leikkaavat raot ovat pysyvyyden kannalta merkittävämpiä kuin lyhyet raot. Suurilla lyhyillä raoilla on paikallista merkitystä pysyvyyteen, koska ne muodostavat usein lohkoja, jotka täytyy huomioida vakavuustarkasteluissa. Jos lyhyet raot eivät muodosta lohkoja, ne voidaan laskea määrityksessä satunnaisena rakosuuntana.

Rakosuuntien lukumäärätekijä J_n voidaan määrittää kairasydämistä mittaamalla rakopintojen kulmat astelevyn tai kompassin avulla. Erityisesti rakosuuntien määrityksessä on huomioitava, että kairauksen kanssa yhdensuuntaiset raot ovat yleensä aliedustettuina kairasydämissä. Rakosuuntien lukumäärä määritetään riittävän pitkältä alueelta kerralla. Metrin pituinen määritysmatka antaa helposti väärän kuvan rakoilusta. Rakosuuntien määritystä helpottaa riittävä määrä suunnattuja näytteitä. Rakosuunnat voidaan mitata myös reikätutkimusten avulla dipmeter-laitteiston avulla. Myös kairareikien valokuvausta tai videokuvausta voidaan käyttää apuna rakosuuntien määrityksessä.

3.3.3 Rako-ominaisuudet J_r ja J_a

Rakopintojen karkeusluku J_r ja rakopintojen muuttuneisuusluku J_a antavat arvion rakopinnan tai täytteisen epäjatkuvuuskohdan kitkakulmasta. Q-luokituksessa huomioidaan kallion rakoilun suuntautuminen parametrien valinnan yhteydessä. Parametrien J_r ja J_a valinnassa on huomioitava, että rakopinnan ominaisuudet eri suuntiin ovat erilaiset. Parametrit valitaan pysyvyyden kannalta epäedullisimman rakosuunnan mukaan. Eri suuntaisilla rakosuunnilla voi olla keskenään erilaiset ominaisuudet tai saman rakosuunnan ominaisuudet voivat vaihdella määrityssuunnan mukaan. Määräävä rakosuunta valitaan sen suunnan mukaan, joka vaikuttaa tilan pysyvyyteen eniten. Tämä suunta on useimmiten pystyrakoilun suunta. Vaakasuuntaisen rakopinnan karkeus ei yleensä vaikuta pysyvyyteen yhtä paljon kuin pystysuuntaisen. Lisäksi on huomioitava kalliotilan suuntautuminen kallion rakoiluun nähden. Tunnelin suuntainen rakoilu on määräävämpi kuin tunnelia kohtisuorasti leikkaava rakoilu. Määräävän rakosuunnan raoista valitaan heikkolaatuisimman raon parametrit, koska ne vaikuttavat eniten pysyvyyteen.

Määrittäessä rakopinnan parametreja J_r ja J_a on aina ensimmäiseksi valittava määritettävän raon tyyppi. Q-luokituksen mukainen jako on seuraava:
a) Rakopinnat kiinni toisissaan,
b) Rakopintoja erottaa ohut rakotäyte, joka sallii enintään 100 mm:n leikkaussiirtymän,
c) Rakopinnat eivät ole kiinni toisistaan.



Kuva 3.5. Rakotäytteen suhteellisen paksuuden (rakoavauman) määritys oletetun leikkaussiirtymän avulla (Løset 1995a).

Tarkkaa rakoavauman suuruutta ei voi määrittää luokille, koska avauma riippuu rakopinnan karkeudesta. Jos rakopinnat ovat sileitä, avaumat ovat selvästi pienempiä kuin karkeilla rakopinnoilla. Eräissä Q-luokituksen sovellutuksissa (Kirsten 1987) on kuitenkin annettu avauman numeeriset arvot yksiselitteisesti millimetreinä. Näiden sovellutusten tekijöiden mielestä NGI:n alkuperäinen määritys on liian vaikea ja epämääräinen käytössä. Rakoavauman määritys kairasydämistä on erityisen hankala, koska rakotäytteet ovat usein huuhtoutuneet pois. Kairasydänhukka, vesimenekkikoe ja reikätutkimukset voivat antaa viitteitä rakoavaumista.

3.3.3.1 Rakopinnan karkeusluku J_r

Rakopinnan karkeutta määräävässä rakosuunnassa kuvataan parametrin J_r avulla taulukon 3.5 mukaisesti. Parametrin arvo vaihtelee sileän haarniskapintaisen arvosta 0,5 karkean portaittaisenpinnan arvoon 4. Rakopinnan karkeus määritetään ISRM:n periaatteiden mukaisesti kahden mittakaavan karkeuden avulla (Brown 1981).

Taulukko 3.5. Rakopintojen karkeusluku J_r (Barton ym. 1974)

3. Rakopintojen karkeusluku J_r		**J_r**
a) Rakopinnat kiinni toisissaan, tai **b) Rakopintoja erottaa ohut rakotäyte, joka sallii enintään 100 mm leikkaussiirtymän**		
A	Raot epäjatkuvia, karkea tai sileä ja portaittainen	4,0
B	Rakopinta karkea, aaltoileva	3,0
C	Rakopinta sileä, aaltoileva	2,0
D	Rako haarniskapintainen, aaltoileva	1,5
E	Rakopinta karkea, tasainen	1,5
F	Rakopinta sileä, tasainen	1,0
G	Rako haarniskapintainen, tasainen	0,5
Huom. 1) Kuvauksen ensimmäinen osa on rakopinnan pienen mittakaavan karkeus mm...cm suuruusluokassa, ja toinen osa on rakenteen suuren mittakaavan tasaisuus dm...m suuruusluokassa. Suuruusluokkien mittakaavat riippuvat vallitsevasta lohkarekoosta.		
c) Rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan ja niitä erottaa:		
H	Savimineraaleja sisältävä vyöhyke, joka on kyllin paksu estämään kontaktin	1,0
J	Hiekkaa, soraa tai murskaantunutta kalliota sisältävä vyöhyke, joka on kyllin paksu estämään kontaktin	1,0
Huom. 1) J_r:n arvoon lisätään 1,0 jos keskimääräinen rakoväli on yli 3 m **Huom. 2)** Arvoa J_r = 0,5 voidaan käyttää tasomaisiin haarniskapintaisiin rakoihin joissa on viivaus, jos viivaus on suuntautunut mahdollisen liukusuunnan suuntaisesti.		

Ensimmäiseksi on valittava kohdan 3.3.3 mukaisesti mihin luokkaan (a, b vai c) kalliorako kuuluu. Määrittäessä rakolukua J_r on huomioitava myös rakotäytteen paksuus ja laatu. Tapauksissa, joissa on heikoista mineraaleista tai murskaantuneesta kalliosta muodostunut paksu rakotäyte, ja leikkaussiirtymän jälkeen rakopinnat eivät kosketa toisiaan (luokka c), rakopinnan karkeudella ei ole merkitystä. Tällöin rakopinnan kitkaominaisuudet määräytyvät rakotäytteen mukaan ja rakopinnan karkeus J_r = 1. Jos rakotäyte on niin ohut, että kalliokontakti syntyy ennen 100 mm:n leikkaussiirtymää (luokka b), käytetään samoja karkeuden arvoja kuin tapauksessa, joissa kalliopinnat koskettavat toisiaan (luokka a).

Tämän jälkeen valitaan pienessä mittakaavassa, onko rakopinta karkea, sileä vai haarniskapintainen. Tämän mittakaavan epätasaisuudet ovat millimetri-senttimetri luokkaa. Määrittäessä kuljetetaan sormea pitkin rakopintaa, jolloin tunnetaan siinä olevat epätasaisuudet. Pienenmittakaavan karkeuden määritys tehdään kuvan 3.6 malliprofiilien mukaisesti. Q-luokituksen yhteydessä ei ole esitetty tarkempaa kuvaus karkeuden määrittämiseksi.

Seuraavaksi valitaan suuressa mittakaavassa onko rakopinta tasainen, aaltomainen vai portaittainen. Näiden epätasaisuuksien mittakaava on desimetri-metri luokkaa (kuva 3.6). Valinta on usein vaikea,

etenkin jos rakopinnasta on näkyvissä pieni alue. Määrittäessä voidaan asettaa rakopintaa vasten metrin mittainen terässauva, joka auttaa määrittämään onko pinta tasainen, aaltoileva vai portaittainen. Rakotason tasaisuuden määritys on nähtävä suhteessa lohkarekokoon. Kun lohkot ovat pienempiä kuin rakotason epäsäännöllisyydestä johtuva aallonpituus, aaltoilun merkitys lohkon ulosliukumisen kannalta ei ole niin merkittävä. Määrittäessä onko rakopinta aaltoileva vai tasainen määritys on tehtävä samassa suuruusluokassa mikä on kallion lohkarekoko.

Portaittaisilla rakopinnoilla parametrin J_r arvo riippuu karkeuden suuntautumisesta. Jos portaittainen rakopinta on suuntautunut liukumista vastaan, voidaan joutua käyttämään alkuperäisestä määritystaulukosta poikkeavia arvoja Løsetin esittämien lukujen mukaisesti (taulukko 3.6). Eri lähteissä on pieniä eroja rakopinnan karkeuden parametriarvoissa. Taulukossa 3.6 esitetyt arvot ovat näistä uusimmat ja perustuvat NGI:ltä pyydettyyn täsmennykseen (Løset 1995c). Jos portaittaisessa haarniskapintaisessa raossa portaat ovat suuntautuneet siten, etteivät ne estä liukumista, voidaan käyttää arvoa $J_r = 1$.

Taulukko 3.6. Rakopinnan karkeustekijä J_r kahden mittakaavan karkeuden mukaan (Løset 1995c)

Luokat a) ja b) rakopinnan karkeustekijä J_r		**Suuri mittakaava (desimetri-, metriluokka)**		
		Portaittainen, epäjatkuva	**Aaltoileva**	**Tasainen**
Pieni mittakaava (millimetri-, senttimetriluokka)	**Karkea**	4...5	3	1,5
	Sileä	3...4	2	1,0
	Haarniskapinta	1...2	1,5	0,5
Luokka c) rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan				
Karkeus ei vaikuta		1,0	1,0	1,0

Rakopintojen karkeusominaisuudet ovat erilaiset eri suuntiin. Rakopinnan karkeus ja aaltoilu voi vaihdella suunnan mukaan siten, että rakopinta on aaltoileva toiseen suuntaan ja sileä toiseen suuntaan. Tällöin valitaan se suunta, joka on pysyvyyden kannalta merkittävin. Tällaisissa kivilajeissa näkyy rakopinnassa selvä suuntautuminen.

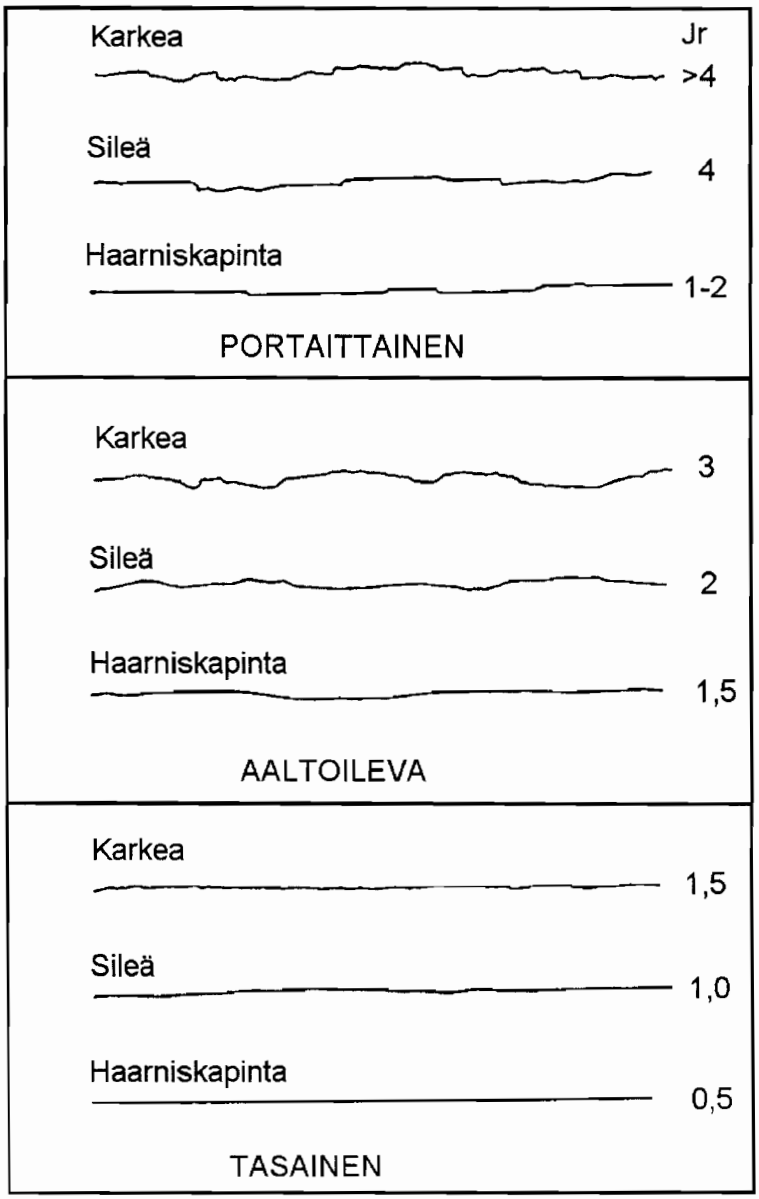
Kartoittaessa tulisi kaikkien rakosuuntien ominaisuudet kirjata ylös, mutta Q-luokitus määritetään tunnelin stabiliteetin kannalta epäsuotuisimman rakosuunnan antaman arvon mukaan.

Usein tietyillä kivilajeilla on ominaisia rakopintojen karkeuksia. Esim. pegmatiitti on karkearakeista ja se saa yleensä arvon 4. Karkearakeinen graniitti saa usein arvon 3, kun pinta on aaltomainen. Liuskeet ja savikivet joiden rakopinnat ovat aaltomaisia saavat arvon 2. Hieno- tai keskirakeinen graniitti saa usein arvon 1,5, kun pinta on tasainen. Kun kiven pinta on sileä ja tasainen, yleinen arvo on 1,0. Tapauksissa, jossa haarniskapintainen rakopinta on tasainen ja sileä voidaan käyttää arvoa 0,5. Tasaiset pinnat ovat usein esim. ferro-oksidin tai kloriitin peittämiä. Erityisesti kloriittipinnat ovat märkänä hyvinkin liukkaita, jolloin on syytä käyttää riittävän pientä J_r arvoa. Rakopinnan karkeus on usein sidoksissa myös raon syntytapaan. Usein vetoraot ovat karkeita, kun taas leikkausraot ovat sileitä. Edellä mainitut arvot ovat F. Løsetin esittämiä yleistyksiä ja koemäärityksissä tehtyjä huomioita eikä niitä pidä käyttää sellaisenaan määrityksiin. Määritys on tehtävä aina tapauskohtaisesti.

Karkeuden arvo J_r määritetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin tunnelin seinästä tehty määritys. Ensin valitaan raon luokka ja sitten pienen mittakaavan karkeus. Tämän jälkeen valitaan suuressa mittakaavassa onko rakopinta tasainen, aaltomainen vai portaittainen. Näiden epätasaisuuk-

sien mittakaava on desimetri-metri luokkaa. Kairasydännäytteet ovat niin pieniä, että on vaikea erottaa onko pinta tasainen, aaltomainen vai portaittainen. Tällaisissa tapauksissa on syytä tehdä myös kenttähavaintoja alueen kalliopaljastumista rakopinnan laadun varmistamiseksi.

Rakopinnan karkeutta kuvataan monissa yhteyksissä JRC-luvun avulla. JRC voidaan määrittää mm. eri pituisten malliprofiilien avulla tai rakopinnan amplitudin avulla käyttäen apuna Bartonin laatimaa kaaviota (Liite 9). Myös parametrin J_r ja JRC-arvon välillä on yhteys (liite 9). Rakopinnan amplitudi määritetään amplitudin pituutena metriä kohtia (mm/m). Myös JRC-luvun ja kalliomassan fraktaaligeometrian välillä on matemaattinen yhteys (Seidel ja Haberfield 1995). Rakopintojen karkeusluku J_r saadaan myös kuvan 3.6 pintojen mukaan vertaamalla määritettävää rakopintaa kuvan rakopintoihin ja valitsemalla lähinnä rakopintaa oleva profiili. Vertailu voidaan tehdä silmämääräisesti tai käyttäen hyväksi muotokampaa. Vertailtaessa on huomioitava, että mallipinnat eivät ole määrätyssä mittakaavassa ja niiden pituus vaihtelee 1:stä 10:een metriin.



Kuva 3.6. Rakopinnan karkeuden määritys kahden mittakaavan profiilin avulla (Løset 1995a)

3.3.3.2 Rakopintojen muuttuneisuusluku J_a

Parametri J_a kuvastaa yleisesti rakotäytteen paksuutta ja mineralogiaa sekä sen kitkaominaisuuksia. Sen arvot vaihtelevat tiiviin raon arvosta 0,75 paisuvahilaisten savitäytteisten rakojen arvoon 20.

Taulukko 3.7. Rakopintojen muuttuneisuusluku J_a (Barton ja Grimstad 1994 ja Løset 1995a).

4. Rakopintojen muuttuneisuusluku J_a		**ϕ_r (noin)**	**J_a**
a) Rakopinnat kiinni toisissaan (terveet tai yhteenkasvaneet raot, täytteiset)			
A	Yhteenkasvaneet raot tai rakotäyte tiivistä, kovaa, pehmenemätöntä ja läpäisemätöntä (esim kvartsi, maasälvät tai epidootti).	(-)	0,75
B	Muuttumattomat rakopinnat, pinta vain oksidoitunut tai likainen	(25°-30°)	1,0
C	Lievästi muuntuneet rakopinnat. Rakotäytteenä pehmenemättömiä mineraaleja, hiekkarakeita tai murskaantunutta savetonta kalliota.	(25°-30°)	2,0
D	Silttistä tai hiekkaista rakotäytettä, jossa pieniä määriä savea (savi pehmenemätöntä, ei paisuvaa)	(20°-25°)	3,0
E	Pehmeneviä tai pienen kitkan omaavia savimateriaalitäytteitä. (Esim. kaoliini, kiille, kloriitti, talkki, kipsi, grafiitti tms.) Vain pieniä määriä paisuvaa savea. (Täytteisyys epäsäännöllistä, paksuus korkeintaan 1...2 mm)	(8°-16°)	4,0
b) Rakopintoja erottaa ohut rakotäyte, joka sallii enintään 100 mm leikkaussiirtymän			
F	Täytteenä hiekkarakeita, murskaantunutta, savetonta kalliota	(25°-30°)	4,0
G	Vahvasti ylikonsolidoitunut, (pehmenemätön) savimineraalitäyte. (Täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm)	(16°-24°)	6,0
H	Keskinkertaisesti tai vähän ylikonsolidoitunut, (pehmenevä) savi-mineraalitäyte. (Täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm)	(12°-16°)	8,0
J	Paisuva savitäyte (täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm). J_a:n arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiintymisestä	(6°-12°)	8,0...12,0
c) Rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan ja niitä erottaa			
K	Murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Vahvasti ylikonsoli-doitunut, pehmenevä savimineraalitäyte	(6°-24°)	6
L	Savea tai murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Vähän tai keskinkertaisesti ylikonsolidoitunut, pehmenevä savimineraalitäyte.	(6°-24°)	8
M	Savea tai murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Sisältää paisuvaa savea. J_a-arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiin-tymisestä.	(6°-24°)	8...12
N	Silttistä tai hiekkaista savea sisältävät vyöhykkeet, pienet savi-vyöhykkeet (pehmenemättömät)	-	5
O	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Vahvasti ylikonsolidoituneet, (peh-menemättömät)	(6°-24°)	10
P	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Keskinkertaisesti tai vähän ylikon-solidoituneet, (pehmenevät)	(6°-24°)	13
Q	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Sisältävät paisuvaa savea. J_a-arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiintymisestä.	(6°-24°)	13...20

Rakopinnan karkeuden lisäksi myös rakotäytteen paksuus ja mineraalityyppi ovat ratkaisevia leikkauslujuuden kannalta. Parametriä J_a määritettäessä on aluksi määritettävä rakotäytteen suhteellinen paksuus kuten rakopinnan karkeutta J_r määritettäessä. Rakotäytteen mineraalikoostu-

mus määritetään taulukon 3.7 mukaan. Mineraalityyppi on ratkaiseva parametrin J_a kannalta. Yleensä se on helposti määritettävissä tunneliolosuhteissakin, mutta joskus voidaan tarvita apuna laboratoriomäärityksiä. Veden vaikutus rakotäytteeseen voidaan yksinkertaisesti kokeilla kastelemalla rakotäyte vedellä.

Koska määritystaulukossa esitetyt kuvaukset ovat hieman epätarkkoja ja subjektiivisia, on erilaisissa sovellutuksissa esitetty vaihtoehtoisia määrityksiä (Kirsten 1988 ja Milne ym. 1992). Myös erilaisia mittausmenetelmiä on tutkittu parametrin määrittämiseksi (Hadjigeorgiou ym. 1994). Tutkimuksissa on mitattu rakopinnan kitkaominaisuuksia alterometrin, tilt-boxin ja tribometrin avulla. Toistaiseksi kuitenkin paras käytettävissä oleva menetelmä parametrin J_a määrittämiseksi on NGI:n alkuperäiset määritystaulukot (taulukko 3.7). Ne kattavat parhaiten erityyppiset raot ja rakotäytteet.

Monissa tapauksissa parametri J_a riippuu rakotäytteenä olevan saven tyypistä. Saven konsolidaatiotila on vaikea päätellä tunneliolosuhteissa. Kalliosavi on usein niin kapeissa raoissa, että sen tutkiminen häiriintymättömässä muodossa on vaikeaa. Tunneliolosuhteissa kapean veitsen avulla saadaan raosta otettua rakotäytettä ja se auttaa myös rakoavauman määrittelyssä. Alustava määritys tehdään katselemalla ja tunnustelemalla sormin savea. Eräs nyrkkisääntö saven luokittelussa on se, että saven konsolidaatioaste on sitä suurempi mitä kovempaa savi on. Pehmeällä savella on yleensä alhainen konsolidaatioaste, usein myös suurissa syvyyksissä.

Paisuvahilainen savi on vaikeasti havaittavissa kenttäoloissa. Se kuitenkin usein varoittaa olemassaolostaan saadessaan vettä. Kastuessaan savi turpoaa ja irrottaa lohkareita tunnelin seinistä ja katoista joka voi johtaa jopa tunnelin sortumiseen. Saven paisuminen ja paisuntapaine riippuvat saven mineraalikoostumuksesta ja saven saamasta vedestä. Paisuvahilainen savi esiintyy usein ruhjelaaksoissa kalimaasälvän rapautumistuotteena, mutta sitä voi esiintyä muissakin ympäristöissä.

Kenttäolosuhteissa voidaan määrittää kalliosaven mineraalikoostumus yksinkertaisen väritestin avulla. Väriaineina käytetään malakiittivihreää tai benzidiiniä (Heiner ja Broms 1976). Myös kuivatun saven vapaata paisumista mittalasissa voidaan käyttää yksinkertaisena testinä. Saven vapaa paisuminen voidaan tutkia karistamalla 10 ml kuivattua ja jauhettua savea (< 0,02 mm) vedellä täytettyyn 50 ml:n mittalasiin ja lukemalla saven paisuminen mitta-asteikolta (NTH 1978). Jos saven vapaa paisuminen on yli 80 % kyseessä on aktiivinen savi.

Epäiltäessä paisuvahilaista savea on syytä tehdä laboratoriomääritys savelle. Saven koostumuksen ja paisuntaominaisuuksien määritykseen käytetään seuraavia menetelmiä (Heiner ja Broms 1976):

1. differentiaaliterminen analyysi (DTA)
2. röntgenanalyysi
3. paisumiskoe (paisuntapaine ja vapaa paisuminen)

3.3.4 Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w

Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w määritetään kalliotilassa havaittujen vesivuotojen perusteella taulukon 3.8 mukaisesti. Vedenläpäisevyysluku J_w vaihtelee kuivan kallion arvosta 1,0 poikkeuksellisten suurten vesivuotojen arvoon 0,05.

Taulukko 3.8. Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w (Barton ym. 1974).

5. Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w		**Likim. veden-paine kg/cm²**	**J_w**
A	Kuivat kalliotilat tai vesivuodot hyvin pieniä (paikallisesti < 5 l/min)	< 1,0	1 ,0
B	Keskinkertaiset vesivuodot, satunnaista rakotäytteen poishuuhtoutumista	1,0...2,5	0,66
C	Suuret vesivuodot kohtalaisen hyvässä kalliossa, jossa raot ovat täytteettömiä	2,5...10,0	0,5
D	Suuret vesivuodot, rakotäytteen huomattavaa poishuuhtoutumista	2,5...10,0	0,33
E	Poikkeuksellisen suuret vesivuodot välittömästi räjäytyksen jälkeen, vuodot kuitenkin pienenevät myöhemmin	> 10	0,2...0,1
F	Poikkeuksellisen suuret pysyvät vesivuodot	>10	0,1...0,05
Huom. 1) Tekijät C...F ovat arvioita. J_w:n arvoa voidaan lisätä käytettäessä salaojitusta. **Huom. 2)** Jään muodostumisesta aiheutuvia ongelmia ei ole otettu huomioon			

Käytettäessä salaojitusta J_w:n arvoa voidaan lisätä. Injektoinnin yhteydessä J_w :n arvoa korotetaan, niin että se vastaa vallitsevaa tilannetta. Jos tila on injektoinnin jälkeen kuiva käytetään arvoa J_w = 1. Käytännössä yleisin tilanne on, että tunneli on kuiva tai vuodot ovat pieniä, jolloin J_w = 1.

Vesi kastelee rakotäytteet ja voi tehdä ne heikommiksi tai liukkaammiksi. Virtaava vesi voi myös huuhdella rakotäytteet pois. Korkea vedenpaine pienentää kitkavoimia siten, että lohkot pääsevät helpommin liukumaan ulos. Taulukossa 3.8. 1 kg/cm²:n paine vastaa 10 metrin vesipatsasta.

Vuotovesien määrät voivat vaihdella määritysajankohdan mukaan. Lähellä pintaa olevissa tunneleissa vuotovedet vaihtelevat vuodenaikojen ja sademäärien mukaan. Vuotovesien määrä voi lisääntyä kosteina ajanjaksoina ja vähentyä kuivina ajanjaksoina tai jäätymisen seurauksena. Määritystä ei suositella tehtäväksi heti louhinnan jälkeen, koska kun tunneli on seissyt jonkin aikaa katkon räjäytyksen jälkeen, ympäröivien kalliomassojen raoissa ollut vesi voi valua tyhjäksi siten, että veden virtaus tunnelin lakkaa tai vähenee huomattavasti. Vuotojen pieneneminen johtuu usein kalliorakojen tiivistymisestä saostumalla. Muutokset vuodoissa johtuvat usein kalliomekaanista muutoksista. Tällainen muutos ilmenee olosuhteista riippuen joskus vasta muutaman kuukauden kuluttua tunnelin louhinnasta. Deformaation seurauksena kallion raot voivat pienentyä tai umpeutua. jolloin vuodotkin lakkaavat tai pienevät.

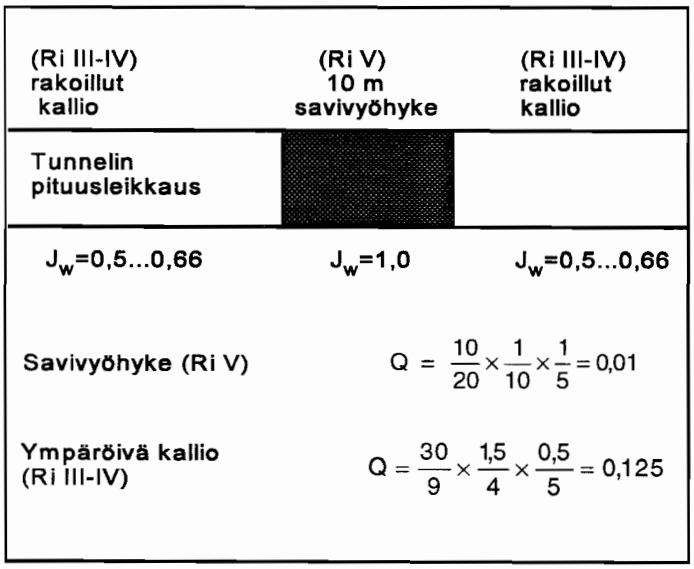
Q-luokituksen yhteydessä ei ole määritetty vesivuotoja litramäärien perusteella. Vuotovesien määrää tunnelin pituusyksikköä kohti ei voida yksiselitteisestä määrittää, koska parametrinarvo ei riipu yksin vesivuodon määrästä. Vuotoveden määrän lisäksi myös vedenpaine vaikuttaa parametrin valintaan. Myös tunnelin pohjan läpi tuleva vesi on huomioitava määrityksessä (Løset 1995a).

Rakojen vedenläpäisevyyslukua J_w ei voida määrittää suoraan kairasydämen perusteella. Jos pohjavesiolosuhteista ei ole mitään tietoa, käytetään arvoa J_w = 1.

J_w:n arvo voidaan määrittää epäsuorasti kallion vedenjohtavuuden avulla, joka määritetään yleensä ns. vesimenekkikokeen avulla. Vesimenekkikokeessa mitataan kairausreikään syötettävän veden määrää, syöttöpainetta ja tutkittavan osan pituutta. Tutkittava alue reiässä rajataan tulppaamalla. Kokeen tuloksena saadaan Lugeon-arvo tietyille väleille (l/min/m/MPa). Tutkimuksessa käytettävä paine valitaan tutkimussyvyyden mukaan. Tällöin kallion pinnan lähellä mittauspaine on noin 0,1

MPa. 1 MPa:n painetta käytetään kun syvyys on yli 50 metriä. Jos tutkittavan kallion raot ovat avoimia, voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta nostaa paine arvoon 1 MPa. Liian suuren paineen käyttö lähellä pintaa voi rikkoa kalliota. Kuivissa rei'issä tai kun vesimenekki on pieni (< 1 Lugeon) voidaan olettaa, että $J_w = 1$. Kun vesimenekki kasvaa arvoon (1-10 Lugeon), $J_w = 0{,}66$. Tätä suuremmilla vesimenekkiarvoilla (> 10 Lugeon) ja kalliomassoilla joissa on avoimia rakoja voidaan käyttää suurempia J_w:n arvoja (Løset 1995b). Vedenjohtavuuden ja Lugeon-arvon välillä on lineaarinen riippuvuus siten, että 1 Lugeon = 10^{-7} m/s.

Rakotäytteenä oleva kalliosavi tiivistää kallion raot monissa tapauksissa. Usein suuremmat vuodot esiintyvät pahimman ruhjealueen vieressä, jossa raot ovat avoimia. Kuvassa 3.7 on tyypillinen savivyöhyke (Ri V).



Kuva 3.7. Parametrin J_w määritys savivyöhykkeessä (Løset 1995c).

3.3.5 Jännitystilaluku SRF

Jännitystilaluku SRF kuvaa kalliotilan jännitystilasta ja kivilajivyöhykkeistä johtuvia olosuhteita. Sen arvo vaihtelee kiinteän jännittyneen kallion arvosta 0,5 runsaan kallioräiskeen ja välittömien muodonmuutosten arvoon 400 taulukon 3.9 mukaisesti.

Taulukko 3.9. Jännitystilaluku SRF (Barton ja Grimstad 1994 ja Løset 1995a).

6. Jännitystilaluku SRF				
a) Kalliossa heikkousvyöhykkeitä				**SRF**
A	Useita heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota, ympäröivä kallio hyvin löyhää (kaikki louhitun tilan syvyydet)			10,0
B	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota (louhitun tilan syvyys ≤ 50 m)			5,0
C	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota (louhitun tilan syvyys > 50 m)			2,5
D	Useita heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa, ympäröivä kallio löyhää (kaikki louhitun tilan syvyydet)			7,5
E	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa (louhitun tilan syvyys ≤ 50 m)			5,0
F	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa (louhitun tilan syvyys > 50 m)			2,5
G	Rakoilu erittäin tiheätä, raot löyhiä ja avoimia			5,0
Huom. 1) Jos heikkousvyöhyke ei lävistä kalliotilaa, mutta vaikuttaa sen pysyvyyteen, pienennetään SRF:n arvoa 25...50 %.				
b) Hyvä kallio, jännitystilasta aiheutuvia ongelmia		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	**SRF**
H	Jännitykset pieniä, kalliotila lähellä pintaa, avoimet raot	> 200	< 0,01	2,5
J	Keskinkertaiset jännitykset, edulliset jännitysolosuhteet	200...10	0,01...0,3	1 ,0
K	Korkeat jännitykset, hyvin kiinteä rakenne. Yleensä edullinen lujuudelle, mahdollisesti epäedullinen seinien lujuudelle	10...5	0,3...0,4	0,5...2,0
L	Lievää kivilaattojen hilseilyä > 1 tunnin kuluttua (kiinteä kallio)	5...3	0,5...0,65	5...50
M	Kivilaattojen hilseilyä ja kallioräiskettä muutamassa minuutissa (kiinteä kallio)	3...2	0,65...1 ,0	50...200
N	Runsasta kallioräiskettä ja välittömiä dynaamisia muodonmuutoksia (kiinteä kallio)	< 2	> 1,0	200...400
Huom. 2) Voimakkaasti anisotrooppisessa jännityskentässä (jos mittauksia on suoritettu): kun $5 \le \sigma_1/\sigma_3 \le 10$, kerrotaan σ_c arvolla 0,8 kun $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ kerrotaan σ_c arvolla 0,6 σ_c = puristuslujuus σ_θ = kalliotilan suurin reuna- (tangentiaali-) jännitys σ_1 = suurin pääjännitys σ_3 = pienin pääjännitys **Huom. 3)** Tarkasteltu vain harvoja tapauksia, joissa kalliokaton paksuus on jänneväliä pienempi. Jos jänneväli on suurempi kuin kalliokaton paksuus, ehdotetaan SRF nostettavaksi arvosta 2,5 arvoon 5				
c) Kokoonpuristuva kallio			σ_θ/σ_c	**SRF**
O	Lievä kokoonpuristava paine		1 ...5	5...10
P	Suuri kokoonpuristava paine		>5	10...20
Huom. 4) Kokoonpuristuva kallio, huonon kallion muuttumisia plastiseksi korkean paineen vaikutuksesta. Louhitun tilan syvyys $H > 350Q^{1/3}$ ja kalliomassan puristuslujuus $\sigma_c = 7\gamma Q^{1/3}$, γ = kallion tiheys tonnia/m^3				
d) Paisuva kallio; kemiallisen paisumisen voimakkuus riippuu veden määrästä				**SRF**
R	Lievä paisuttava paine			5...10
S	Suuri paisuttava paine			10...15

SFR voidaan laskea kivilajin yksiaksiaalisen puristuslujuuden (σ_c) ja suurimman pääjännityksen (σ_1) välisen suhteen perusteella. Vaihtoehtoisesti SRF voidaan laskea myös kalliotilan suurimman reunajännityksen (σ_θ) ja kivilajin yksiaksiaalisen puristuslujuuden (σ) suhteesta. Monissa tapauksissa nämä tiedot kuitenkin puuttuvat, ja SRF täytyy määrittää kokemuksen ja tunnelista tai kallionpinnasta tehtyjen havaintojen perusteella. Kalliorakennushankkeen alkuvaiheessa määritys voidaan tehdä topografisten olosuhteiden ja alueella aiemmin tehtyjen geologisten tutkimusten perusteella. Louhinnan aikana ja jälkeen saadaan paljon uutta tietoa jännitystilasta ja SRF voidaan määrittää kallion käyttäytymisestä tehtyjen havaintojen ja hyvän insinööritaidon perusteella.

Jännityksen vaikutukset tunneliin voidaan usein havaita tunnelissa, ja määrittää niiden perusteella SRF-arvo. Täytyy kuitenkin muistaa, että vie tietyn ajan, ennen kuin yksittäiset ilmiöt esiintyvät. Kun rakopinnat koskettavat toisiaan välittömästi louhinnan jälkeen, voi mennä useita päiviä tai viikkoja ennen kuin plastinen deformaatio ilmenee. Parametri SRF arvioidaan helposti väärin, jos se määritetään heti louhinnan jälkeen.

Maanpinnanmuodot voivat antaa viitteitä jännitysolosuhteista. Kun SRF määritetään tunnelin tutkimusvaiheen aikana, voi kokemukset paikallisista olosuhteista olla hyödyllisiä. Myös kallion pinnanmuodostus voi olla merkittävä jännitystilan arvioinnissa. Esimerkiksi korkean mäen sivussa voi olla voimakkaasti anisotrooppinen jännityskenttä.

Taulukossa 3.9 jännitysolosuhteet jaetaan neljään luokkaan:

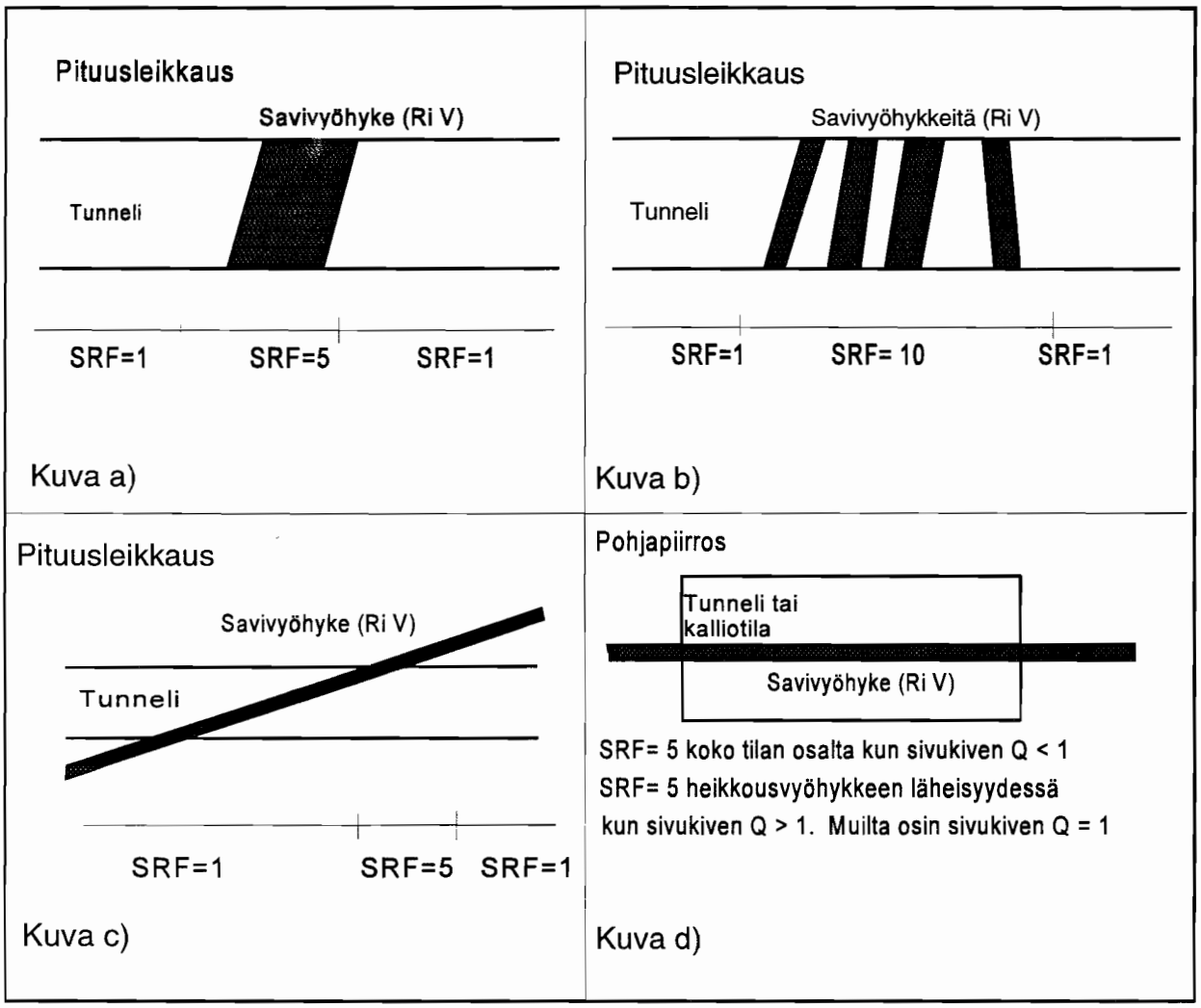
a) Kalliossa on heikkousvyöhykkeitä jotka leikkaavat tunnelin ja voivat johtaa sortumaan

Kun kallioperässä on heikkousvyöhykkeitä, jännitystilassa voi olla suuria paikallisia eroja. Jos vyöhykkeen materiaali on ympäröivää kalliomassaa heikompaa, sitä ympäröivän kallion jännitykset ovat vähemmän merkittäviä. Jos heikkousvyöhyke on niin heikko, että se ei voi siirtää jännityksiä, voi vyöhykkeen toisella puolella olla jännityskeskittymä, mutta toisella puolella jännitykset ovat vapautuneet. Heikkousvyöhykkeen vaikutuksen laajuus riippuu ympäröivän kalliomassan laadusta. Jos ympäröivä kalliomassa on hyvää ja vähärakoista, vaikutus on hyvin paikallinen. Jos ympäristö muodostuu heikosta kalliosta, vyöhykkeen vaikutus saattaa ulottua useiden metrien päähän.

Vyöhykkeen osia määritettäessä geologin vasara on hyvä apuväline. Lyötäessä vasaralla tunnelin seinään huomataan onko kivi kiinteätä ja jännittynyttä, jolloin valitaan SRF = 1. Jos lohkot ovat löyhtyneet, voidaan käyttää suurempaa SRF-arvoa (Løset 1995a).

Heikkousvyöhykkeen vaikutusta parametrin SRF arvoon on esitetty kuvassa 3.8. Kuvissa esitetyt parametrin SRF arvot ovat periaattellisia, ja ne on aina määritettävä tapauskohtaisesti vallitsevien olosuhteiden mukaisesti. Kohdassa a on tunnelin läpileikkaus, jossa on tunnelin lävistävä savivyöhyke, joka aiheuttaa epänormaalin jännitystilan. Heikkousvyöhykkeessä ja sen välittömässä läheisyydessä käytetään tällöin arvoa SRF = 5. Noin metrin etäisyydellä käytetään ympäröivän kalliomassan normaalia arvoa, esim. SRF = 1. Kohdassa b on useita savivyöhykkeitä. Tällöin käytetään arvoa SRF = 10 savivyöhykkeiden rajaamalla alueella. Heikkousvyöhykkeiden välissä oleva hyvälaatuinenkin kallio voi olla häiriintynyttä. Tällaisessa tapauksessa SRF = 10 arvoa käytetään myös vyöhykkeiden välissä olevassa hyvässä kalliossa. Kohdassa c ohut loivakaateinen heikkousvyöhyke lävistää tunnelin. Tällöin käytetään arvoa SRF = 5, siltä osin kun se vaikuttaa tunnelin pysyvyyteen. Kohdassa d heikkousvyöhyke lävistää kalliotilan pituusakselin suuntaisesti. Tällöin jos sivukivi on huonoa (Q < 1) heikkousvyöhyke vaikuttaa koko kalliotilan pysyvyyteen. Tällöin käytetään heikkousvyöhykkeen SRF-arvoa koko tilan osalta, esim. SRF = 5. Jos sivukiven laatu on hyvä (Q>1) vyöhyke vaikuttaa tunnelin pysyvyyteen vain vyöhykkeen kohdalla ja sen välittömässä läheisyydessä. Tapauksissa joissa heikkousvyöhyke lävistää kalliotilan viistosti, on pääteltävä tapauskohtaisesti miltä osin heikkousvyöhyke vaikuttaa kalliotilan pysyvyyteen.

Jos kalliotila ei lävistä heikkousvyöhykettä, mutta tällä on kuitenkin vaikutusta tilan pysyvyyteen, pienennetään SRF:n arvoa 25...50 %.



Kuva 3.8. Heikkousvyöhykkeen vaikutus parametrin SRF arvoon (Løset 1995a,c)

b) Kovat kiinteät kalliot, joissa vain vähäiset muodonmuutokset ovat mahdollisia. Hyvä kallio, jossa voi olla jännitystilasta aiheutuvia ongelmia

Tavallisesti suomalaiset kalliot kuuluvat tähän luokkaan. Tässä kategoriassa SRF:n arvo määräytyy kivilajin lujuuden ja vallitsevan jännitystilan perusteella. Yleensä, kun jännitykset ovat kohtuulliset ja kalliotilaan nähden suotuisia, käytetään arvoa SRF = 1. Myös suhteellisen korkea jännitystila voi olla suotuisa kalliotilasta riippuen. Tällaisessa tilanteessa voidaan käyttää SRF:n arvoa 0,5. Kalliotiloissa joissa on ohuet kalliokatot voi vallita alhainen jännitystila ja tämän johdosta huonontunut pysyvyys. Näissä tapauksissa SRF on yleensä 2,5 tai 5. Selvää raja mikä on ohut katto ei voida antaa, vaan se on pääteltävä tapauskohtaisesti. Ohuissa kalliokatoissa on tarkasteltava erikseen leikkautumismahdollisuus. Jos kalliokaton leikkaa selvä rako, käytetään arvoa 5. Karkeasti voidaan arvioida, että kalliokatto on ohut tapauksissa joissa sen paksuus on pienempi kun kalliotilan jänneväli. Kun jännitystila on pieni ja kalliokatto ohut, pieni jännitys voi aiheuttaa kallion löyhtymistä ja rakoavaumien kasvamista. Tämä aiheuttaa lohkojen löyhtymistä ja komuiluvaara kasvaa. Tässä yhteydessä voidaan käyttää apuna geologin vasaraa. Vasaraniskut paljastavat löyhtyneet lohkot. Jos niitä on runsaasti, voi olla syytä valita SRF:n arvo 2,5. Kallion ollessa kiinteätä, voidaan käyttää arvoa 1.

Kalliossa vallitseva pystyjännitys muodostuu kallion omasta painosta joka on keskimäärin 2700 kg / m^3. Kallion vallitsevaa pystyjännitystä σ_v (MPa) voidaan arvioida kaavalla (Hoek ym. 1995):

$$\sigma_v = \gamma z \qquad (3.8)$$

jossa,
γ on tiheys (MN/m^3)
z on syvyys maanpinnan alla (m)

Vaakajännitys σ_h (MPa) syvyydellä z (m) on (Hoek ym. 1995):

$$\sigma_h = k\sigma_v = k\gamma z \qquad (3.9)$$

jossa,
k on vakiokerroin.

Tehdyissä tutkimuksissa on esitetty vallitsevia pysty- ja vaakajännityksiä suoritetuissa mittauksissa syvyyden suhteen. Kalliorakennus ja kaivoskohteissa tehdyt mittaukset osoittavat, että vakiota k voidaan arvioida kaavalla (Hoek ym. 1995):

$$k = 0{,}25 + 7E_h(0{,}001 + 1/z) \qquad (3.10)$$

jossa,
E_h on keskimääräinen vaakasuuntainen kimmokerroin (GPa).

Jännitystiloissa voi olla myös suuria paikallisia vaihteluja. Esimerkiksi Helsingin kallioperässä on havaittu suuriakin kallion jännitystiloja lähellä kallion pintaa. Käytännössä Suomen kallio-oloissa voidaan käyttää pystyjännityksenä arvoa joka tulee kallion massasta ja vaakajännitys saadaan kertomalla pystyjännitys 2...2,5:llä. Hyvään tulokseen pääsemiseksi jännitystila on mitattava kallioperästä.

Erittäin suurilla jännityksillä SRF voi olla jopa 400. Suuria jännityksiä esiintyy vuoristossa ja kun tunnelin syvyys on useita satoja metrejä. Suuria jännityksiä voi esiintyä paikallisesti jopa melko lähellä kallion pintaa. Jos kohteessa on viitteitä suurista jännitystiloista, on jännitystila mitattava kallioperästä. SRF voidaan määrittää myös kallion hilseilyn ja kallioräiskeen perusteella taulukon 3.10 mukaan.

c) Kokoonpuristuva kallio, jossa esiintyy huonon kallion muuttumista plastiseksi korkean paineen vaikutuksesta

Kokoonpuristuvassa kalliossa tapahtuu plastista deformaatioita jännityksen vaikutuksesta. Ilmiö voi esiintyä suhteellisen heikoissa sitkeissä kivilajeissa, kun jännitys ylittää kivilajin lujuuden. Suomen oloissa tämä luokka on varsin harvinainen. Q-luokituksen sopivuutta kokoonpuristuviin kallioihin on tutkittu mm. Intiassa (Verman ym. 1991).

d) Paisuva kallio, jossa kemiallisen paisumisen voimakkuus riippuu veden määrästä ja kivilajin mineraalikoostumuksesta

Paisuminen on kemiallinen ilmiö, joka voi alkaa kun paisuvahilaisia mineraaleja sisältävät mineraalit kastuvat. Paisuvahilaisten mineraalien määrä ja tyyppi sekä vedensaanti ratkaisevat, kuinka pitkälle prosessi etenee ja kuinka suuri paisunta paine voi olla. Kivilajin paisuntaominaisuuksia voidaan tutkia laboratoriossa ISRM:n suositusten mukaisesti.

SRF:n määritys kairasydännäytteen perusteella

Jännitystilan ei voida määrittää ainoastaan kairasydännäytteen perusteella. Monissa tapauksissa voidaan kuitenkin käyttää arvoa SRF = 1. Tätä arvoa voidaan käyttää kun kalliolaatu on hyvä eikä ole tiedossa mitään erityistä ko. tunnelista, esim. merkittäviä heikkousvyöhykkeitä tai suuria jännitystiloja. Jos tunneli sijaitsee lähellä maanpintaa, vallitseva jännitystila on usein melko pieni. Tällöin voidaan käyttää arvoa SRF = 2,5. Kun kairasydännäytteessä on paljon heikkousvyöhykkeitä ja murskaantunutta kalliota, voidaan käyttää arvoa SRF = 5. Jos kalliomassa on plastista tai paisuvaa käytetään tätäkin suurempia SRF arvoja. Kun tunneli on syvällä (useita satoja metrejä) käytetään

korkeita SRF arvoja, jotka saadaan laskemalla syvyyden ja kivilajin yksiaksiaalisen puristuslujuuden perusteella.

3.4 RMR-luokitus

RMR-luokitusta on käytetty lukuisiin eri sovellutuksiin. Näitä ovat mm. tunnelit, luiskat ja perustukset. Luokitusta on käytetty myös moniin erilaisiin kaivossovellutuksiin sekä kovissa että pehmeissä kivissä. RMR-luokituksessa kallio jaetaan viiteen luokkaan lähtöparametrien perusteella lasketun pisteytyksen mukaan. Kallioluokat ja niiden pisteytykset on esitetty taulukossa 3.10.

Taulukko 3.10. Kallioluokat ja niiden pisteytys (Bieniawski 1989)

C. KALLIOLUOKAT					
Kokonais pisteet (RMR-arvo)	**100...81**	**80...61**	**60...41**	**40...21**	**20**
Luokka	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**
Kalliolaadun kuvaus	**erittäin hyvä**	**hyvä**	**kohtalainen**	**huono**	**eritäin huono**

Jos kalliossa on samassa perässä kahta tai useampaa eri tyyppistä kalliota sekaisin keskenään, on suositeltavaa, että kummallekin kalliotyypille lasketaan oma RMR-luku ja kalliomassan RMR-luvuksi lasketaan pinta-alalla painotettu keskiarvo (Bieniawski 1989).

RMR-luokituksessa kalliomassa luokitellaan kuuden lähtöparametrin avulla.

- yksiaksiaalinen puristuslujuus
- RQD-luku
- rakoväli
- rakojen laatu
- pohjavesi olosuhteet
- rakosuuntien vaikutus

Taulukko 3.11. RMR-luokitusparametrit (Bieniawski 1989)

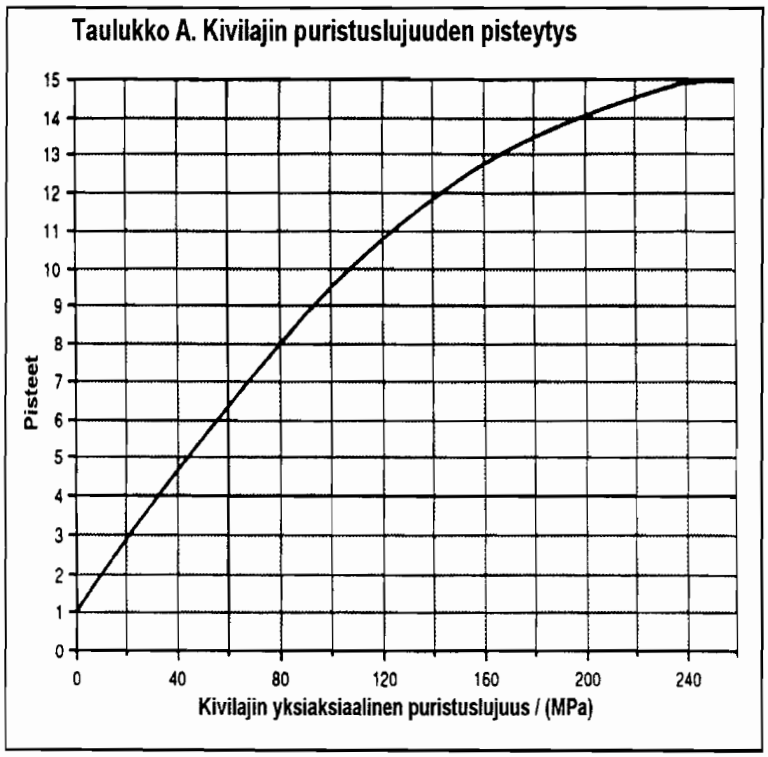
A. LUOKITUSPARAMETRIT JA NIIDEN PISTEYTYS									
Parametri			Vaihteluväli						
1	Koekappaleen lujuus	Pistekuormitusindeksi (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Tällä alueella suositellaan yksiaksiaalista puristuslujuutta		
		Yksiaksiaalinen puristuslujuus (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Pisteytys		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD-luku (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Pisteytys		**20**	**17**	**13**	**8**	**3**		
3	Rakoväli		> 2 m	0,6-2 m	200 -600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Pisteytys		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Rakojen laatu		-hyvin karkeat rakopinnat -raot epäjatkuvia -rakopinnat kiinni toisissaan -ei rapautumista	-lievästi karkeat rakopinnat -raon avautuneisuus < 1 mm -lievää rapautumista	-lievästi karkeat rakopinnat -raon avautuneisuus < 1 mm -voimakasta rapautumista	-haarniskapintaiset raot tai -savitäytteiset raot < 5 mm tai -raon avautuneisuus 1-5 mm -raot jatkuvia	-pehmeä savitäyte, paksuus > 5 mm tai -raon avautuneisuus > 5 mm -raot jatkuvia		
	Pisteytys		**30**	**25**	**20**	**10**	**0**		
5	Pohjavesi	Virtaus 10 m tunnelipituudella	Ei yhtään	< 10 l/min	10...25 l/min	25...125 l/min	> 125 l/min		
		Suhdeluku raon vesipaine/suurin pääjännitys	0	< 0,1	0,1...0,2	0,2...0,5	> 0,5		
		Kuvaileva	Täysin kuiva	Kostea	Märkä	Tippuva	Virtaava		
	Pisteytys		**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		

Huom 1) Kohtien A1, A2 ja A3 osalta tarkemmat arvot saadaan taulukoiden graafisista kuvaajista.
Huom 2) Kohdan A4 arvo saadaan tarkemmin yksittäisten rako-ominaisuuksien perusteella kohdasta F.
Huom 3) Rako-olosuhteet ovat karkeita arvioita. Esim. rakotäytteen esiintyessä karkeuden merkitys ylikorostuu. Tällöin voidaan käyttää suoraan kohtaa A 4 rako-ominaisuuksien arvioimiseen.

3.4.1 Kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus

Määritys voidaan tehdä yksiaksiaalisen puristuskokeen, Schmidt-vasaran, pistekuormituskokeen tai kivilajin perusteella tehtävän arvion perusteella. Määritysten puuttuessa voidaan kivilajin

puristuslujuutta arvioida kivilajin perusteella (taulukko 3.12). Puristuslujuuden pisteytys määritetään taulukon 3.11 kohdan A1 mukaisesti. Tarkempi pisteytys saadaan kuvan 3.9 kaavion avulla.



Kuva 3.9. Kivilajin puristuslujuuden pisteytys (Bieniawski 1989)

Tarkimpaan tulokseen päästään laboratoriossa tehtävien tutkimuksien avulla. Kivilajin yksiaksiaalinen puristusmurtolujuus määritetään puristuskokeen avulla. Koe tehdään käyttäen in-situ kosteudessa olevia preparoituja kairasydännäytteitä ISRM:n standardien mukaisesti (Brown 1981). Kokeen tuloksena saadaan kivilajin puristuslujuus, kimmo-moduli ja tarvittaessa Poissonin luku.

Pistekuormituskoetta voidaan käyttää kiven lujuuden määritykseen sekä kentällä että laboratoriossa. Koe voidaan tehdä kairasydämellä tai epämääräisen muotoisella näytekappaleella. Kokeessa näyte asetetaan puristussylinterin pään ja vastakappaleen väliin, jonka jälkeen kappaletta kuormitetaan murtumiseen saakka. Kokeen avulla saadaan määritettyä näytteelle pistekuormitusindeksi, jota voidaan käyttää sellaisenaan RMR-luokituksen perusteena. Siitä voidaan myös laskea kappaleen vetomurtolujuus. Menetelmä ei ole yhtä tarkka kuin yksiaksiaalinen puristuskoe.

Puristuslujuus voidaan määrittää myös Schmidt-kimmovasaran avulla. Vasara mittaa epäsuorasti kiven kimmo-modulia, mikä on tietyssä suhteessa puristusmurtolujuuteen. Vasaraa voidaan käyttää sekä in-situ määritysten yhteydessä suoraan tunnelin seinästä, tai näytekappaleiden tutkimiseen. Tutkittavan kappaleen tulee olla tukevasti paikallaan. Jos kappale on löyhästi kiinnittynyt kallioon, kokeen tulos on virheellinen. Käytettäessä Schmidt-kimmovasaraa kairasydämien tutkimiseen, asetetaan tutkittava kairasydännäyte kokeen ajaksi erityiselle metallialustalle, jonka massa on vähintään 20 kg. Kokeen antaman tuloksen perusteella voidaan arvioida kivilajin yksiaksiaalista puristuslujuutta. Menetelmä sopii huonosti koviin ja erittäin pehmeisiin kivilajeihin. Koska suomalaiset kivilajit ovat pääosin kovia, menetelmä soveltuu huonosti Suomen kallio-olosuhteisiin. Jos menetelmää kuitenkin käytetään, tulee se suorittaa ISRM:n antamien suositusten mukaisesti (Brown 1981). Koestettavan kappaleen tulee olla riittävän suuri, näytteen halkaisijan on oltava vähintään 54,7 mm ja pituuden vähintään 60 mm. Näytteestä otetaan aina vähintään 20 lukemaa,

joiden perusteella voidaan arvioida ISRM:n ohjeiden mukaisesti kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus.

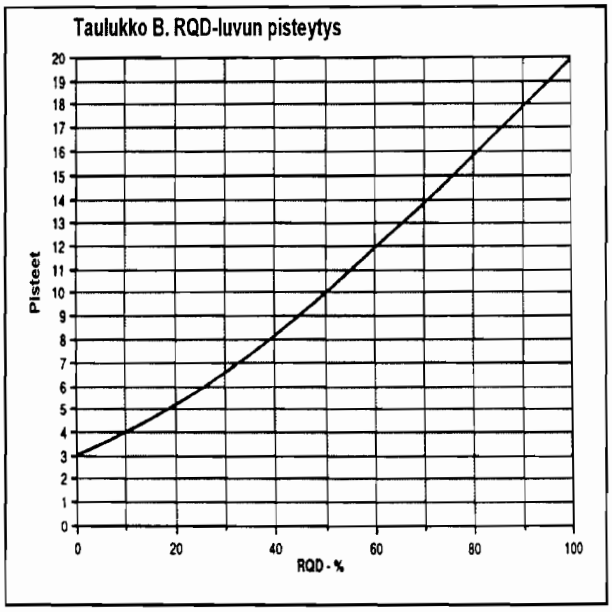
Taulukon 3.12 mukaan voidaan arvioida kivilajin tai rakopinnan (JCS-luku) puristuslujuutta tarkemman tutkimustiedon puuttuessa. Taulukon 3.12 mukaan kivilajin pienin puristuslujuus on noin 1 MPa. Kiven ja maan välinen raja ei ole aina selvä. Eräs määritys on Hong Kongin geoteknillisen toimiston esittämämääritys, jonka mukaan maata on luonnon muodostama aines, joka voidaan käsin rikkoa sen muodostamiksi rakeiksi. Kiveä taas on luonnon muodostama aines, jota rapautuneisuudesta riippuen ei voida tai voidaan vain osittain rikkoa käsin (Geoguide 3 1988).

Taulukko 3.12. Kivilajin yksiaksiaalisen puristuslujuuden arvioiminen (Hoek ym. 1993)

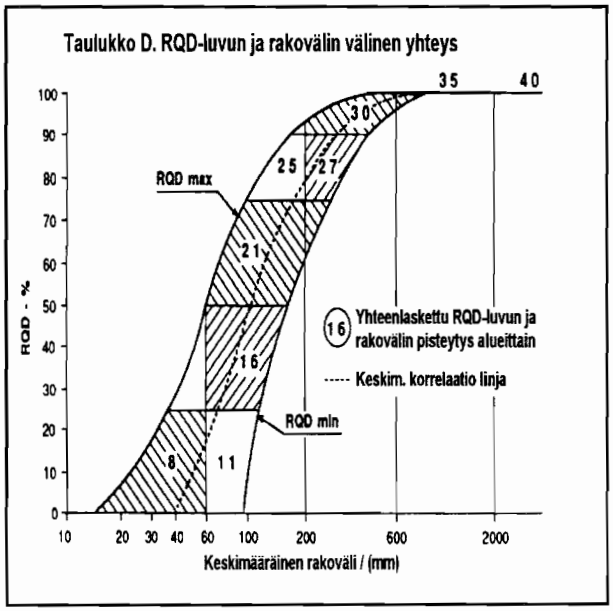
Luokitus	Yksiaksiaalinen puristuslujuus, MPa	Pistekuormitusindeksi, MPa	Schmidtin lujuus (L-tyyppinen vasara)	Kenttäarvio lujuudesta	Esimerkkejä
Erittäin luja	> 250	> 10	50...60	Kivi irtoaa lastuina ja vaatii useita vasaran geologin iskuja, soi osuessaan	Basaltti, diabaasi, piikivi, gneissi, graniitti, kvartsiitti
Hyvin luja	100...250	4...10	40...50	Kivinäytteen irrottaminen vaatii useita vasaran iskuja	Amfiboliitti, hiekkakivi, basaltti, gabro, gneissi, granodioriitti, kalkkikivi, marmori, ryoliitti, tuffi
Luja	50...100	2...4	30...40	Kivinäytteen saa irrotettua yhdellä vasaran iskulla	Kalkkikivi, marmori, fylliitti, hiekkakivi, liuske, saviliuske
Keskinkertaisen luja	25...50	1...2	15...30	Luja lyönti geologin hakulla painuu kiveen 5 mm, veitsi juuri ja juuri raaputtaa kiveä	Savikivi, hiili, betoni, liuske, saviliuske, lietekivi
Heikko	5...25	-	< 15	Veitsi leikkaa materiaalia, mutta kivinäytteen muotoilu veitsellä ei onnistu	Liitu, suola, potaska
Hyvin heikko	1...5	-	-	Murentuu lujilla hakun iskuilla, voidaan muovata veitsellä	Voimakkaasti rapautunut tai muuttunut kivi
Erittäin heikko	0,25...1	-	-	Voidaan uurtaa kynnellä	Savi

3.4.2 RQD-luku ja rakoväli

RMR-luokituksessa rakoilun määrä määritetään RQD-luvun ja rakovälin perusteella. RQD-luku määritetään RMR-luokituksen yhteydessä aivan samoin kuin Q-luokituksen yhteydessä sillä erolla, että RQD-luvun koko asteikko (0-100) on käytössä RMR-luokituksessa. RQD-luvun antama pisteytys saadaan taulukosta 3.11 kohdasta A2 karkeasti ja tarkemmin graafisen kuvaajan (kuva 3.10) mukaisesti.

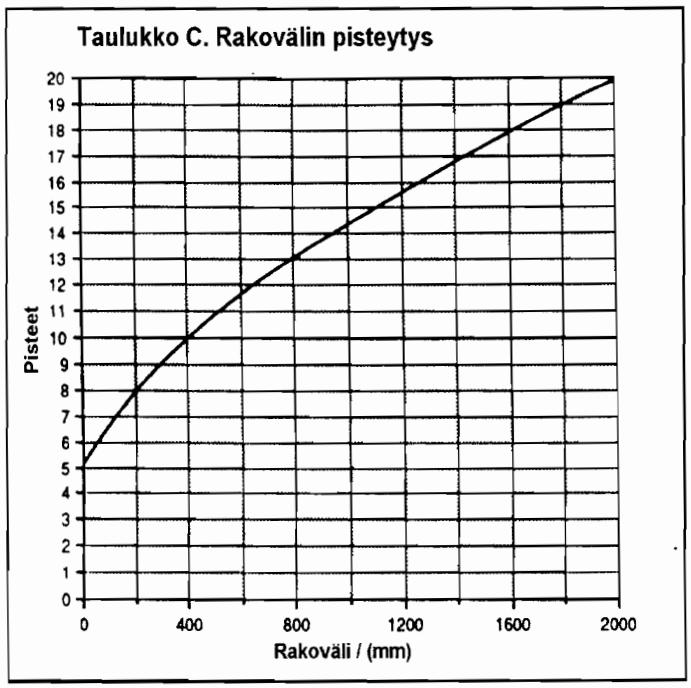


Kuva 3.10. RQD-luvun pisteytys (Bieniawski 1989)



Kuva 3.11. RQD-luvun ja rakovälin välinen yhteys (Bieniawski 1989)

Rakoväli määritetään tiheimmän rakosuunnan mukaan. Rakovälin pisteytys määritetään taulukon 3.11. kohdan A3 mukaisesti. Tarkempi pisteytys saadaan kuvan 3.12 kaaviosta. RMR-luokituksen mukainen keskimääräisen rakovälin määritys lähtee olettamuksesta, jonka mukaan kalliomassassa on kolme rakosuuntaa. Mikäli vain kalliossa on esimerkiksi vain kaksi rakosuuntaa, voidaan arvoa hieman korottaa noudattaen varovaista harkintaa. Jos molemmat rakosuunnat ovat pysyvyyden kannalta epäedullisia, arvoa ei ole syytä muuttaa. Rako määritetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin Q-luokituksen yhteydessä



Kuva 3.12. Rakovälin pisteytys (Bieniawski 1989)

3.4.3 Pohjaveden pisteytys

Pohjaveden pisteytys määritetään tunnelissa tehtyjen havaintojen perusteella taulukon 3.11 kohdan A5 mukaisesti. RMR-luokitus on herkempi pohjaveden vaikutukselle kuin Q-luokitus. Suomen oloissa tunneli on yleensä täysin kuiva tai kostea. Tippuvat ja virtaavat tapaukset ovat meillä melko harvinaisia. Määritys voidaan suorittaa myös mitattujen vuotovesien perusteella. Pohjavesi olosuhteita arvioitaessa on huomioitava myös tunnelin pohjan vuodot. Näiden havaitseminen voi olla joskus hankalaa. Tunnelin vuodot voidaan määrittää mittapatojen avulla.

Kairasydänluokitusten yhteydessä pohjaveden pisteytys saadaan samalla periaatteella kuin J_w arvo Q-luokituksen yhteydessä. Kuivissa rei'issä tai kun vesimenekki on pieni, < 1 Lugeon, voidaan olettaa, että tunneli on täysin kuiva ja pohjaveden pisteytys = 15. Kun vesimenekki kasvaa arvoon 1-10 Lugeon, tunneli on kostea tai märkä, pisteytys = 10 tai 7. Tätä suuremmilla vesimenekkiarvoilla (> 10 Lugeon) ja kalliomassoilla joissa on avoimia rakoja voidaan käyttää pienempiä pisteytyksiä. Vesimenekkikoe ei onnistu olosuhteissa, joissa on suuria avoimia rakoja ja virtaava pohjavesi. Pohjavesiolosuhteet on tällöin arviotava muiden havaintojen perusteella. Näissä olosuhteissa esiintyy usein huomattavaa kairasydänhukkaa ja pohjaveden pisteytys voi laskea jopa arvoon 0.

3.4.4 Rakojen laatu

RMR-luokituksen uusimmassa versiossa (Bieniawski 1989) on rako-olosuhteet eritelty . Rakojen laadun yleinen kuvaus on säilytetty edelleen taulukoissa, mutta tarkempaan luokitukseen päästään käyttämällä rako-ominaisuuksia. Jotkut olosuhteet ovat keskenään vaihtoehtoisia. Esimerkiksi raon karkeudella ei ole merkitystä täytteisessä raossa. Rakotäyte aiheuttaa tällöin karkeuden vaikutuksen ylikorostamista. Tällaisissa tapauksissa voidaan käyttää suoraan taulukon 3.11 rakolaadun yleistä kuvausta. Myös alustavassa luokituksessa voidaan käyttää edelleen raon yleistä kuvausta. Koska rako-ominaisuudet ovat vaikeasti määritettävissä kairasydämistä, voidaan käyttää taulukon 3.11 antamaa rakolaadun yleistä kuvausta.

Rakojen laatu on kuvattu seuraavien ominaisuuksien perusteella:

- rakojen pituus eli jatkuvuus
- rakojen avauma
- rakopintojen karkeus
- rakotäyte
- rapautuneisuus

Laskemalla näiden tekijöiden pisteet yhteen saadaan rakojen laadun pisteytys (0...30 pistettä).

Rakojen laatu voidaan määrittää tarkemmin yksittäisten rako-olosuhteiden perusteella (Taulukko 3.13):

Taulukko 3.13. Rakojen laatu (Bieniawski 1989)

E. RAKOJEN LAATU 1)					
Rakojen pituus (jatkuvuus)	< 1 m	1...3 m	3...10 m	10...20 m	> 20 m
Pisteytys	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**
Rakojen avauma	Ei	< 0,1 mm	0,1...1 mm	1...5 mm	> 5 mm
Pisteytys	**6**	**5**	**4**	**1**	**0**
Rakopintojen karkeus	Hyvin karkea	Karkea	Lievästi karkea	Sileä	Haarniskarako
Pisteytys	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**
Rakotäyte	Ei	Kova täyte < 5 mm	Kova täyte > 5 mm	Pehmeä täyte < 5 mm	Pehmeä täyte > 5 mm
Pisteytys	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**
Rapautuneisuus	Rapautumaton	Hiukan rapautunut	Keskinkertaisesti rapautunut	Voimakkaasti rapautunut	Täysin rapautunut
Pisteytys	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**

Rakojen pituus määritetään näköhavaintojen perusteella, joko kalliopaljastumasta tai tunnelin seinistä ja katosta. Rakojen pituutta ei voida määrittää kairasydämestä. Määrityksen apuna voidaan käyttää kenttähavaintoja. Pitkät raot, jotka poikkileikkaavat koko tunnelin, ovat pysyvyyden kannalta merkittävämpiä kuin lyhyet raot. Isoilla lyhyillä raoilla on kuitenkin paikallista merkitystä pysyvyyteen. Ne muodostavat usein lohkoja, jotka täytyy huomioida vakavuustarkasteluissa.

Rakoavaumassa tapahtuu yleensä suurta vaihtelua. On myös huomioitava räjäytyspaineen vaikutus rakoavaumaan. Usein räjäytyksen painevaikutus suurentaa rakoavaumaa. Rakoavauman havaitsemista helpottaa suuresti kalliopinnan pesu. Liiallinen pesu voi kuitenkin huuhtoa rakotäytteet pois. Myös jotkut sedimenttikivet halkeilevat kastumisen ja kuivumisen seurauksena. Avauman havaitsemista kenttäoloissa helpottaa pieni veitsi, jonka avulla saadaan myös näyte rakotäytteestä.

Rakopintojen karkeus tai karkeuden laatu on rakojen leikkauslujuuden kannalta tärkeä ominaisuus. Karkeudet, jotka ilmenevät rakopintojen lukkiutumisena, kun rakopinnat ovat puhtaat ja tiiviit, estävät rakopintojen leikkaussiirtymän. Rakopintojen karkeus määritetään RMR-luokituksessa pienen mittakaavan karkeuden mukaan. Karkeudella on tavallisesti millimetriluokan peruspituus ja -amplitudi, jotka ovat helposti nähtävissä jopa kairasydämistä. RMR-luokituksessa on karkeudelle viisi eri luokkaa. Rakopintojen karkeudella ei ole merkitystä jos rakotäyte on paksu. Rakopinnan pienen mittakaavan karkeus pystytään arviomaan kairasydämen rakopinnoista, mutta suuren mittakaavan karkeutta ei voida arvioida kairasydämestä. Tällöin voidaan käyttäen apuna kenttähavaintoja alueelta. Vaikka RMR-määritys perustuu vain pienen mittakaavan karkeuteen, on kartoituksen yhteydessä aina huomioitava myös suuren mittakaavan karkeus.

Taulukko 3.14. Rakopintojen karkeus RMR-luokituksessa.

Rakopintojen karkeus	**Kuvaus**	**Pisteytys**
Hyvin karkea	karkea hiekkapaperi	**6**
Karkea	keskikarkea tai hieno hiekkapaperi	**5**
Lievästi karkea	sileä tai lievästi karkea	**3**
Sileä	sileä, mutta ei kiillottunut	**1**
Haarniskarako	haarniskapintainen, kiillottunut	**0**

Rakotäytteellä on kaksi vaikutusta. Ensiksi paksuudesta riippuen, rakotäyte estää rakopintojen karheudesta johtuvan lukkiutumisen. Toiseksi sillä on omia ominaisuuksia, joita ovat leikkauslujuus, permeabiliteetti ja muodonmuutosominaisuudet. Luokituksen ja kartoituksen yhteydessä kirjataan ylös rakotäytteen paksuus, tyyppi, jatkuvuus ja konsistenssi. Rakotäyte huuhtoutuu yleensä suureksi osaksi pois kairauksen yhteydessä ja vaikeuttaa sen määritystä. Määritystä helpottaa kehittyneiden kairausmenetelmien käyttö.

Kallion rapautuminen voidaan jakaa mekaaniseen ja kemialliseen rapautumiseen. Mekaaninen rapautuminen johtuu kallion jännitystilan ja lämpötilan muutoksista. Kemiallinen rapautuminen hajottaa edelleen mekaanisesti rapautunutta kalliota. Lisäksi on huomioitava esim. kasvien juurten aikaansaama mekaaninen rapautuminen. Myös tietyt bakteerit voivat edesauttaa rapautumista. Puhdas vesi ei saa aikaan kemiallista rapautumista, vaan vesi yhdessä siihen liuenneiden ainesten kanssa. Rapautuneisuus on yleensä hyvin nähtävissä rakopinnoissa sekä tunneleissa että kairasydämien yhteydessä.

Kalliomassan ja kiviaineksen rapautumisasteessa voi olla hyvin suurta hajontaa, joka voidaan määrittää kartoittaessa keinotekoisia ja luonnonrakoja. On huomioitava, että pienin kalliosta näkyvä alue ei välttämättä edusta koko kalliomassaa. Erityisesti kalliopaljastumat voivat olla esim. pakkasen rapauttamia, mutta alempana oleva kalliomassa voi olla täysin rapautumatonta.

Kaikkia rapautumisasteita ei aina voida nähdä kalliomassasta, tai niitä voi esiintyä vain hyvin pieniä määriä. Rapautumisen hajonta voi esiintyä kalliomassan huokoisuutena tai avoimina rakoina kalliossa. RMR-luokituksessa rakopintojen rapautumisen aste määritetään ISRM:n periaatteiden mukaisesti (Brown 1981). Rapautumisasteen määrityksen apuna voidaan käyttää myös rapautumisastetta kuvaavia kuvasarjoja eri kivilajeilla (Geoguide 3 1988) tai sanallisia kuvauksia (Bell 1983).

Taulukko 3.15. Rapautuneisuuden pisteytys RMR-luokituksessa (Brown 1981)

Rapautuneisuus	Kuvaus	Pisteytys
Rapautumaton (Fresh)	Ei näkyviä merkkejä kallion rapautumisesta. Terve kivi, kiteet kirkkaat. Mahdollisesti päärakopinnat kevyesti värjäytyneet.	6
Hiukan rapautunut (Sligthtly weathered)	Värjäytynyt kalliomateriaali indikoi rapautumista. Kalliomateriaali voi olla kokonaan värjäytynyt ja voi olla ulkoisesti hieman heikompaa kun rapautumaton kallio.	5
Keskinkertaisesti rapautunut (Moderately weathered)	Alle puolet kalliomateriaalista on hajonnut tai murskaantunut maaksi. Myös rapautumatonta ja värjäytymätöntä kalliota on edelleen kalliossa tai kairasydämissä.	3
Voimakkaasti rapautunut (Highly weathered)	Yli puolet kalliomateriaalista on hajonnut tai murskaantunut maaksi. Myös rapautumatonta ja värjäytymätöntä kalliota on edelleen kalliossa tai kairasydämissä.	1
Täysin rapautunut (Decomposed)	Kaikki kalliomateriaali on hajonnut tai murskaantunut maaksi. Alkuperäinen kalliomassan rakenne voi olla edelleen vahingoittumaton, mutta osa tai kaikki mineraalirakeet ovat hajonneet. Tässä luokassa voi olla materiaali ja rakenne kokonaan hajonnut maaksi. Tällöin myös sen tilavuus on muuttunut.	0

3.4.5 Rakosuuntien vaikutus

Laskemalla yhteen lähtöparametrit 1...5 saadaan ns. perus RMR-luku. Varsinainen RMR-luku riippuu lisäksi kallion rakoilun ja louhittavan tunnelin suunnista. Rakosuuntien vaikutus määritetään tiheimmän rakosuunnan mukaan taulukon 3.16 avulla. Määrittäessä valitaan onko kyseessä tunneli, perustus vai luiska. Rakoilun suunnan vaikutus kuvaillaan laadullisilla termeillä, jotka kuvaavat kuinka edullisesti rakoilu on suuntautunut louhintaan nähden. Rakoilun suunnan vaikutus louhintaan on esitetty taulukossa 3.18, joka perustuu RSR-luokituksen yhteydessä esitettyihin tutkimuksiin (Wicham ym. 1972). Jos suunnan vaikutusta ei voida huomioida, voidaan olettaa rakosuunnan vaikutuksen olevan kohtalainen (fair). Tämä voi tulla kyseeseen esim. hankkeen alkuvaiheessa, jolloin tunnelin tarkka sijainti ja muoto ei ole vielä tiedossa.

Taulukko 3.16. Rakosuuntien vaikutuksen pisteytys (Bieniawski 1989)

B. RAKOSUUNTIEN VAIKUTUS						
Rakosuunnat		**Hyvin edullinen**	**Edullinen**	**Kohtalainen**	**Epäedullinen**	**Hyvin epäedullinen**
Pisteytys	**tunnelit**	**0**	**-2**	**-5**	**-10**	**-12**
	perustukset	**0**	**-2**	**-7**	**-15**	**-25**
	luiskat	**0**	**-5**	**-25**	**-25**	**-60**

Taulukko 3.17. Rakosuuntien vaikutus louhintaan (Bieniawski 1989)

F. RAKOILUN SUUNNAN VAIKUTUS TUNNELIN LOUHINNASSA						
Rakoilun kulku tunnelia vastaan kohtisuoraan				Rakoilun kulku tunnelin suuntainen		
Louhinta kaateen viettosuunnan mukaisesti		Louhinta kaateen viettosuuntaa vastaan				Kaade 0°...20° rakoilun kulusta riippumatta
Kaade	Kaade	Kaade	Kaade	Kaade	Kaade	
45°...90°	20°...45°	45°...90°	20°...45°	45°...90°	20°...45°	
Hyvin edullinen	Edullinen	Kohtalainen	Epäedullinen	Hyvin epäedullinen	Kohtalainen	Kohtalainen

3.5 Luokituksen määritys seismisen nopeuden perusteella

Kallion laatu voidaan arvioida myös seismisen P-aallon nopeuden V_p perusteella. Kallion Q-arvo saadaan kaavalla (Grimstad ja Barton 1993):

$$Q = 10^{\left(\frac{V_p - 3500}{1000}\right)} \qquad (3.11)$$

Kohtalaisissa ja hyvissä graniiteissa ja gneisseissä ($V_p > 3\ 600$ m/s) saadaan paras vastaavuus kaavalla (Grimstad ja Barton 1993):

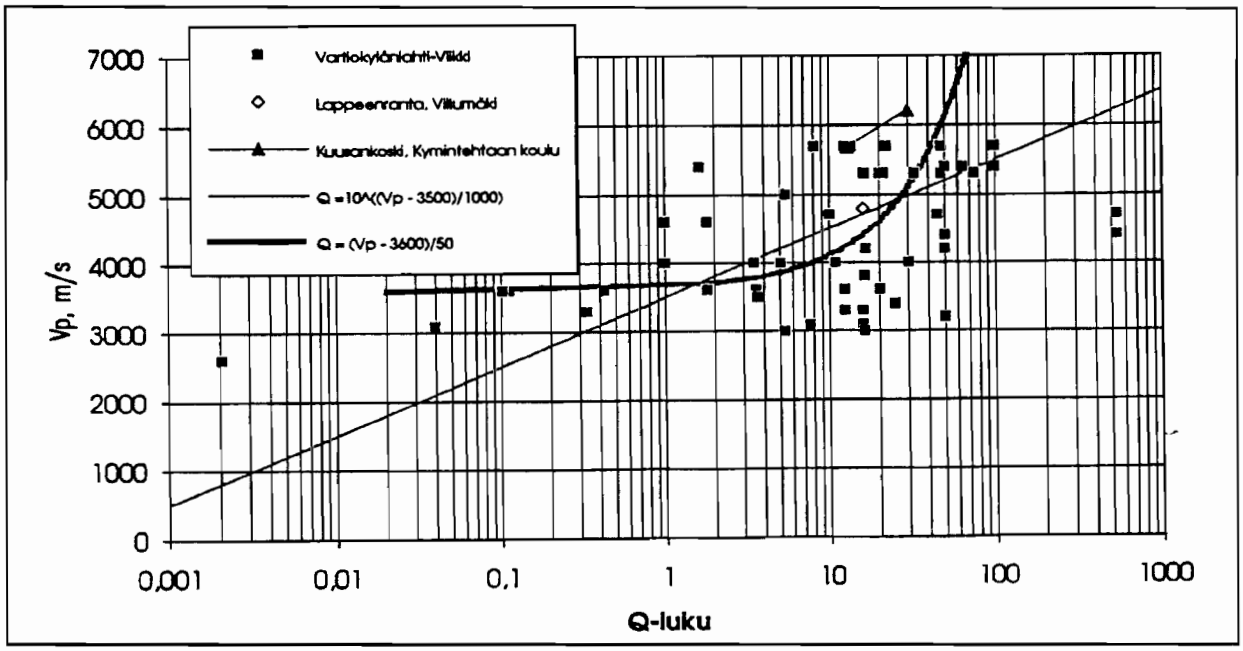
$$Q = \frac{V_p - 3600}{50} \qquad (3.12)$$

Kuvassa 3.13 on esitetty Q-luokituksen ja seismisen nopeuden välinen yhteys Suomessa tehtyjen kokeiden perusteella. Menetelmä ei anna tarkkaa Q-luokitusta, mutta on suuntaa antava muiden menetelmien ohella.

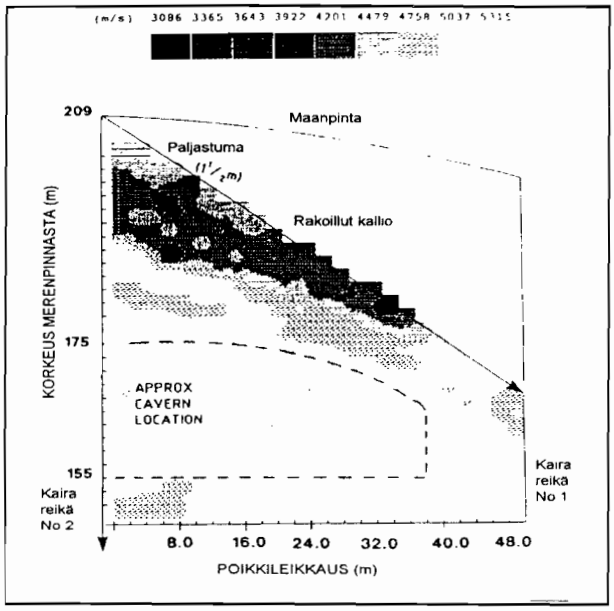
Seismisen nopeuden mittaukseen luotettavin menetelmä on reikäseisminen mittaus, koska sen avulla saadaan tietoa suunnitellun kalliotilan tasosta. Kaksireikämenetelmällä saadaan varsin hyvä kuva kalliotilaa ympäröivän kallion rakenteesta tomografian avulla (kuva 3.14). Pintaseisminen luotaus antaa tietoa vain kallion pintaosista joka saattaa olla pakkasen rapauttama. Usein seismisiä menetelmiä käytetään myös tunnustelureikien yhteydessä. Tällöin saadaan hyvä kuva välittömästi katkon edessä olevasta kalliosta (kuva 3.15).

Kalliomassan seisminen nopeus kasvaa kallion huokoisuuden (n%) vähentyessä ja vallitsevan jännitystilan ja kimmo-kertoimen kasvaessa syvyyden (H) funktiona (kuva 3.16). Kaavat ovat tarkoitettu kivilajeihin, joiden yksiaksiaalinen puristuslujuus on 100 MPa. Kivilajin puristuslujuuden poiketessa tästä, tehdään korjaus seuraavasti:

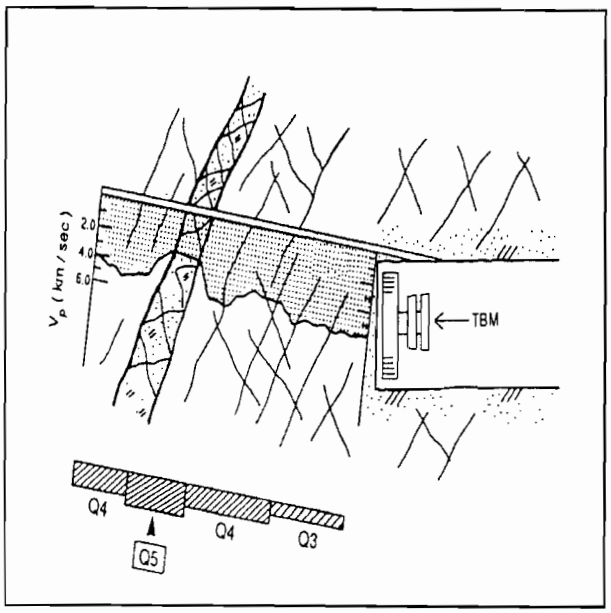
$$Q_c = Q \times \frac{\sigma_c}{100} \qquad (3.13)$$



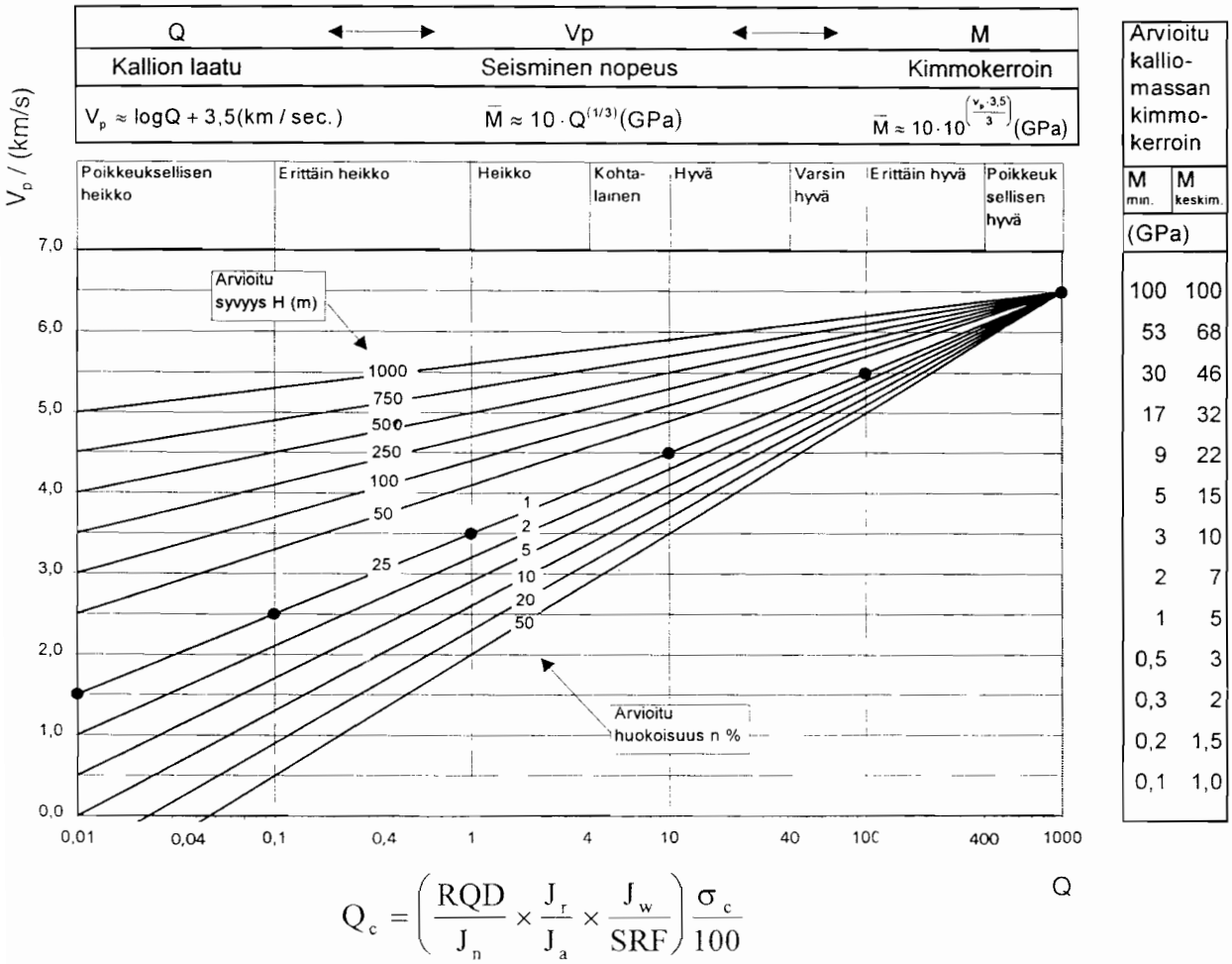
Kuva 3.13. Q-luokituksen ja seismisen nopeuden välinen yhteys Suomessa tehtyjen tutkimusten perusteella (Syrjänen 1993)



Kuva 3.14. Seismisen tomografian käyttö kalliotutkimuksissa (Barton ym. 1992).



Kuva 3.15. Seismisen nopeuden käyttö ennakkoreikien tutkimisessa (Barton ja Grimstad 1994).



$$Q_c = \left(\frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \right) \frac{\sigma_c}{100}$$

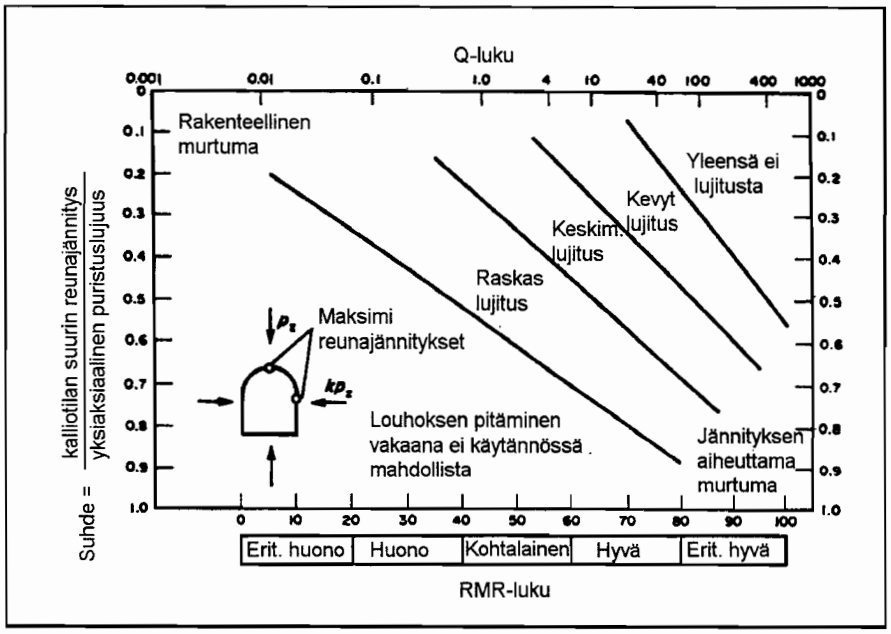
Kuva 3.16. Kalliolaadun määritys seismisen nopeuden perusteella syvyyden, huokoisuuden ja kivilajin yksiaksiaalisen puristuslujuuden mukaan (Barton ym. 1996).

4 LUJITUSSUOSITUSTEN MÄÄRITTÄMINEN LUOKITUKSEN PERUSTEELLA

Kalliotilan lujitustarvetta voidaan arvioida Q- ja RMR-luokituksen yhteydessä esitetettyjen empiiristen lujitussuositusten avulla. Näistä Q-luokituksen yhteydessä esitetyt taulukot ovat yksityiskohtaisempia ja vastaavat paremmin suomalaista lujituskäytäntöä.

Q-luokituksen yhteydessä lujitussuositus määritetään taulukosta kalliolaadun, tunnelin jännevälin tai korkeuden ja käyttötarkoituksen perusteella. RMR-luokituksen yhteydessä on esitetty vain yksi lujitussuositustaulukko käytettäväksi poraus-räjäytysmenetelmällä louhitulle "hevosenkengän" muotoiselle tunnelille, jonka jänneväli on 10 metriä ja kallion pystyjännitys < 25 MPa.

Kalliotilan lujitustarve ja rakennettavuus voidaan arvioida reunajännitysten, kalliolaadun ja kivilajin yksiaksiaalisen puristusmurtolujuuden perusteella (kuva 4.1). Yleensä Suomen kallio-olosuhteissa kalliotilan suurin reunajännitys on selvästi pienempi kuin kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus.



Kuva 4.1. Lujitusvaatimukset kalliolaadun ja reunajännityksen suhteen (Hoek ym. 1981)

4.1 Q-luokitus

4.1.1 Kalliotilan pysyvyys

Olemassa olevat luonnonluolat ja louhitut kalliotilat osoittavat, että tila voidaan tietyissä olosuhteissa jättää jopa kokonaan lujittamatta. Q-luokituksen yhteydessä on tutkittu kalliotiloja joiden jännevälit vaihtelevat 1,2 metristä 62,0 metriin. Kun kalliossa on hyvin vähän rakoja, Q-luku on noin 500...1000, ainoa jänneväliä rajoittava tekijä on kalliomassan puristuslujuus. Jos suurimman reunajännityksen ja kiven yksiaksiaalisen puristuslujuuden suhde laskee, myös SRF-parametri suurenee ja Q-luku pienenee.

Suurin mahdollinen lujittamaton jänneväli perustuu tutkittuihin louhittuihin tunneleihin ja luonnonluoliin. Q-luokitusta on tutkittu myös Uudessa Meksikossa sijaitsevissa suurissa kalkkikiviluolissa, joiden jänneväli on jopa 100 metriä (Barton 1976). Tutkimusten perusteella on saatu vahvistusta Q-luokituksen toimivuuteen. Yhdistämällä nämä tiedot louhittujen tunneleiden

vastaaviin arvoihin, voidaan muodostaa kaava suurinta tukematonta jänneväliä varten (Barton 1974):

$$L=2Q^{0,66} \qquad (4.1)$$

jossa,
L on jänneväli (m)
Q on kallion laatu.

Suunnitelutarkoituksia varten Barton on kuitenkin määritellyt varovaisemman arvion. Suurin tukematon jänneväli on nähtävissä myös lujitussuosituskaaviosta (kuva 4.5). Kun huomioidaan tunnelin käyttötarkoituksesta riippuva kerroin ESR, voidaan kaava kirjoittaa muotoon (Barton 1976):

$$L=2*ESR*Q^{0,4} \qquad (4.2)$$

Jos kallion laatu on kriittistä Q-lukua heikompaa, kalliotilassa on käytettävä lujitusta. Kriittinen Q-luku saadaan kaavalla (Barton 1976):

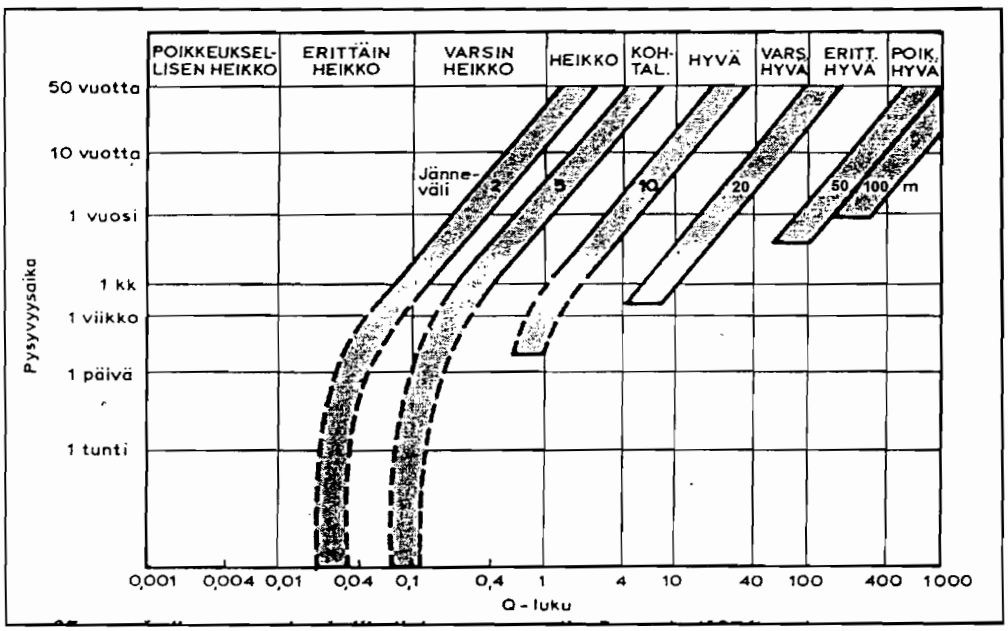
$$Q=(\frac{L}{2\times ESR})^{2,5} \qquad (4.3)$$

Erittäin hyvässä kalliossa tai kalliotila voidaan jättää kokonaan lujittamatta tietyin edellytyksin. Yleiset ehdot pysyvästi lujittamattomalle tilalle (Barton 1976):

1. $J_n \leq 9$, $J_r \geq 1.0$, $J_a \leq 1.0$, $J_w = 1.0$, SRF ≤ 2.5

Ehdolliset vaatimukset pysyvästi lujittamattomalle tilalle:

2. jos RQD ≤ 40, tulee olla $J_n \leq 2$
3. jos $J_n = 9$, tulee olla $J_r \geq 1.5$ ja RQD ≥ 90
4. jos $J_r = 1$, tulee olla $J_n < 4$
5. jos SRF > 1, tulee olla $J_r \geq 1.5$
6. jos jänneväli > 10 m, tulee olla $J_n < 9$
7. jos jänneväli > 20 m, tulee olla $J_n \leq 4$ ja SRF ≤ 1.



Kuva 4.2. Tukemattoman tunnelin pysyvyysaika Q-luokituksen mukaan (Barton ym. 1976)

Q-luokituksen ja kalliotilan mittasuhteiden avulla voidaan arvioida myös kalliotilan muodonmuutoksia (Grimstad ja Barton 1993).

4.1.2 Jännevälin määritys

Lujitusta määrittäessä tarvitaan Q-arvon lisäksi myös jänneväli (leveys) tai seinien lujitusta määrittäessä tunnelin korkeus. Jänneväli B on tunnelin mitattu leveys ja korkeus H mitataan yleensä lattiasta holvin ylimpään kohtaan. Koska tarvittavan lujituksen määrä riippuu kallion laadun lisäksi myös tunnelin tai kalliotilan mittasuhteista, on määritettävä ensin tunnelin laskennallinen jänneväli D_e.

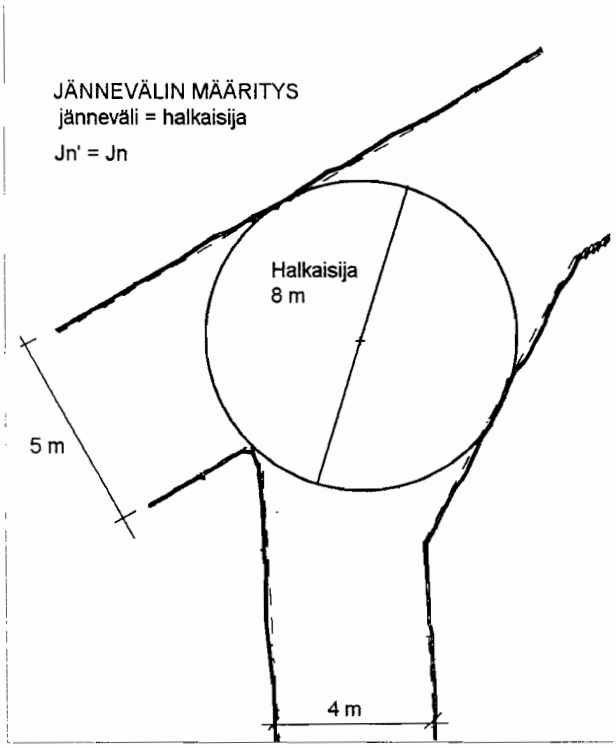
Usein jänneväli ei ole yksiselitteisesti määritettävissä. Jänneväli mitataan yleensä suoraan tunnelin poikki, jolloin saatu leveys tai halkaisija on jänneväli. Seinän lujituksia määrittäessä mitataan seinän korkeus seinän alla olevasta lattiasta tunnelin holviin. Jos tunnelin holvi on normaalia korkeampi, arvioidaan korkeudeksi se korkeus mikä tunnelilla on normaalin korkuista holvia käytettäessä. Normaalina voidaan pitää holvia jonka nuolikorkeus on B/5...B/7. Suorakulmaisissa kuiluissa käytetään jännevälinä kuilun seinämän leveyttä ja pyöreissä kuiluissa halkaisijaa.

Risteysalueilla ja tunnelin sisäänmenoaukoissa käytetään Q-arvoa määrittäessä korjattua rakosuunnan lukumäärätekijää J_n' :

- risteyksissä $J_n' = 3 \times Jn$
- sisäänmenoaukoissa $J_n' = 2 \times J_n$.

Tällöin jännevälinä B käytetään tunnelin suoran osuuden jänneväliä.

Toinen tapa määrittää jänneväli risteysalueissa, kuprikoissa yms. on sijoittaa ko. alueelle ympyrä. Jännevälinä käytetään tällöin ympyrän halkaisijaa. Menetelmä on yksinkertainen ja sopii moniin erilaisiin kalliotiloihin. Tällöin arvoa J_n ei korjata edellä esitetyillä korjauskertoimilla. Menetelmä on helppokäyttöinen ja sopii myös monimuotoisten tilojen jännevälin määrityksiin.



Kuva 4.3. Jännevälinä voidaan käyttää myös määritysalueen sisälle sijoitetun ympyrän halkaisijaa. Tällöin $J_n' = J_n$, koska kasvanut halkaisija huomio lisälujituksen (Løset 1995c)

4.1.3 Käyttötarkoituksen vaikutus

Q-luokituksen lujitussuosituksen määrittämistä varten saadaan kalliotilan laskennallinen jänneväli D_e jakamalla mitattu jänneväli B tai korkeus H kalliotilan käyttötarkoitusta kuvaavalla vakiolla ESR. ESR-luku on tavallaan käänteinen varmuuskerroin sortumista vastaan. Laskennallinen jänneväli saadaan kaavalla 4.4 (Barton ym. 1974):

$$D_e = \frac{B}{ESR} \qquad (4.4)$$

Taulukko 4.1. ESR-luku (Løset 1995a)

Luokka	Kalliotilan tyyppi	ESR
A	Väliaikaiset kaivostunnelit jne.	noin 3-5
B	Pystykuilut a) poikkileikkaus ympyrä b) poikkileikkaus suorakaide	 noin 2,5 noin 2,0
C	Pysyvät kaivostunnelit, vesitunnelit (ei suuripaineiset), tutkimustunnelit, pilot tunnelit jne.	1,6
D	Varastot, vedenpuhdistamot, pienet liikenne- ja rautatietunnelit, vesivoimalaitoksen aaltoilutilat, ajotunnelit jne.	1,3
E	Asemahallit, suuret tie- ja rautatietunnelit, väestönsuojat, pääsisäänkäynnit jne.	1,0
F	Ydinvoimalaitokset, rautatieasemat, urheilu- ja yleisötilat, tehtaat jne.	0,8
G	Tärkeät tilat, joilla on pitkät käyttöajat	0,5

Tarkan ESR-luvun antaminen eri tyyppisiin tunneleihin on hankalaa, koska ESR-luku riippuu tunnelin tärkeydestä, liikenteestä tunnelissa, huollettavuudesta sekä suunnitellusta käyttöiästä. Pitkäikäisissä tunneleissa täytyy erityisesti huolehtia lujituksen korroosion estosta.

NGI ei tavallisesti yhdistä varmuuskerrointa ja ESR-arvoja. Sen sijaan he yrittävät analysoida hyväksyttävän tippuvan kiven määrän. Esimerkiksi väliaikaisissa tunneleissa joissa ESR = 3, jopa tunnelin täydellinen sortuminen tunnelin käytön jälkeen voidaan sallia. Vesitunneleissa (ESR = 1,6) pieni kiven tiputtelu voidaan hyväksyä, mutta kiviä ei saa tippua niin paljoa, että tunneli tukkeutuu. Tietunneleissa (ESR=1,0) vain hyvin pieni kiven tippuminen tunnelin verhouksen päälle voidaan sallia. Erittäin tärkeissä kalliotiloissa, ESR 0,5 - 0,8, ei voida sallia minkäänlaista kiven tippumista, ja varmuuskertoimen kiven tippumista vastaan täytyy olla merkittävästi suurempi kuin 1. (Løset 1995c)

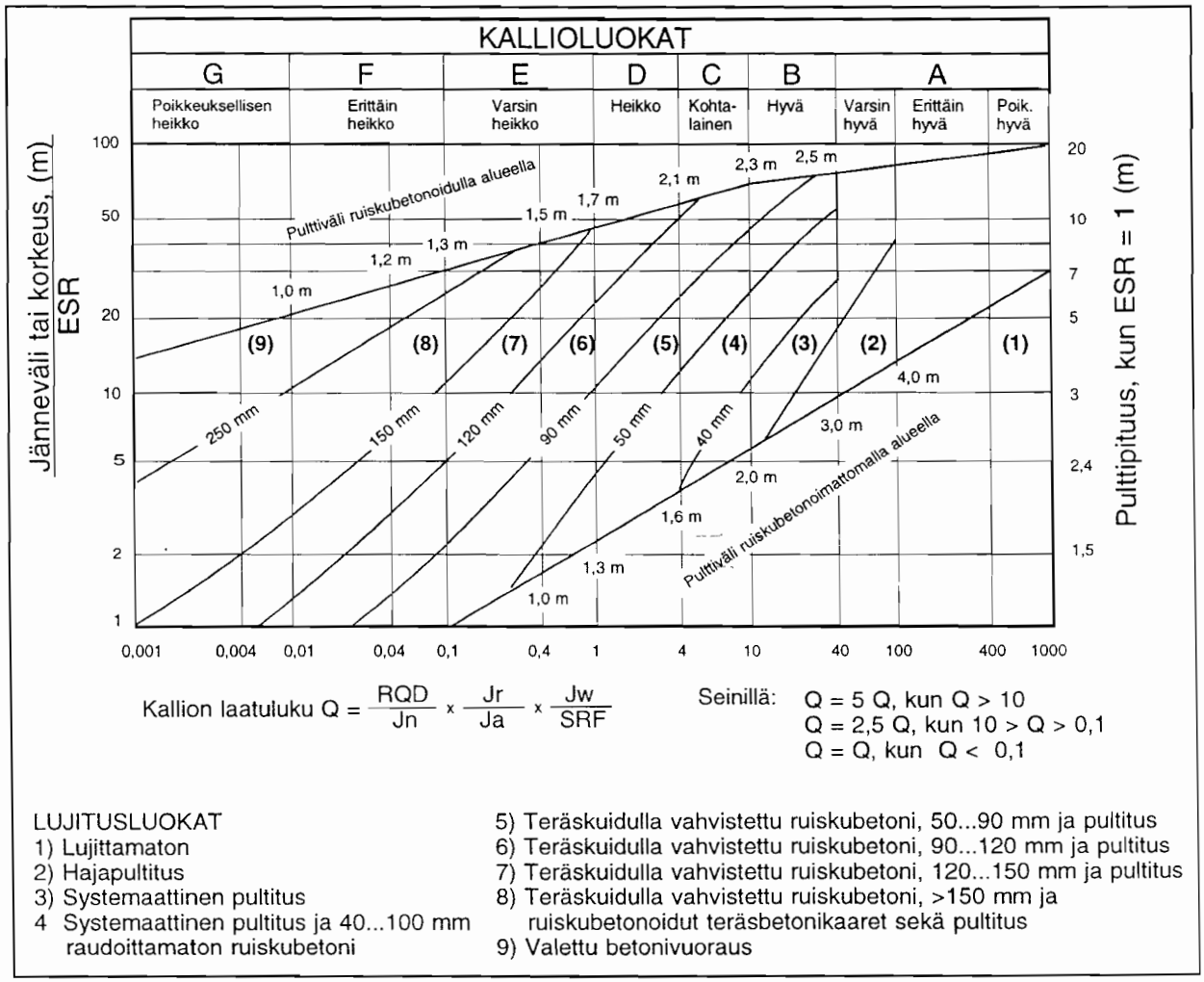
Taulukossa 4.2 on NGI:n esittämiä täsmennyksiä ESR-taulukkoon (Løset 1995c). Niitä on kuitenkin pidettävä vain ehdotuksina, koska tunnelien tarkemmat yksityiskohdat eivät ole tiedossa. Jokainen tapaus on käsiteltävä erikseen riippuen turvallisuudesta, liikenteestä, huoltomahdollisuuksista ja käyttöajasta.

Taulukko 4.2. Ehdotettuja ESR-lukuja eri tunneleihin (Løset 1995c)

Tunnelin tyyppi	ESR	Tunnelin tyyppi	ESR
Viemäritunneli (gradientti ja paineviem.)	1,3-1,6	Tekninen tunneli ilman kaukolämpöä	1,3-1,6
Jätevedenpuhdistuslaitos	1,0-1,3	Liikennetunneli	1,0-1,3
Vesijohtotunneli	1,0-1,6	Metrotunneli	0,9
Raakavesitunneli	1,6-2,0	Hiekkasiilo	1,6
Jäähdytysvesitunneli	1,0-1,3	Öljysäiliö	1,2
Kaukolämpötunneli	1,3	Öljysäiliön pumppausalue	1,0
Kaukolämpötunnelin pumppuhallit	1,0	Ydinjätevarasto	1,0

4.1.4 Lujitussuositukset

Luokituksen lähtökohtana on olettamus, että kalliomassat joilla on sama Q-arvo vaativat samanlaisen lujituksen samanlaisissa kalliotiloissa. Q-luokituksen empiirinen lujitussuositus taulukko perustuu nykyisin 1050 erilaiseen toteutuneeseen kalliorakennuskohteeseen, joista on määritetty Q-luokitus ja toteutettu lujitus. Lujitussuositustaulukko onkin koottu yhteenveto aiemmin tehdyistä lujituksista erilaisissa kallio-olosuhteissa ja erilaisissa tunneleissa ja kalliotiloissa. Taulukkoa ei pidä tulkita selvänä lujitusohjeena, sillä lujituksen mitoittamisessa on aina huomioitava paikalliset erityisvaatimukset. Esimerkiksi putoavia lohkoja ei voida määrittää luokituksen avulla, vaan niitä varten on tehtävä erillinen tarkastelu.



LUJITUSLUOKAT
1) Lujittamaton
2) Hajapultitus
3) Systemaattinen pultitus
4 Systemaattinen pultitus ja 40...100 mm raudoittamaton ruiskubetoni
5) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 50...90 mm ja pultitus
6) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 90...120 mm ja pultitus
7) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 120...150 mm ja pultitus
8) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, >150 mm ja ruiskubetonoidut teräsbetonikaaret sekä pultitus
9) Valettu betonivuoraus

Kuva 4.4. Lujitussuositukset Q-luokituksen mukaan (Grimstad ym. 1993).

Katon lujitus

Kaaviosta saatava pulttiväli ei tarkoita niinkään täsmällistä pulttiväliä, vaan siitä saadaan pikemminkin tarvittavien pulttien määrä. Työmaalla pultit asennetaan rakoilun mukaan pulttiväliä vaihdellen. Jos pultitus tehdään ruiskubetonoinnin jälkeen eikä rakoilua nähdä, pultitus asennetaan käyttäen suositusten mukaisia pulttivälejä.

Kaaviossa on esitetty lujitussuositus myös rakenteelle, jossa ruiskubetonointi on korvattu tihennetyllä pultituksella. Tällöin käytetään alempaa saraketta pulttivälin määritykseen.

Seinien lujitus

Luokitusta voidaan käyttää myös seinien lujitustarpeen määrittämiseen. Seinien lujitus perustuu muutettuun Q-arvoon Q_w. Tällöin on Q-arvo kerrottava kalliolaadusta riippuvalla korjauskertoimilla seuraavasti (Barton ym. 1974):

a) valitse $Q_w = 5 \times Q$ kun $Q > 10$
b) valitse $Q_w = 2{,}5 \times Q$ kun $0{,}1 < Q \leq 10$
c) valitse $Q_w = 1{,}0 \times Q$ kun $Q \leq 0{,}1$

Huom. 1 Käytä tunnelin kokonaiskorkeutta (H) seinien tuennan suunnitteluun.
Huom. 2 Q on kallion yleinen laatu tarkasteluna tunnelin holvista tai seinistä. Kallion laadun paikallista vaihtelua varten (holvissa tai seinissä), kartoita paikallisesti ja muuta lujitusta soveliaaksi. Q_w ei ole tunnelin seinästä määritetty Q-arvo.

4.1.5 Pienten heikkousvyöhykkeiden lujitus

Kun heikkousvyöhyke on kapea eikä sisällä paisuvaa tai pehmenevää savea ei sitä tarvitse luokitella yleensä erikseen. Tällaisessa tapauksessa heikkousvyöhyke on kuitenkin pysyvyyden kannalta heikoin kohta ja määrää parametrien J_r ja J_a arvot. Parametrit RQD, J_n, J_w ja SRF määritetään ympäröivän kallion mukaan.

Pienien heikkousvyöhykkeiden lujitus riippuu vyöhykkeen leveydestä. Esim. 5 metriä leveä savivyöhyke vaatii kokonaan toisenlaisen lujituksen kuin 0,5 metrin levyinen savivyöhyke jos itse vyöhykkeillä on sama Q-arvo. Ratkaisevaa lujituksen kannalta on mm. se voidaanko lujitus ankkuroida hyvään sivukiveen vai ei. Tällainen ankkurointi voidaan tavallisesti tehdä kun heikkousvyöhykkeen leveys on < 2 metriä. Vyöhykkeissä joiden leveys on < 2 metriä ei voida vyöhykkeen Q-arvoa käyttää lujituksen määrityksen perustana. Sen sijaan voidaan käyttää vyöhykkeen ja sivukiven keskimääräistä arvoa lujituksen perustana. Tämä keskimääräinen Q-arvo voidaan laskea empiirisellä kaavalla 4.5 (Løset 1990):

$$\log Q_m = \frac{b * \frac{1}{\sin\alpha} * \log Q_z + \log Q_r}{b * \frac{1}{\sin\alpha} + 1} \qquad (4.5)$$

jossa,
Q_m on kallion keskimääräinen Q-arvo
Q_z heikkousvyöhykkeen Q-arvo

Q_r sivukiven Q-arvo (korkeintaan 2*lujittamattoman ja lujitetun kalliotilan raja-arvo ko. jännevälillä)
b heikkousvyöhykkeen leveys metreinä.
α heikkousvyöhykkeen kulma tunnelin pituusakseliin nähden

Heikkousvyöhykkeen leveys tunnelin pituusakselin suunnassa saadaan kaavasta 4.6:

$$b_t = b\frac{1}{\sin\alpha} \qquad (4.6)$$

jossa,
b_t on heikkousvyöhykkeen leveys tunnelin pituusakselin suuntaisesti.

Yleensä kaavasta 4.5 käytetään yksinkertaisempaa muotoa kaava 4.7 (Løset 1990):

$$\log Q_m = \frac{b*\log Q_z + \log Q_r}{b+1} \qquad (4.7)$$

Jossa tunnelin ja heikkousvyöhykkeen välinen kulma huomioidaan seuraavasti:
Käytä 1*b kun tunnelin ja heikkousvyöhykkeen välinen kulma on 90°...45°
Käytä 2*b kun tunnelin ja heikkousvyöhykkeen välinen kulma on 45°...20°
Käytä 3*b kun tunnelin ja heikkousvyöhykkeen välinen kulma on 20°...10°
Käytä 4*b kun tunnelin ja heikkousvyöhykkeen välinen kulma on < 10°

Tilanteissa, joissa sivukiven Q-arvo on hyvin korkea, kaava antaa liian korkean keskimääräisen Q-arvon. Ratkaisevaa tässä on se, onko sivukivi riittävän hyvää lujitusrakenteen ankkurointia varten. Sivukiven katsotaan olevaan riittävän hyvää, kun sen Q-arvo on korkeampi kuin lujitetun ja lujittamattoman kalliotilan raja-arvo Q_r kyseisellä jännevälillä. Jos Q-arvo on 10 kertaa raja-arvoa Q_r korkeampi se tuskin vaikuttaa lujitukseen, mutta vaikuttaa selvästi keskimääräiseen Q-arvoon. Tästä johtuen sivukiven Q-arvo kaavassa voi olla korkeintaan 2 * Q_r .

Vaihtoehtoisesti kaavan 4.5 tai 4.7 käytön sijasta voidaan keskimääräinen Q-arvo määrittää suoraan kartoituksen yhteydessä. Se ei ole kuitenkaan yhtä täsmällinen erityisesti savivyöhykkeissä jotka ovat hyvässä sivukivessä. Parametrien J_n, J_r ja J_a valinta on hankalaa. Sen sijaan keskimääräinen RQD-arvo voidaan helposti määrittää. Keskimääräinen SRF-arvo asetetaan suuremmaksi kuin 1, yleensä 2,5 tai 5.

4.1.6 Louhinnan aikaisen lujituksen määritys

Q-luokitusta voidaan käyttää myös louhinnan aikaisen lujituksen määrittämiseen.

Välitöntä eli louhinnan aikaista lujitustarvetta arvioitaessa suositellaan käytettäväksi seuraavia kertoimia (Barton ym. 1974):

$$ESR = 1{,}5 * ESR \;\; ja \;\; Q = 5 * Q \;\; (katto) \;\; tai \;\; Q_w = 5 * Q_w \;\; (seinät) \qquad (4.8)$$

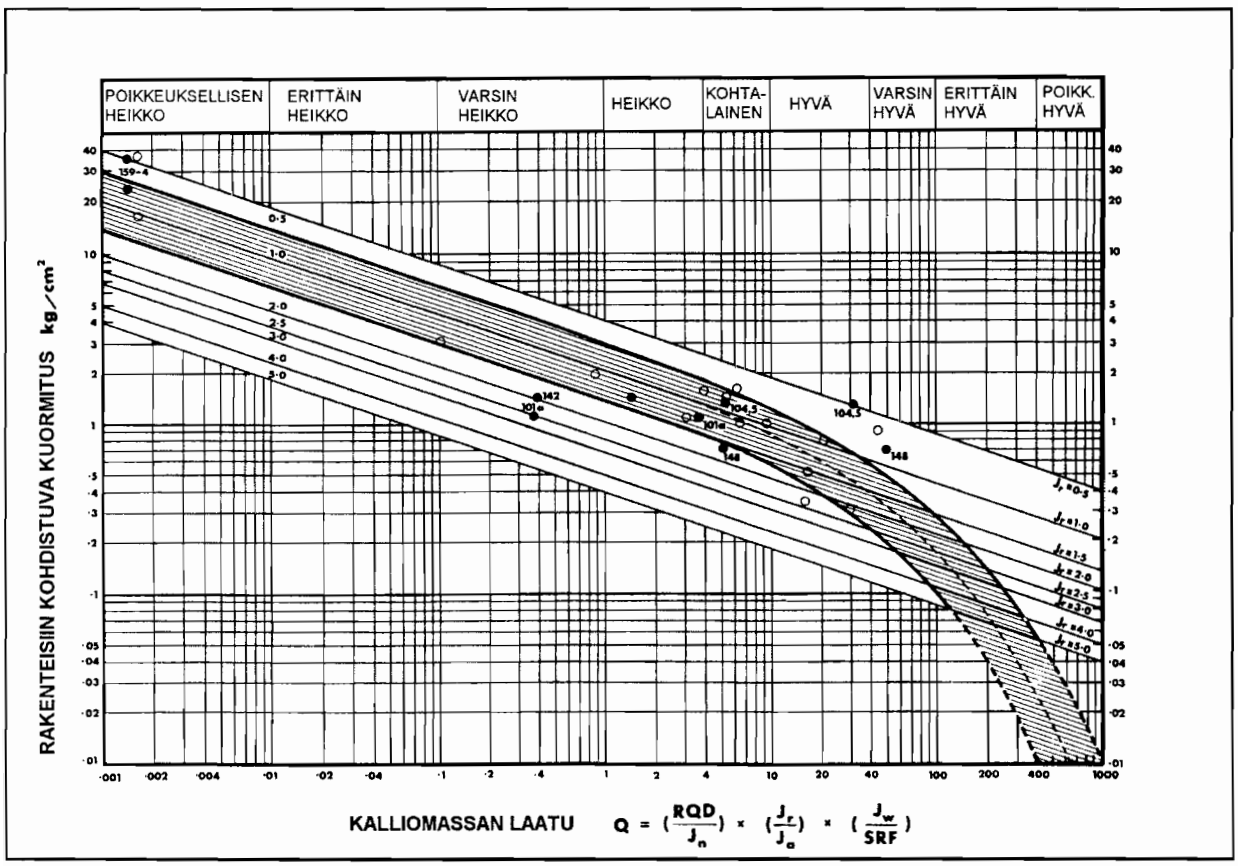
ESR arvon antaminen louhinnan aikaista lujitusta varten on hankalaa. Esimerkiksi vesitunnelissa, ESR = 1,6, usein voidaan hyväksyä työnaikana vähemmän kiven tippumista kuin käytön aikana. Tämän takia työnaikainen pultitus voi olla usein enemmän kuin riittävä käytön aikana. Toisaalta savivyöhykkeet voivat olla vakaita niin kauan kun ne ovat kuivia, jolloin vain vähäistä työnaikaista

lujitusta tarvitaan. Savivyöhykkeet on kuitenkin tuettava melko voimakkaasti sekä pulteilla että ruiskubetonilla.

Toinen tapa jota voidaan käyttää louhinnan aikaisen lujitustarpeen määrittämiseen on tunnelin rinnastaminen väliaikaiseen kaivostunneliin, jolloin käytetään ESR-arvoa 3...5. Tällöin Q-arvoa ei muuteta, jolloin suositeltava pulttitiheys on sama kuin lopullisessa lujituksessa, mutta suositeltava ruiskubetonin määrä on pienempi.

4.1.7 Lujitusrakenteisiin kohdistuva kuormitus

Rakenteisiin kohdistuva kuormitus riippuu lähinnä kallion laadusta, rakosuuntien lukumäärästä ja rakopintojen karkeudesta. Cordingin ym. (1972), Singhin ym. (1992) ja Geelin ym. (1995) kokoonpuristumattomissa kallioissa tekemien tutkimusten mukaan kalliotilan mittasuhteilla ei ole juurikaan vaikutusta lujituksiin kohdistuvaan kuormitukseen (Bhasin ja Grimstad 1996). Toisaalta Terzaghin (1946), Wichamin ym. (1972) ja Bieniawskin (1973, 1988) mukaan kuormitus kasvaa suorassa suhteessa tunnelin kokoon (Bhasin ja Grimstad 1996). Kuorman ja kalliolaadun välisen suhde voidaan lukea kuvan 4.5 kaaviosta (Barton ym. 1974):



Kuva 4.5. Empiirinen menetelmä lujituskuorman arvioimiseksi. Kuvassa olevat pisteet ovat esimerkkitapauksia (Barton ym. 1974)

Lujituksiin kohdistuva kuormitus voidaan myös laskea kaavan 4.9 avulla (Barton ym. 1974):

$$P_{katto}=(\frac{200}{J_r})\ Q^{-1/3}\ kPa \qquad (4.9)$$

Kuvan 4.6 kaaviossa ei voida esittää useampia muuttujia. Tarkempaan tulokseen päästään kaavalla 4.10 , jossa on huomioitu myös rakosuuntien lukumäärä erillisenä terminä (Barton ym. 1974):

$$P_{katto} = \frac{200 J_n^{1/2} Q^{-1/3}}{3 J_r} \; kPa \qquad (4.10)$$

Kaavalla voidaan laskea yhtä hyvin myös seinien lujituskuorma, jolloin $Q = Q_w$ ja Q_w = 1xQ...5xQ kalliolaadusta riippuen.

Haluttaessa huomioida kalliotilan koko, voidaan kuormitus laskea kaavan 4.11 avulla (Bhasin ja Grimstad 1996). Erityisesti huonoissa ja kokoonpuristuvissa kalliolaaduissa Q-luokitus aliarvioi lujituksiin kohdistuvaa kuormitusta suurissa kalliotiloissa. Tämän johdosta on kehitetty kaava joka huomioi kalliotilan mittasuhteiden vaikutuksen lujituskuormaan.

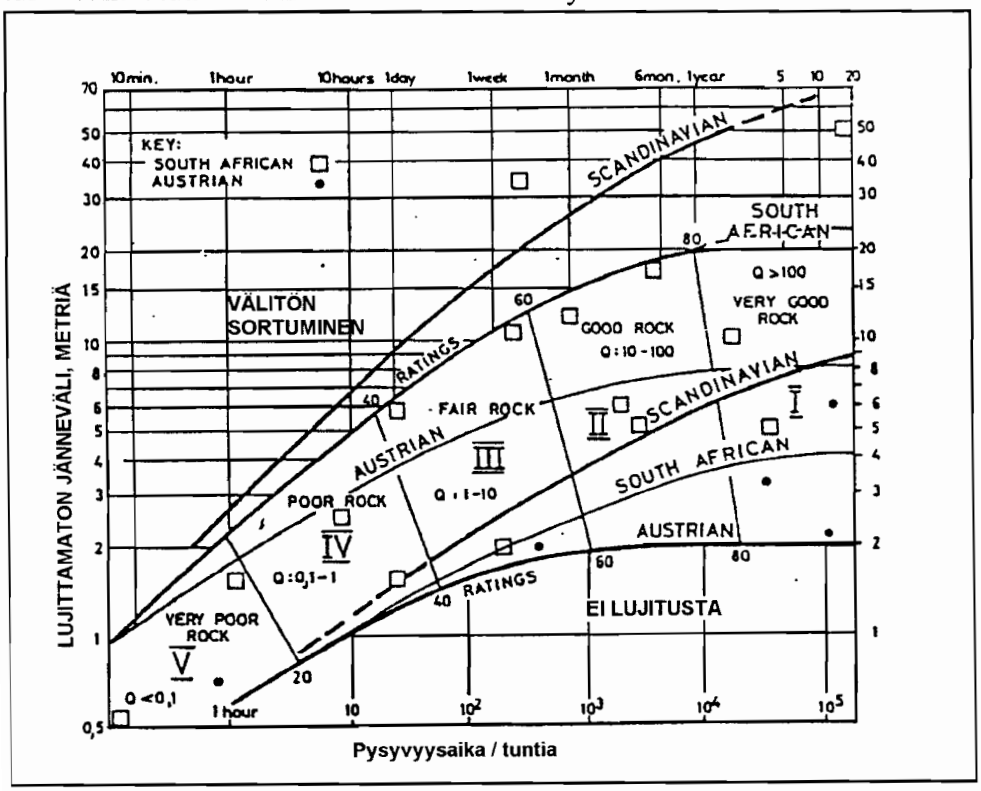
$$P_{katto} = \frac{40D}{J_r} \, Q^{-1/3} \; kPa \qquad (4.11)$$

jossa,
D on kalliotilan todellinen jänneväli tai halkaisija (m)

4.2 RMR-luokitus

4.2.1 Kalliotilan pysyvyys

Kuvan 4.6 kaaviosta voidaan havaita, että pohjoismaiset kovat kalliot ovat pysyvyyden kannalta Itävallan ja Etelä-Afrikan pehmeitä kallioita parempia. Bieniawskin esittämä kallioluokkien pysyvyysaika, koheesio ja kitkakulma ovat varsin konservatiivisia ja niiden käyttöön suunnittelussa tulee suhtautua varauksella. Nämä on esitetty taulukossa 4.3.



Kuva 4.6. Tukemattoman jännevälin pysyvyysaika (Bieniawski 1984)

Taulukko 4.3. Kallioluokkien pysyvyys, koheesio ja kitkakulma (Bieniawski 1989)

D. KALLIOLUOKKIEN MERKITYS					
Luokka	I	II	III	IV	V
Pysyvyysaika	20 vuotta 15 m:n jännevälillä	1 vuosi 10 m:n jännevälillä	1 viikko 5 m:n jännevälillä	10 tuntia 2,5 m:n jännevälillä	30 minuuttia 1 m:n jännevälillä
Kalliomassan koheesio	> 400 kPa	300...400 kPa	200...300 kPa	100...200 kPa	< 100 kPa
Kalliomassan kitkakulma	> 45°	35°...45°	25°...35°	15°...25°	< 15°

4.2.2 RMR-luokituksen lujitussuositukset ja lujituskuormat

Bieniawski on julkaisut lujitussuosituksen poraus-räjäytysmenetelmällä louhitulle "hevosenkengän" muotoiselle tunnelille, jonka jänneväli on 10 metriä ja kallion pystyjännitys < 25 MPa (taulukko 4.4). Suositus on konservatiivinen (Bieniawski 1989).

Taulukko 4.4. Lujituksen ja louhinnan suuntaviivat RMR-luokituksessa. (Bieniawski 1989).

Kallioluokka	**Louhinta**	**Pultitus (ø 20 mm, juotetut pultit)**	**Ruiskubetonointi**	**Teräskaaret**
I- erittäin hyvä kallio RMR: 81-100	Normaali tunnelilouhinta, 3 m katko	Normaalisti ei lujitusta, paikoitellen hajapultitus		
II - hyvä kallio RMR: 61-80	Normaali tunnelilouhinta, 1-1,5 m katko. lopullinen lujitus 20 m tunnelin perästä.	Paikallisesti kattoon 3 m pultteja 2,5 m ruutuun. Verkotus paikoitellen tarvittaessa	50 mm katossa tarvittaessa	Ei
III - kohtalainen kallio RMR: 41-60	Välitön lujitus jokaisen räjäytyksen jälkeen. Lopullinen lujitus 10 metriä tunnelin perästä.	Järjestelmäpultitus 1,5- 2,0 m ruutuun, pultin pituus 4 m, kattoon ja seinille. Verkotus katossa.	50-100 mm katossa ja 30 mm seinissä	Ei
IV - huono kallio RMR: 21-40	Kattoperä- ja pengerlouhinta: kattoperässä 1,0-1,5m katko Lujitus louhinnan yhteydessä 10 metriä tunnelin perästä.	Järjestelmäpultitus 1,0- 1,5 m ruutuun, pultin pituus 4-5 m. Verkotus katossa ja seinissä.	100-150 mm katossa ja 100 mm seinissä	Kevyet tai keskiraskaat teräskaaret 1,5 metrin välein tarvittaessa.
V - erittäin huono kallio RMR: < 20	Osittaislouhinta 0,5-1,5m kattoperässä. Lujitus louhinnan yhteydessä 10 metriä tunnelin perästä. Ruiskubetonointi mahdollisimman pian räjäytyksen jälkeen.	Järjestelmäpultitus 1,0- 1,5 m ruutuun, pultin pituus 5-6 m. Verkotus katossa ja seinissä. Pultin päät jätetään näkyviin. (invert bolting)	150-200 mm katossa, 150 mm seinissä ja 50 mm tunneliperässä	Keskiraskaat tai raskaat teräskaaret 0,75 metrin välein, tarvittaessa esituenta.

RMR-luokituksen yhteydessä on esitetty kaava, minkä avulla voidaan arvioida lujitusrakenteisiin kohdistuva kuorma kallion laadun ja kalliotilan jännevälin perusteilla.

$$P = (\frac{100 - RMR}{100}) B \varrho \, kPa \qquad (4.12)$$

jossa,

B	on	jänneväli (m)
RMR		kallion laatuluku
ϱ		kallion ominaispaino (kN/m^3)

RMR-luokituksen yhteydessä on esitetty myös graafinen menetelmä, jolla voidaan tarkastella kalliomassan, tunnelin ja lujituksen ominaisuuksia ja käyttäytymistä (Liite 10).

5 LUOKITUSTEN MÄÄRITTÄMINEN KÄYTÄNNÖN KOHTEISSA

Tutkimuksen yhteydessä suoritettiin joitakin kallioluokituksia, joiden tarkoituksena oli perehtyä luokituksissa käytettyihin menetelmiin sekä eri lähtöparametrien määrittämiseen. Helsingin kaupungin geotekninen osasto sai vieraakseen Fredrik Løsetin Norjan geoteknillisestä instituutista (NGI). Vierailun aikana suoritettiin muutamia erilaisia kallioluokituksia, sekä keskusteltiin Q-luokituksen yksityiskohdista.

Luokitus määritettiin kallionpinnasta seuraavissa kohteissa:

- Forumin pysäköintiluolan laajennus
- Otaniemen keskusväestönsuoja
- Töölö-Alppila vesijohtotunneli
- Vuosaaren B-voimalan jäähdytysvesitunneli ja öljysäiliön ajotunneli

Luokitukset määritettiin valituissa kohteissa tunnelin seinästä ja katosta. Otaniemessä määritettiin luokitus lisäksi tunnelin yläpuolisesta kalliopaljastumasta ja kallioleikkauksesta.

Luokitus määritettiin kairasydämien perusteella seuraavissa kohteissa:

- Maunulan väestönsuojan kalliotutkimuskairaukset
- TVO:n kallionäytekairauksista 400 - 900 m syvyydeltä Länsi-Suomessa Kivetyn ja Olkiluodon alueilla
- Töölö-Alppila vesijohtotunneli, pääradan alitus Tivolitien kohdalla

Kohteista on esitetty lyhyt kuvaus kohteesta, määritetyt parametrit ja laskettu luokitus sekä määritykseen liittyneitä yksityiskohtia valituilla määritysalueilla. Valituista kohteista määritettiin Q-luokitus ja osasta kohteita määritettiin vertailun vuoksi myös RMR-luokitus. Q- ja RMR-luokituksia voidaan vertailla keskenään muunnoskaavojen avulla. Suomen kallio-olosuhteissa päästään melko hyvään tarkkuuteen kaavalla 5.1:

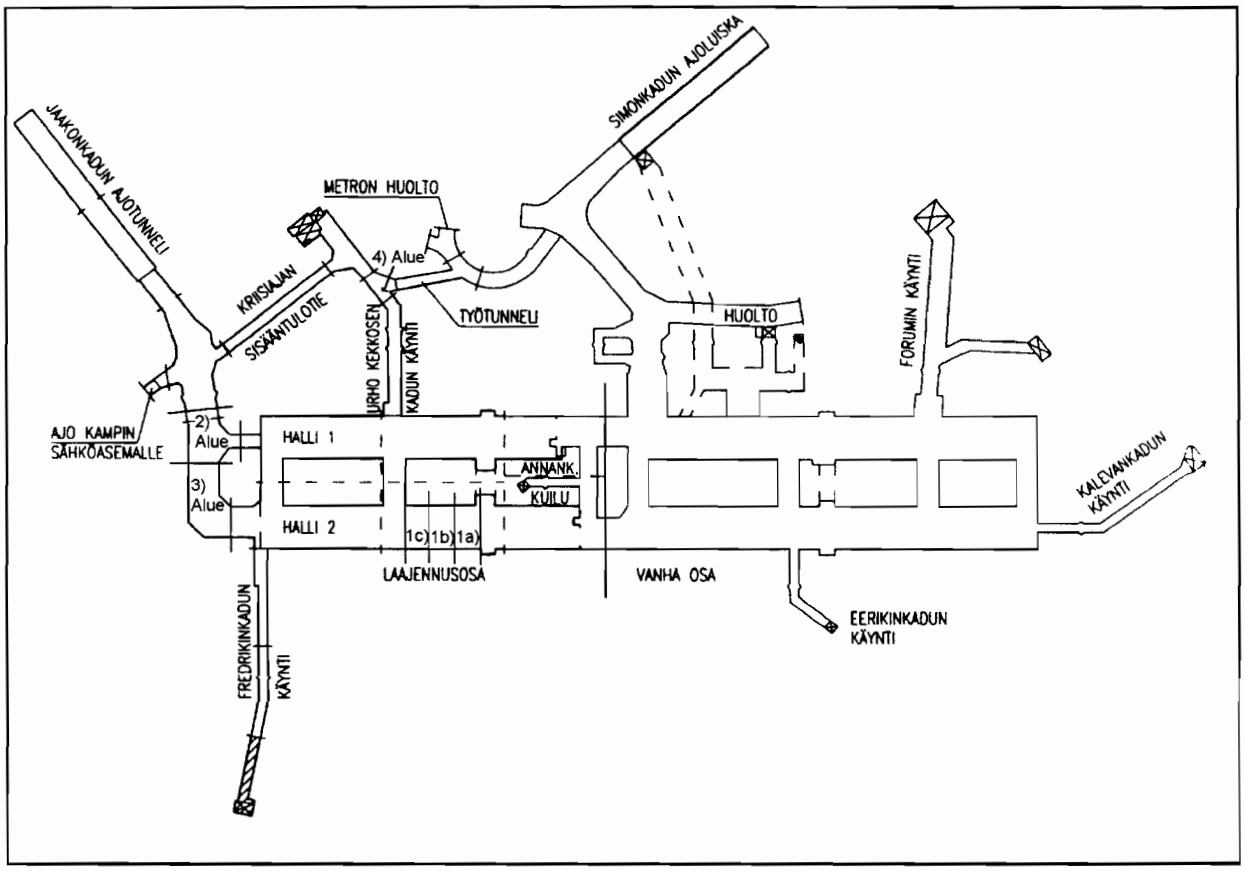
$$RMR = 9 \ln Q + 44 \qquad (5.1)$$

Näin saatu RMR-luku on nimetty taulukoissa RMRQ:ksi.

Valittuihin kohteisiin määritettiin myös Q-luokituksen antamat lujitussuositukset. Tutkimuksessa ei ole vertailtu suosituksia toteutuneisiin lujituksiin, koska määritysten tarkoituksena oli luokitusmenetelmien kokeileminen käytännössä.

5.1 Forumin pysäköintiluolan laajennus

Forumin pysäköintihallin laajennuksen louhinta tapahtuu vuoden 1995 aikana. Kalliotila muodostuu kahdesta 17 metrin levyistä pysäköintihallista, sekä useista liityntätunneleista ja sisäänkäynneistä. Alueen kallio on pääosin migmatiittia. Luokitukset tehtiin hallin 2 eteläseinästä ja pysäköintiluolan sisäänkäyntitunneleista. Työteknisistä syistä johtuen määrityksiä ei tehty hallissa 1.



Kuva 5.1. Forumin pysäköintihallin laajennuksen luokitusten määritysalueet (1-4).

Taulukko 5.1. Forumin pysäköintihallin laajennuksen kallioluokitukset

Forumin pysäköintihalli		RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	RMR	RMRQ
Halli 2 seinä paikka 1a		95	4	1,5	2,0	1,00	2,5	7,13	62	62
Halli 2 seinä paikka 1b		75	6	1,5	2,0	1,00	2,5	3,75	58	56
Halli 2 seinä paikka 1c		80	4	3,0	2,0	1,00	2,5	12,00	62	66
Y-risteys paikka 4		60	9	1,5	4,0	1,00	2,5	1,00	47	44
Y-risteys paikka 4	$3*J_n$	60	27	1,5	4,0	1,00	2,5	0,33		
sisääntulo paikka 2		80	6	1,5	2,0	1,00	2,5	4,00		
sisääntulo paikka 3		90	6	1,5	2,0	1,00	2,5	4,50		
sisääntulo paikka 3	$3*J_n$	90	18	1,5	2,0	1,00	2,5	1,50		
sisääntulo paikka 3	heikkousv.	20	9	1,5	2,0	1,00	2,5	0,67		
sisääntulo paikka 3	$3*J_n$ heik-kousv.	20	27	1,5	2,0	1,00	2,5	0,22		
sisääntulo paikka 3	keskim.	50	6	1,5	2,0	1,00	2,5	2,50		
sisääntulo paikka 3	$3*J_n$ kes-kim.	50	18	1,5	2,0	1,00	2,5	0,83		

Hallin 2 eteläseinältä luokiteltiin kuvan 5.1 mukaisesti alue, joka jaettiin kolmeen osa-alueeseen. Q-arvo vaihteli alueella välillä 3,8...12,0 ja RMR välillä 58...62. Kallion laatu vaihteli kohtalaisesta hyvään sekä Q- että RMR-luokitusten mukaan.

Koska kyseessä on väestönsuoja, valitaan ESR = 1. Jänneväli = 17,5 m. Q-luokitus antaa osa-alueille taulukon 5.2 mukaiset lujitussuositukset.

Alue 4 on pystykuilun yhteystunnelin Y-risteys. Risteyksen ylittää selvää pystyasentoinen sileä tasainen rakopinta ($J_r = 0,5$). Se on kuitenkin edullisesti suuntautunut, joten rakopintojen lähtöparametrit määritettiin muista epäedullisemmin suuntautuneista pinnoista.

$$Q = \frac{60}{9} * \frac{1,5}{4} * \frac{1}{2,5} = 1,0 \qquad (5.2)$$

Koska alue on risteys voidaan lujitussuositusta varten määrittää Q-arvo käyttäen kaavaa $J_n' = 3*J_n$ jolloin:

$$Q = \frac{60}{27} * \frac{2}{4} * \frac{1}{2,5} = 0,33 \qquad (5.3)$$

Väestönsuojan sisäänkäynnin ESR=1,0. Kun jänneväli on 5 metriä saadaan risteysalueen lujitussuositukseksi 9 cm:n kuituvahvisteinen ruiskubetonointi ja järjestelmäpultitus 1,5 metrin ruutuun, pultin pituus noin 2,4 metriä.

Louhinnan aikaista lujitustarvetta voidaan arvioida käyttämällä kertoimia Q = 5*Q ja ESR = 1,5*ESR. Jolloin Q = 5*0,33 = 1,5 ja ESR = 1,5*1,0 = 1,5. Q-luokituksen mukaan alueella ei tarvita louhinnanaikaista lujitusta.

Risteyksessä määritettiin myös RMR-luokitus, jonka arvo oli keskimäärin RMR = 44, kohtalainen kallio.

Alueella 3 tarkasteltavassa kohdassa on kahden metrin levyinen heikkousvyöhyke. Luokitus määritetään erikseen sekä heikkousvyöhykkeelle että ympäröivälle kalliolle. Paikka on risteysalue, joten voidaan käyttää kaavaa $J_n' = 3*J_n$.

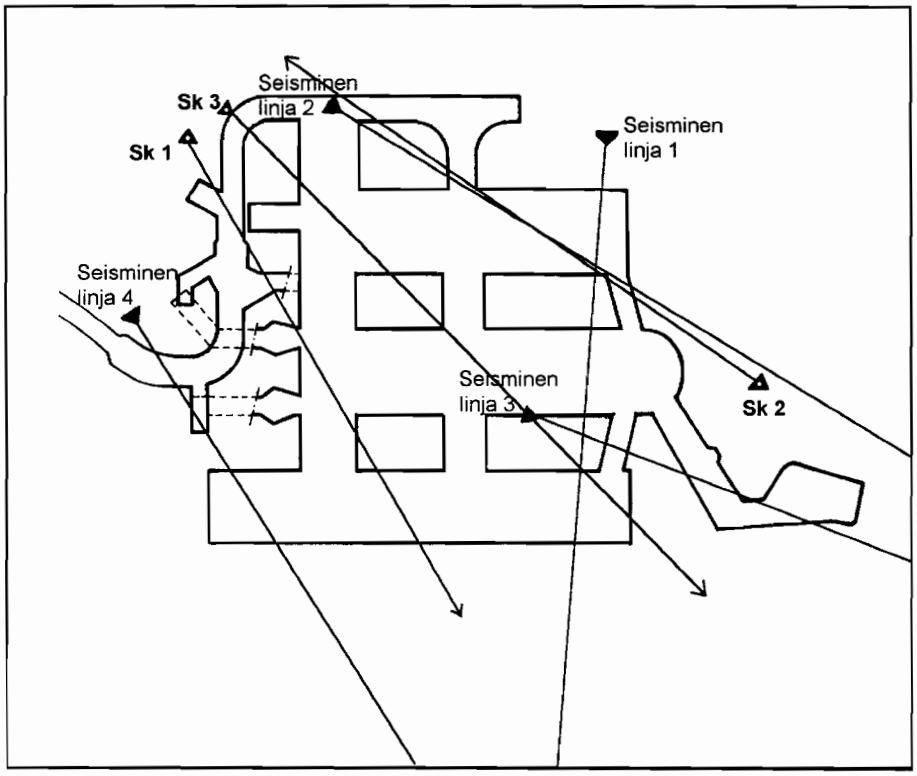
Yksinkertaisempi menetelmä on ympyrämenetelmän käyttö, jossa risteysalueelle sijoitetaan mahdollisimman suuri ympyrä, jonka halkaisijaa käytetään jännevälinä. Sijoittamalla ympyrä risteysalueelle, sen enimmäishalkaisija on 15 metriä, joka on myös alueen jänneväli.

Määrityksiä ei voida käyttää sellaisenaan lujitussuosituksiin, koska kallion laatu oli huomattavasti parempi sisäänajotunnelin katossa ja toisessa reunassa. Niiden luokitusta ei kuitenkaan määritetty työmaateknisten seikkojen ja ajanpuutteen johdosta.

Taulukko 5.2. Lujitussuositukset

		Katon lujitus		
Sijainti (Plv.)	**Q-luku**	**Ruiskubetoni (mm)**	**Pulttiväli (mm)**	**Pultin pituus (mm)**
Halli 2 eteläseinä paikka 1a	7,1	50	2300	4500
Halli 2 eteläseinä paikka 1b	3,8	70	2100	4500
Halli 2 eteläseinä paikka 1c	12	50	2300	4500
Y-risteys paikka 4 ($J_n'=3*J_n$)	0,33	90	1500	2400
Y-risteys paikka 4 ($J_n'=3*J_n$)	1,0	80	1700	2700

5.2 Maunulan väestönsuoja



Kuva 5.2. Maunulan väestönsuojan kallionäytekairaukset ja seismiset luotauslinjat

Alueen kallioperä on lähinnä kuutiorakoillutta massamaista graniittia, paikoin laattarakoillutta. Maunulan väestönsuojan kallioperässä on tehty 3 kairasydännäytekairausta vuonna 1984. Kairauskalustona on käytetty Craelius D-750-kairauskonetta ja T-46-kalustoa. Kairasydämien halkaisija on 32 mm. Osa näytteistä oli suunnattuja. Kairauksien pituudet ja kaltevuuskulmat olivat:

- SK 1 pituus 120 m, kaltevuus 8 gon
- SK 2 pituus 130 m, kaltevuus 13 gon
- SK 3 pituus 150 m, kaltevuus 7 gon

Luokitukset on tehty vain niiden havaintojen perusteella mitä kairasydämistä voidaan nähdä. Rajoitetun ajan vuoksi määritettiin Q-luokitus vain osalle kairasydännäytteitä. Valitut osuudet kattavat hyvin kaikki näytteissä esiintyvät kalliotyypit. Kairasydämet on jaettu osa-alueisiin kalliolaadun mukaan.

Maunulan kairasydämistä on tehty aiemmin myös RMR-luokitus vuoden 1976 version mukaan (Laine 1988). Kairarei'issä on suoritettu myös vesimenekkimittaus, josta saatiin viitteitä parametrin J_w määrittämiseksi.

Kallion jännitystilan arviomisessa on käytetty karkeata arviota, jonka mukaan valittiin SRF = 1. Kalliotila sijaitsee melko lähellä kallion pintaa ja vallitseva jännitystila voi olla melko pieni. Tällöin on mahdollista, että SRF = 2,5 antaa totuudenmukaisemman luokituksen. Käytettäessä arvoa SRF = 2,5, laskee kallion laatu jonkin verran (Q / 2,5). Paikanpäällä tehdyt havainnot varmentavat SRF:n arvoa. Jännitystilamittausten avulla SRF-arvo voidaan määrittää tarkasti.

Taulukko 5.3. Maunulan kairasydämien Q -luokitus sekä aiemmin määritetty RMR-luokitus.

Määr. alue	huom.	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	RMR	RMRQ
SK 1										
76,6-86,0		95	6	3	2	1	1	23,7	79-84	73
86-89,5		40	9	3	3	1	1	2,9	79	54
SK 2										
70,7-79,0		70	9	3	3	1	1	7,8	72	62
79,0-81,3		10	15	1	6	1	1	0,1	10	24
81,3-84,85		15	9	3	3	1	1	1,7	55	49
84,85-86,5		95	9	3	3	1	1	10,6	55	65
86,5-91,45		20	9	3	3	1	1	2,2	55	51
91,45-100		80	9	3	2	1	1	13,3	55	67
100-110,3		80	9	3	2	1	1	13,3	55	67
110,3-114,2		25	12	3	2	1	1	3,1	55	54
SK 3										
86,3-116,3	min.	70	9	2	3	1	1	3,9	64	56
86,3-116,3	maks.	70	9	3	2	1	1	11,7	64	66
86,3-116,3	keskim.	70	9	2	2	1	1	7,8	64	62

Sekä Q- että RMR-luokitukset antoivat saman suuntaisia arvoja. Q-luokitus ei huomio suuntautumista kovin hyvin, mutta RMR-luokituksessa se huomioidaan oman parametrina. Erityisesti kairasydämien perusteella luokittaessa kalliotilan suuntautumisen huomioiminen on hankalaa. Tätä varten tulee olla riittävästi suunnattuja näytteitä. Myös reikätutkimuksia ja kalliopaljastumista tehtyjä havaintoja voidaan käyttää apuna määrittäessä rakosuuntia ja rako-ominaisuuksia.

Taulukosta voidaan päätellä luokitusten suurinpiirtein vastaavan toisiaan. Joiltain osin on pieniä eroavuuksia. RMR määrityksessä heikkousvyöhyke on arvioitu turhankin huonoksi, ja vastaavasti osa hyvistä alueista liian hyviksi.

Luokituksessa kairasydämet on jaettu osa-alueisiin toisin kuin nyt tehdyssä Q-luokituksessa siten, että RMR-luokituksessa valitut alueet ovat laajempia. Esimerkiksi alue, jossa RMR = 10 on liian laaja. Q-luokitus ei anna näin huonoja arvoja edes heikoimmalle kohdalle 79,0-81,3, jossa Q-arvon (Q = 0,11) avulla laskettu RMR = 24.

Kallioluokitus seismisten tutkimusten perusteella Maunulan väestönsuojan kallioperässä

Q-luokitusta voidaan arvioida myös seismisen P-aallon nopeuden (v_p) perusteella kaavan (5.4) avulla (Grimstad ja Barton 1993):

$$Q = 10^{\left(\frac{v_p - 3500}{1000}\right)} \qquad (5.4)$$

Hyvissä ja kohtalaisissa graniteissa ja gneisseissä (v_p > 3 600 m/s) saadaan paras vastaavuus kaavalla (Grimstad ja Barton 1993):

$$Q = \frac{v_p - 3600}{50} \qquad (5.5)$$

Kohteessa on neljä seismistä mittauslinjaa, joilta on mitattu kalliotutkimusten yhteydessä seismisen pitkittäisaallon nopeus v_p osa-alueittain. Nopeuden perusteella voidaan laskea yllä olevien kaavojen mukaan kallion laatu karkeasti. Luokituksessa on oletettu, että kalliotila on kuiva (J_w = 1) ja jännitystilat ovat normaalit (SRF = 1). Laskenta suoritettiin Excel ohjelman avulla.

Taulukko 5.4. Kalliolaatu seismisten luotausten perusteella Maunulan väestönsuojassa

Seismisen linjan numero	Seisminen nopeus (m/s)	Q-luku	Seismisen linjan numero	Seisminen nopeus (m/s)	Q-luku
1	3800	4	2	5300	34
1	5350	35	3	5100	30
1	4650	21	3	4900	26
1	5000	28	3	5000	28
1	4000	8	4	4700	15,8
2	4700	22	4	3900	6
2	3600	1,3	4	4400	7,9
2	5200	32	4	4000	8
2	3200	0,5			

Seismisistä nopeuksista laskettu Q-luokitus vastaa melko hyvin kairasydämistä määritettyjä luokituksia. Suurelta osin kallion laatu on hieman parempaa mitä kairasydänten luokituksissa. Lasketuissa arvoissa ei ole huomioitu kivilajin kovuudesta ja tiheydestä aiheutuvia korjauksia. Oletettaessa kivilajin yksiaksiaalisen puristuslujuuden olevan 200 MPa, Q-arvo putoaa puoleen lasketusta, jolloin arvot vastaavat paremmin muita määrityksiä.

5.3 Otaniemen keskusväestönsuoja

Otaniemen keskusväestönsuoja on rakennettu 1960-luvulla Espoon Otaniemeen. Alueen kallioperä on pääosin graniittia. Väestösuojan yhteyskäytävissä ja sisäänkäynneissä on laajoja lujittamattomia alueita, joissa kalliopinta on näkyvissä. Otaniemen väestönsuojan yhteydessä sijaitsee myös TKK:n koetunneli, jonka perästä määritettiin Q-luokitus.

Alueella määritettiin kallioluokitukset myös VTT:n yhdystunnelin yläpuolisesta kalliopaljastumasta ja kallioleikkauksesta. Suunniteltavan kalliorakennuskohteen ensimmäiset havainnot kallioperästä saadaan yleensä kalliopaljastumista ja kallioleikkauksista. Kallioleikkaukset antavat kallion rakenteesta paremman kalliopaljastumaa paremman kuvan, mutta leikkauksissa on huomioitava usein varsin kovakouraisenkin louhinnan aiheuttamat halkeamat kalliossa.

Taulukko 5.5. Otaniemen keskusväestönsuojan kallioluokitukset

Paikka		RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	RMR	RMRQ
1. VTT paljastuma		90	4	3,0	1,0	1,0	2,5	**27,00**	69	74
2. VTT leikkaus	sekt 1 min.	90	9	3,0	1,0	1,0	2,5	**12,00**		66
2. VTT leikkaus	sekt 1 maks.	100	9	3,0	1,0	1,0	2,5	**13,33**		67
2. VTT leikkaus	sekt .2	90	4	3,0	1,0	1,0	2,5	**27,00**		74
2. VTT leikkaus	sekt. 3	90	4	1,5	1,0	1,0	2,5	**13,50**		67
3. TKK:n koetunneli	min.	10	9	1,0	4,0	1,0	2,5	**0,11**		24
3. TKK:n koetunneli	maks.	30	9	1,5	3,0	1,0	2,5	**0,67**		40
3. TKK:n koetunneli	keskim.	20	9	1,0	4,0	1,0	2,5	**0,22**		30
4. VSS sisäänkäynti	min.	70	6	2,0	4,0	1,0	2,5	**2,33**		52
4. VSS sisäänkäynti	maks.	80	4	2,0	2,0	1,0	2,5	**8,00**		63
5. VTT yhdystunneli 1	min.	50	9	2,0	3,0	1,0	2,5	**1,48**		48
5. VTT yhdystunneli 1	maks.	80	6	2,0	3,0	1,0	2,5	**3,56**		55
5. VTT yhdystunneli 2	min.	30	9	2,0	2,0	1,0	2,5	**1,33**		47
5. VTT yhdystunneli 2	maks.	50	6	2,0	2,0	1,0	2,5	**3,33**		55
5. VTT yhdystunneli 2	heik. vyöh.	10	20	1,0	6,0	1,0	2,5	**0,03**		13
5. VTT yhdystunneli 2	keskim.	20	12	1,0	6,0	1,0	2,5	**0,11**	38	24
5. VTT yhdystunneli 2	jos SRF=1 keskim.	20	12	1,0	6,0	1,0	1	**0,28**	38	32

Kalliopaljastuma VTT:n päärakennuksen pihassa sijaitsee väestönsuojan tunnelin yläpuolella. Kallio on migmatiittia (granitti-gneissi). Paljastuma-alueen halkaisija on noin 10 metriä. Alue oli melko tasalaatuinen, joten sitä ei tarvinnut jakaa osa-alueisiin.

Kallio luokiteltiin paljastumasta saatujen havaintojen perusteella sekä Q- että RMR-menetelmillä. Luokitus tehdään niiden havaintojen perusteella mitä on käytettävissä. Luokituksen tarkkuutta voidaan parantaa tarkentamalla parametreja lisätutkimusten avulla.

Q-luokituksen lähtöparametrit olivat seuraavat:

$$Q = \frac{90}{4} * \frac{3}{1} * \frac{1}{2,5} = 27 \qquad (5.6)$$

Kallion laatu on hyvä (Q = 27). SRF = 2,5 arvoa käytetään alla olevaan tunneliin, kun kalliokaton paksuus on vain muutamia metrejä, eikä ole syytä olettaa kalliossa olevan voimakkaita jännitystiloja. Kalliokaton tarkka paksuus ei ollut tiedossa, joten SRF:n arvo 1 voi olla myös mahdollinen.

Samasta paljastumasta määritettiin myös RMR-luokitus.

Taulukko 5.6. Otaniemen kalliopaljastuman RMR-luokitus

Parametri	Arvo	Pisteet
yksiaksiaalinen puristuslujuus	100-250 MPa	12
RQD	90	18
rakoväli	400 mm	10
rakojen pituus	3-10 m	2
rakojen avauma	0,1-1 mm	4
rakopintojen karkeus	karkea	5
rakotäyte	ei täytettä	6
rapautuneisuus	rapautumaton	6
pohjavesi	kostea (arvio)	10
rakosuuntien vaikutus	kohtalainen	-5
RMR-luku	luokka II, hyvä kallio	68

Kallioleikkaus VTT:n edessä antaa kalliopaljastumaa paremman kuvan kallion rakenteesta. Kallioleikkaus sijaitsee edellisen paljastuman vieressä myös tunnelin yläpuolella. Leikkauksesta määritettiin vain Q-luokitus.

Aluksi kallioleikkaus jaettiin kalliolaadun mukaan silmämääräisesti kolmeen osa-alueeseen. Tämän jälkeen jokaisesta osa-alueesta määritettiin parametrit luokitusta varten. Koska osa-alueen 1 RQD vaihteli välillä 90...100, laskettiin alueen 1 luokitukselle raja-arvot. Koko kallioleikkauksen Q-arvo vaihteli välillä 12...27.

Kallioleikkauksesta ei määritetty RMR-luokitusta, koska se näyttänyt eroavan paljastuman määrityksestä.

TKK:n koetunnelin perästä määritettiin Q-luokitus. Perässä olevat rakopinnat olivat keskenään erilaisia. Parametrien vaihteluvälit voidaan merkitä kaavaan ja laskea Q:n pienin ja suurin arvo.

$$Q=\frac{10-30}{9}*\frac{1-1,5}{3-4}*\frac{1}{2,5}=0,1...0,7 \qquad (5.7)$$

Keskimääräinen Q-arvo saadaan valitsemalla keskimääräiset parametrit. Parametreistä J_r ja J_a valitaan yleensä epäedullisimmat arvot, joita pitkin mahdollinen sortuminen todennäköisesti tapahtuu.

$$Q=\frac{20}{9}*\frac{1}{4}*\frac{1}{2,5}=0,22 \qquad (5.8)$$

Keskimääräistä Q:n arvoa voidaan käyttää lujituksen määrittämiseen. Parametreja valittaessa on huomioitava niiden pintojen parametrit, joilla on vaikutusta tunnelin pysyvyyteen. Tässä tapauksessa pystysuorat rakopinnat vaikuttavat eniten tunnelin vakavuuteen. Kivi liukuu pystysuoria rakopintoja pitkin mutta ei vaakarakoja pitkin. Vaakaraon leikkauslujuus ei vaikuta tässä tapauksessa vakavuuteen. Kivi voi tippua katosta vaakaraon leikkauslujuudesta riippumatta.

Lujitussuositukseksi saatiin arvolla Q = 0,22 teräskuituvahvisteinen ruiskubetoni 70 mm ja järjestelmäpultitus k/k 1700 mm. Työn aikaista lujitusta ei tarvita.

Otaniemen väestönsuojan sisäänkäyntitunneli on toiminut TKK:n harjoituspaikkana Q-luvun määritystä varten. Tästä paikasta määritettiin sekä Q- että RMR-luokitus. Kalliota ei jaettu osa-alueisiin luokitusta varten. Kallion laatu vaihteli alueella hyvästä kohtalaiseen. Q-arvot olivat 2,33...8,0 (Taulukko 5.5).

Otaniemen väestönsuojan yhteystunneli VTT:n rakennukseen on noin 30 vuotta vanha ja kokonaan lujittamaton. Sen leveys on noin 3 metriä ja korkeus noin 3 metriä. Kallioluokitus määritettiin kahdesta paikasta tunnelissa. Määritetyt kohdat sijaitsevat aiemmin määritettyjen paljastuman ja leikkauksen alapuolella.

Sijainnissa 1 kallioluokitus määritettiin yhtenä alueena. RQD- ja J_n-parametreille valittiin vaihteluvälit, jolloin voidaan laskea sijainnin minimi- ja maksimiarvot kallioluokitukselle. Q-arvot vaihtelivat välillä 1,5...3,6 (taulukko 5.5). Lujitussuosituksen mukaan tunnelia ei tarvitse lujittaa.

Sijainnin 2 alueella on kapea loivakaateinen heikkousvyöhyke joka lävistää tunnelin. Luokitus määritettiin erikseen heikkousvyöhykkeelle (Q = 0,03) ja sen ympäristöön (Q = 1,3...3,3). Lujitussuositusta varten määritettiin keskimääräinen Q-arvo (Q = 0,11). Kallion keskimääräinen laatu määritettiin arvioimalla. Tarkempaan tulokseen pääse kaavan 4.5 avulla. Alueelle määritettiin myös keskimääräinen RMR-luokitus (RMR = 38). Kallion keskimääräinen laatu oli Q-luokituksen mukaan varsin heikko ja RMR-luokituksen mukaan huono. Heikkousvyöhykkeen ympäristö oli Q-luokituksen mukaan heikko.

Tarvittava lujitussuositus määritetään keskimääräisen arvon mukaan. Keskimääräisessä arvossa RQD = 20, joka on likimain heikkousvyöhykkeen ja ehjän kallion arvojen keskiarvo.
Rakopintojen ominaisuudet valitaan siten, että J_r = 1 ja J_a = 6. Parametrit valittiin epäedullisimmista rakopinnoista, joita pitkin mahdollinen sortuminen tapahtuu.

Alueella on yleisesti arvioitu, että SRF = 2,5. Koska tunnelissa ei näytä esiintyvän jännityksistä aiheutuneita ongelmia, voidaan harkita SRF:n arvoa 1. Todennäköisesti SRF = 2,5 antaa liian konservatiivisen lujitussuosituksen (Løset 1995c). Kohdassa missä heikkousvyöhyke lävistää katon ja vaikuttaa sen vakavuuteen käytetään arvoa SRF = 5.

Q-luokituksen mukaan tunneliin suositellaan lujitukseksi 50 - 90 mm:n kuituvahvisteista ruiskubetonia ja järjestelmäpultitusta 1,3 metrin ruutuun.

5.4 TVO:n syväkairaukset

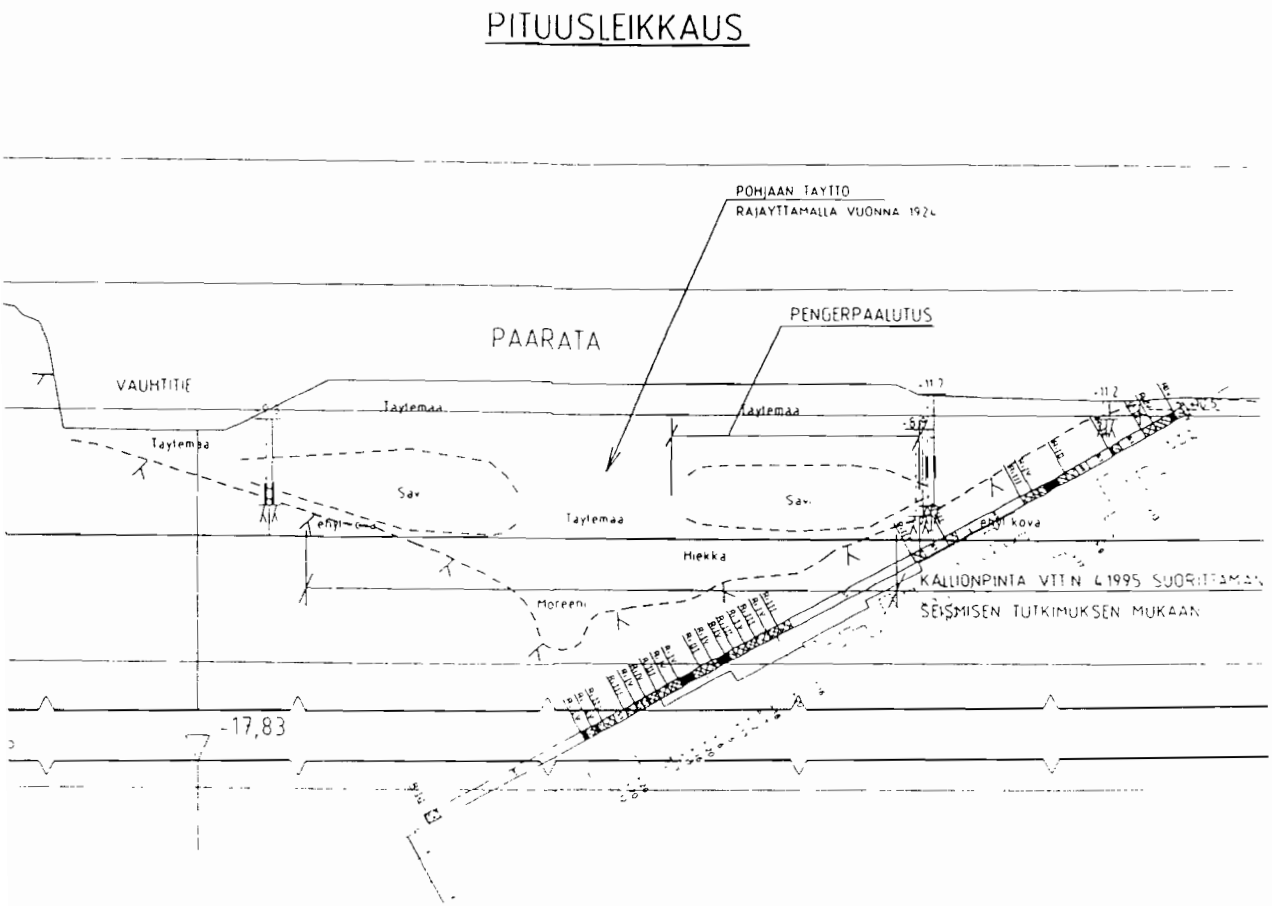
Olkiluodon ja Kivetyn alueilla tehtyjen kallionäytekairausten perusteella määritettiin Q-luokitus. Tarkasteltavaksi valittiin syvyydellä 400 - 830 m sijaitsevat heikkousvyöhykkeet ja niiden ympäristöt. Syvällä sijaitsevan kohteen jännitystila voidaan arvioida syvyyden ja kallion tiheyden avulla olettaen, että vaakajännitys on noin kaksi kertaa pystyjännitys. Kun tiedetään kiven yksiaksiaalinen puristuslujuus ja vaakajännitys, voidaan taulukoista määrittää niiden perusteella parametri SRF.

Valituissa kohteissa kallion jännitystila ja kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus on saatu aiemmin suoritettujen mittausten perusteella. Tuloksissa esiintyneen hajonnan johdosta tuloksissa on esitetty myös vaihteluvälit. Kohteessa on suoritettu myös vesimenekkikokeita, joiden perusteella on arvioitu parametri J_w. Mittausten yksityiskohtaiset tulokset esitetään raportissa (Johansson 1995).

Taulukko 5.7. Syväkairaukset

Määr. alue	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q-luku
KI - KR1							
537,8...539,8	15	9	3	2	0,66	15 (1,7...35)	0,11 (0,05...1)
540,4...548,2	100	6	3	2	1	15 (1,7...35)	1,7 (0,7...14,7)
823,3...829,0	20	12	3	2	0,5	40 (22...50)	0,03 (0,02...0,06)
OL - KR5							
408,0...409,5	20	9	3	2	1	3 (1,66...33)	1,1 (0,1...2,1)
411,3...416,9	100	3	3	2	1	3 (1,66...33)	16,7 (1,5...31)

5.5 Töölö-Alppila vesijohtoputkitunneli



Kuva 5.3 Toolo-Alppila vesijohtoputkitunnelin ruhjevyöhyke, pituusleikkaus.

Luokitus on arvioitu kairasydännäytteestä, joka on kairattu pääradan alla olevaan heikkousvyöhykkeeseen. Kivilaji on paikoin hyvin rikkonaista ja kairasydänhukka on näiltä osin suuri. Koska kairasydännäytteet ovat hyvin ohuita, halkaisja vain 32 mm, on rakopinnan karkeuden arviointi hankalaa. Myös rakotäytettä on hyvin vaikea arvioida, koska se on huuhtoutunut kairauksen yhteydessä pois lähes kokonaan.

Koska kairasydänlaatikko on metrin mittainen, on helppo määrittää RQD-luku riveittäin. Tässä tapauksessa määritystä häiritsi se, että kairasydämissä oli runsaasti sydänhukkaa ja kairasydämet eivät olleet tasaisesti laatikoissa.

Töölö-Alppila vesijohtotunnelin kairasydännäytteiden luokitus suoritettiin Q-luokituksen avulla aiemmin kesällä 1995. NGI:n geologi F. Løset tarkasti myöhemmin määritykset valokuvien perusteella ja esitti muutamiin kohtiin korjauksia ja tarkennuksia. Hyvälaatuisestakin valokuvasta on vaikea arvioida kallion luokitusta. Määrityksien tarkistamista helpotti rakopinnoista otetut lähikuvat.

Viitteitä J_w arvosta saatiin kairauksen yhteydessä tehtyjen vesimenekkikokeiden tuloksista. Näin saadut arvot eivät kuitenkaan ole kovin luotettavia. Lisäksi on huomioitava, että valmis tunneli injektoidaan, jolloin J_w on kuivassa tunnelissa yksi. Lisäksi tunneliin asennetaan ruiskubetonin salaojitus.

Kallioluokitus määritettiin myös tunnelin seinästä tunnelin alkupäässä (Pl. 17) ja pääradan alla olevan heikkousvyöhykkeen kohdasta (Pl. 431 ja Pl. 451).

Taulukko 5.8. Töölö-Alppilan in-situ määritykset.

Sijainti (Pl.)	RQD (%)	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q
13	50	9...12	1,5	4	0,66	2,5	0,4...0,55
431	40	12	1	6	0,66	5	0,07
451	10...20	9..12	1,5	6...8	1	5	0,03...0,11

Määritykset vastaavat melko hyvin kairasydämen perusteella tehtyjä määrityksiä. Laboratoriotutkimusten mukaan savinäytteet sisältävät pieniä määriä paisuvahilaisia savikomponentteja. Näytteille on tehty röntgendifraktiometrianalyysi ja paisuntakokeet (vapaa paisuminen ja paisuntapaine).

Lujitussuositus:

Tunnelin leveys B = 4,5 m ja ESR = 1,6 (vesijohto tunneli) =>D_e = 3 m.

Taulukko 5.9. Lujitussuositukset

		Katon lujitus		Seinien lujitus	
Sijainti (Plv. tai syvyys)	Q-luku	Ruiskubetoni (mm)	Pulttiväli (mm)	Ruiskubetoni (mm)	Pulttiväli (mm)
13	0,4...0,55	70	1500	50	1800
431	0,07	120	1250	80	1400
451	0,03...0,11	100..130	1100...1300	100..130	1100...1300
0...25	1,2	50	1800	-	-
25...36	0,4	70	1500	50	1700
36...47	0,03	130	1200	130	1200
47...55	0,15	100	1400	70	1500
55...69,15	4,5	-	-	-	-

Tarvittava pulttien pituus noin 2,4 metriä.

5.6 Vuosaaren jäähdytysvesitunneli

Vuosaaren B-voimalaitoksen yhteydessä on rakenteilla olevissa kahdessa jäähdytysvesitunnelissa on yksi ajotunneli ja neljä perää. Tunnelin suunniteltu leveys on 3,8 metriä. Alueen kivilaji on pääosin amfiboliittia. Tunneli kulkee pääsääntöisesti likimain päärakosuunnan mukaisesti joka on vakavuuden kannalta epäedullinen suuntaus. Jännitystekijänä SRF on käytetty arvoa 1, koska tunnelissa ei näkynyt viitteitä jännitystilan aiheuttamista ongelmista ja tunnelin kalliokatto on suhteellisen ohut. Luokituksia määritettiin perissä 1 ja 3 alueilla, jotka ovat ympäristöään heikompia ja kriittisiä vakavuuden suhteen.

Taulukko 5.10. Vuosaaren jäähdytysvesitunnelin luokitus

Paikka		RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	RMR	RMRQ
perä 1 plv 1440-1465		85	9	1,5	1,0	1,00	1	**14,17**	**56**	68
perä 1 plv 1530-1550		55	9	1,5	1,0	0,50	1	**4,58**	**42**	58
perä 1 plv 1560 kupr	heik. vyöh.	10	12	1,5	6,0	0,66	1	**0,14**	**-**	26
perä 1 plv 1560 kupr	ymp	80	9	1,5	1,0	0,66	1	**8,80**	**-**	64
perä 1 plv 1560 kupr	keskim	50	9	1,5	6,0	0,66	1	**0,92**	**-**	43
perä 3 plv 690-710	YMP.	90	6	1,5	1,0	1,00	1	**22,50**	**59**	72
perä 3 plv 690-710	heik. vyöh.	30	6	0,5	4,0	1,00	1	**0,63**	**-**	40
perä 3 plvV 540-570	min	80	6	1,0	2,0	0,66	1	**4,40**	**48**	57
perä 3 plv 540-570	maks.	80	6	1,5	1,0	0,66	1	**13,20**	**48**	67
perä 3 plv 250-275		10	20	1,0	13	1	10	**0,004**	**11**	12

Taulukko 5.11. Vuosaaren jäähdytysvesitunnelin lujitussuositukset Q-luokituksen perusteella

		Katon lujitus		Seinien lujitus	
Sijainti (Plv.)	**Q-luku**	**Ruiskubetoni (mm)**	**Pulttiväli (mm)**	**Ruiskubetoni (mm)**	**Pulttiväli (mm)**
perä 1 plv 1440-1465	**14,17**	-	-	-	-
perä 1 plv 1530-1550	**4,58**	-	-	-	-
perä 1 plv 1560 kupr	**0,92**	70	1700	-	-
perä 3 plv 690-710	**1,7**	40...50	2000	-	-
perä 3 plv 540-570	**4,40**	100	1400	70	1500
perä 3 plv 250-275	**0,004**	200 + RRS-	1000	200 + RRS-	1000

Työnaikaista lujitusta ei tarvita muissa kohteissa kuin perässä 3 Plv. 250-275 alueella olevassa heikkousvyöhykkeessä, jossa suositus työnaikaiseksi lujitukseksi on 120 mm:n ruiskubetoni kuidulla ja järjestelmäpultitus, pulttiväli 1200 mm. Lohkot on komutettava ja lujitettava erillisen rakoanalyysin perusteella, koska kallioluokitukset eivät voi antaa lujitussuosituksia erillisille lohkoille.

Perässä 1 pl 1560 on lastauskuprikka ja noin 0,5 metriä paksu loivakaateinen heikkousvyöhyke. Kuprikan kohdalla saadaan liian konservatiivinen lujitussuositus, jos käytetään risteyksen sääntöä $J_n' = 3*J_n$. Tässä tapauksessa on parempi käyttää approksimointia siten, että jänneväliksi valitaan 10 metriä. Tämä saadaan sijoittamalla ympyrä risteysalueelle ja käyttämällä sen halkaisijaa jännevälin mittana. Tällöin parametria J_n ei muuteta. Tunneli on raakavesitunneli ja lastauskuprikan

paikallinen sortuminen käytön aikana ei vaikuta veden virtaamiseen. Tunnelissa riittää näiltä osin mahdollinen työnaikainen lujitus.

Välitöntä lujitustarvetta voidaan arvioida Q-luokituksen avulla. Q = 5*0,9 = 4,5 ja ESR = 1,5*1,6 = 2,4, jolloin alustava lujitussuositus on rajalla, jossa työnaikaista lujitusta ei tarvita.

Perässä 3 plv 690-710 on 2-3 metriä leveä jyrkkäkaateinen (noin 70 astetta) heikkousvyöhyke. Kohdassa on lastauskuprikka. Q-arvo määritettiin erikseen sekä heikkousvyöhykkeelle että ympäröivälle kalliolle. Heikkousvyöhyke, jonka keskellä on tasainen kiillottunut rakopinta, lävistää kuprikan. Tällöin voidaan käyttää rakopinnan karkeuden arvoa J_r = 0,5. Heikkousvyöhykkeen rakoparametrit määritetään huonoimman pystysuuntaisen arvon mukaan.

Lujituksen määrittämiseksi alueelta valitaan keskimääräinen Q-luku, sijoittamalla kaavaan keskimääräiset parametrit. Tällöin saatu arvo on Q = 5 (kohtalainen), joka antaa lujitussuosituksek-si 40 - 50 mm ruiskubetonia ja järjestelmäpultitus 2 metrin ruutuun. Tarkempaan arvoon päästään käyttämällä F. Løsetin 1990 kehittämää kaavaa 4.11.

Kaavan avulla saadaan arvoksi Q = 1,7, kallion laatu on keskimäärin heikko. Arvo sattuu samaan lujitusluokkaan tunnelissa tehdyn karkean arvion kanssa.

Perässä 3 plv 250 - 275 on laaja savirakenteinen heikkousvyöhyke, (pituus > 25 m). Savi ei sisällä paisuvahilaisia mineraaleja.

$$Q = \frac{10}{20} * \frac{1}{13} * \frac{1}{10} = 0{,}004 \qquad (5.9)$$

Luokituksessa saatiin Q = 0,004 ja RMR = 11. Q-luokituksen mukaan saadaan lujitussuositukseksi kuituvahvisteinen ruiskubetoni, paksuus 200 mm, lujitetut ruiskubetonikaaret (RRS) ja järjestelmä-pultitus 1,0 metrin ruutuun. Sama lujitus seinille. Q-luokitus ei anna lujitusuositusta lattian osalta.

Lujitussuosituksia varten tunnelin jänneväli jaetaan varmuustekijällä ESR. Raakavesitunnelissa voidaan käyttää arvoa ESR = 1,6. Yleisesti tunneli sijaitsee hyvässä kalliossa eikä tarvitse lujituksia. Lastauskuprikoissa joissa on heikkousvyöhyke, voidaan kuitenkin tarvita työnaikaista lujitusta. Koska kuprikoiden sortuminen ei vaikuta valmiin tunnelin vedenvirtaukseen, riittää niissä pelkkä mahdollinen työnaikainen lujitus. Tällöin voidaan harkita arvoa ESR = 3...5, joka on käytössä väliaikaisissa kaivoskäytävissä. Norjassa tällaiset tunnelit tehdään usein vain työnaikaista lujitusta käyttäen. Putoavat lohkareet komutetaan työn aikana tarvittaessa pois.

Erityisesti vedellä täytetyissä tunneleissa on suhtauduttava vakavasti paisuvahilaisen saven esiintymiseen. Saven paisumispaine riippuu sekä saven paisumisominaisuuksista, että saven veden saannista. Näissä tunneleissa savi saa jatkuvasti vettä. Jos käytetään ohutta ruiskubetonia työnaikai-sena lujituksena, voi jäädä näkemättä paisuvahilaisen saven alulle panema löyhtyminen. Lopullinen sortuminen tapahtuu tällöin tunnelin käytön aikana (Løset 1995c).

Tässä tunnelissa nähtiin selvästi, että luokitus ei anna erillisten lohkojen lujitussuositusta. Myös suuntautumisen vaikutus tuli selvästi esiin. Q-luokitus ei huomioi, että tunneli on erittäin epäedulli-sesti suuntautunut kallion rakoiluun nähden. Sen sijaan RMR-luokitus huomioi kallion suuntautu-misen hyvin. RMR-luokituksen mukaan tunnelin kallion laatu oli monin paikoin huonompaa kuin Q-luokituksen mukaan.

5.7 Vuosaaren öljysäiliön ajotunneli

Ajotunnelin suunniteltu leveys on 4,0 m ja korkeus 4,5 m. Vallitseva kivilaji alueella on amfiboliitti-gneissi. Luokitukset tehtiin 26.9.1995, jolloin louhinta oli edennyt pl 240 kohdalle, eikä öljysäiliön louhintaa ei oltu vielä aloitettu. Myöhempien käyntiin perusteella voitiin havaita öljysäiliön kalliolaadun vastaavan ajotunnelin kalliolaatua. Luokitukset tehtiin pääasiasssa ajotunnelin oikean puoleisessa seinässä, likimäärin öljysäiliön holvin suunnitellussa tasossa.

Taulukko 5.12. Vuosaaren öljysäiliön ajotunnelin luokitukset

Sijainti	Huom.	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	RMR	RMRQ
plv. 154-162		65	9	1,0	6,0	1,00	2,5	0,48		37
plv. 151-154		30	9	1,0	6,0	1,00	2,5	0,22		30
plv. 140-150, heik vyöh.	min.	10	12	1,0	8,0	1,00	2,5	0,04		15
plv. 140-150, heik vyöh.	maks.	10	12	1,0	6,0	1,00	2,5	0,06		18
plv. 140-150, ymp.		85	9	1,5	3,0	1,00	2,5	1,89	46	50
plv. 140-150, alue.	keskim.	50	9	1,0	6,0	1,00	2,5	0,37	46	35
plv. 140-150	RMR min								32	
plv. 140-150	RMR max								54	
plv. 180-200	min.	70	9	1,0	4,0	1,00	2,5	0,78		42
plv. 180-200	maks.	80	9	1,5	3,0	1,00	2,5	1,78		49

Taulukko 5.13. Vuosaaren öljysäiliön ajotunnelin lujitussuositukset Q-luokituksen perusteella

		Katon lujitus		Seinien lujitus	
Sijainti (Plv.)	**Q-luku**	**Ruiskubetoni (mm)**	**Pulttiväli (mm)**	**Ruiskubetoni (mm)**	**Pulttiväli (mm)**
plv. 154-162	**0,48**	50	1600	-	-
plv. 151-154	**0,22**	90	1400	-	-
plv. 140-150	**0,37**	90	1500	-	-
plv. 180-200	**0,8...1,8**	40...50	2000	-	-

Lastauskuprikassa (plv 140-150) jänneväli voidaan määrittää ympyräsäännöllä. Tällöin jänneväli on noin 8 metriä. Kun ESR = 1,3 saadaan määrääväksi jänneväliksi noin 6 metriä. Lujitussuositus alueen kattoon on 90 mm teräskuituvahvisteinen ruiskubetoni ja järjestelmäpultitus k/k 1,5 metriä. pulttipituus noin 3 metriä.

Plv 150-200 tunneli on suoraa ja tasalevyistä. Kivilaji amfibolitti-gneissi, plv 151-154 kivilaji on pegmatiitti. Pegmatiitti on karkearakeista ja saa usein suuria karkeuden arvoja. Tässä tapauksessa alueella sijaitsi runsaasti sileitä leikkausrakoja, jolloin $J_r = 1$.

Ajotunnelin luokitusta tehtäessä louhinta ei ollut edennyt vielä öljysäiliölle asti. Tulevan öljysäiliön kallionlaatua ja lujitusta on arvioitu ajotunnelin ja kairausraporttien perusteella. Niiltä osin kun öljysäiliö on samanlaista kalliota kuin plv 140-150, jossa heikkousvyöhyke leikkaa kalliotilan ja Q = 0,37, saadaan öljysäiliön katon lujitussuositukseksi 120 mm teräskuituvahvisteinen ruiskubetoni ja järjestelmäpultitus, pulttiväli 1,5 m. pulttipituus n. 4,5 m. Jos kallion laatu vastaa ajotunnelin parempia osia (Q = 0,8...1,8), saadaan lujitussuositukseksi RB 70 mm - RB 100 mm kuidulla ja järjestelmäpultitus, pulttiväli k/k 1,6 m - 2,0 m. Paisuvahilaisten rakotäytteitä esiintyessä tarvittavat lujitusmäärät kasvavat.

6 LUOKITUSTEN ARVIOINTI

Q- ja RMR-luokituksia on käytetty sekä kovissa että pehmeissä kalliolaaduissa, mutta ne sopivat erityisen hyvin kovaan kiveen, koska ne huomioivat hyvin kalliomassan rakojen määrän ja laadun. Kovassa kivessä pienillä jännitystiloilla kalliomassan deformaatio tapahtuu pääasiassa kallion rakoja pitkin. Q-luokitus huomioi myös suuret jännitystilat ja niissä tapahtuvat kalliomassan muodonmuutokset. Alkuperäinen RMR-luokitus ei huomioi jännitystilan vaikutuksia.

Rakoilun määrä kuvaillaan Q-luokituksessa RQD-luvun ja rakosuuntien lukumäärän avulla. RMR-luokituksessa määritetään RQD-luvun lisäksi rakoväli ja rakojen suuntautumisen vaikutus. RMR-luokituksessa rakoilun suunnan vaikutus on huomioitu erillisenä parametrinä. Q-luokituksen yhteydessä se huomioidaan välillisesti parametrien valinnan yhteydessä siten, että rakoparametrit valitaan kalliomekaanisen pysyvyyden kannalta epäedullisimman rakosuunnan mukaisesti. Q-luokituksessa myös heikkousvyöhykkeen suuntaus vaikuttaa jännitystilatekijään SRF. RMR-luokituksessa oletetaan, että kalliossa on tavallisesti kolme rakosuuntaa.

Rakojen laatu kuvaillaan Q-luokituksessa rakopinnan karkeuden, rakoavauman ja muuttuneisuuden avulla. RMR-luokituksessa rakojen laatu kuvaillaan viiden erillisen ominaisuuden avulla, joita ovat rakojen pituus eli jatkuvuus, avauma, karkeus, rakotäyte ja rapautuneisuus. Molempien luokitusten avulla voidaan kuvailla erilaiset rakotyypit melko kattavasti. RMR-luokitus huomioi vain pienen mittakaavan karkeuden kun Q-luokituksessa huomioidaan sekä pienen että suuren mittakaavan karkeus. Q-luokituksessa rakopintojen rapautuneisuus huomioidaaan parametrin J_a valinnassa. Q-luokituksen yhteydessä rakojen pituus huomioidaan parametrien valinnan yhteydessä. Rakopintojen kitkakulma riippuu rakojen laadusta. Q-luokituksessa suhde J_r/J_a kuvastaa hyvin rakopintojen kitkakulmaa. Q-luokituksen yhteydessä voidaan huomioida myös paisuvahilaiset rakotäytteet, joita. RMR-luokitus ei huomioi.

Pohjavesiolosuhteet huomioidaan erillisenä parametrina sekä Q- että RMR-luokituksissa. Määritys tehdään hieman eri perustein, joten toisen luokituksen määrityksiä ei voida käyttää suoraan toisessa. Pysyvyyden kannalta merkittävin tekijä on vallitseva vedenpaine raoissa.

Kallion jännitystila ei ole osaparametrina RMR-luokituksessa kuten Q-luokituksessa. RMR-luokituksen sovellutuksissa on esitetty, että jännitystilan vaikutus huomioidaan korjauskertoimen avulla lopullisen luokituksen määrityksen yhteydessä. RMR-luokituksessa kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus on osaparametrina, mutta Q-luokituksessa se huomioidaan osana SRF-parametrin määritystä. Q-luokituksessa kiven yksiaksiaalisen puristuslujuuden ja suurimman pääjännityksen välinen suhde σ_c/σ_1 kuvastaa hyvin mahdollista kallioräiskettä ja kallion jännityksestä johtuvaa mahdollista hilseilyä. Kalliomekaanisen pysyvyyden kannalta puristuslujuuden ja jännityksen välinen suhde on merkittävämpi kuin pelkkä kivilajin yksiaksiaalinen puristuslujuus.

Q-luokitus huomioi SRF-parametrin valinnan yhteydessä heikkousvyöhykkeet, paisuvat ja kokoonpuristuvat kalliot sekä näistä aiheutuvan kallion löyhtymisen. RMR-luokitus ei huomioi näitä erikseen. Heikkousvyöhykkeet voidaan huomioida Q-luokituksessa myös laskennallisin menetelmin (kaava 4.11) kapeiden heikkousvyöhykkeiden lujitusten määritysten yhteydessä.

Kallion laatu vaihtelee Q-luokituksella poikkeuksellisen heikosta (Q = 0,001) poikkeuksellisen hyvään (Q = 1000) ja RMR-luokituksella erittäin huonosta (RMR = 0) erittäin hyvään (RMR = 100). Tämän tutkimuksen ja aiempien luokitusten perusteella voidaan todeta, että Q- ja RMR-luokitusten koko asteikko on käytössä Suomessa. Tutkimuksen yhteydessä suoritetuissa luokituksissa Q-luokituksen arvot vaihtelivat välillä 0,003...30. Aiemmin tehdyissä kallioluokituksissa Q-

arvot ovat vaihdelleet välillä 0,002...533 (Syrjänen 1993, Salmelainen 1994b). Tämän tutkimuksen yhteydessä RMR-arvot vaihtelivat välillä 11...69. Aiemmissa määrityksissä RMR-arvot ovat vaihdelleet välillä 10...96. Voidaan olettaa, että myös luokitusten ja yksittäisten parametrien ääripäät ovat löydettävissä Suomen kallioperästä.

Luokitusten tarkkuus riippuu yksittäisten parametrien määritysten tarkkuudesta. Parametrien määritykset eivät ole yksiselitteisiä, ja tulokset voivat vaihdella määrittäjästä riippuen. Tämän ohjeen tavoitteena on, että eri määrittäjät pystyisivät määrittämään saman kallion yhden lujitusluokan tarkkuudella. Q- ja RMR-luokituksen yhteydessä tarvittavien lähtöparametrien määrittäminen kallionpinnasta on yleensä melko yksinkertaista. Määritysten tekeminen kairasydänten perusteella on huomattavasti hankalampaa.

RQD-luvun määrityksen tarkkuus riippuu käytetystä menetelmästä. RQD-luku on alunperin tarkoitettu määritettäväksi kairasydänten perusteella, jolloin sen tarkkuus on yleensä hyvä. RQD-luku voidaan määrittää myös kalliopinnasta, jolloin kokenut määrittäjä voi arvioida sen karkeasti yhdellä silmäyksellä, mutta tarkassa määrityksessä on mitattava kaikkien rakosuuntien rakovälit erikseen. Jännitystilatekijän SRF valinta on vaikein tehtävä, mikäli ei ole käytetty jännitystilamittauksia. Valinta perustuu tällöin välillisiin havaintoihin, kuten esim. kalliotilan syvyyteen, kallion deformaatiomuutoksiin ja heikkousvyöhykkeiden sijaintiin. Tällöin virheen mahdollisuus parametrin määrityksessä on suuri. Pienillä jännitystiloilla parametrin vaikutus luokituksiin on vähäinen, mutta suurilla jännitystiloilla virheellinen parametrin valinta aiheuttaa suuren virheen Q-luokitukseen. Eräs helposti syntyvä virhe on paisuvahilaisen saven huomioimatta jättäminen parametrin J_a määrityksessä. RMR-luokituksen yhteydessä tarvittavien parametrien määritys on usein hieman yksinkertaisempaa.

Kairasydänten avulla saadaan RQD-luku määritettyä tarkasti. Muiden parametrien määritys on huomattavasti hankalampaa, johtuen kairasydännäytteiden pienestä koosta ja rakotäytteiden poishuuhtoutumisesta kairauksen yhteydessä. Riittävä määrä suunnattuja näytteitä helpottaa rakosuuntien arvioimista.

Lujitussuositukset on annettu erillisissä taulukoissa Q- ja RMR-luokitusten yhteydessä. Näistä Q-luokituksen yhteydessä annettu lujitussuositus on yksityiskohtaisempi ja monipuolisempi, sekä vastaa paremmin Suomessa totuttua lujituskäytäntöä. Kalliotilan lujitusten määrittäminen perustuu suurelta osin aiempiin kokemuksiin samanlaisissa olosuhteissa. Luokitusten antamat lujitussuositukset ovat suuntaa antavia. Lopullinen lujitus on määritettävä paikanpäällä, jolloin on huomioitava esim. erillisten lohkojen lujitustarve. Pulttien suuntaus, sijoittelu ja ruiskubetonoitavan alueen rajat määritetään paikanpäällä tunnelissa, huomioiden kalliomassan paikalliset erityispiirteet. Q-luokituksen lujitussuositus kattaa sekä lopullisen että työnaikaisen lujituksen. Kallioluokitukset auttavat kiinnittämään huomiota sellaisiin seikkoihin kallion laadussa, joilla on merkitystä työnaikaisen ja lopullisen lujituksen suunnittelussa.

Q-luokituksen yhteydessä on annettu yksityiskohtainen lujitussuositus erilaisille kalliotiloille. Lujitussuositusta varten määritetään käyttötarkoitusta kuvaava ESR-luku, jolla jaetaan kalliotilan jänneväli. ESR-luku määrää yhdessä Q-luvun kanssa valitun lujitusstandardin. Valitun lujitusstandardin valinta ei ole aina yksiselitteinen asia. Teknisten näkökohtien lisäksi valintaan liittyy erilaisia arvostus ja painotusnäkökohtia. RMR-luokituksen yhteydessä on annettu lujitussuositus vain yhteen tunnelityyppiin. Q-luokituksen lujitussuositus vastaa paremmin suomalaista lujituskäytäntöä kuin RMR-luokituksen. Q-luokituksen lujitussuosituksia voidaan käyttää myös tunneleiden risteyksissä, sisäänmenoissa ja kuiluissa.

Kalliorakennushankkeen kaikissa vaiheissa on syytä käyttää molempia luokituksia, koska ne muodostuvat hieman eri parametreista. Tällöin luokitukset tarkistavat ja täydentävät toisiaan. Luokituksien vastaavuutta voidaan vertailla erilaisten kaavojen avulla. On muistettava, ettei luokitukset ole suoraan vertailukelpoisia. Molemmilla luokituksilla on omat hyvät ja huonot puolensa.

Q-luokituksen edut:

- suuri referenssitiedosto (1050 kohdetta)
- referenssikohteiden kallio-olosuhteet vastaavat suurelta osin suomalaisia kallio-olosuhteita
- luokitus laajalti käytössä eri puolilla maailmaa
- luokitus ei ole kovin herkkä yksittäisen parametrin määrityksessä tehdylle virheelle
- huomioi hyvin erilaiset kalliot, heikkousvyöhykkeet, paisuvan ja kokoonpuristuvan kallion
- erilaiset rakotyypit on hyvin kuvailtavissa lähtöparametrien avulla
- rakojen laadun perusteella saadaan arvio raon kitkakulmasta
- huomioi myös paisuvahilaiset rakotäytteet
- yksityiskohtaiset lujitussuositukset erityyppisille ja -kokoisille kalliotiloille
- lujitussuositukset erikseen katon ja seinän lujitusta varten
- lujitussuositukset huomioivat myös kuilut, sisäänmenoaukot ja risteykset
- lujitussuositukset myös louhinnanaikaista lujitusta varten
- lujitussuositukset huomioivat myös kalliotilan käyttötarkoituksen ESR-luvun avulla
- lujitussuositusten lujitusmenetelmät vastaavat Suomessa totuttua lujituskäytäntöä
- luokituksen avulla saadaan arvio kalliomassan kimmo-kertoimesta ja lujituksiin kohdistuvasta kuormituksesta
- luokituksessa on esitetty suurin mahdollinen tukematon jänneväli reunaehtoineen

Q-luokituksen puutteet:

- huomioi huonosti kallion suuntautumisen vaikutuksen
- luokitus ei huomioi erillisiä irrallisia lohkoja
- osa parametreista hankalia määrittää, esim. jännitystilatekijän SRF määrittäminen ilman jännitystilamittauksia on vaikeaa
- melko vähän kokemuksia erittäin huonoissa kivilajeissa

RMR-luokituksen edut:

- lähtöparametrit melko yksinkertaiset määrittää
- luokitus sopii moneen eri tilanteeseen, kuten tunnelit, kaivokset, luiskan vakavuus ja perustusten vakavuus.
- luokitus laajalti käytössä eri puolilla maailmaa
- huomioi kalliotilan suuntautumisen rakoiluun nähden
- luokituksen avulla saadaan arvio kalliomassan kimmo-kertoimesta, lujituksiin kohdistuvasta kuormituksesta sekä kalliomassan kitkakulmasta ja koheesiosta.

RMR-luokituksen puutteet:

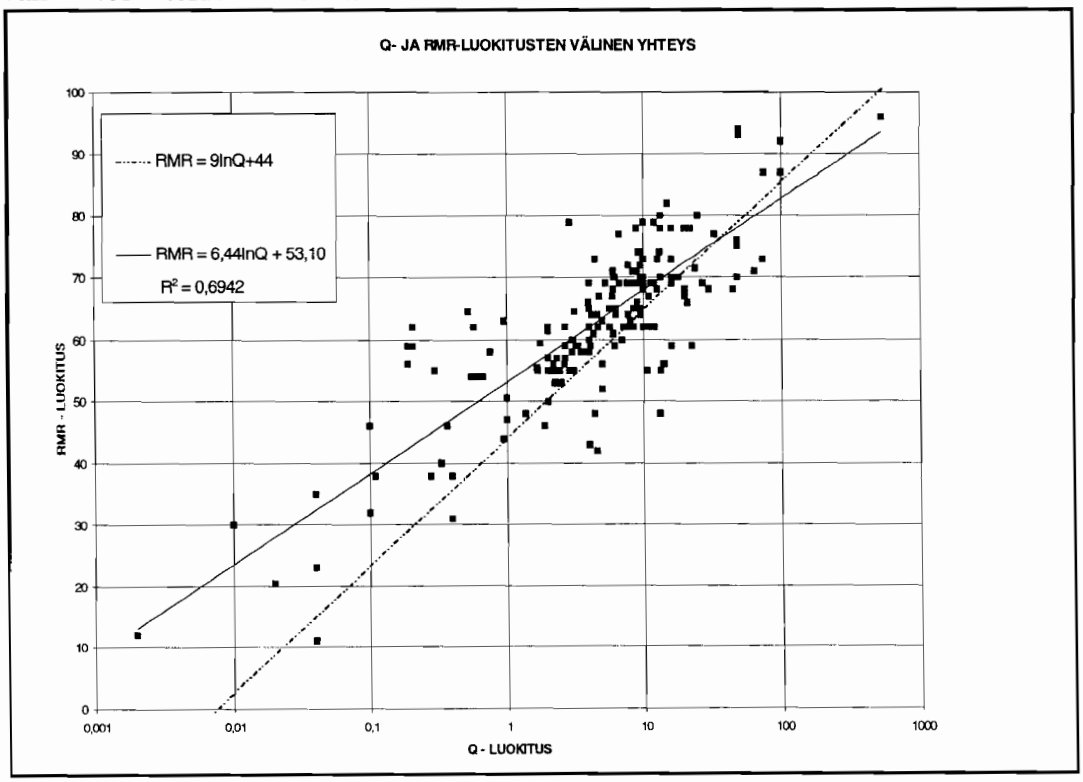
- luokituksessa on monia puutteita ja epätäsmällisyyksiä esim. monien parametrien määritys epätäsmällinen

- luokituksessa oletetaan kalliossa olevan kolme rakosuuntaa, jos rakosuuntia on vähemmän luokitus antaa turhan alhaisen arvon.
- luokitus ei huomio erillisiä irrallisia lohkoja
- referenssikohteista vain pieni osa Suomessa yleisissä kalliotyypeissä
- alkuperäinen luokitus ei huomioi jännitystilaa, heikkousvyöhykkeitä, paisuvaa ja kokoonpuristuvaa kalliota erikseen, kuten Q-luokitus
- lujitussuositukset vain yhteen tunnelityyppiin (poraus-räjäytys-menetelmällä tehty hevosenkengän muotoinen tunneli, jänneväli = 10 m, pystyjännitys < 25 MPa)
- lujitussuositukset ylimitoitettuja verrattuna muihin luokitusjärjestelmiin
- luokituksessa vain 5 lujitusluokkaa
- luokituksen pysyvyysajat ja suurimmat jännevälit epärealistisia Suomen olosuhteissa

Q- ja RMR-luokitusten välistä yhteyttä voidaan arvioida kaavan 2.2 avulla, jonka yleinen muoto on $RMR = x^a * \ln Q + y^b$, jossa x, y, a ja b ovat kallion rakoilusta ja laadusta riippuvia vakioita. Suomessa yleisesti käytetty muoto on $RMR = 9*\ln Q + 44$. Tarkastellessa tuloksia havaitaan, että Q-arvon ollessa < 10, RMR-arvo saa yleensä suurempia arvoja mitä kaava antaa. Tämä johtuu siitä, että Q-luokitus ei huomioi pienillä jännityksillä riittävästi kiven kovuutta. Kallion laatu laskeekin yleensä lähinnä rakoilun määrän ja laadun muutosten johdosta. Jotta yhtälö vastaisi paremmin suomalaista kovaa kalliota, on alhaisia Q-arvoja vastaavia RMR-arvoja korotettava. Tutkimuksen yhteydessä tehtyjen ja aiempien luokitusten perusteella, saadaan pienimmän neliösumman menetelmällä yhtälöksi:

$$RMR = 6{,}44 \ln Q + 53{,}10 \qquad (6.1)$$

Koska havainnot painottuvat keskialueelle, kaava ei ole kuitenkaan luotettava. Tekemällä lisähavaintoja erityisesti alueen ääripäissä, voidaan määrittää Suomen kallio-olosuhteisiin parhaiten sopiva yhteys Q- ja RMR-luokitusten välille. Riittävän tutkimusaineiston perusteella voidaan myös määrittää eri kallioiden rakoilusta ja laadusta riippuvien vakioiden arvot, jolloin oikea muunnoskaava voitaisiin valita olosuhteiden mukaan.



Kuva 6.1. Q- ja RMR-luokitusten välinen yhteys Suomessa tehtyjen luokitusten mukaan.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että Q- ja RMR-luokitukset soveltuvat Suomen kallioperään.

Luokituksien määrittäminen pelkkien parametrien määritystaulukoiden perusteella on hankalaa. Määrittäessä kallion luokitusta tarvitaan lisäksi tietoa parametrien valintaan vaikuttavista kriteereistä ja yksityiskohdista. Tässä työssä esitettyjä yksityiskohtaisia ohjeita noudattamalla kallioluokitusten määritys onnistuu ilman laajaa aiempaa kokemusta kallioluokituksista.

Tutkimuksen tuloksena on koottu Suomen oloihin soveltuvat määritysohjeet, joissa on koottuna Q- ja RMR-luokitusten määrittämisessä tarvittavat parametrit ja näkökohdat sekä niiden määrittämisen yksityiskohdat. Ohjeiden tavoitteena on ollut, että eri määrittäjät pystyvät määrittämään saman kallion vähintään lujitusluokan tarkkuudella. Edellytyksenä tälle on, että määrittäjä perehtyy taulukkojen lisäksi ohjeissa esitettyihin yksityiskohtiin.

Q- ja RMR-luokitusten käytöstä saadut kokemukset ovat melko vähäisiä Suomessa. Luokitukset tulee ottaa käyttöön, jonka jälkeen voidaan vertailla Suomessa käytettyjä lujitusmääriä ja -menetelmiä vastaaviin ulkomaisiin.

Luokitukset tulee määrittää työturvallisuuden kannalta kriittisissä paikoissa heti louhinnan jälkeen tai viimeistään tunnelin geologisen kartoituksen yhteydessä. Parametrit on määritettävä tunnelissa, ei kirjoituspöydän ääressä yleisen kuvailun perusteella. Kallion kuvaillaan luokitusten lähtöparametrien avulla. Täydentävä geologinen kartoitus tulee tehdä mahdollisuuksien mukaan ISRM:n suositusten mukaisesti. Myös rakennusgeologista kartoitusta voidaan tarvittaessa käyttää.

Kalliotilan lujituksen määrittäminen perustuu suurelta osin aiempiin kokemuksiin samanlaisissa olosuhteissa. Luokitusten antamat lujitussuositukset ovat suuntaa antavia. Lopullinen lujitus on määritettävä paikanpäällä, jolloin on huomioitava esim. erillisten lohkojen lujitustarve. Kallioluokitus auttaa kiinnittämään huomiota sellaisiin seikkoihin kallion laadussa, joilla on merkitystä työturvallisuuden ja lopullisen lujituksen suunnittelussa, sekä auttaa tunnistamaan kalliomassan käyttäytymisen kannalta merkittävimmät parametrit.

8 YHTEENVETO

Kallion laatua ja kalliomekaanisia ominaisuuksia voidaan arvioida kallioluokitusten avulla. Q- ja RMR-luokitukset ovat yleisimmät ja monipuolisimmat nykyisin käytetyistä kansainvälisistä kallioluokitusmenetelmistä. Työn tuloksena on laadittu Suomen olosuhteisiin sopivat yksityiskohtaiset ohjeet Q- ja RMR-kallioluokituksien määrittämiseksi kalliorakennushankkeen eri vaiheissa. Työn tarkoituksena on osaltaan edistää kansainvälisten kallioluokitusmenetelmien käyttöä Suomessa.

Ohjeissa on esitetty uusimmat parametrien määritystaulukot. Tutkimuksessa käsitellään kaikki luokituksiin liittyvät parametrit ja niiden määrittäminen kalliorakennushankkeen eri vaiheissa. Koska parametrit eivät ole yksiselitteisiä, näissä ohjeissa on esitetty myös ne kriteerit, joiden perusteella määritykset tehdään. Tutkimuksessa on käsitelty niitä yksityiskohtia, jotka eivät ilmene pelkästään parametrien määritystaulukoista. Tutkimuksessa keskitytään luokituksen käyttöön kalliorakennuskohteissa, eikä esitetä kaivoskohteiden sovellutuksia. Tutkimus keskittyy Q- ja RMR-luokituksiin, joista esitetään uusimmat käytössä olevat versiot (Q-luokitus 1993 ja RMR-luokitus 1989).

Q- ja RMR-luokituksen tuloksena saadaan kallion laadusta riippuva numeerinen arvo, jota voidaan käyttää arvioitaessa kalliotilan kalliomekaanista pysyvyyttä. Koska kalliomekaanisella pysyvyydellä ja lujituksella on keskinäinen yhteys, voidaan kallioluokitusta käyttää apuna myös tarvittavan lujituksen suunnittelussa. Luokitusten käyttäminen kalliomekaanisen suunnittelun apuna on empiirinen suunnittelumenetelmä, jossa käytetään hyväksi aikaisempia kokemuksia vastaavissa olosuhteissa.

Q- ja RMR-luokitusten määrityksiä on selvitetty aluksi kirjallisuustutkimuksen avulla, jossa on tarkasteltu tarvittavia lähtöparametreja ja niiden määritysmenetelmiä. Kirjallisuustutkimuksessa on esitetty lyhyesti yleisemmät käytetyt kallioluokitusmenetelmät, joita ovat Terzaghin, Laufferin, RQD-, RSR-, RMR- ja Q-luokitukset. Nämä luokitukset ovat merkittävimmät kallioluokitusten kehityksen kannalta. Näistä luokituksista Q- ja RMR-luokitukset soveltuvat parhaiten Suomen olosuhteisiin. Lisäksi ne ovat näistä menetelmistä kehittyneimmät ja monipuolisimmat.

Työn yhteydessä tehtiin kallioluokituksia Q- ja RMR-menetelmillä seuraavissa kalliorakennuskohteissa menetelmien selvittämiseksi ja kokeilemiseksi:

- Forumin pysäköintiluolan laajennus
- Kallionäytekairauksista 400 - 900 m syvyydeltä Länsi-Suomen alueella
- Maunulan väestönsuojan kalliotutkimuskairaukset
- Otaniemen keskusväestönsuoja
- Töölö-Alppila vesijohtotunneli
- Vuosaaren B-voimalan jäähdytysvesitunneli ja öljysäiliön ajotunneli

Kohteissa määritettiin kallioluokitus kalliopaljastumista, -leikkauksista, kalliotilan seinistä ja katosta sekä kairasydänten ja seismisten tutkimusten perusteella. Q- ja RMR-luokitusta voidaan käyttää apuna kalliorakennushankkeen kaikissa vaiheissa. Kun tiedot kalliomassasta ja sen ominaisuuksista tarkentuvat, voidaan myös luokitusta tarkentaa.

Tutkimuksen perusteella Q- ja RMR-luokitukset sopivat hyvin Suomen olosuhteisiin, joskin kokemukset näiden luokitusten käytöstä Suomessa ovat vielä vähäisiä. Luokitusten avulla voidaan vertailla Suomessa louhittavia kohteita ja niiden lujitusta vastaaviin ulkomailla. Luokitusmenetel-

miä käytetään apuna kalliomekaanisessa suunnittelussa ja lujitusten määrittämisessä. Ne auttavat osaltaan optimoimaan lujitustarvetta ja sitä kautta mahdollisesti pienentämään kustannuksia. Ne auttavat kiinnittämään huomiota kalliomekaanisen pysyvyyden kannalta merkittäviin asioihin.

KIRJALLISUUSVIITTEET

Afrouz, A. A. 1992, Practical Handbook of Rock Mass Classification Systems and Modes of Ground Failure. Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo: CRC Press, 195 s.

Ahola, J. Viitala, R. 1992, Lujitus ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa, Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, Geotekninen osasto.

Barton, N. Lien, R. Lunde, J. 1974, Engineering classification of rock masses for the desing of tunnel support. Rock Mechanics, Vol 6, No 4, ss 189-236.

Barton, N. 1976 Unsupported underground openings, Bergmekaniskt diskussionmöte i Stockholm 10 Februari 1976, Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo. Stocholm.

Barton, N. 1988, Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-system. Artikkeli kirjasta Kirkaldie, L. Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP 984. Philadelphia: American Society for Testing and Monitoring, 1988. 167 s.

Barton, N. Grimstad, E. Aas, G. Opsahl, A. Bakken, A. Pedersen, L. Johansen, E. D. 1992, Norwegian Method of Tunneling. World tunneling, june 1992. Turnbridge Wells, Kent, U.K.

Barton, N. Grimstad, E. 1994, The Q-system following Twenty Years of Application in NMT Support Selection. Felsbau 12 Nr. 6. Essen: Verlag Glückauf GmbH. ss. 428-436.

Barton, N. 1996, The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses, Norwegian Geotecnical Institute NGI, Oslo.

Bell, F. G. Engineering Properties of Soils and Rocks. 2nd ed. London, Boston, Durban, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington: Butterworths, 149 s.

Bhasin, R. Grimstad, E. 1996, The Use of Relationships in the Assessment of Stability, Tunneling and Underground space Technology, Vol. 11. No. 1 ss. 93-98, Pergamon.

Bieniawski, Z. T. 1988, The Rock Mass Rating (RMR) System (Geomechanics Classification) in Engineering Practise. Artikkeli kirjasta Kirkaldie, L. Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP 984. Philadelphia: American Society for Testing and Monitoring, 167 s.

Bieniawski, Z. T. 1989, Engineering Rock Mass Classifications. New York: John Wiley & Sons, 251 s.

Bieniawski, Z. T. 1993, Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends. Artikkeli kirjassa Comprehensive Rock Engineering, Vol 3. ed. J. H. Hudson. Pergamon Press. Oxford, New York, Soul, Tokio.

Brady, B. H. G. 1993, Brown, E. T. Rock Mechanics for Underground Mining, 2. painos, Chapman & Hall, Lontoo, Glasgow, New York, Tokio, Melbourne, Madras, 571 s.

Brown, E. T. 1981, Rock Characterization testing & Monitoring, ISRM Suggested Methods.Oxford, New york, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press, 211 s.

Deere, D. U. 1963, Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes, Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Vol 1, No 1, ss. 16-22.

Deere, D. U. Hendron, A. Patton, F. Cording E. 1967, Desing of Surface and Near-Surface Construction in Rock, Failure and Breakage of Rock, Fairhurst, Society of Mining Engineers of AIME, New York, ss. 237-302.

Deere, D. U. Deere, D. W. 1988, The Rock quality Designation (RQD) Index in Practice. Artikkeli kirjasta Kirkaldie, L. Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP 984. Philadelphia: American Society for Testing and Monitoring, 167 s.

Grimstad, E. Barton, N. 1993, Updating of the Q-system for NMT. Proc. of the International Symposium on Sprayed Concrete. Fagernes, Norway. Kompen, E. Opsahl, Berg. Norwegian Concrete Assosiation. ss. 46-66.

Hadjigeorgiou, J. Germain, P. Potvin, Y. 1994, In-situ Estimation of Rock Joint Alteration. Artikkeli julkaisussa Canadian Tunneling.

Heiner, A. Broms, B. 1979, Förstärkningen av lerzoner i berganläggningar, Byggforskningens Rapport R130:1979, Stocholm.

Hoek, E. Brown, E. T. 1980, Underground Excavations in Rock. London: The Institute of Mining and Metallurgy, 527 s.

Hoek, E. Kaiser, P. K. Bawden, W. F. 1995, Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam: Balkema, 215 s.

Hong Kong, Geotechnical Control Office. 1988, Guide to Rock and Soil Descriptions. Geoguide 3. Hong Kong.

Johansson, E. 1995, Olkiluodon ja Kivetyn ruhjerakenteiden Q-luvun määritys, Muistio, Insinööritoimisto Saanio & Riekkola Oy, Helsinki.

Kaiser, P. MacKay, C. Gale, A. 1986, Evaluation of Rock classifications at B. C. Rail Tumbler Ridge Tunnels, Rock Mechanics and Rock Engineering Vol 19, ss. 205-234, Springer-Verlag.

Kirsten, H. A. D. 1988, Case Historiesof Groundmass Characterization for Excavatability. Artikkeli kirjasta Kirkaldie, L. Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP 984. Philadelphia: American Society for Testing and Monitoring, 167 s.

Korhonen, K. -H. Gardemaister, R. Jääskeläinen, H. Niini, H. Vähäsarja, P. 1974, Rakennusalan kallioluokitus, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Geotekniikan laboratorio, Tiedonanto 12, 91 s.

Laubscher, D. H. 1977, Geomechanics classifications of jointed rock masses - mining applications, Trans. Institution of Mining and Metallurgy.

Lauffer, H. 1958, Gebirgklassifizierung für den Stollenbau, geol. Bauwesen, ss. 46-51.

Laine, T. 1988, Maunulan kalliosuoja, Kallio- ja louhintaselvitys,. Helsinki: Insinööritoimisto Laine & Vuorikari, 4 s.

Løset, F. 1990, Bruk av Q-metoden ved sikring av smale svakhetssoner og arbeidssikring, Oslo: Norges geotekniske institute, NGI, Intern raport 548140-1.

Løset, F. 1995, Bruk av Q-metoden ved tunnelkartlegging. Luonnos. Oslo: Norges geotekniske institute NGI. 33 s.

Løset, F. 1995, Ingeniørgeologisk logging av borkjerner. Luonnos. Oslo: Norges geotekniske institute NGI. 33 s.

Løset, F. Keskustelut ja kirjeenvaihto syksyn 1995 ja talven 1995-1996 aikana.

Løset, F. 1992, Support needs compared at the Svartisen road tunnel. Tunnels & Tunneling, June 1992.

Løset, F. 1996, The Q-method used in TBM tunnels, field mapping and core logging, NGI, Intern raport 540011-3.

Palmström, A. 1982, The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock jointing. Proceeding 4th congr. Int Assn. Engineering Geology., Delhi 5.

Palmström, A. 1995, Characteristing The Strenght of Rock Masses for Use in Desing of Underground Structures. Conference on Desing and Construction of Underground Structures New Delhi, India,

Riekkola, R. 1975, Suomalaisten vesitunnelien lujitustarpeen määrittäminen erään norjalaisen kallioluokituksen perusteella. Diplomityö. TKK, Rakennustekniikan osasto. Helsinki 120 s.

RIL 154-1, 1988 Tunneli- ja kalliorakennus I. Suomen rakennusinsinöörien liitto ry. RIL. Helsinki.

Ritter, W. 1879, Die statik der Tunnelgewölbe, Berlin: Springer.

Sen, Z. Kazi, A. 1984, Discontinuity Spacing and RQD Estimates from Finite Lenght Scanlines, International Journal of Rock Mechanism, Mining Science & Geomechanic, Vol 21, No 4, ss. 203-212, Pergamon Press.

Salmelainen, J. 1994, Kallioperätutkimustulosten käyttö kalliorakenteiden mitoituksessa, Kalliorakentaminen 2000, Osaprojekti 6.4, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y.. Helsinki.

Salmelainen, J. Syrjänen, P. 1994, Kampin sähköaseman rakennettavuusselvitys. Kalliosuunnittelu Oy. Helsinki.

Seidel, J. Haberfield, C. 1995, Towards an Understanding of Joint Roughness, Rock Mechanics and Rock Engineering Vol. 28, ss. 69-92, Springer-Verlag.

Stacey, T. R. Page, C. H. 1986, Practical Handbook for Underground Rock Mechanics.

Stillborg, B. 1986, Professional Users Handbook for Rock Bolting. Clausthal-Zellerfeld: Trans tech publications, 145 s.

Syrjänen, P. 1993, Maanalaistentilojen kalliomekaanisen suunnittelun perusteet. petusmoniste TKK-KAL B10. Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu, materiaali- ja kalliotekniikan laitos, Kalliotekniikan laboratorio 108 s.

Syrjänen, P. 1995, Kalliomekaaninen suunnittelu Kampissa, Kalliomekaniikan päivät 1995.

Terzaghi, K. 1946, Rock Defects and Loads on Tunnel Support. Rock Tunneling with Steel Supports, Commercial Shearing Co., Youngstown.

Verman, M. Jehtwa, J. Singh, B. 1991, Q-system modified for squeezing grounds, Tunneling 91, Institution of Mining and Metallurgy, New York.

Wegelius, A. Viitala, R. 1995, Lujitusmäärät Helsingin teknisissä tunneleissa, Kalliomekaniikan päivät 1995.

Wickham, G.E. Tiedemann, H.R. ja Skinner E.H. 1972, Support Determination Based on Geologic Predictions. Proceeding of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, AIME, New York.

Q-LUOKITUS, YHTEENVETOTAULUKKO

1. RQD luokat ja niiden merkitykset			
Laatuluokka		**Rakojen lukumäärä / m³ J_v**	**RQD-luku (%)**
A	Erittäin voimakkaasti rakoillut	> 27	0-25
B	Voimakkaasti rakoillut	20-27	25-50
C	Kohtalaisesti rakoillut	13-19	50-75
D	Vähän rakoillut	8-12	75-90
E	Erittäin vähän rakoillut	0-7	90-100

Huom. 1) Jos määritetty RQD ≤ 10, käytetään arvoa 10
Huom. 2) RQD-luku on riittävän tarkka ilmaistuna viiden yksikön välein (100, 95, 90...)
Huom. 3) RQD-luku on yli 100 mm:n kairasydännäytteiden osuus kairasydämen kokonaispituudesta luonnonrakojen kukaan.
Huom. 4) Jos kairasydäntä ei ole käytettävissä, voidaan RQD-luku määrittää kaavalla RQD = 115-3,3J_v ja $J_v=1/S_1+1/S_2+1/S_3+...$ Määritys voidaan tehdä myös lopussa olevan taulukon perusteella, rakoilun määrän mukaan (rakoilu/m³)

2. Rakosuuntien lukumäärätekijä J_n		J_n
A	Kiinteä kallio, ei rakoja tai vain muutamia rakoja	0,5...1
B	Yksi rakosuunta	2
C	Yksi rakosuunta ja satunnaista rakoilua	3
D	Kaksi rakosuuntaa	4
E	Kaksi rakosuunta ja satunnaista rakoilua	6
F	Kolme rakosuuntaa	9
G	Kolme rakosuuntaa ja satunnaista rakoilua	12
H	Neljä tai useampia rakosuuntia, satunnaista, voimakasta rakoilua, "soke-ripaloja", jne.	15
J	Kallio murskaantunutta, maan kaltaista	20

Huom. 1) Risteyksissä käytä (3,0 x J_n)
Huom. 2) Sisäänmenoaukoissa, käytä (2,0 x J_n)

3. Rakopintojen karkeusluku J_r		J_r
a) Rakopinnat kiinni toisissaan, tai b) Rakopintoja erottaa ohut rakotäyte, joka sallii enintään 100 mm leikkaussiirtymän		
A	Raot epäjatkuvia, karkea tai sileä ja portaittainen	4,0
B	Rakopinta karkea, aaltoileva	3,0
C	Rakopinta sileä, aaltoileva	2,0
D	Rako haarniskapintainen, aaltoileva	1,5
E	Rakopinta karkea, tasainen	1,5
F	Rakopinta sileä, tasainen	1,0
G	Rako haarniskapintainen, tasainen	0,5
Huom. 1) Kuvauksen ensimmäinen osa on rakopinnan pienen mittakaavan karkeus mm...cm suuruusluokassa, ja toinen osa on rakenteen suuren mittakaavan tasaisuus dm... m suuruusluokassa. Suuruusluokkien mittakaavat riippuvat vallitsevasta lohkarekoosta.		
c) Rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan ja niitä erottaa:		
H	Savimineraaleja sisältävä vyöhyke, joka on kyllin paksu estämään kontaktin	1,0
J	Hiekkaa, soraa tai murskaantunutta kalliota sisältävä vyöhyke, joka on kyllin paksu estämään kontaktin	1,0

Huom. 1) J_r:n arvoon lisätään 1,0 jos keskimääräinen rakoväli on yli 3 m
Huom. 2) Arvoa J_r = 0,5 voidaan käyttää tasomaisiin haarniskapintaisiin rakoihin joissa on viivaus, jos viivaus on suuntautunut mahdollisen liukusuunnan suuntaisesti.

4. Rakopintojen muuttuneisuusluku J_a		ϕ_r (noin)	J_a
a) Rakopinnat kiinni toisissaan (terveet tai yhteenkasvaneet raot, täytteiset)			
A	Yhteenkasvaneet raot tai rakotäyte tiivistä, kovaa, pehmenemätöntä ja läpäisemätöntä (esim kvartsi, maasälvät tai epidootti).	(-)	0,75
B	Muuttumattomat rakopinnat, pinta vain oksidoitunut tai likainen	(25°-30°)	1,0
C	Lievästi muuntuneet rakopinnat. Rakotäytteenä pehmenemättömiä mineraaleja, hiekkarakeita tai murskaantunutta savetonta kalliota.	(25°-30°)	2,0
D	Silttistä tai hiekkaista rakotäytettä, jossa pieniä määriä savea (savi pehmenemätöntä, ei paisuvaa)	(20°-25°)	3,0
E	Pehmeneviä tai pienen kitkan omaavia savimateriaalitäytteitä. (Esim. kaoliini, kiille, kloriitti, talkki, kipsi, grafiitti tms.) Vain pieniä määriä paisuvaa savea. (Täytteisyys epäsäännöllistä, paksuus korkeintaan 1...2 mm)	(8°-16°)	4,0
b) Rakopintoja erottaa ohut rakotäyte, joka sallii enintään 100 mm leikkaussiirtymän			
F	Täytteenä hiekkarakeita, murskaantunutta, savetonta kalliota	(25°-30°)	4,0
G	Vahvasti ylikonsolidoitunut, (pehmenemätön) savimineraalitäyte. (Täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm)	(16°-24°)	6,0
H	Keskinkertaisesti tai vähän ylikonsolidoitunut, (pehmenevä) savi-mineraalitäyte. (Täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm)	(12°-16°)	8,0
J	Paisuva savitäyte (täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm). J_a:n arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiintymisestä	(6°-12°)	8,0...12,0
c) Rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan ja niitä erottaa			
K	Murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Vahvasti ylikonsolidoi-tunut, pehmenevä savimineraalitäyte	(6°-24°)	6
L	Savea tai murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Vähän tai keskinkertaisesti ylikonsolidoitunut, pehmenevä savimineraalitäyte.	(6°-24°)	8
M	Savea tai murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Sisältää paisuvaa savea. J_a-arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiinty-misestä.	(6°-24°)	8...12
N	Silttistä tai hiekkaista savea sisältävät vyöhykkeet, pienet savivyöhyk-keet (pehmenemättömät)	-	5
O	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Vahvasti ylikonsolidoituneet, (peh-menemättömät)	(6°-24°)	10
P	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Keskinkertaisesti tai vähän ylikonsoli-doituneet, (pehmenevät)	(6°-24°)	13
Q	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Sisältävät paisuvaa savea. J_a-arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiintymisestä.	(6°-24°)	13...20

5. Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w		**Likim. veden-paine kg/cm²**	J_w
A	Kuivat kalliotilat tai vesivuodot hyvin pieniä (paikallisesti < 5 l/min)	< 1,0	1 ,0
B	Keskinkertaiset vesivuodot, satunnaista rakotäytteen poishuuhtoutumista	1,0...2,5	0,66
C	Suuret vesivuodot kohtalaisen hyvässä kalliossa, jossa raot ovat täyt-teettömiä	2,5...10,0	0,5
D	Suuret vesivuodot, rakotäytteen huomattavaa poishuuhtoutumista	2,5...10,0	0,33
E	Poikkeuksellisen suuret vesivuodot välittömästi räjäytyksen jälkeen, vuodot kuitenkin pienenevät myöhemmin	> 10	0,2...0,1
F	Poikkeuksellisen suuret pysyvät vesivuodot	>10	0,1...0,05

Huom. 1) Tekijät C...F ovat arvioita. J_w:n arvoa voidaan lisätä käytettäessä salaojitusta.
Huom. 2) Jään muodostumisesta aiheutuvia ongelmia ei ole otettu huomioon

6. Jännitystilaluku SRF		
a) Kalliossa heikkousvyöhykkeitä		**SRF**
A	Useita heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota, ympäröivä kallio hyvin löyhää (kaikki louhitun tilan syvyydet)	10,0
B	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota (louhitun tilan syvyys ≤ 50 m)	5,0
C	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota (louhitun tilan syvyys > 50 m)	2,5
D	Useita heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa, ympäröivä kallio löyhää (kaikki louhitun tilan syvyydet)	7,5
E	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa (louhitun tilan syvyys ≤ 50 m)	5,0
F	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa (louhitun tilan syvyys > 50 m)	2,5
G	Rakoilu erittäin tiheätä, raot löyhiä ja avoimia	5,0

Huom. 1) Jos heikkousvyöhyke ei lävistä kalliotilaa, mutta vaikuttaa sen pysyvyyteen, pienennetään SRF:n arvoa 25...50 %.

b) Hyvä kallio, jännitystilasta aiheutuvia ongelmia		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	**SRF**
H	Jännitykset pieniä, kalliotila lähellä pintaa, avoimet raot	> 200	< 0,01	2,5
J	Keskinkertaiset jännitykset, edulliset jännitysolosuhteet	200...10	0,01...0,3	1 ,0
K	Korkeat jännitykset, hyvin kiinteä rakenne. Yleensä edullinen lujuudelle, mahdollisesti epäedullinen seinien lujuudelle	10...5	0,3...0,4	0,5...2,0
L	Lievää kivilaattojen hilseilyä > 1 tunnin kuluttua (kiinteä kallio)	5...3	0,5...0,65	5...50
M	Kivilaattojen hilseilyä ja kallioräiskettä muutamassa minuutissa (kiinteä kallio)	3...2	0,65...1 ,0	50...200
N	Runsasta kallioräiskettä ja välittömiä dynaamisia muodonmuutoksia (kiinteä kallio)	< 2	> 1,0	200...400

Huom. 2) Voimakkaasti anisotrooppisessa jännityskentässä (jos mittauksia on suoritettu):
kun $5 \le \sigma_1/\sigma_3 \le 10$, kerrotaan σ_c arvolla 0,8
kun $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ kerrotaan σ_c arvolla 0,6
σ_c = puristuslujuus
σ_θ = kalliotilan suurin reuna- (tangentiaali-) jännitys
σ_1 = suurin pääjännitys
σ_3 = pienin pääjännitys
Huom. 3) Tarkasteltu vain harvoja tapauksia, joissa kalliokaton paksuus on jänneväliä pienempi. Jos jänneväli on suurempi kuin kalliokaton paksuus, ehdotetaan SRF nostettavaksi arvosta 2,5 arvoon 5

c) Kokoonpuristuva kallio		σ_θ/σ_c	**SRF**
O	Lievä kokoonpuristava paine	1 ...5	5...10
P	Suuri kokoonpuristava paine	>5	10...20

Huom. 4) Kokoonpuristuva kallio, huonon kallion muuttumisia plastiseksi korkean paineen vaikutuksesta. Louhitun tilan syvyys $H > 350Q^{1/3}$ ja kalliomassan puristuslujuus $\sigma_c = 7\gamma Q^{1/3}$, γ = kallion tiheys tonnia/m^3

d) Paisuva kallio; kemiallisen paisumisen voimakkuus riippuu veden määrästä		**SRF**
R	Lievä paisuttava paine	5...10
S	Suuri paisuttava paine	10...15

Huom. J_j ja J_a määritetään rakosuunnista, jotka ovat pysyvyyden kannalta vähiten suotuisia sekä suuntautumisen että rakopinnan leikkauslujuuden τ kannalta. (Kun $\tau \approx \sigma_n \tan^{-1}(J_r/J_a)$.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

7. Kallion laatuluokat Q-luokituksessa		**Q-luku**
G	Poikkeuksellisen heikko (exceptionally poor)	0,001...0,01
F	Erittäin heikko (extremely poor)	0,01...0,1
E	Varsin heikko (very poor)	0,1...1
D	Heikko (poor)	1...4
C	Kohtalainen (fair)	4...10
B	Hyvä (good)	10...40
A	Varsin hyvä (very good)	40...100
	Erittäin hyvä (extremely good)	100...400
	Poikkeuksellisen hyvä (exceptionally good)	400...1000

8. RQD-luku rakojen lukumäärän mukaan.			
RQD-luku (%)	**In-situ kallionpinnasta**	**Rakojen määrä pituusyksikköä kohden tai rakoväli, scanline tai kairasydän**	
	Rakojen lukumäärä J_v / (m^3)	**Keskim. rakoväli S / (mm)**	**Rakojen lukumäärä λ / (m)**
(5)	(33)	(21)	(48)
10	32	25	39
15	30	29	34
20	29	33	30
25	27	37	27
30	26	41	25
35	24	45	22
40	23	49	20
45	21	54	19
50	20	59	17
55	18	65	15
60	17	72	14
65	15	80	13
70	14	90	11
75	12	103	10
80	11	119	8
85	9	144	7
90	8	184	5
95	6	274	4
100	5	1000	0

Luokat a) ja b) rakopinnan karkeustekijä J_r		**Suuri mittakaava (desimetri-, metriluokka)**		
		Portaittainen, epäjatkuva	**Aaltoileva**	**Tasainen**
Pieni mittakaava (millimetri-, senttimetriluokka)	**Karkea**	4...5	3	1,5
	Sileä	3...4	2	1,0
	Haarniskapinta	1...2	1,5	0,5
Luokka c) rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan				
Karkeus ei vaikuta		1,0	1,0	1,0

Q-LUOKITUS, YHTEENVETOTAULUKKO

1. RQD luokat ja niiden merkitykset			
Laatuluokka	Kalliolaatu	Rakojen lukumäärä / m³ J_v	RQD-luku (%)
A	Erittäin heikko	> 27	0-25
B	Heikko	20-27	25-50
C	Kohtalainen	13-19	50-75
D	Hyvä	8-12	75-90
E	Erinomainen	0-7	90-100

Huom. 1) Jos määritetty RQD ≤ 10, käytetään arvoa 10
Huom. 2) RQD-luku on riittävän tarkka ilmaistuna viiden yksikön välein (100, 95, 90...)
Huom. 3) RQD-luku on yli 100 mm:n kairasydännäytteuden osuus kairasydämen kokonaispituudesta luonnorakojen kukaan.
Huom. 4) Jos kairasydäntä ei ole käytettävissä, voidaan RQD-luku määrittää kaavalla RQD = 115-3,3J_v ja J_v=1/S_1+1/S_2+1/S_3+... Määritys voidaan tehdä myös lopussa olevan taulukon perusteella, rakoilun määrän mukaan (rakoilu/m³)

2. Rakosuuntien lukumäärätekijä J_n		J_n
A	Kiinteä kallio, ei rakoja tai vain muutamia rakoja	0,5...1
B	Yksi rakosuunta	2
C	Yksi rakosuunta ja satunnaista rakoilua	3
D	Kaksi rakosuuntaa	4
E	Kaksi rakosuunta ja satunnaista rakoilua	6
F	Kolme rakosuuntaa	9
G	Kolme rakosuuntaa ja satunnaista rakoilua	12
H	Neljä tai useampia rakosuuntia, satunnaista, voimakasta rakoilua, "sokeripaloja", jne.	15
J	Kallio murskaantunutta, maan kaltaista	20

Huom. 1) Risteyksissä käytä (3,0 x J_n)
Huom. 2) Sisäänmenoaukoissa, käytä (2,0 x J_n)

3. Rakopintojen karkeusluku J_r		J_r
a) Rakopinnat kiinni toisissaan, tai b) Rakopintoja erottaa ohut rakotäyte, joka sallii enintään 100 mm leikkaussiirtymän		
A	Raot epäjatkuvia, karkea tai sileä ja portaittainen	4,0
B	Rakopinta karkea tai säännötön, aaltoileva	3,0
C	Rakopinta sileä, aaltoileva	2,0
D	Rako haarniskapintainen, aaltoileva	1,5
E	Rakopinta karkea tai säännötön, tasainen	1,5
F	Rakopinta sileä, tasainen	1,0
G	Rako haarniskapintainen, tasainen	0,5
c) Rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan ja niitä erottaa:		
H	Savimineraaleja sisältävä vyöhyke, joka on kyllin paksu estämään kontaktin	1,0
J	Hiekkaa, soraa tai murskaantunutta kalliota sisältävä vyöhyke, joka on kyllin paksu estämään kontaktin	1,0

Huom. 1) J_r:n arvoon lisätään 1,0 jos keskimääräinen rakoväli on yli 3 m
Huom. 2) Arvoa J_r = 0,5 voidaan käyttää tasomaisiin haarniskapintaisiin rakoihin joissa on viivoitus,
jos viivoitus on suuntautunut pienimmän leikkauslujuuden suuntaisesti.

4. Rakopintojen muuttuneisuusluku J_a		ϕ, (noin)	J_a
a) Rakopinnat kiinni toisissaan (terveet tai yhteenkasvaneet raot, täytteiset)			
A	Yhteenkasvaneet raot tai rakotäyte tiivistä, kovaa, pehmenemätöntä ja läpäisemätöntä (esim kvartsi, maasälvät tai epidootti).	(-)	0,75
B	Muuttumattomat rakopinnat, pinta vain oksidoitunut tai likainen	(25°-30°)	1,0
C	Lievästi muuntuneet rakopinnat. Rakotäytteenä pehmenemättömiä mineraaleja, hiekkarakeita tai murskaantunutta savetonta kalliota.	(25°-30°)	2,0
D	Silttistä tai hiekkaista rakotäytettä jossa pieniä määriä savea (savi pehmenemätöntä, ei paisuvaa)	(20°-25°)	3,0
E	Pehmeneviä tai pienen kitkan omaavia savimateriaalitäytteitä. (Esim. kaoliini, kiille, kloriitti, talkki, kipsi, grafiitti tms.) Voi sisältää pieniä määriä paisuvaa savea. (Täytteisyys epäsäännöllistä, paksuus korkeintaan 1...2 mm)	(8°-16°)	4,0
b) Rakopintoja erottaa ohut rakotäyte, joka sallii enintään 100 mm leikkaussiirtymän			
F	Täytteenä hiekkarakeita, murskaantunutta, savetonta kalliota	(25°-30°)	4,0
G	Vahvasti ylikonsolidoitunut, (pehmenemätön) savimineraalitäyte. (Täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm)	(16°-24°)	6,0
H	Keskinkertaisesti tai vähän ylikonsolidoitunut, pehmenevä savimineraalitäyte. (Täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm)	(12°-16°)	8,0
J	Paisuva savitäyte (täytteisyys jatkuvaa, paksuus < 5 mm). J_a:n arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiintymisestä	(6°-12°)	8,0...12,0
c) Rakopinnat eivät ole kiinni toisissaan ja niitä erottaa			
K	Murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Vahvasti ylikonsolidoitunut, pehmenevä savimineraalitäyte	(6°-24°)	6
K	Savea tai murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Vähän tai keskinkertaisesti ylikonsolidoitunut, pehmenevä savimineraalitäyte.	(6°-24°)	8
M	Savea tai murskaantunutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä Sisältää paisuvaa savea. J_a-arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiintymisestä.	(6°-24°)	8-12
N	Silttistä tai hiekkaista savea sisältävät vyöhykkeet, pienet savivyöhykkeet (pehmenemättömät)	-	5
O	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Vahvasti ylikonsolidoitunut (pehmenemättömät)	(6°-24°)	10
P	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet.Keskinkertaisesti tai vähän ylikonsolidoitunut.	(6°-24°)	13
Q	Paksut, jatkuvat savivyöhykkeet. Sisältää paisuvaa savea J_a-arvo riippuu saven paisuvuudesta ja veden esiintymisestä	(6°-24°)	13...20

5. Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w		Likim. veden-paine kg/cm²	J_w
A	Kuivat kalliotilat tai vesivuodot hyvin pieniä (paikallisesti < 5 l/min)	< 1,0	1 ,0
B	Keskinkertaiset vesivuodot, satunnaista rakotäytteen poishuuhtoutumista	1,0..2,5	0,66
C	Suuret vesivuodot kohtalaisen hyvässä kalliossa, jossa raot ovat täytteettömiä	2,5..10,0	0,5
D	Suuret vesivuodot, rakotäytteen huomattavaa poishuuhtoutumista	2,5..10,0	0,33
E	Poikkeuksellisen suuret vesivuodot välittömästi räjäytyksen jälkeen, vuodot kuitenkin pienenevät myöhemmin	> 10	0,2...0,1
F	Poikkeuksellisen suuret pysyvät vesivuodot	>10	0,1...0,05

Huom. 1) Tekijät C...F ovat arvioita. J_w:n arvoa voidaan lisätä käytettäessä salaojitusta.
Huom. 2) Jään muodostumisesta aiheutuvia ongelmia ei ole otettu huomioon

6. Jännitystilaluku SRF				
a) Kalliossa heikkousvyöhykkeitä				**SRF**
A	Useita heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota, ympäröivä kallio hyvin löyhää (kaikki tunnelin syvyydet)			10,0
B	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota (tunnelin syvyys ≤ 50 m)			5,0
C	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä, jotka sisältävät **savea** tai kemiallisesti hajonnutta kalliota (tunnelin syvyys > 50 m)			2,5
D	Useita heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa, ympäröivä kallio löyhää (kaikki tunnelin syvyydet)			7,5
E	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa (tunnelin syvyys ≤ 50 m)			5,0
F	Yksittäisiä heikkousvyöhykkeitä kohtalaisen hyvässä, **savettomassa** kalliossa (tunnelin syvyys > 50 m)			2,5
G	Rakoilu erittäin tiheätä, raot löyhiä ja avoimia			5,0
b) Hyvä kallio, jännitystilasta aiheutuvia ongelmia		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	**SRF**
H	Jännitykset pieniä, kalliotila lähellä pintaa, avoimet raot	> 200	< 0,01	2,5
J	Keskinkertaiset jännitykset, edulliset jännitysolosuhteet	200...10	0,01...0,3	1 ,0
K	Korkeat jännitykset, hyvin kiinteä rakenne. Yleensä edullinen lujuudelle, mahdollisesti epäedullinen seinien lujuudelle	10...5	0,3...0,4	0,5...2,0
L	Lievää kivilaattojen hilseilyä > 1 tunnin kuluttua (kiinteä kallio)	5...3	0,5...0,65	5...50
M	Kivilaattojen hilseilyä ja kallioräiskettä muutamassa minuutissa (kiinteä kallio)	3...2	0,65...1 ,0	50...200
N	Runsasta kallioräiskettä ja välittömiä dynaamisia muodonmuutoksia (kiinteä kallio)	< 2	> 1,0	200...400

Huom. 2) Voimakkaasti anisotrooppisessa jännityskentässä (jos mittauksia on suoritettu):
kun 5 ≤ σ_1/σ_3 ≤ 10, kerrotaan σ_c arvolla 0,8
kun σ_1/σ_3 > 10 kerrotaan σ_c arvolla 0,6
σ_c = puristuslujuus
σ_θ = kalliotilan suurin reuna- (tangentiaali-) jännitys
σ_1 = suurin pääjännitys
σ_3 = pienin pääjännitys
Huom. 3) Tarkasteltu vain harvoja tapauksia, joissa kalliokaton paksuus on jänneväliä pienempi. Jos jänneväli on suurempi kuin kalliokaton paksuus, ehdotetaan SRF nostettavaksi arvosta 2,5 arvoon 5

c) Kokoonpuristuva kallio		σ_θ/σ_c	**SRF**
O	Lievä kokoonpuristava paine	1 ...5	5...10
P	Suuri kokoonpuristava paine	>5	10...20

Huom. 4) Kokoonpuristuva kallio, huonon kallion muuttumisia plastiseksi korkean paineen vaikutuksesta. Kalliokaton korkeus H > 350$Q^{1/3}$ ja kalliomassan puristuslujuus σ_c = 7γ$Q^{1/3}$, γ = kallion tiheys tonnia/m³

d) Paisuva kallio; kemiallisen paisumisen voimakkuus riippuu veden määrästä		**SRF**
R	Lievä paisuttava paine	5...10
S	Suuri paisuttava paine	10...15

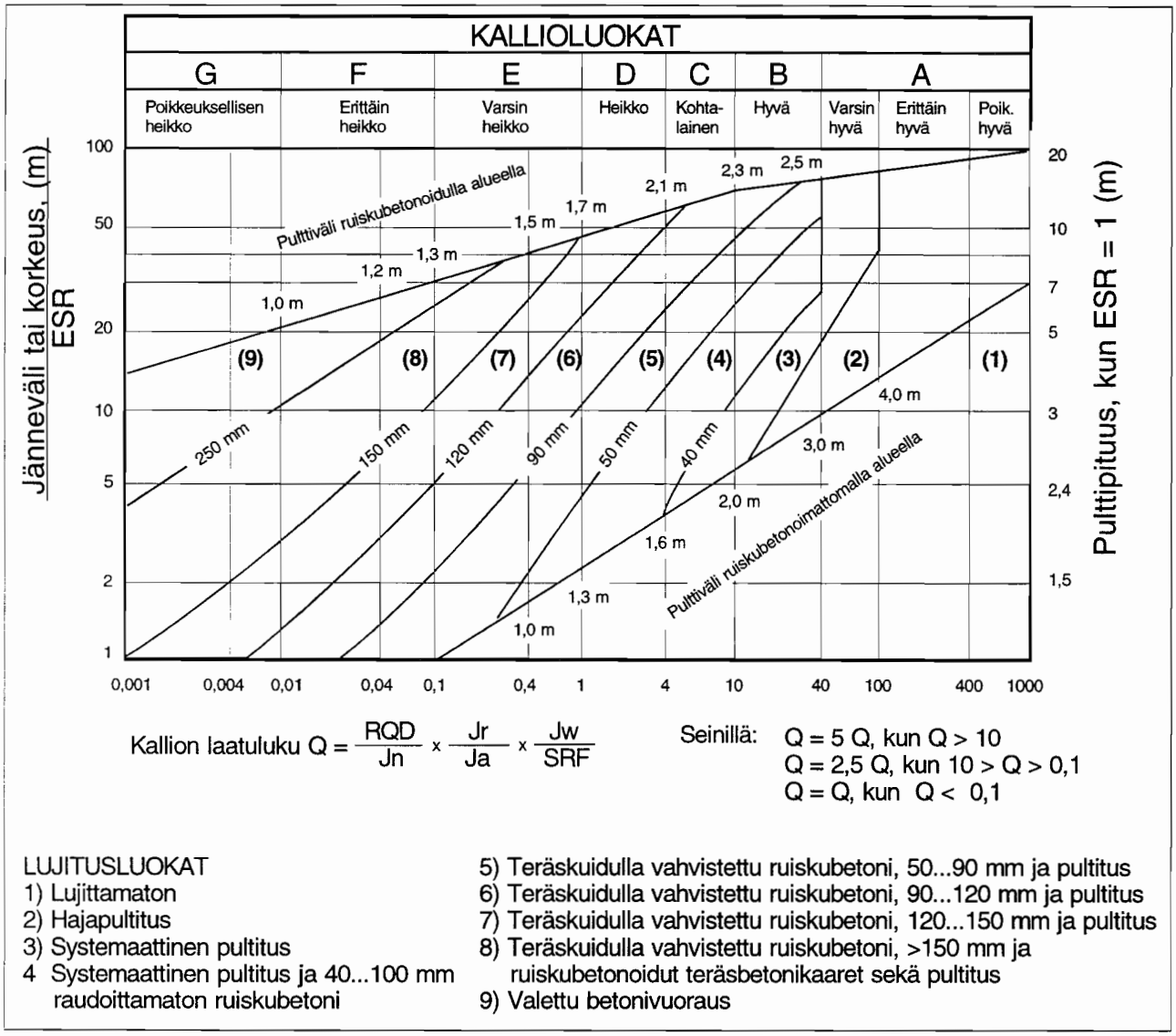
Huom. J_r ja J_a määritetään rakosuunnista jotka ovat stabiliteetin kannalta vähiten suotuisia sekä suuntautumisen että rakopinnan leikkauslujuuden Ÿ kannalta.
(kun Ÿ = $\sigma_n \tan^{-1}(J_r/J_a)$.
Valitse ominaisuus missä sortumisen alkaminen on todennäköisin

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

7. Kallion laatuluokat Q-luokituksessa		Q-luku
G	Poikkeuksellisen heikko (exceptionally poor)	0,001...0,01
F	Erittäin heikko (extremely poor)	0,01...0,1
E	Varsin heikko (very poor)	0,1...1
D	Heikko (poor)	1...4
C	Kohtalainen (fair)	4...10
B	Hyvä (good)	10...40
A	Varsin hyvä (very good)	40...100
	Erittäin hyvä (extremely good)	100...400
	Poikkeuksellisen hyvä (exceptionally good)	400...1000

8. RQD-luku rakojen lukumäärän mukaan.					
Rakojen lukumäärä / m³ (J_v)	RQD-luku (%)	Rakojen lukumäärä / m³ (J_v)	RQD-luku (%)	Rakojen lukumäärä / m³ (J_v)	RQD-luku (%)
(33)	(5)	23	40	12	75
32	10	21	45	11	80
30	15	20	50	9	85
29	20	18	55	8	90
27	25	17	60	6	95
26	30	15	65	5	100
24	35	14	70	<4,5	100

Q-luokituksen lujitussuositukset



LUJITUSLUOKAT
1) Lujittamaton
2) Hajapultitus
3) Systemaattinen pultitus
4 Systemaattinen pultitus ja 40...100 mm raudoittamaton ruiskubetoni
5) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 50...90 mm ja pultitus
6) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 90...120 mm ja pultitus
7) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, 120...150 mm ja pultitus
8) Teräskuidulla vahvistettu ruiskubetoni, >150 mm ja ruiskubetonoidut teräsbetonikaaret sekä pultitus
9) Valettu betonivuoraus

Kuva 1. Lujitussuositukset Q-luokituksen mukaan (Grimstad ym. 1993).

Taulukko 1. ESR-luku (Løset 1995a)

Luokka	Kalliotilan tyyppi	ESR
A	Väliaikaiset kaivostunnelit jne.	noin 3-5
B	Pystykuilut a) poikkileikkaus ympyrä b) poikkileikkaus suorakaide	 noin 2,5 noin 2,0
C	Pysyvät kaivostunnelit, vesitunnelit (ei suuripaineiset), tutkimustunnelit, pilot tunnelit jne.	1,6
D	Varastot, vedenpuhdistamot, pienet liikenne- ja rautatietunnelit, vesivoimalaitoksen aaltoilutilat, ajotunnelit jne.	1,3
E	Asemahallit, suuret tie- ja rautatietunnelit, väestönsuojat, pääsisäänkäynnit jne.	1,0
F	Ydinvoimalaitokset, rautatieasemat, urheilu- ja yleisötilat, tehtaat jne.	0,8
G	Tärkeät tilat, joilla on pitkät käyttöajat	0,5

Välitöntä eli louhinnan aikaista lujitustarvetta arvioitaessa suositellaan käytettäväksi seuraavia kertoimia:

$$ESR = 1{,}5 * ESR \text{ ja } Q = 5 * Q \text{ (katto) tai } Q_w = 5 * Q_w \text{ (seinät)}$$

Huomautuksia Q-luokituksen lähtöparametritaulukkoihin

1. **RQD-luvun** laskemiseksi mitataan kalliosta kairatusta sydännäytteestä yli 10 osien kokonaispituus ja lasketaan, montako prosenttia se on kairatun matkan pituudesta. Jos kairasydännäytteitä ei ole käytettävissä, RQD-luku voidaan määrittää rakojen lukumäärän perusteella tilavuusyksikköä kohden. Tällöin lasketaan yhteen kunkin rakosuunnan metrin matkalla olevat raot. RQD-luku määritetään liitteen 1 taulukon 8 perusteella. Taulukon toinen sarake antaa tarkimman RQD-luvun arvon, mutta kolmas ja neljäs sarake ovat usein helpompia käyttää.

2. **Rakosuuntien lukumäärää** kuvaava parametri J_n määritetään liitteen 1 taulukon 2 mukaisesti. Rakosuuntien lukumäärä ja satunnaisen rakoilun esiintyminen määritetään silmämääräisesti kalliopinnalta. Satunnaisella rakoilulla tarkoitetaan ensin määrättyihin rakoihin kuulumattomia yksittäisiä rakoja. Jos rakoilu on kauttaaltaan sekarakoilua, on tällöin arvioitava vastaako lohkareiden vapausaste 1, 2, 3 vai useampaa rakosuuntaa.

3. **Rakopinnan karkeusluku J_r** määritetään liitteen 1 taulukon 3 ja **rakopinnan muuttuneisuusluku J_a** taulukon 4 mukaan. Ne kuvaavat yhdessä rakopinnan leikkauslujuutta. Parametrit määritetään määritysalueen heikkolaatuisimman merkittävän rakosuunnan tai savitäytteisen epäjatkuvuuskohdan mukaan. Jos suhteelle J_r / J_a minimiarvon antava rakosuunta kuitenkin on kalliomekaanisen pysyvyyden kannalta edullisesti suuntautunut, saattaa jokin toinen epäedullisemmin suuntautunut rakosuunta tai heikkousvyöhyke olla merkittävämpi ja sen määräämää suurempaa arvoa J_r / J_a käytetään määrittäessä Q-arvoa.

4. **Rakojen vedenläpäisevyysluku J_w** vaikuttaa lähinnä rakojen leikkauslujuuteen. Luokitusperusteet on esitetty liitteen 1 taulukossa 5.

5. **Kallion jännitystilaluku SRF** määritetään liitteen 1 taulukon 6 mukaan. Jos kalliomassassa on savivyöhykkeitä on sen aiheuttama jännitystilan pieneminen huomioitava taulukon 6 a mukaisesti. Tällaisissa tapauksissa kiinteän kallion lujuuden merkitys on vähäinen. Rakoilun ollessa vähäistä ja ilman savitäytteitä kivilajin lujuudesta saattaa tulla heikoin tekijä. Tällöin kalliotilan pysyvyys riippuu kalliossa vallitsevan jännitystilan suhteesta ehjän kiven yksiaksiaaliseen puristusmurtolujuuteen (taulukko 6b). Hyvin anisotrooppisen jännityskentän huomioiminen on selvitetty taulukon 6 alahuomautuksessa 2. Yleisesti kalliomassan ehjän kiven puristus- ja vetolujuudet (σ_c ja q) tulisi arvioida pysyvyyden kannalta epäedullisessa suunnassa. Tämä on tärkeätä erityisesti voimakkaasti anisotrooppisissa kivilajeissa.

   Jos kalliomassan laatu vaihtelee määritysalueella merkittävästi luokitetaan nämä vyöhykkeet erikseen. Yleisesti kallionmassan laatuluku Q määritetään erikseen kahdella vierekkäisellä kalliomassalla jos niiden lujitus tulee käytännössä olemaan erilainen. Kuitenkin, jos laadultaan erilainen vyöhyke leikkaa tunnelin vain muutaman metrin matkalta, sitä ei usein luokiteta erikseen vaan arvioidaan koko alueen keskimääräinen Q-arvo.

   Melko kapeatkin pehmenevät ja paisuvat savivyöhykkeet vaativat usein erillisen lujitusrakenteen, joka riippuu saven määrästä ja tyypistä, saven veden saannista ja kallion laadusta. Joissakin tapauksissa kallion laatu on riittävän korkea ja vyöhyke riittävän kapea, ≤ 20 cm jätettäväksi ilman erillistä lujitusta. Tämä riippuu myös tunnelin tai kalliotilan käyttötarkoituksesta. Yleisesti savivyöhykkeiden erillisen luokittelun ja lujituksen lisäksi on koko tehtävä koko vyöhykkeen keskimääräinen luokittelu niin, että savivyöhykkeiden väliset alueet tulevat riittävästi lujitetuksi. Pienten heikkousvyöhykkeiden lujitus tehdään tiedotteen luvun 4.1.5 mukaisesti.

   Joissakin tapauksissa, epäedullisesta kallion rakoilusta johtuen, saattaa muodostua erillisiä melko suuria kalliolohkoja, jotka on lujitettava erikseen pultituksen avulla. Pultit mitoitetaan niihin kohdistuvan kuormituksen mukaan.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

RMR-LUOKITUS, YHTEENVETOTAULUKKO (Bieniawski 1989)

A. LUOKITUSPARAMETRIT JA NIIDEN PISTEYTYS									
Parametri			Vaihteluväli						
1	Koekappaleen lujuus	Pistekuormitusindeksi (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Tällä alueella suositellaan yksiaksiaalista puristuslujuutta		
		Yksiaksiaalinen puristuslujuus (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Pisteytys		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD-luku (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Pisteytys		20	17	13	8	3		
3	Rakoväli		> 2 m	0,6-2 m	200 -600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Pisteytys		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Rakojen laatu		-hyvin karkeat rakopinnat -raot epäjatkuvia -rakopinnat kiinni toisissaan -ei rapautumista	-lievästi karkeat rakopinnat -raon avautuneisuus < 1 mm -lievää rapautumista	-lievästi karkeat rakopinnat -raon avautuneisuus < 1 mm -voimakasta rapautumista	-haarniskapintaiset raot tai -savitäytteiset raot < 5 mm tai -raon avautuneisuus 1-5 mm -raot jatkuvia	-pehmeä savitäyte, paksuus > 5mm tai -raon avautuneisuus > 5 mm -raot jatkuvia		
	Pisteytys		**30**	**25**	**20**	**10**	**0**		
5	Pohjavesi	Virtaus 10 m tunnelipituudella	Ei yhtään	< 10 l/min	10...25 l/min	25...125 l/min	> 125 l/min		
		Suhdeluku raon vesipaine/suurin pääjännitys	0	< 0,1	0,1...0,2	0,2...0,5	> 0,5		
		Kuvaileva	Täysin kuiva	Kostea	Märkä	Tippuva	Virtaava		
	Pisteytys		**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		

B. RAKOSUUNTIEN VAIKUTUS						
Rakosuunnat		Hyvin edullinen	Edullinen	Kohtalainen	Epäedullinen	Hyvin epäedullinen
Pisteytys	tunnelit	**0**	**-2**	**-5**	**-10**	**-12**
	perustukset	**0**	**-2**	**-7**	**-15**	**-25**
	luiskat	**0**	**-5**	**-25**	**-25**	**-60**

C. KALLIOLUOKAT					
Kokonais pisteet (RMR-arvo)	100...81	80...61	60...41	40...21	20
Luokka	I	II	III	IV	V
Kalliolaadun kuvaus	erittäin hyvä	hyvä	kohtalainen	huono	eritäin huono

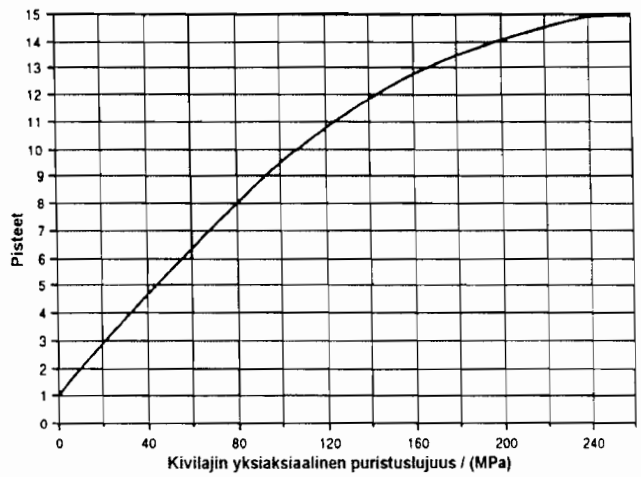
D. KALLIOLUOKKIEN MERKITYS					
Luokka	I	II	III	IV	V
Pysyvyysaika	20 vuotta 15 m:n jännevälillä	1 vuosi 10 m:n jännevälillä	1 viikko 5 m:n jännevälillä	10 tuntia 2,5 m:n jännevälillä	30 minuuttia 1 m:n jännevälillä
Kalliomassan koheesio	> 400 kPa	300...400 kPa	200...300 kPa	100...200 kPa	< 100 kPa
Kalliomassan kitkakulma	> 45°	35°...45°	25°...35°	15°...25°	< 15°

E. RAKO-OMINAISUUDET 1)					
Rakojen pituus (jatkuvuus)	< 1 m	1...3 m	3...10 m	10...20 m	> 20 m
Pisteytys	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**
Rakojen avauma	Ei	< 0,1 mm	0,1...1 mm	1...5 mm	> 5 mm
Pisteytys	**6**	**5**	**4**	**1**	**0**
Rakopintojen karkeus	Hyvin karkea	Karkea	Lievästi karkea	Sileä	Haarniskarako
Pisteytys	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**
Rakotäyte	Ei	Kova täyte < 5 mm	Kova täyte > 5 mm	Pehmeä täyte < 5 mm	Pehmeä täyte > 5 mm
Pisteytys	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**
Rapautuneisuus	Rapautumaton	Hiukan rapautunut	Keskinkertaisesti rapautunut	Voimakkaasti rapautunut	Täysin rapautunut
Pisteytys	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**

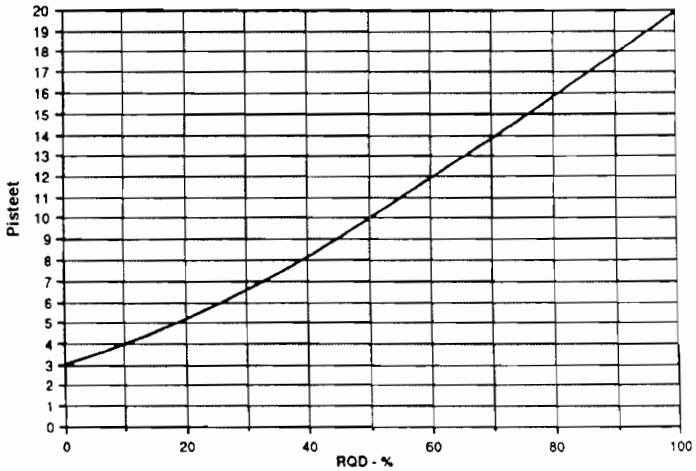
F. RAKOSUUNNAN VAIKUTUS						
Rakoilun kulku tunnelia vastaan kohtisuoraan				Rakoilun kulku tunnelin suuntainen		Kaade 0°...20° rakoilun kulusta riippumatta
Louhinta kaateen viettosuunnan mukaisesti		Louhinta kaateen viettosuuntaa vastaan				
Kaade	Kaade	Kaade	Kaade	Kaade	Kaade	
45°...90°	20°...45°	45°...90°	20°...45°	45°...90°	20°...45°	
Hyvin edullinen	Edullinen	Kohtalainen	Epäedullinen	Hyvin epäedullinen	Kohtalainen	Kohtalainen

Huom1) Kohtien A1, A2 ja A3 osalta tarkemmat arvot saadaan taulukoiden graaffisista kuvaajista.
Huom 2) Kohdan A4 arvo saadaan tarkemmin yksittäisten rako-ominaisuuksien perusteella kohdasta F.
Huom 3) Rako-olosuhteet ovat karkeita arvioita. Esim. rakotäytteen esiintyessä karkeuden merkitys ylikorostuu. Tällöin voidaan käyttää suoraan kohtaa A 4 rako-ominaisuuksien arvioimiseen.

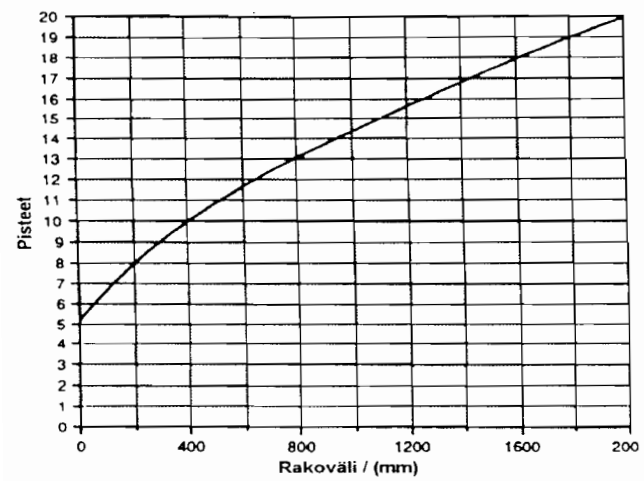
Taulukko A. Kivilajin puristuslujuuden pisteytys



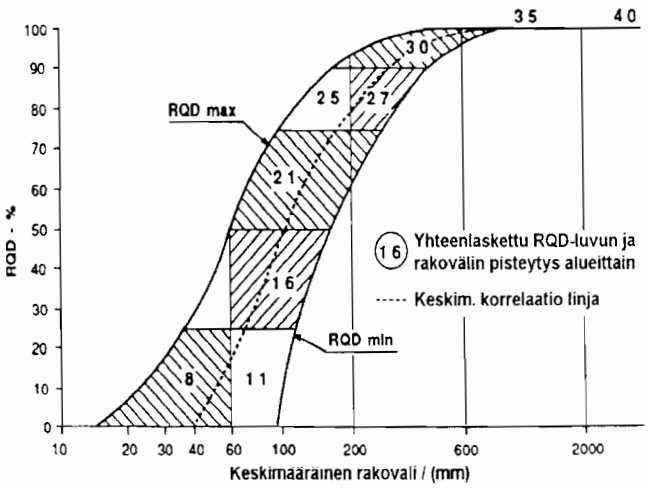
Taulukko B. RQD-luvun pisteytys

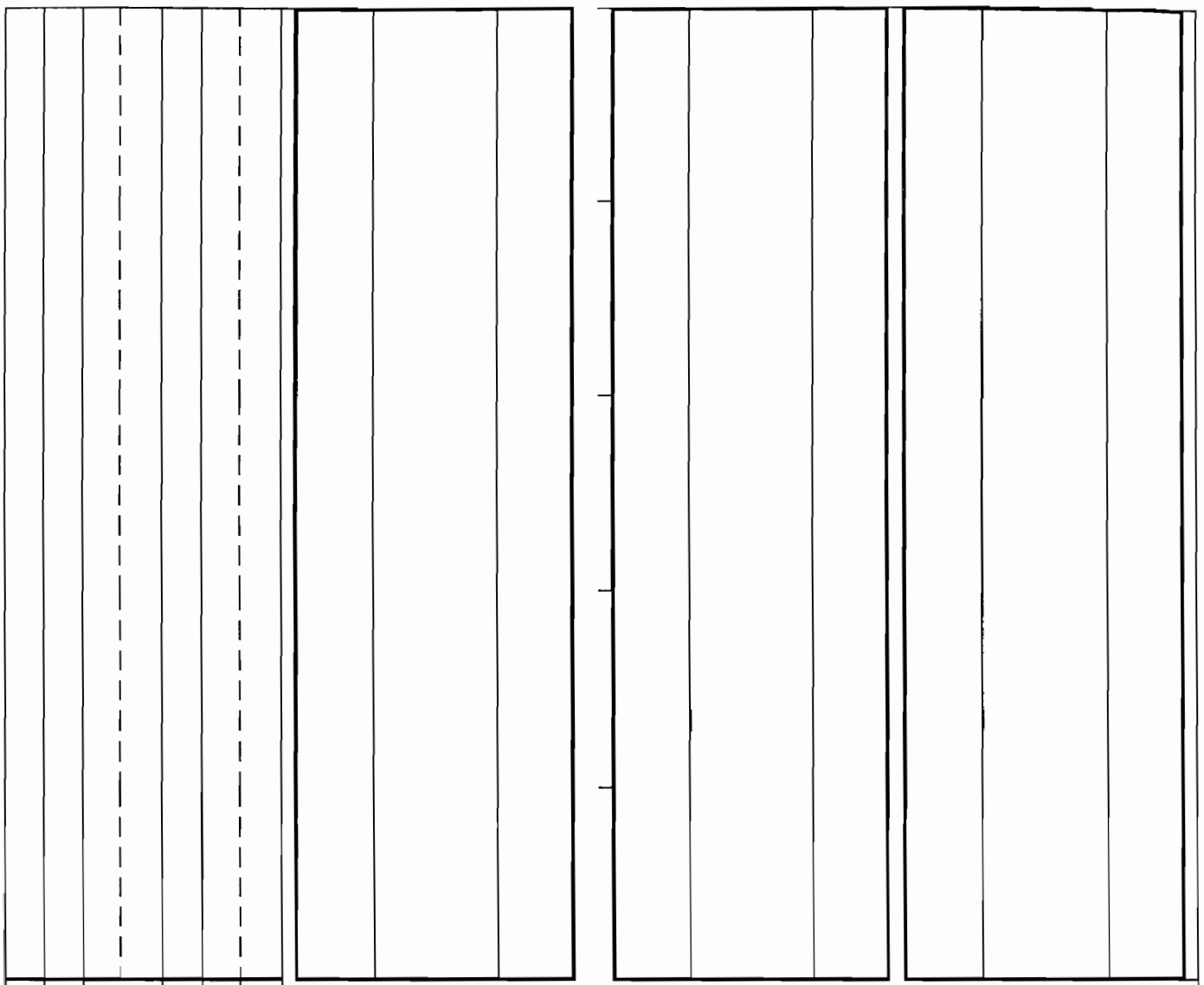


Taulukko C. Rakovälin pisteytys



Taulukko D. RQD-luvun ja rakovälin välinen yhteys





HUOM:

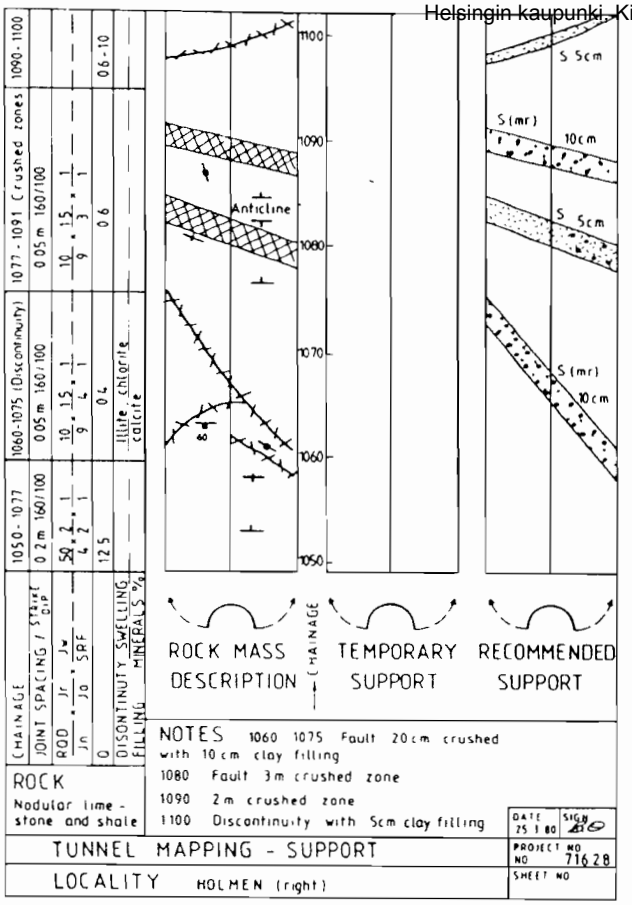
KALLIO:

PVM	KUIT
TYO NRO	
PIIR NRO	

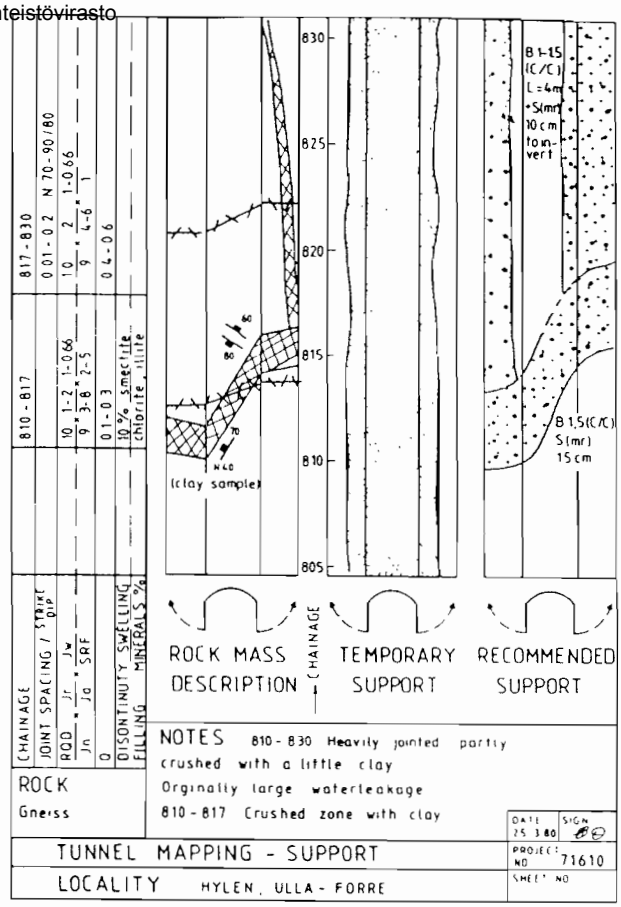
TUNNELIN KARTOITUS - LUJITUS

SIJAINTI:

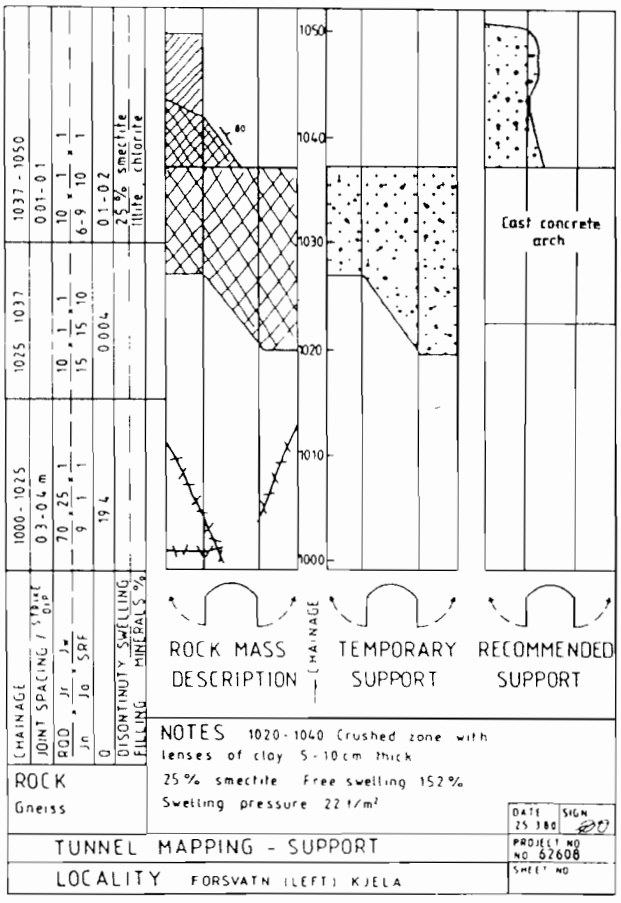
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto



A



B



C

ROCK MASS

- Discontinuity, thickness < 50 cm
- Crushed zone, without clay
- Crushed zone, weathered with clay
- 80 Strike / dip
- Dikes and sills

SUPPORT

- B Expansion bolts
- Bolts with bands
- B Grouted bolts
- S Shotcrete
- S(mr) Mesh reinforced shotcrete with grouted bolts
- Cast concrete arch

RAKENNUSGEOLOGINEN KALLIOLUOKITUS

KALLIOHAVAINTOMERKINNÄT

RAKENTEELLINEN KIINTEYS		RAKENNETYYPPI	
vihreä	Kiinteä kallio	Ma Ma Ma	Massarakenteinen
		Li Li Li	Liuskerakenteinen
		Se Se Se	Seosrakenteinen
keltainen	Löyhä kallio	Lö Lö Lö	Löyhärakenteinen
		Ra Ra Ra	Raparakenteinen
punainen	Rikkonainen kallio	Ri I	Halkeamarakenteinen
		Ri II	Rakorakenteinen
		Ri III	Murrosrakenteinen
		Ri IV	Ruhjerakenteinen
		Ri V	Savirakenteinen

— — — — Kalliolaadun raja

—·—·— Kivilaadun raja

RAKOILU

Yleismerkinnät

— —◇— — Pystyrakoilu (kaade 90...100^{gon})

— —◡— — Kalteva rakoilu (kaade 10...90^{gon})

—☼— Vaakarakoilu (kaade 0...10^{gon})

Goonilukemilla täydennetyt merkinnät

— —◇— — 200/100 Pystyrakoilu

— —◡— — 200/60 Kalteva rakoilu

—☼— 110/5 Vaakarakoilu

200/70 Yksittäinen merkittävä rako tai rakoryhmä

Kaateen ollessa 100^{gon} pidetään kaateen viettosuuntana kumpaa tahansa kulkua vastaan kohtisuorista suunnista.

Merkinnän viivan suunta ilmaisee rakoilun kulun suunnan ja goonilukuyhdistelmä rakoilun kaateen viettosuunnan ja -kulman. Osasten järjestyneisyys ilmoitetaan tarvittaessa merkinnän yhteydessä.

Merkinnän yhteydessä kaadelukujen lisäksi oleva luku ilmaisee tämän rakosuunnan rakoluvun (kpl/m).

Esim. — 370/50 — 8

VESIVUODOT

12.3.75 Vesivuodosta aiheutuvaa kosteutta

3.4.75 Tippuva vesivuoto

21.4.75 Juokseva vesivuoto

13 l/min Vesivuotoalueen raja

Vesivuodon havaintopäivämäärä kirjataan merkinnän yhteydessä. Juoksevan vesivuodon määrä tarkistetaan tarvittaessa mittaamalla ja ilmaistaan esim. (l)/min.

LIUSKEISUUS

Yleismerkinnät

Pystyliuskeisuus (kaade 90...100^{gon})

Kalteva liuskeisuus (kaade 10...90^{gon})

Vaakaliuskeisuus (kaade 0...10^{gon})

Goonilukemilla täydennetyt merkinnat

200/100 Pystyliuskeisuus

200/50 Kalteva liuskeisuus

110/5 Vaakaliuskeisuus

Kaateen ollessa 100^{gon} pidetään kaateen viettosuuntana kumpaa tahansa kulkua vastaan kohtisuorista suunnista.

Merkinnän viivan suunta ilmaisee liuskeisuuden kulun suunnan ja goonilukuyhdistelmä liuskeisuuden kaateen viettosuunnan ja -kulman. Osasten järjestyneisyys ja liuskeisuusaste ilmoitetaan merkinnän yhteydessä.

Liuskeisuuden suuntaisen rakoilun rakoluku (kpl/m) voidaan ilmaista liuskeisuutta ilmaisevan merkinnän yhteydessä ko. luvulla.

Esim. 380/70 L2 8 150/80 S2 5

KALLIONPINNAN KORKEUSKÄYRÄT

Kallionpinnan arvioitu korkeus

KALLIONPINTA LEIKKAUKSISSA

Tutkimustulosten perusteella arvioitu kallionpinta

Todettu kallionpinta

Louhittu kallionpinta

KOHDE: Päiväys: Numero:

Paaluluku:

VASEN SEINÄ	
KATTO	
OIKEA SEINÄ	
RQD-luku	
Rakosuuntien lkm, J_n	
Rakoväli, 1. rakosuunta	
Rakoväli, 2. rakosuunta	
Rakoväli, 3. rakosuunta	
Rakopituus, 1. rakosuunta	
Rakopituus, 2. rakosuunta	
Karkeusluku J_r	
Muuttuneisuus J_a	
Karkeus, JRC-luku	
Amplitudi, a/L, mm/m	
Rakolujuus, JCS, MPa	
Vedenläpäisevyys J_w	
Vuodot l/100m/min	
Rakoavauma, mm	
Rakotäyte, mm	
Rakopintojen rapautuneisuus	
UCS, σ_c MPa	
Jännitys, σ_1 MPa	
SRF	

RMR-LUOKITUKSEN LÄHTÖTIETOLOMAKE (Bieniawski 1993)

Työn nimi:

Työn numero:

Rakennuttaja:

Urakoitsija:

Tutkimuspaikka:

Pvm:

Määrittäjä:

RAKENTEELLINEN ALUE:	SYVYYS, m	KALLION TYYPPI

KOEKAPPALEEN LUJUUS

Nimike:	Yksiaksiaalinen puristuslujuus, MPa	TAI	Pistekuormitusindeksi, MPa
Erittäin korkea:	> 250		> 10
Korkea:	100 - 250		4 - 10
Melko korkea:	50 - 100		2 - 4
Keskinkertainen:	25 - 50		1 - 2
Alhainen:	5 - 25		< 1
Hyvin alhainen:	1- 5		

RQD-LUKU

Erinomainen:	90 - 100 %
Hyvä:	75 - 90 %
Kohtalainen:	50 - 75 %
Heikko:	25 - 50 %
Erittäin heikko:	< 25 %

RQD = Rock Quality Designation

KULUT JA KAATEET (SUUNNAT)

Rakosuunta 1	Kulku:..... (keskim.)	(väli:.....)	Kaade:..... (kulma)	..... (suunta)
Rakosuunta 2	Kulku:.....	(väli:.....)	Kaade:.....	.....
Rakosuunta 3	Kulku:.....	(väli:.....)	Kaade:.....	.....
Rakosuunta 4	Kulku:.....	(väli:.....)	Kaade:.....	.....

Huom. Suunnat magneettisia suuntia

RAKOVÄLI

		Rakosuunta 1	Rakosuunta 2	Rakosuunta 3	Rakosuunta 4
Hyvin harva:	> 2 m	.....	.....	.....	.....
Harva:	0,6 - 2 m	.....	.....	.....	.....
Keskinkertainen:	200 - 600 mm	.....	.....	.....	.....
Tiheä:	60 - 200 mm	.....	.....	.....	.....
Hyvin tiheä:	< 60 mm	.....	.....	.....	.....

POHJAVESI

Virtaus 10 m tunnelipituudella	.....	Kuvaileva (Täysin kuiva, kostea, märkä, tippuva, virtaava
litraa/minuutti:	.....	matala/korkea paine)
tai	.....	
Vedenpaine KPa	.....	.....

IN SITU JÄNNITYSTILA

RAKO-OLOSUHTEET

RAKOPITUUS (JATKUVUUS)		Rakosuunta 1	Rakosuunta 2	Rakosuunta 3	Rakosuunta 4
Hyvin pieni:	< 1 m	.....	.....	.....	.....
Pieni:	1 - 3 m	.....	.....	.....	.....
Keskinkertainen:	3 - 10 m	.....	.....	.....	.....
Suuri:	10 - 20 m	.....	.....	.....	.....
Hyvin suuri:	> 20 m	.....	.....	.....	.....
RAKOAVAUMA					
Hyvin tiiviit raot:	< 0,1 mm	.....	.....	.....	.....
Tiiviit raot:	0,1 - 0,5 mm	.....	.....	.....	.....
Keskinkertaisen tiiviit raot:	0,5 - 2,5 mm	.....	.....	.....	.....
Avoimet raot:	2,5 - 10 mm	.....	.....	.....	.....
Erittäin suuret rakoavaumat:	> 10 mm	.....	.....	.....	.....
KARKEUS: (Merkitse myös suuren mittakaavan karkeus, onko pinta portaittainen, aaltoileva tai tasainen)					
Hyvin karkea:		.....	.....	.....	.....
Karkea:		.....	.....	.....	.....
Lievästi karkea:		.....	.....	.....	.....
Sileä:		.....	.....	.....	.....
Haarniskarako:		.....	.....	.....	.....
RAKOTÄYTE					
Tyyppi:		.....	.....	.....	.....
Paksuus:		.....	.....	.....	.....
Yksiaksiaalinen puristuslujuus, MPa:		.....	.....	.....	.....
Vuotovedet:		.....	.....	.....	.....
RAKOPINTOJEN RAPAUTUMINEN					
Rapautumaton:		.....	.....	.....	.....
Hiukan rapautunut:		.....	.....	.....	.....
Keskinkert. rapautunut:		.....	.....	.....	.....
Voimakkaasti rapautunut:		.....	.....	.....	.....
Täysin rapautunut:		.....	.....	.....	.....
Maankaltainen:		.....	.....	.....	.....

HUOMAUTUKSET JA LISÄTIEDOT:

MERKITTÄVIMMÄT RUHJEET

Huom.
(1) Määritelmät ja menetelmät ISRM:n suositusten mukaisesti:

YHTEENVETOTAULUKKO: Q- JA RMR-LUOKITUS KAIRASYDÄMISTÄ (Muunnettu taulukkoa lähteestä Løset 1995)

ASIAKAS:	KIVILAJI:	SIVU	
KAIRAREIKÄ: KOKONAISSYVYYS:	KALLIOTYYPPI:	TARK. / PÄIV.	KAIR. / PÄIV.

SYVYYS		Q-LUOKITUS Q = RQD/Jn x Jr/Ja x Jw/SRF								RMR-LUOKITUS; RMR-pisteytys = 1+2+3+4+5+6														
														4) Rako-ominaisuudet										
D (m)	kair.syd. Pituus	RQD (%)	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	LUOKAT (A-G)		1) Puristus-lujuus σ_c (MPa)	2) RQD-luku	3) Rakoväli S (mm)	Pituus (m)	Avauma (mm)	Karkeus	Täyte (mm)	Rapautu-neisuus	5) Pohjavesi-olosuhteet (l/min/10m)	6) Rako-suunta α/β (°)	RMR PISTEY-TYS	LUOKAT (I-V)	RMR-Q RMR= 9lnQ+44	HUOMAUTUKSET
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														
										Arvo Pisteet														

Geotekninen osasto julkaisu 72

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

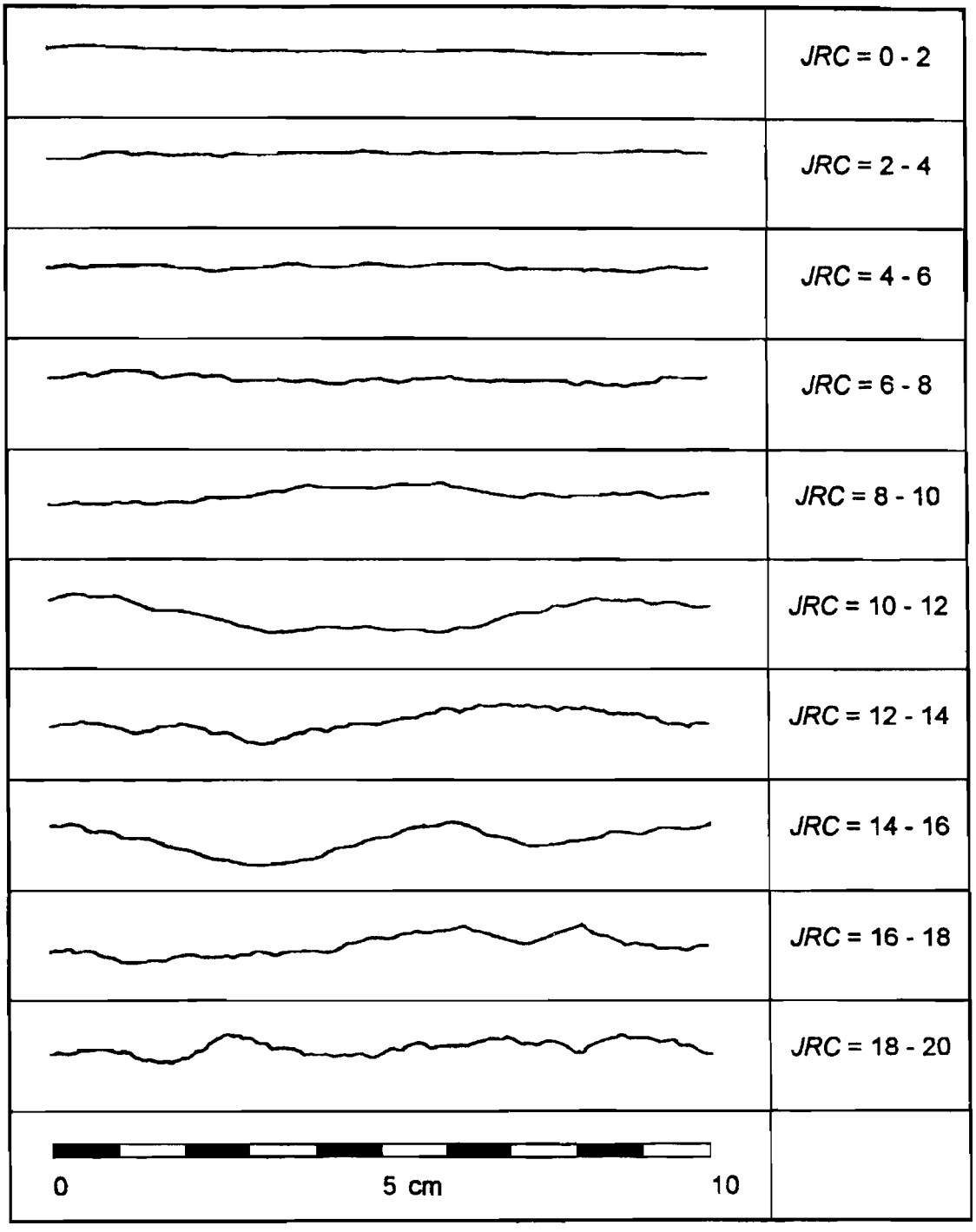
TABLE 1 Summary of Q and RMR logging

CLIENT VBB VIAK Malmo Citytunnelen
NGI 941017
BOREHOLE KBT1 DEPTH 0–30.04m

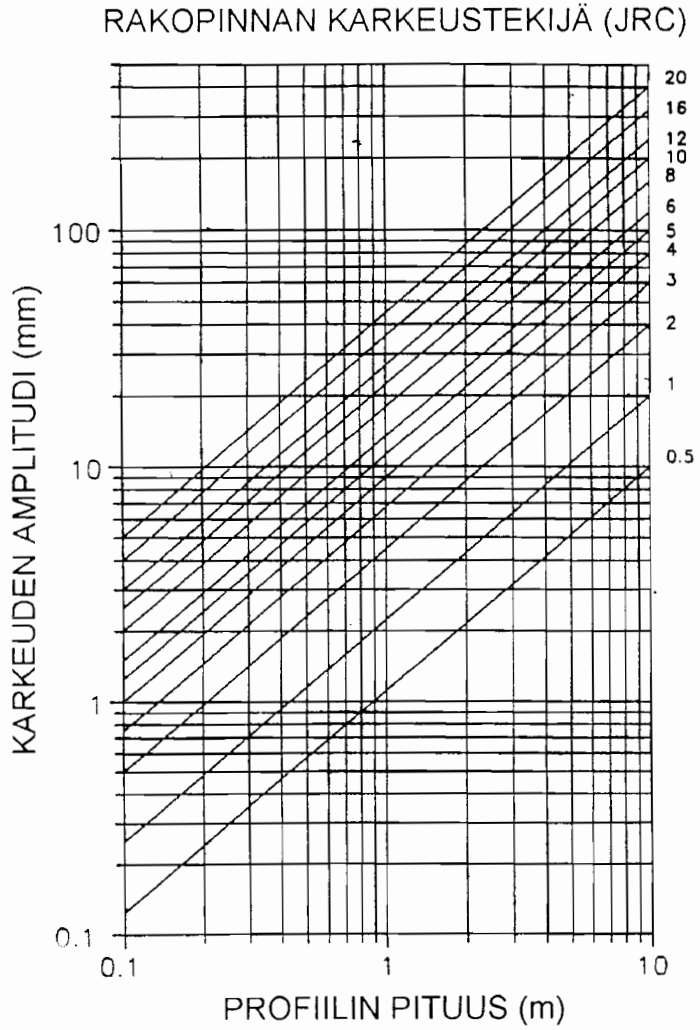
Geological Formation *Bryozo limestone* PAGE
Rock Type Limestone Checked by Logged by FL
Date Date 22 6 95

DEPTH		Q-SYSTEM Q = RQD/Jn x Jr/Ja x Jw/SRF									RMR - SYSTEM RMR Rating = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6												COMMENTS
											1) Rock Strength SIGMAc (MPa)	2) RQD RATING	3) Joint Spacing S (m)	4) Joint Condition					5) Groundwater Flow	6) Joint Orientation ALPHA/ BETA (°)	RMR RATING	CLASS (I–V)	
														Length (m)	Aperture (mm)	Roughness	Infilling (mm)	Weathering	(l/m/10m)				
D (m)	CORE LENGTH	RQD (%)	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	CLASS A–G														
0–										Value													
5.55										Rating													No cores
5.55–										Value	50	29	0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
7.62	2.07	29	4	3	4	0.33	2.5	0.72	E	Rating	5	6.5	6	2	5	5	2	5	4	5	35.5	IV	Some flint
7.62–										Value	50	0	>0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft >5	Slw	Dripping	Fair			
8.99	1.37	10	6	1	6	0.33	2.5	0.04	F	Rating	5	3	5	2	5	5	0	5	4	–5	29	IV	Partly crushed
8.99–										Value	50	77	0.2	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
10.12	1.13	77	4	3	3	0.33	2.5	2.54	D	Rating	5	15	8	2	5	5	2	5	4	–5	46	III	Grey limestone
10.12–										Value	50	0	0.05	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
11.91	1.79	10	4	3	3	0.33	2.5	0.33	E	Rating	5	3	5	2	5	5	2	5	4	–5	31	IV	Grey limestone
11.91–										Value	50	30	0.07	3–10	<0.1	Rough	Soft >5	Slw	Dripping	Fair			
14.31	2.4	10	4	1	6	0.33	2.5	0.17	E	Rating	5	6.5	6	2	5	5	0	5	4	–5	33.5	IV	10cm soft material
14.31–										Value	50	26	0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
15.92	1.61	26	4	3	3	0.33	2.5	0.86	E	Rating	5	6	6	2	5	5	2	5	4	–5	35	IV	Grey limestone
15.92–										Value	50	28	0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft >5	Slw	Dripping	Fair			
17.48	1.56	28	4	1	6	0.33	2.5	0.15	E	Rating	5	6.5	6	2	5	5	0	5	4	–5	33.5	IV	Partly crushed
17.48–										Value	50	67	0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
19.17	1.69	67	4	3	3	0.33	2.5	2.21	D	Rating	5	13	6	2	5	5	2	5	4	–5	42	III	Grey limestone
19.17–										Value	50	57	0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
21.3	2.13	57	4	3	3	0.33	2.5	1.88	D	Rating	5	12	6	2	5	5	2	5	4	–5	41	III	Grey limestone
21.30–										Value	50	49	0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
23.04	1.74	49	4	3	3	0.33	2.5	1.62	D	Rating	5	10	6	2	5	5	2	5	4	–5	39	IV	Grey limestone
23.04–										Value	50	34	0.06	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
24.3	1.26	34	4	3	3	0.33	2.5	1.12	D	Rating	5	7	5.5	2	5	5	2	5	4	–5	35.5	IV	Grey limestoen
24.30–										Value	50	7	0.05	3–10	<0.1	Rough	Soft >5	Slw	Dripping	Fair			
25.72	1.42	10	4	1	6	0.33	2.5	0.06	F	Rating	5	3.5	5	2	5	5	0	5	4	–5	29.5	IV	Thin soft zones
25.72–										Value	50	57	0.1	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
26.84	1.12	57	4	3	3	0.33	2.5	1.88	D	Rating	5	12	6	2	5	5	2	5	4	–5	41	III	Grey limestone
26.84–										Value	50	20	0.06	3–10	<0.1	Rough	Soft <5	Slw	Dripping	Fair			
30.04	3.2	20	4	3	3	0.33	2.5	0.66	E	Rating	5	5	5.5	2	5	5	2	5	4	–5	33.5	IV	Partly crushed

Fig. 26. Geotechnical logging results for the arch of the Olympic cavern [12, 13].



Rakopinnan karkeustekijän JRC määritys rakopinnan karkeuden perusteella (mittakaava 1:1)



Rakopinnan karkeustekijän JRC määritys rakopinnan karkeuden amplitudin perusteella

Kuvaus	Profiili	J_r	*JRC* 200mm	*JRC* 1 m
Karkea		**4-5**	**20**	**11**
Tasainen		**3-4**	**14**	**9**
Haarniska pinta		**1-2**	**11**	**8**
	Portaittainen			
Karkea		**3**	**14**	**9**
Tasainen		**2**	**11**	**8**
Haarniska pinta		**1.5**	**7**	**6**
	Aaltoileva			
Karkea		**1.5**	**2.5**	**2.3**
Tasainen		**1.0**	**1.5**	**0.9**
Haarniska pinta		**0.5**	**0.5**	**0.4**
	Tasainen			

Rakopinnan karkeusluvun J_r ja JRC-luvun välinen yhteys

Esimerkkitapauksissa on yleensä arvioitu, että parametrit $J_w = 1$ ja SRF = 1 Tunneliolosuhteissa parametrit voivat olla epäedullisempia.

Kuva 1. Kiillegneissi Q = 90/6 x 1,5/1 x 1/1 = 22,5
(Tunnelin suuaukko Q = 90/12 x 1,5/1 x 1/1 = 11,3)
Tunnelin otsa vaatii runsaasti lujitusta koska rakoilun suunta on epäedullinen

Kuva 2. Graniittigneissi Q = 90/4 x 1,5/1 x 1/10 = 3,4
(Tunnelin suuaukko Q = 90/8 x 1,5/1 x 1/10 = 1,7
SRF = 10 koska vallitseva jännitys on korkea.

Kuva 3. Graniitti Q = 100/1 x 4/1 x 1/1 = 400

Kuva 4.
Graniittigneissi
Q = 100/4 x 3/2 x 1/2,5 = 15
(Tunnelin suuaukko
Q = 100/8 x 3/2 x 1/2,5 = 7,5)
Tunnelissa ei ole lujitusta

Kuva 5. Kiillegneissi Aaltoilevat sileät rakopinnat (liuskeisuustasot)
Q = 80/4 x 2/2 x 1/1 = 20

Kuva 6. Kvartsiliuske Q = 20/3 x 1,5/1 x 1/1 = 10

Kuva 7. Kiillegneissi Q = 60/9 x 2/1 x 1/1 = 13,3

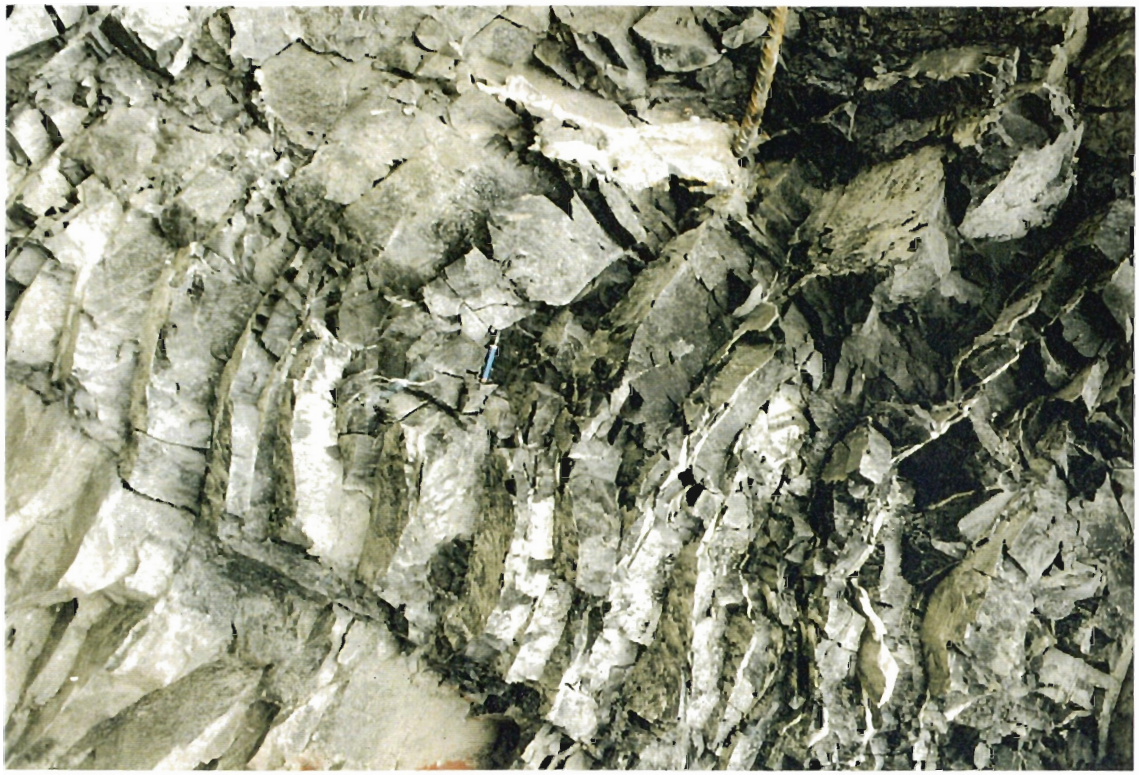
Kuva 8
Kalkkikivi Q = 50/4 x 1/2 x 1/1 = 6,3

Kuva 9
Kalkkikivi
Q = 100/6 x 1,5/2 x 1/5 = 2,5
(Tunnelin suuaukko
Q = 100/12 x 1,5/2 x 1/5 = 1,3)
SRF = 5 koska tunnelin otsassa on avoin leikkausrako

Kuva 10. Savikivi Q = 20/12 x 1,5/2 x 1/1 = 1,3

Kuva 11 Savikivi Q = 50/12 x 1,5/2 x 1/1 = 3,1

Kuva 12. Kiillegneissi Rakopinnat eivät kosketa toisiaan.
Q = 90/3 x 1/6 x 1/1 = 5



Kuva 13 Savikivi Q = 30/9 x 2/2 x 1/1 = 3,3

Kuva 14. Savikivi Q = 70/6 x 1,5/1 x 1/1 = 8,8

Kuva 15. Kiillegneissi Q = 90/9 x 1,5/1 x 1/1 = 15

Kuva 16. Kiillegneissi Q = 80/6 x 3/1 x 1/1 = 40

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET 1(2)

1	*Anttikoski, Usko*	Geotekniset kartat ja niiden käyttäminen	Suomi	1973	
2	*Anttikoski, Usko*	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1973	*
3	*Anttikoski, Usko*	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1974	*
4	*Mäkinen, Reino*	Täyttömakien rakentaminen kaupunkialueella	Suomi	1974	*
5	*Saarelma, Matti*	Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys	Suomi	1974	*
6	*Hartikainen, Jorma*	Kitkapaalujen kantavuus	Suomi	1976	
7	*Petäjä, Jouko*	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	Suomi	1977	
8	*Raudasmaa, Pekka*	Metrotunneleiden injektointi	Suomi	1977	*
9	*Anttikoski, Usko*	Kalliotunneleiden käyttö varastointiin	Suomi	1977	*
10	*Tikkanen, Heikki*	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	Suomi	1978	
11	*Arkima, Olli*	Kluuvin ruhjeen jäädytys	Suomi	1978	*
12	*Raudasmaa, Pekka*	Puiset perustusrakenteet	Suomi	1979	
13	*Havukainen, Jorma*	Voimalalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	Suomi	1979	
14	*Vähäaho, Ilkka*	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	Suomi	1979	*
15	*Raudasmaa, Pekka*	Pohjavesitarkkailu -80	Suomi	1980	
16	*Anttikoski, Usko*	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	Suomi	1979	*
17	*Roinisto, Jarmo*	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin	Suomi	1981	
18	*Havukainen, Jorma*	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	Suomi	1981	*
19	*Roinisto, Jarmo*	Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys	Suomi	1981	
20	*Vuola, Pekka*	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	Suomi	1981	
21	*Havukainen, Jorma & Korhonen, Osmo*	Tonttialueiden maarakenteet	Suomi	1981	
22	*Havukainen, Jorma*	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	Suomi	1981	
23	*Havukainen, Jorma*	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	Suomi	1982	
24	*Latvala, Ahti*	Rakennusjätteen alustava hyotykayttoselvitys	Suomi	1982	
25	*Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Sulamäki, Antti*	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	Suomi	1982	
26	*Halkola, Hannu*	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä	Suomi	1982	*
27	*Paavola, Pertti*	Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys	Suomi	1982	
28	*Vähäaho, Ilkka*	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	Suomi	1982	*
29	*Gulin, Kai*	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	Suomi	1982	
30	*Halkola, Hannu*	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	Suomi	1982	
31	*Havukainen, Jorma*	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	Suomi	1983	
32	*Havukainen, Jorma*	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	Svenska	1983	
33	*Havukainen, Jorma*	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	English	1983	
34	*Salmelainen, Juha*	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	Suomi	1983	
35	*Havukainen, Jorma*	Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista	Suomi	1983	
36	*Hytti, Pekka*	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	Suomi	1984	
37	*Lemonen, Jukka*	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syväarastossa	Suomi	1984	
38	*Pirinen, Jussi*	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	Suomi	1984	*
39	*Latvala, Ahti*	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	Suomi	1984	
40	*Korpela, Jaakko & Schüller, Mikael*	Jäykkien hitosjohtojen pohjarakenneselvitys (Jäli-selvitys)	Suomi	1984	
41	*Lahtinen, Eeva-Riitta*	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, välraportti)	Suomi	1985	
42	*Korpi, Juha*	In Situ-kuormituskoe painumien määrittämiseksi	Suomi	1985	
43	*Havukainen, Jorma*	Esirakentamisen kehittäminen	Suomi	1985	
44	*Vähäaho, Ilkka*	Jäähdytysmenetelmän käyttö	Suomi	1987	
45	*Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Latvala, Ahti*	Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	Suomi	1987	
46	*Julkunen, Arto*	Geofysikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	Suomi	1987	
47	*Hutri, Kaisa-Leena*	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	Suomi	1988	
48	*Melander, Kari*	Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	Suomi	1989	
49	*Leppänen, Mikko*	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	Suomi	1989	
50	*Vähäaho, Ilkka & Ryhänen, Hannu*	Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa	Suomi	1989	
51	*Vähäaho, Ilkka*	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	English	1989	
52	*Koskela, Pekka*	Routastabiloinnin vaikutus tuoppausmassaan	Suomi	1989	
53	*Saari, Mauri & Korhonen, Osmo*	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	Suomi	1990	
54	*Saari, Mauri & Volanen, Niilo*	Ruoholahden koepaalutus	Suomi	1990	
55	*Yrjana, Jouni & Korhonen, Osmo*	Pystyojitus Pikku-Huopalahdessa	Suomi	1991	
56	*Niinmaki, Risto & Raudasmaa, Pekka*	Viikinmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	Suomi	1992	
57	*Nieminen, Jarmo &*	Viikinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	Suomi	1992	

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET 2(2)

	Johansson, Erik & Holopainen, Pekka			
58	*Ahola, Jukka & Vuttala, Raimo*	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa	Suomi	1992
59	*Ravea, Timmo & Korhonen, Osmo*	Helsingin tulvapadon rakentamisen edellytykset	Suomi	1992
60	*Taipale, Hannu & Korhonen Osmo*	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	Suomi	1992
61	*Karlstedt, Paul & Halkola, Hannu*	Ylijäämäsavien massastabilointi	Suomi	1993
62	*Leiskallio, Antti & Lehtonen, Jouko*	Maankäytön geotekninen suunnittelu	Suomi	1993
63	*Anttikoski,Usko & Kumar, Seppo & Saarelainen, Seppo*	Kalliokaivanto jätehuollossa Esiraportti	Suomi	1993
64	*Rekonen, Riitu & Halkola, Hannu*	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	Suomi	1994
65	*Ulmala, Ola & Halkola, Hannu*	Puristinporakonekairaus	Suomi	1994
66	*Havukainen, Jorma*	Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa Matkakertomus	Suomi	1995
67	*Korkeakoski, Pasi & Lehtonen, Jouko*	Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset	Suomi	1996
68	*Puumalainen, Niina & Havukainen, Jorma*	Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä	Suomi	1996
69	*Mehtälä, Jani & Korhonen, Osmo*	Puotilan metroaseman pohjavesivaikutusten arviointi numeerisilla menetelmillä	Suomi	1996 **
70	*Niemunen, Jarmo & Anttikoski, Usko*	EU:n rahoitustuki Helsingin kaupungin tutkimustoiminnassa	Suomi	1996
71	*Junnila, Antti & Lehtonen, Jouko*	Geotekninen kustannustiedosto Geokut 96	Suomi	1996
72	*Wegelius, Arto & Vuttala, Raimo*	Kalliluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa	Suomi	1996
73	*Vähäaho, Ilkka*	Savien stabilointi eri sideaineilla, kenttäkokeiden tulokset	Suomi	1996

*) painos loppuunmyyty
**) ilmestyy lähiaikoina

Hinnat 1 kpl 90 mk, 2-3 kpl 80 mk, 4-6 kpl 70 mk, 7- kpl 65 mk
Tilauslomake http://www.kv.hel.fi/geo/tilaus.html

Malmin asematie 3 A 00700 Helsinki
puhelin 09-1691 fax 09-169 4555
Email geo.kv@hel.fi
http://www.kv.hel.fi/geo