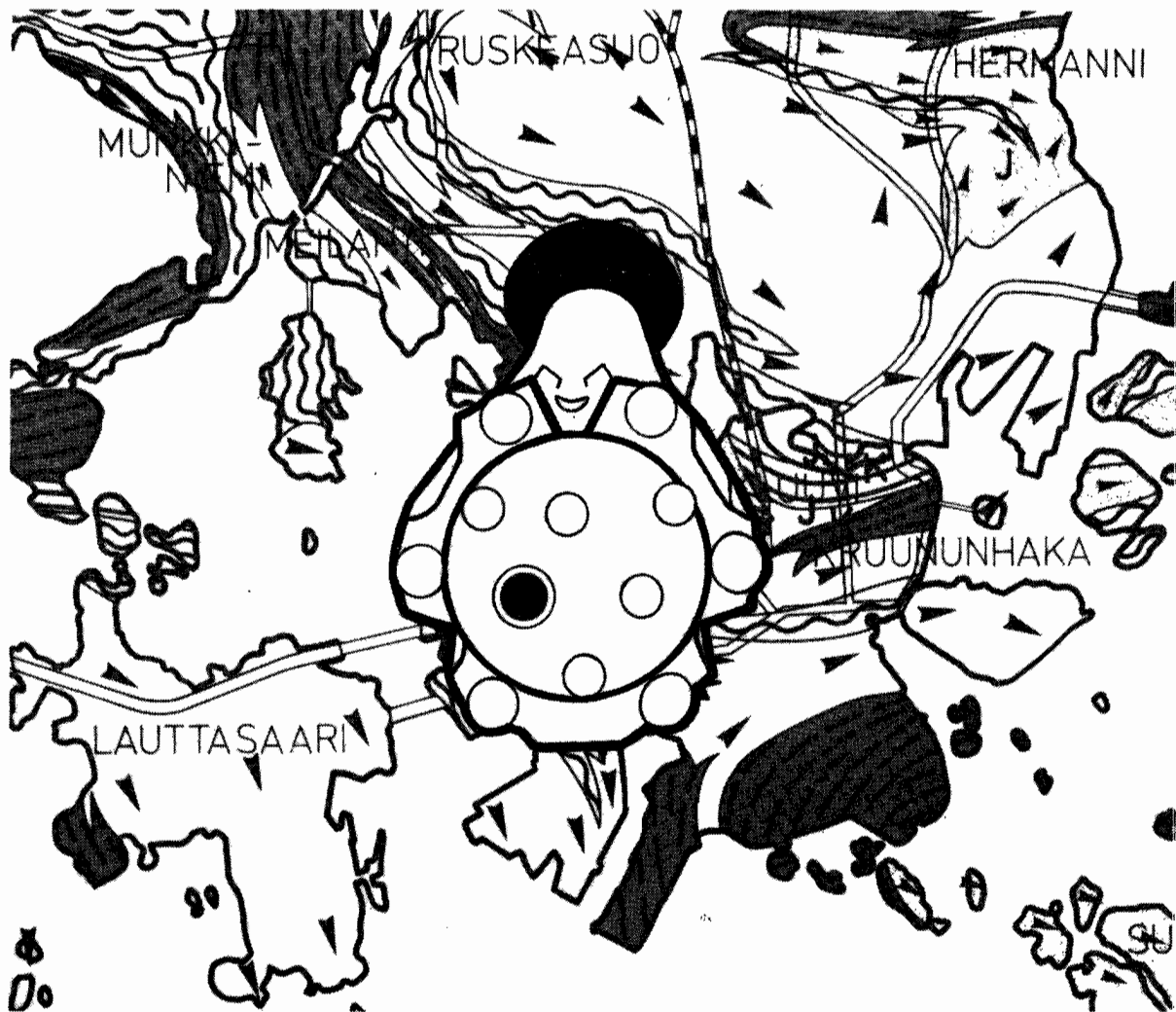




Juha Salmelainen

HELSINGIN KALLIOPERÄN GEOLOGIASTA JA KIVILAJIEN LUJUUSOMINAISUUKSISTA PORATTAVUUDEN KANNALTA

Juha Salmelainen

HELSINGIN KALLIOPERÄN GEOLOGIASTA JA
KIVILAJIEN LUJUUSOMINAISUUKSISTA
PORATTAVUUDEN KANNALTA

Geoteknisen osaston tiedote 34

TIIVISTELMÄ

Työssä on tutkittu Helsingin alueen pääkivilajeja petrologisin menetelmin 49 näytepisteestä. Tutkimuksessa on myös perehdytty kirjallisuuden pohjalta Helsingin ja Svekofenniidien eteläosan kallioperän rakenteeseen, kivilajeihin sekä niiden ikäsuhteisiin. Näiden tutkimusten yhteenvetona on laadittu geologinen karttaselitys Helsingin alueesta.

Tutkimusalueen prekambriset kivilajit ovat pääosiltaan seoskiviä - migmatiitteja, joista noin 46 % on syväkiviä ja 54 % pintakivilajeja. Pääkivilajeja ovat migmatiittinen graniitti, kvartsidioriitti, kiillegneissi ja metavulkaniittit (amfiboliittit). Iältään ne ovat noin 2000 - 1800 Ma. Synkinemaattisen vaiheen amfiboliittifasieksen aluemetamorfosisin jälkeen tapahtui mikrokliinigraniitin intruusio, joka aiheutti vanhempien kivilajien graniittiutumista ja migmatiittien muodostumista.

Tutkimuksen toisessa osassa on käsitelty geologisten ja fysikaalisten tekijöiden vaikutuksia kiven porattavuuteen. Porattavuutta selvitettiin laboratoriokokeilla, joissa määritettiin kivinäytteille kalliomekaaniset lujuusarvot ja porattavuusarvio (porausnopeusindeksi, DRI') sovelletulla koemenetelmällä. Kaikista kivinäytteistä tehtiin yksityiskohtaiset geologiset määritykset, joiden mukaan näytteiden kivilajit edustivat hyvin tutkimusalueen kallioperää. Kalliomekaanisia lujuusarvoja verrattiin keskenään lujuusjakautumien selvittämiseksi. Yhtenäisin kivilajiryhmä oli mikrokliinigraniittit. Määritettyjä porausnopeusindeksejä käytettiin suhteellisina porattavuuden arvoina, joita verrattiin vastaaviin kalliomekaanisiin lujuusarvoihin. Parhaiten DRI':n kanssa korreloivat pistekuormitusindeksi ja kimmomoduli. DRI'-arvot vastasivat graniittisilla kivilajeilla louhintaporauskalustolla määritettyjä todellisia tunkeutumisnopeuksia. Tunnelin kokoprofiiliporaus on DRI'-arvojen perusteella teknisesti mahdollista Helsingin kallioperässä.

ABSTRACT

Influence of Petrological and Strength Properties on Drilling Rates in the Rocks of Helsinki

The Svecofennidic bedrock of the investigated Helsinki area consists mainly of migmatitic granite, tonalite, mica gneiss and metavolcanites (mostly amphibolites) 1800 - 2000 My of age. Of the rocks 46 % are igneous origin and 54 % sedimentary and volcanic origin. The rocks were undergone regional metamorphism of the amphibolite facies. The intrusion of microcline granite followed the climax of the regional metamorphism. This caused granitization and migmatization of older rocks. The first part of the investigation will provide as an explanatory text to the 1:10 000 geological map of Helsinki.

In the second part of this investigation percussive drilling and fullface boring have been studied in hard rock. The geological and physical properties of the rock samples were examined by laboratory tests. One of the determined values was drilling rate index DRI'. Penetration rates in granitic rocks defined by DRI' values and the penetration rates of the Fixtrack drilling machine were in a good agreement.

According to the determined rock mechanical values the most homogenous group of rocks were microcline granites. The DRI' values indicate that fullface boring is technically possible for tunnel construction in Helsinki.

ALKUSANAT

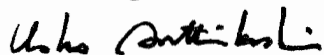
Helsingin kaupunki aloitti kalliooperän kartoitustyöt useita suunnitteilla olleita tunnelihankkeita silmälläpitäen 1950-luvun lopulla. Geoteknisen osaston käytössä olevat kallio-perätiedot koottiin yhtenäiseksi 1:10 000 mittakaavaiseksi kalliooperäkartaksi, joka painettiin vuonna 1978. Kartalla on esitetty kivilajien, tektonisten merkintöjen ja tärkeiden kairaustietojen ohella ruhjeiden luokittelu, jolloin on saatu yleiskuva kalliooperän rikkonaisuuden jakaantumisesta kaupungin alueella.

Vuosaaren viemäritunnelin rakennustyön yhteydessä todettiin konkreettisesti kallion perusominaisuuksien suuruusluokallinen selvitys välttämättömäksi. Parantunut poraustekniikka on johtanut louhinnan rytmityksen kiristymiseen. Louhintaprosessi on entistä haavoittuvampi ja sen suunnitteluun tarvitaan yhä yksityiskohtaisempia kalliooperätietoja.

Eri yhteyksissä on tehty tiedusteluja kallion ominaisuuksista ajatellen kokoprofiilimenetelmän käyttöä Helsingissä. Juha Salmelaisen tutkimuksessa on tästä syystä käsitelty myös tätä menetelmää iskuporauksen rinnalla.

Tutkimustyön tulokset ovat arvokas lisä geoteknisen osaston geo-tiedostoon. Eräänä perusselvityksenä se poistaa maanalaisten rakentamisen epävarmuustekijöitä, jotka usein ovat olleet syynä varaukselliseen suhtautumiseen kalliorakennushankkeissa.

Helsingissä 8.6.1983



Usko Anttikoski
osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

MERKINNÄT

1.	JOHDANTO.....	1
2.	HELSINGIN KALLIOPERÄN YLEISPIIRTEET.....	2
2.1	Yleistä.....	2
2.2	Paljastumasuhteet ja pinnanmuodostus.....	4
3.	KIVILAJIT: MINERALOGIA, ESIINTYMINEN JA SYNTYOLO- SUHTEET.....	5
3.1	Pintasyntysiset kivilajit.....	5
3.1.1	Esiintymisestä.....	5
3.1.2	Kvartsi-maasälpägneissit.....	7
3.1.3	Kalkkikivet ja karret.....	10
3.1.4	Pyrokseeni- ja amfiboligneissit.....	11
3.1.5	Kiillegneissit.....	12
3.1.6	Vulkaaniset kivilajit ja amfiboliitit..	13
3.2	Syväkivet.....	15
3.2.1	Esiintymisestä.....	15
3.2.2	Hornblendiitit.....	16
3.2.3	Gabrot ja dioriitit.....	17
3.2.4	Kvartsi- ja granodioriitit.....	18
3.2.5	Graniitit.....	21
3.3	Juonikivet.....	26
3.4	Malmeista ja muista hyötykivilajeista.....	27
3.5	Syntyolosuhteet.....	28
3.5.1	Metamorfoosi.....	28
3.5.2	Metasomatoosi.....	30
4.	KALLIOPERÄN RAKENNE JA KIVILAJIEN IKÄSUHTEET.....	33
4.1	Kallioperän rakenne.....	33
4.1.1	Yleistä.....	33
4.1.2	Poimutustektoniikka.....	33
4.1.3	Magmaintruusiot.....	34
4.1.4	Rakoilu ja ruhjeet.....	35
4.2	Stratigrafia ja kivilajien ikärakenteet.....	37
4.3	Helsingin kallioperäkartta.....	38

5.	PORAUSMENETELMÄT KALLIORAKENTAMISESSA.....	40
5.1	Yleistä.....	40
5.2	Porausmenetelmien jako.....	40
5.3	Iskuporaus.....	41
5.3.1	Iskuporausmenetelmät.....	41
5.3.2	Iskuporauksen poraus- ja porakalustot..	42
5.3.3	Kiven käyttäytyminen ja murtuminen iskuporauksessa.....	43
5.3.4	Poraustehoon vaikuttavat kalustotekijät iskuporauksessa.....	44
5.4	Kiertoporaus-murskausmenetelmä.....	49
5.4.1	Menetelmän periaate.....	49
5.4.2	Menetelmän suhde kokoprofiiliporaukseen	50
5.5	Kokoprofiiliporaus.....	51
5.5.1	Kokoprofiiliporauslaite.....	51
5.5.2	Kiven murtuminen kokoprofiiliporauk- sessa.....	52
5.5.3	Kokoprofiiliporauslaitteen tunkeutumis- nopeuteen vaikuttavat tekijät.....	55
5.5.4	Kivi- ja kalliolaatujen tutkiminen kokoprofiiliporauksta varten.....	60
5.5.5	Kokoprofiiliporauksessa syntyvän kivi- aineksen laatu.....	62
5.5.6	Kokoprofiiliporausmenetelmän edut ja haitat.....	63
6.	KIVILAJIEN PORATTAVUUS.....	65
6.1	Poraustulokseen vaikuttavat tekijät.....	65
6.2	Porattavuus.....	65
6.3	Porattavuuteen vaikuttavat fysikaaliset perusominaisuudet.....	67
6.3.1	Kiven fysikaaliset perusominaisuudet...	67
6.3.2	Kallion fysikaaliset perusominaisuudet.	68
6.4	Porattavuuteen vaikuttavat geologiset ominai- suudet.....	68
6.4.1	Geologisen materiaalin tutkiminen porattavuuden kannalta.....	68
6.4.2	Kiven geologiset ominaisuudet.....	70
6.4.3	Kallion geologiset ominaisuudet.....	74
6.5	Porattavuuden määrittäminen sovelletuilla fysikaalisilla menetelmillä.....	74

7.	TUTKIMUSMENETELMÄT.....	76
7.1	Tutkimusmenetelmien ja -materiaalin valinta...	76
7.2	Kimmomoduli, Poissonin luku ja puristusmurto- lujuus.....	79
7.3	Vetomurtolujuus.....	80
7.4	Tiheys.....	80
7.5	Pistekuormituslujuus.....	81
7.6	Haurausarvo.....	81
7.7	Sieversin J-arvo.....	83
7.8	Porausnopeusindeksi DRI.....	84
7.9	Ohuthietutkimukset.....	85
8.	TUTKIMUSTULOKSET.....	86
8.1	Tiheys, kimmomoduli, Poissonin luku, puristus- ja vetomurtolujuus.....	86
8.2	Pistekuormituslujuus.....	88
8.3	DRI'-arvo.....	89
8.4	Ohuthietutkimukset.....	90
8.5	Virhelähteet.....	90
9.	TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI JA VERTAILU.....	93
9.1	Fysikaalisten perusominaisuuksien vertailu....	93
9.2	DRI'-arvojen vertailu fysikaalisiin perus- ominaisuuksiin.....	96
9.3	Kivilajin mineraalikoostumuksen ja rakenteen vaikutus koetuloksiin.....	99
9.4	DRI'-arvojen ja koeporaustulosten vertailu kirjallisuusarvoihin.....	101
9.5	DRI'-arvojen ja kirjallisuuden kokoprofiili- poraustulosten vertailu.....	103
9.6	Porattavuuden määrittäminen kiven ja kallion fysikaalisten perusominaisuuksien ja geologis- ten ominaisuuksien sekä sovellettujen menetel- mien avulla.....	107
10.	YHTEENVETO.....	108
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	110
	LIITTEET	

MERKINNÄT

Amf		amfiboli
An ₃₀	%	plagioklaasin anortiittipitoisuus
AP		amfiboli ja pyrokseeni
DRI		Drilling Rate Index, porausnopeusindeksi
DRI'		tutkimuksessa määritetyt porausnopeusindeksit
E	GPa	kiven kimmomoduli
$\bar{E}$	GPa	kimmomodulien keskiarvo
F	N	koekappaleen murtokuormitus
F	MPa	murtokuormituspaine
ΔF	N	voiman lisäys
I _S	MPa	pistekuormitusindeksi Ø 32 mm:n kairan-sydännäytteestä
I _S (50)	MPa	pistekuormitusindeksi Ø50 mm:n kairan-sydännäytteestä
Ka		kalsiitti, karbonaatti
Ki		kiille
Kms		kalimaasälpä
Kv		kvartsi
M	g	alkuperäinen näytemäärä
M _L	g	seulan läpäissyt materiaali
Op		malmimineraali, opaakki
P		kuormitus
Pl		plagioklaasi
Py		pyrokseeni
S	%	n-1 -painotteinen keskihajonta
SJ		Sieversin J-arvo
S ₂₀		haurausarvo
W	kg	paino
a	m	kappaleen paksuus
amf		amfiboliitti
b	m	kappaleen leveys
c	m	kappaleen pituus
d ₀	m	koekappaleen alkuperäinen läpimitta
Δd	m	koekappaleen paksunema
gr		graniitti
grdr		granodioriitti
k, k+1	mm	kiekkoterän tunkeutuma kierrosta kohden

- IX -

kg _n		kiillegneissi
kv _{dr}		kvartsidioriitti
kv-ms _{gn}		kvartsi-maasälpägneissi
l _o	m	koekappaleen alkuperäinen pituus
Δl	m	koekappaleen lyhenemä
m ₁	kg	näytteen paino ilmassa
m ₂	kg	näytteen paino vedessä
sg _n		suonigneissi
sv-g _b		sarvivälkegäbro
sv-kg _n		sarvivälke-kiillegneissi
tuff		tuffiitti
α	°	liuskeisuuden kulma
γ		Poissonin luku
$\bar{\gamma}$		Poissonin lukujen keskiarvo
γ _{H₂O}	kg/m ³	veden tiheys määrittäyslämpötilassa
γ _k	kg/m ³	kivilajien keskimääräinen tiheys, 2,66·10 ³ kg/m ³
γ _N	kg/m ³	näytekivilajin tiheys
γ _S	kg/m ³	kiviaineksen tiheys
$\bar{\gamma}_S$	kg/m ³	tiheyksien keskiarvo
σ _p	MPa	pistekuormitusindeksistä määritetty puristusmurtolujuus
σ _{pm}	MPa	puristusmurtolujuus
$\bar{\sigma}_{pm}$	MPa	puristusmurtolujuuksien keskiarvo
σ _r	MPa	säteen suuntainen jännitys
σ _θ	MPa	tangentin suuntainen jännitys
σ _t	MPa	pistekuormitusindeksistä määritetty vetomurtolujuus
σ _{vm}	MPa	vetomurtolujuus
$\bar{\sigma}_{vm}$	MPa	vetomurtolujuuksien keskiarvo
∅	mm	läpimitta
//		yhdensuuntainen
⊥		kohtisuorassa
—		massamainen

1. JOHDANTO

Helsingin alueen kallioperän geologiaa on tutkittu viimeisen sadan vuoden aikana useiden henkilöiden toimesta. Tutkimusten tuloksena on alueelta olemassa yksityiskohtainen kallioperäkartta. Aluetta käsittelevää yhtenäistä kirjallista selvitystä ei kuitenkaan ole tehty. Tämän tutkimuksen eräänä tavoitteena on ollut tutkia ja selvittää kirjallisuuden sekä laboratorio- ja kenttätutkimusten avulla Helsingin alueen kallioperän geologiaa siinä laajuudessa, missä se on esitetty Helsingin alueen kallioperäkartassa mittakaavassa 1:10 000.

Tutkimuksen toisena tavoitteena on ollut selvittää Helsingin kallioperän pääkivilajien lujuusominaisuuksia ja porattavuuksia petrologisten ja fysikaalisten laboratoriokokeiden avulla. Taustana tälle on ollut Helsingin kaupungin runsas kalliorakentaminen. Kivilajien porattavuudella on keskeinen osuus kalliorakentamisessa. Iskuporaukseen ja räjäyttämiseen perustuvan tunnelirakentamisen ohella arvioidaan lähitulevaisuudessa käytettävän myös ns. kokoprofiiliporausta.

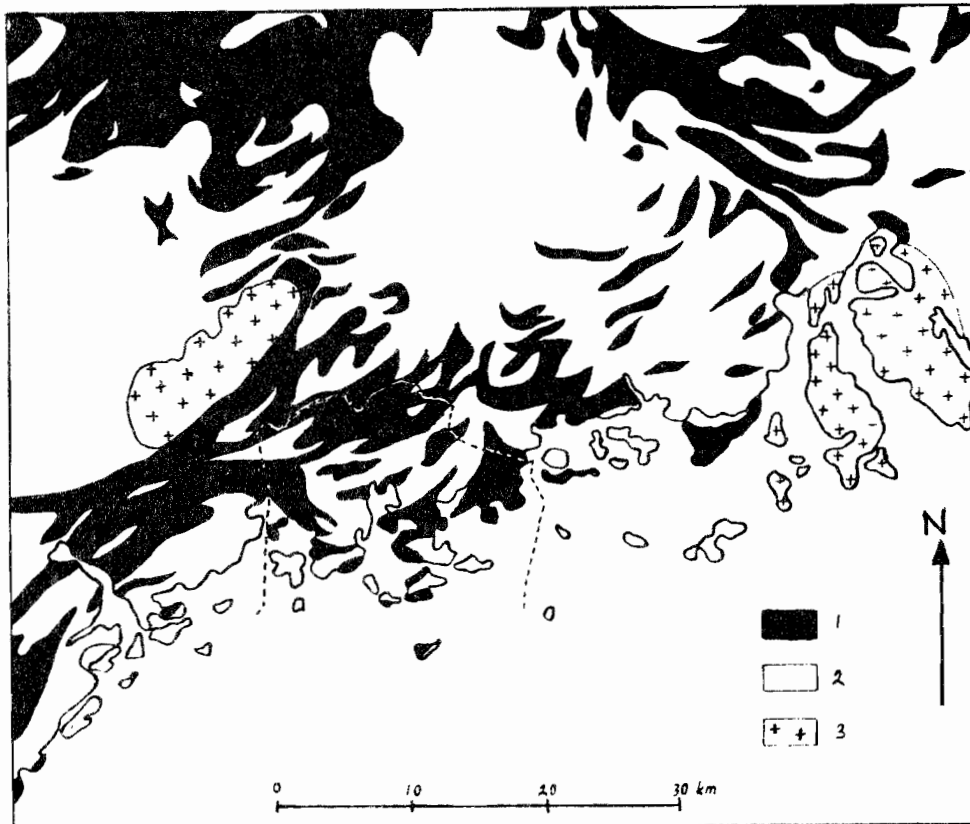
Tutkimusmenetelmien valinnassa on huomioitu ISRM:n (International Society for Rock Mechanics) suosittelmien menetelmien lisäksi niiden käytännön toteutettavuus sekä Teknillisen korkeakoulun vuoriteollisuusosaston louhintatekniikan laboratoriossa käynnissä olevan porattavuustutkimuksen tarjoamat mahdollisuudet.

Mikroskooppitutkimukset ja pääosa laboratoriokokeista on tekijän suorittamia. Pistekuormituslujuudet on Leena Korkiala määrittänyt tähän tutkimukseen liittyneessä maarakennusmekaniikan ja pohjarakennuksen erikoistyössään.

2. HELSINGIN KALLIOPERÄN YLEISPIIRTEET

2.1 Yleistä

Osana Etelä-Suomen svekofennialaista kallioperää koostuu Helsingin alue gneisseistä, metavulkaniiteista sekä grani-
toidisista syväkivistä, jotka yhdessä muodostavat paikoin
seoksisia kivilajeja, migmatiitteja (kuva 1). Näistä sel-
västi nuorempia ovat alueella tavattavat muutamat juoni-
kivet. Iältään Helsingin alueen prekambriset kivilajit
ovat noin 1600 - 2300 Ma /30, 61/.



Kuva 1. Helsingin kallioperän geologinen ympäristö. Svekofennialaiset kivilajit 1) amfiboliitit ja gneissit sekä 2) granitoidiset syväkivet. 3) Anorogeeniset rapakivityyppiset graniitit. Karttapiirros perustuu viitteeseen /30/ kivilajikarttaan.

Helsingin kallioperäkartalla voidaan alueen kivilajit jakaa vyöhykkeisiin, joita luonnehtii joko yksi pääkivilaji tai jokin kivilajiryhmä. Helsingin länsiosissa kallioperässä on laajoja poimuja, joihin liittyy metavulkaniitteja (amfiboliitteja), kiillegneissejä ja migmatiittigraniitteja. Idässä ja osittain myös etelässä on vulkaniittijakso, johon liittyy synorogeenisia kvartsi- ja granodioriitteja sekä nuorempia mikrokliinigraniitteja. Alueen keski- ja pohjois-osia luonnehtivat vähemmän poimuttuneet, mutta selvästi suuntautuneet kiillegneissit ja amfiboliitit sekä migmatiittigraniittialueet. Helsingin etelä- ja länsiosan saaret liittyvät laajaan graniittialueeseen, joka on tyypillistä ns. Helsingin graniittia.

Helsingin alueen svekofennialaiset kivilajit voidaan jakaa syväkiviin ja pintasyntyisiin kivilajeihin. Näiden kivilajiluokkien jakautuminen eri kivilajiryhmiin sekä niiden prosentuaaliset määrät Helsingin kallioperässä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri kivilajien esiintymismäärät karttapinta-aloina Helsingin alueella /20/.

Pintasyntyiset kivilajit	Emäksiset ja intermediääriset vulkaniitit sekä amfiboliitit	15,0 %
	Happamat vulkaniitit ja kvartsi-maasälpägneissit	5,9 %
	Kiillegneissit	34,1 %
	Kalkkikivet ja karret	0,1 %
	Yht.	55,1 %
Syväkivet	Gabrot ja dioriitit	1,0 %
	Kvartsi- ja granodioriitit	15,2 %
	Graniitit	28,7 %
	Yht.	44,9 %

2.2 Paljastumasuhteet ja pinnanmuodostus

Kalliopinta on Helsingin alueella Etelä-Suomen rannikko-alueelle tyypillisellä tavalla suureksi osaksi paljastuneena. Maanpintatopografiaa luonnehtivat paljaat korkeahkot kalliomäet sekä alavammat glasifluviaalisten sedimenttien peittämät, pääosin kallioperän siirrosten ja ruhjeiden kontrolloimat painanteet ja laaksot. Svekofennialaisen vuorijonon tasoittuminen (peneplaaniutuminen) lähelle nykyistä kallionpintaa on tapahtunut ennen kambrikautta (noin 1300 - 1400 Ma). Prekambrisen kallioperän tiedetään painuvan peneplaanina Suomenlahden eteläpuolella todettujen kambristen kerrostumien alle /30, 43/.

Lopullisen muodon nykyiselle kallionpinnalle antoivat eri jäätiköitymisvaiheet, joista viimeisin päättyi noin 10 000 vuotta sitten. Suurin jäätikön kulutusvaikutus on kohdistunut kallionpinnan korkeimpiin kohtiin, mutta kiviainesta on irronnut myös alavien ruhjeisten ja rapautuneiden vyöhykkeiden kohdilta. Irrotustyö on ollut voimakkainta niissä vyöhykkeissä, joiden suuntaus on ollut sama jäätikön etenemissuunnan kanssa. Suurin osa näistä jo preglasiaasisella ajalla rapautuneista vyöhykkeistä aivan niiden pintaosia lukuunottamatta on säilynyt nykypäiviin saakka. Jäätikköeroosion suuruuden on arvioitu olleen vain metrien luokkaa, minkä vuoksi nykyisin kallionpinnan reliefiä on pidettävä preglasiaalisena /22, 30, 43/.

3. KIVILAJIT: MINERALOGIA, ESIINTYMINEN JA SYNTYÖLOSUHTEET

3.1 Pintasyntyiset kivilajit

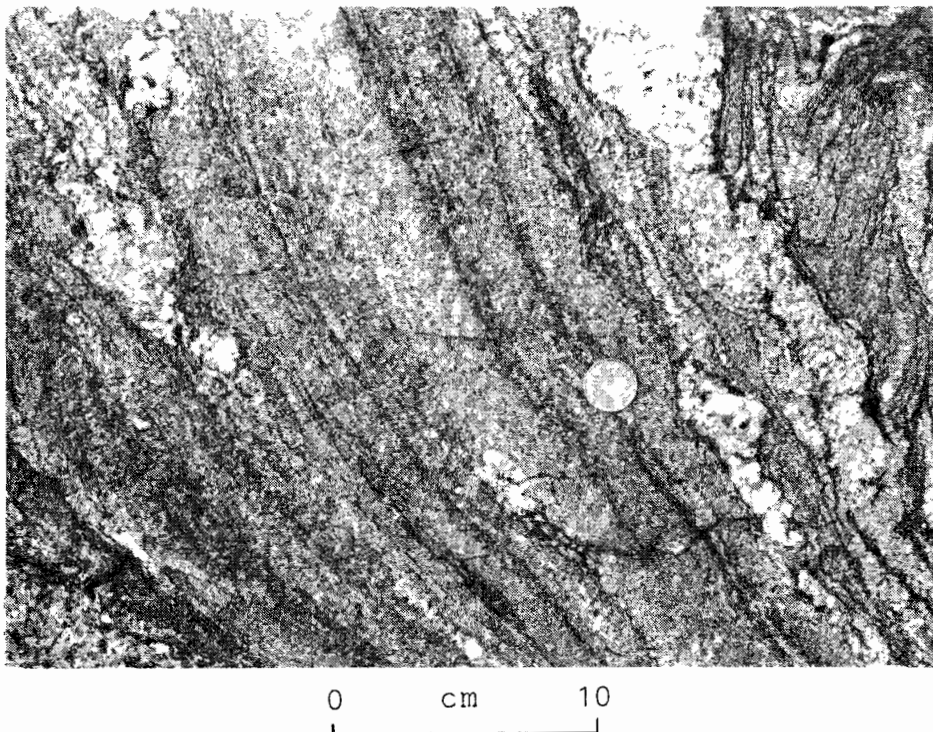
3.1.1 Esiintymisestä

Helsingin alueella esiintyy svekofennialaisina pintasyntyisinä kivilajeina kvartsi-maasälpägneissejä, kiillegneissejä, kalkkikiviä ja erilaisia metavulkaniitteja, joiden koostumus vaihtelee basalttisesta ryoliittiseen. Metasedimenttejä on muodostunut myös detritaalisen ja pyroklastisen aineksen sekoittuessa keskenään esiintyen nykyään lähinnä tuffiitteina ja amfiboligneisseinä. Kiillegneissit ja kvartsi-maasälpägneissit edustavat stratiigrafisesti alinta tunnettua sedimenttihorisonttia. Sedimentaatioalustaa ei tunneta eikä pohjakonglomeraatteja ole tavattu koko Etelä-Suomen alueella /30/.

Kvartsi-maasälpägneissien alkuperäinen raekoko on ollut pääosiltaan hiekka-karkea siltti -luokkaa vastaava. Niihin liittyy läheisesti myös karbonaattipitoisia välikerroksia sekä muutamia hieman laajempia karbonaattiesiintymiä. Sedimentaatiomateriaali viittaa kerrostumisolosuhteisiin, jotka ovat tyypillisiä geosynkliinivaiheen etumaa-alueille. Kvartsi-maasälpägneissit vaihettuvat lateraalisesti kiillegneisseihin. Ne ovat alunperin olleet hienorakeisia, osittain savipitoisia sedimenttejä, jotka ovat pidemmälle edenneen rapautumisen ja lajittumisen tuotteita. Sedimentaatioympäristö on siis vastannut syvän veden olosuhteita /29, 30/.

Helsingin ja samoin koko Etelä-Suomen alueella ovat migmatittiutuneet gneissit yleisiä. Näiden seoksisten gneissien syntyyn on vaikuttanut ultrametamorfoosissa graniittisen aineksen sulaminen ja erkautuminen juoniksi tai linssimäisiksi segregatioiksi sekä kalirikkaan graniitin konkordantinen ja/tai breksioiva intruusio kiveen. Vaalean aineksen erkautuminen on johtanut toisaalta tummien mineraalien (esim. biotiitti) kasautumiseen kivessä (kuva 2). Tämä ns. melasomi

voi vastata koostumukseltaan kiillegneissiiä. Usein osa biotiitista on metamorfoosiasteen kohotessa reagoinut muodostaen granaattia ja/tai kordieriittia /26, 27, 28, 29/.



Kuva 2. Migmatiitti. Jakomäentie, Jakomäki.

Kvartsi-maasälpagneisseihin ja amfiboliitteihin liittyy amfiboligneissejä, joissa on paikoin myös pyrokseeneja. Amfiboligneissien lähtöaines on muodostunut pyroklastisen aineksen sekoittuessa detritaaliseen sedimenttiainekseen.

Vulkaanisperäiset kivilajit ovat laavoja ja porfyriittejä, juovaisia ja kerroksellisia tuffeja tai pyroklastisen ja detritaalisen aineksen sekaisia tuffiitteja. Emäksisten ja myös infermediääristen tuffien ja laavojen alkuperä voidaan metaformoituneissakin kivissä usein perustellusti päätellä kokonaiskoostumuksen tai reliktilisten primäärirakenteiden perusteella. Happamampien metavulkaniittien alkuperän määrittäminen on vaikeampaa, koska myös detritaalisilla sedimenteillä saattaa olla sama kokonaiskoostumus. Parhaiten ne on voitu tunnistaa vulkaanisperäisiksi silloin, kun ne esiintyvät varsinaisissa vulkaanisten kivilajien vyöhykkeessä, joissa emäksisten vulkaniittien alkuperä on selvästi pääteltävissä /30/.

Gneissit ja amfiboliitit ovat kiteytyneet pääasiassa synkine-maattisen vaiheen aluemetamorfoosissa. Migmatiittiset gneissit ovat sittemmin myöhäiskinemaattisen vaiheen ultrametamorfoosissa saaneet nykyisen asunsa ja mineraalikoostumuksena /30, 61/.

Simonen /61/ on esittänyt pintakivilajien jakautuvan Länsi- ja Etelä-Suomen liuskejaksossa seuraavasti:

- kiilleliuskeet ja -gneissit	79,9 %
- kvartsi-maasälpäliuskeet ja gneissit	6,5 %
- kvartsiitit	0,3 %
- kalkkikivet	0,3 %
- metabasaltit ja amfiboliitit	13,0 %

Helsingin kallioperäkartasta (1:10 000) pisteotannalla laskettuna saadaan pintasyntyisille kivilajeille seuraava jakauma:

- kiillegneissit	61,8 %
- kvartsi-maasälpägneissit	10,7 %
- kalkkikivet ja karret	0,3 %
- metavulkaniitit ja amfiboliitit	27,2 %

Prosenttisuhteiden jakautumisessa on huomioitava, että ne on määritetty Helsingin maapinta-alasta. Määräsuhteiltaan jakautuma on kuitenkin vastaavanlainen Simosen esittämän kanssa.

3.1.2 Kvartsi-maasälpägneissit

Kvartsi-maasälpägneisseillä tarkoitetaan tässä niitä hienorakeisia kivilajeja, jotka koostuvat pääosiltaan kvartsista ja plagioklaasista sekä vähäisemmässä määrin biotiitista. Kiven rapautumispinta on yleensä huomattavasti vaaleampi kuin tuore murrospinta, mikä jo osoittaa sen suurta maasälpäpitoisuutta.

Happamiksi vulkaniiteiksi luokiteltavien kivilajien ja sedimenttiseen rapautumistuotteista koostuvien kvartsi-maasälpägneissien makroskooppinen erottaminen on usein hyvin

vaikeaa. Ulkoisilta ominaisuuksiltaan ne ovat hyvin samantlaisia. Esim. karbonaatin esiintyminen välikerroksina ei ole ratkaiseva kriteeri, koska happamiin vulkaniitteihin on myös todettu liittyvän karbonaattia /29/. Sedimentaatio on molemmissa tapauksissa voinut tapahtua vedessä. Tämän vuoksi ne on tässä yhteydessä käsitelty yhdessä. Suurin osa Helsingin alueen kvartsi-maasälpägneisseistä liittyy läheisesti metavulkaniitteihin, joten ne lienevät lähes kaikki ainakin osittain vulkaanisperäisiä. Näitä hienorakeisia gneissejä esiintyy runsaammin seuraavilla alueilla:

- Vuosaari - Laajasalo
- Mustikkamaa - Korkeasaari - Kruunuhaka - Kluuvi - Etu-Töölö
- Lapinlahti - Lehtisaari
- Pihlajasaari,

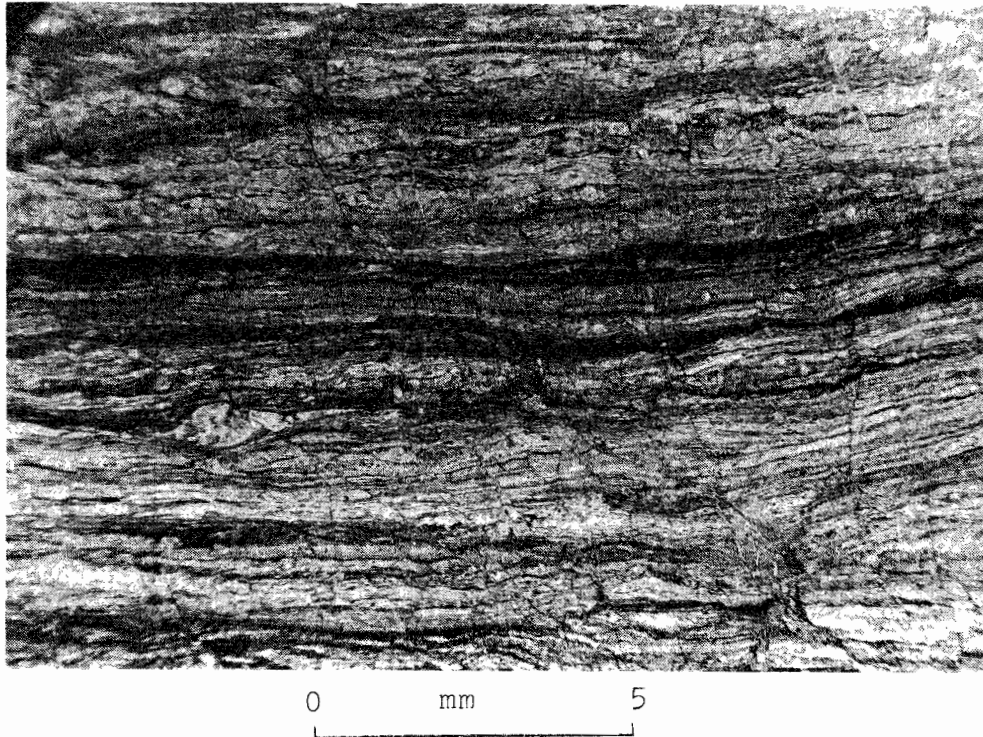
Tutkituissa neljässä kvartsi-maasälpägneisseinä otetuissa näytteissä jakautuivat mineraalikoostumukset päämineraalien osalta seuraavasti:

Paikka	Näyte no	Kv	Pl (An %)	Kms	Bi	Sv	Opaakki
Vuosaari	5	15	49 (28)	9	25		
Vuosaari	48	39	21 (47)	4	7	11	8
Laajasalo	7	44	36 (50)		18		
Kruunuhaka	23	40	33 (25)		25		

Biotiitin suhteellisen runsas esiintyminen näytteissä (7 - 25 %) johtunee alkuperäisen sedimenttimateriaalin sisältämästä saviaineksesta tai pyroklastisesta materiaalista. Maasälvistä suurin osa on plagioklaasia, jonka koostumus on osalla näytteistä suhteellisen anortiittirikas. Myös tämä viittaa kyseessä olevien kivilajien liittymiseen emäksisiin metavulkaniitteihin. Näytteitä No 5, 7 ja 48 pitäisikin kutsua tuffiiteiksi. Vuosaaren näytteisiin liittyy myös kalimaasälpää sekä varsin runsaasti sarvivälkettä ja opaakkia (magnetiittia). Aksessorisina mineraaleina näissä kivilajeissa on apatiittia, zirkonia, epidoottia, kloriittia, karbonaattia ja granaattia.

Mikroskooppiselta rakenteeltaan eli tekstuuriltaan kvartsi-maasälpägneissit ovat granoblastisia. Porfyroblasteina voi

esiintyä granaattia, kalimaasälpää ja sarvivälkettä. Vallitseva raekoko on keskimäärin 0,1 mm ja raekokojakauma on pieni, ts. kivilaji on hyvin tasarakeinen. Kerroksellisuutta on havaittavissa esim. näytteestä No 28 Kruunuhaasta. Siinä voidaan mikroskoopissa havaita biotiittirikkaiden kerroksien selvästi erottuvan kvartsi-plagioklaasikerroksista (kuva 3).



Kuva 3. Kvartsi-maasälpägneissin kerroksellinen rakenne.
Nikolit //. Kirjatyöntekijäncatu, Siltavuori.

Kvartsi-maasälpägneisseihin liittyy karbonaatti-välikerroksia, jotka näkyvät rapautuneessa kivipinnassa selvinä monttuina ja urina. Karbonaatin kerrostuminen viittaa sedimentaation tapahtuneen olosuhteissa, jotka ovat tyypillisiä etumaa-alueille. Kerrosrakenteista ei ole havaittu virtakerroksellisuutta eikä kerrospintarakenteita, mikä osoittaa sedimentaation olleen rauhallinen ja tasaisesti jatkuva. Materiaalin tasarakeisuus viittaa hyvään lajittumiseen kerrostumisvaiheessa. Maasälpäjen paikoin runsaskin esiintyminen on osoituksena detritaalisien aineksien epätäydellisestä kemiallisesta rapautumisesta. Pyroklastisen materiaalin vaikutus näissä metasedimenteissä on ilmeinen ja se näkyy esim. biotiitin ja sarvivälkkeen esiintymisenä /30/.

3.1.3 Kalkkikivet ja karret

Kaikki Helsingin alueen mainittavimmat kalkkikiviesiintymät liittyvät kvartsi-maasälpägneisseihin, mikä on myös tyypillistä kaikille Etelä-Suomen svekofennialaisille kalkkikiville. Helsingin alueella näihin karbonaattipitoisiin metasedimentteihin liittyy usein myös pyroklastista materiaalia.

Koostumukseltaan kalkkikivet ovat pääosiltaan kalsiittisia, mutta paikoin niissä on myös dolomiittia ja karsimineraaleja. Väriltään ne ovat valkoisia tai vaalean harmaita. Poikkeavan väristä - lohenpunaista - kalkkikiveä on Nordsjön kalkkilouhoksessa Vuosaarella. Raekooltaan ne ovat keskirakeisia.

Kooltaan kalkkiesiintymät ovat pieniä linssejä ja pahkuja sekä ohuita välikerroksia. Helsingin alueella kalkkikiviä esiintyy mm. seuraavilla alueilla /20, 21, 39, 41, 45, 60/:

- Vuosaari - Laajasalo
- Kruunuhaka
- Lapinlahti
- Meilahti
- Puistola
- Silvola
- Pakila.

Kalkkikiviin liittyy usein mineraaleja, joista pääosan muodostavat metasomaattisten karsireaktioiden kautta syntyneet Ca-silikaatit. Tyypillisimpiä karsimineraaleja ovat eräät pyrokseenit (diopsidi ja hedenbergiitti), amfibolit (sarvivälke ja tremoliitti) ja granaatit (andradiitti). Kalkkikivissä voi esiintyä myös harvinaisempia mineraaleja, kuten esim. näytteessä No 34 Lapinlahdesta, jossa on mm. humiittiryhmän mineraaleja ja oliviinia. Tässä hieman poikkeavalla tavalla esiintyvä oliviini on koostumukseltaan lähes puhdasta forsteriittia (Mg-oliviini). Se on ilmeisesti metamorfoosin tuote. Seitsaari /60/ on maininnut kondrodiitin esiintymisestä kalkkikivessä Laajasalossa.

Karsikivet liittyvät hyvin samanlaisiin kivilajiympäristöihin kalkkikivien kanssa. Esim. Laajasalon Stansvikin ja Santahaminen karsipahkut (yhteensä 8 kpl) sijaitsevat lähes poikkeuksetta suuren kiillegneissipoimun samassa kerros-horisontissa.

Mittasuhteiltaan suurin karsiesiintymä Helsingin alueella on Pukinmäessä (näyte No 32). Tämä alunperin kalkkikivenä ollut esiintymä sisältää nyt runsaasti kvartsia, plagio-klaasia, kalimaasälpää ja diopsidia. Toinen merkittävä karsikivialue Helsingissä on Laajasalo, jossa tunnetaan useita pienhköjä karsipahkuja. Suurin niistä on Stansvikin andradiittihedenbergiittikarsi, johon liittyy mm. oksidimalmimineralisaatio (magnetiitti) sekä ametistikvartsia. Alueen toinen tunnettu karsiesiintymä on hieman lännempänä Kaitalahdessa. Siihen liittynyttä sulfidimalmimineralisaatiota (lyijyhohde) on louhittu sen sisältämän hopean takia. Näiden edellämainittujen esiintymien lisäksi tavataan pienempiä karsityyppisiä mineralisaatioita koko Helsingin alueella /41, 42, 60, 70/.

3.1.4 Pyrokseeni- ja amfiboligneissit

Runsaasti pyrokseeneja mafisina mineraaleina sisältäviä gneissejä ei tämän tutkimuksen yhteydessä ole tavattu. Sen sijaan Helsingin länsi- ja luoteisosissa on tummia gneissejä, joissa on pyrokseenien lisäksi runsaasti amfiboleja (esim. näytteet No 43 ja 44). Pyrokseeni on hypersteeniä tai diopsidia. Nämä pyrokseeni-amfiboligneissit liittyvät osana vulkaanisperäisiin metasedimentteihin, joissa saattaa olla mukana detritaalista ainesta.

Amfiboligneissejä esiintyy pyrokseeni-amfiboligneissejä runsaammin. Ne liittyvät ainakin osittain alueen vulkaniitteihin. Niissä on tummina mineraaleina amfibolien lisäksi biotiittia. Näiden mineraalien osuus on vähän alle 50 % koko kiven mineraalikoostumuksesta. Vaaleina mineraaleina ovat kvartsi ja plagioklaasi, jonka koostumus vaihtelee andesinista labradoriin (An_{40-60}). Tässä tutkimuksessa näitä kiviä on kutsuttu amfiboli-biotiittigneisseiksi (esim. näytteet No 8, 35, 37 ja 42). Kiilteiden ja amfibolien keskinäinen

suhde vaihtelee ja onkin todennäköistä, että kyseiset gneissit muodostavat aukottoman sarjan kiillegneissien ja amfiboliittien välillä.

3.1.5 Kiillegneissit

Kiillegneisseiksi luokiteltavia kivilajeja on Helsingin alueen kaikista kivilajeista noin kolmasosa. Ne erotetaan kvartsi-maasälpägneisseistä keskirakeisen raekokonsa ja suhteellisen suuren kvartsi- ja biotiittimäärän avulla. Kiillegneissien primäärinen maasälpä on lähes yksinomaan plagioklaasia (andesiini). Mutta kivessä voi olla myös vähän sekundääristä kalimaasälpää (esim. näyte No 13). Päämineraalien lisäksi on näissä gneisseissä zirkonia, apatiittia, epidoottia, granaattia ja kordieriittia.

Metamorfoosiasteen kohotessa on kiillegneisseihin saattanut syntyä biotiitin kustannuksella granaattia ja/tai kordieriittia. Näistä granaatti-kordieriittigneisseistä käytetään nimitystä kinzigiitti /30, 67/. Ne ovat usein kerroksellisia, mikä näkyy granaatin ja kordieriitin keskittymisestä tiettyihin kerrosmaisiin vyöhykkeisiin. Synkinemaattisessa aluemetamorfoosissa on kiillegneissiin voinut muodostua kordieriittia. Myöhemmin mikrokliinigraniitin assimiloidessa samaa gneissiä on graniittiin syntynyt nuorempaa kordieriittia. Helsingin alueella tavataan kinzigiittejä kaupungin koillis- ja pohjoisosien lisäksi mm. Laajasalossa, Pihlajasaassa ja Salmisaaressa.

Kiillegneissit sekä kordieriitti- ja granaattigneissit edustavat alinta tunnettua sedimenttihorisonttia. Pääasiallisen metapeliittisen alkuperänsä lisäksi voi kiillegneissi olla pyrokseenigneissin muuttumistulos. Kyseisen gneissin migmatiittiutuuessa pyrokseeni muuttuu ensin amfibolin kautta biotiitiksi. Uudestaan kohoavassa metamorfoosissa voi biotiitti reagoida muodostaen granaattia ja kordieriittia. Kiillegneissit ovat ultrametamorfoosissa yleensä muuttuneet migmatiittiksi suonigneisseiksi. Niiden juonimuodostus on tapahtunut intrusiivista mikrokliinigraniittia edeltävässä migmatiittirintamassa ja on siten syntyneeltään sekä arteriittista että veniittistä (kts. kohta 3.2.4) /28, 29, 30, 31, 61/.

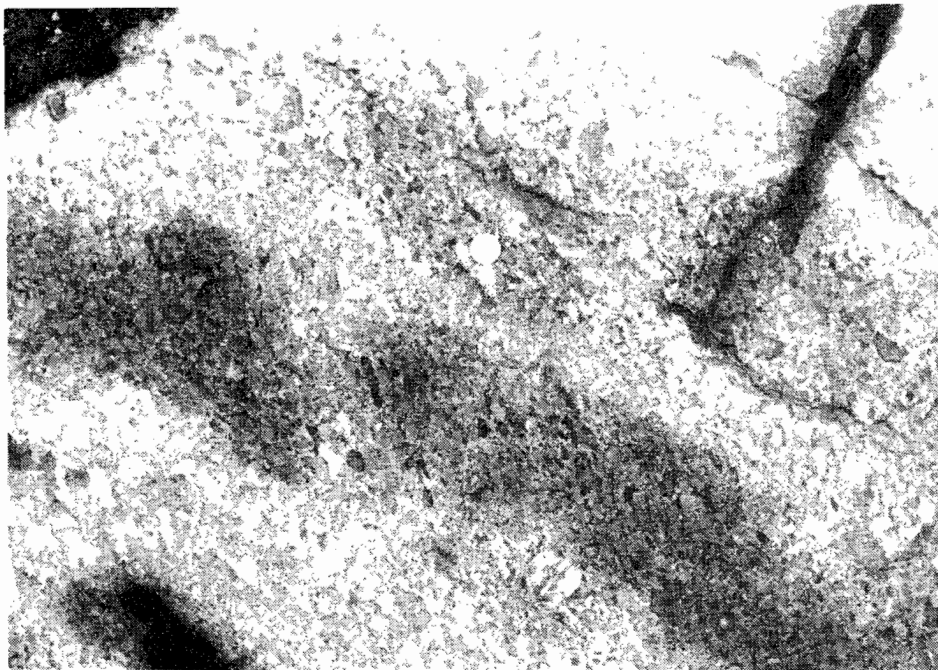
3.1.6 Vulkaaniset kivilajit ja amfiboliitit

Helsingin alueen metamorfoituneet vulkaniitit voidaan jakaa niiden koostumuksen mukaan emäksisiin ja intermediäärisiin sekä happamiin. Happamat metavulkaniitit (dasiitit, latiitit ja ryoliitit) muistuttavat sekä koostumukseltaan että esiintymistavaltaan ja ulkonäöltään paljon kvartsi-maasälpägneissejä. Tämän vuoksi niiden mineralogiaa käsiteltiin jo kohdassa 3.1.2.

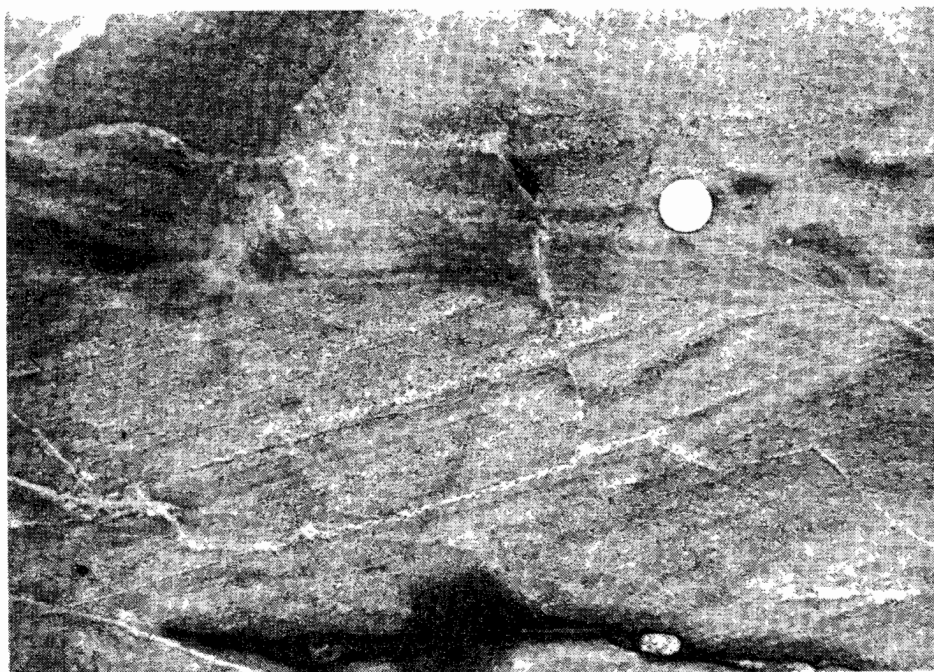
Emäksiset ja intermediääriset vulkaniitit (basaltit ja andesiitit) muodostavat suurimman osan metavulkaniiteiksi tunnistettavista amfiboliiteista. Koska niiden primäärirakenteet ovat yleensä täysin tuhoutuneita, niiden erottaminen infra-krustisista amfiboliiteista on usein mahdotonta. Tämän vuoksi nämä molemmat amfibolityypit ovat tässä yhteydessä esitetty yhdessä. Myöhemmin tässä tutkimuksessa on näitä kivilajeja kutsuttu lyhyesti amfiboliiteiksi.

Emäksisiin ja intermediäärisiin vulkaniitteihin liittyy kerrosrakenteita, fragmenttirakenteita, agglomeraatteja ja tyyny-laavoja. Parhaiten näitä rakenteita on säilynyt paksuissa vulkaniittipatjoissa kuten esim. Vuosaaren metavulkaniiteissa (kuva 4). Kaivopuiston amfiboliitissa on myös uraliittiporfyyriittiä (näyte No 26).

Kerroksellinen rakenne on varsin yleinen. Usein tiheään vaihtuvat kerrokset ovat pyroklastisen ja detritaalisen aineksen sekoituksia tai vuorokerroksia. Vuosaaren metavulkaniittien rakenteeseen liittyy jopa virtakerroksellisuutta (kuva 5). Näiden metavulkaniittien joukossa on myös vaaleita kvartsiittisia välikerroksia /36, 68/. Hyvin kvartsipitoisia kerroksia on myös Talin alueen metavulkaniiteissa. Kerrostumisen oletetaankin tapahtuneen vedessä. Huuhtoutunutta tuffiainesta ovat todennäköisesti ne happamat kerrokset raitaisessa vulkaniitissa, joissa tummat ja vaaleat kerrokset vuorottelevat. Voimakkaasti metamorfoitunutta edellisen kaltaista keskirakeista kiveä on joskus nimitetty "juovadioriitiksi" /8, 23/.



Kuva 4. Agglomeraattivälikerroksia emäksisessä ja intermedidärisessä metavulkaniitissa. Leikosaarentie, Vuosaari.



Kuva 5. Virtakerroksellisuutta tuffiitissa. Leikosaarentie, Vuosaari.

Emäksisien ja intermediääristen metavulkaniittien päämine-raalit ovat plagioklaasi ja sarvivälke. Plagioklaasin koostumus vaihtelee andesiinista labradoriin (An_{40-65}). Sarvivälkkeen tilalla voi olla myös muita amfioleja kuten kum-mingtoniittia, gruneriittia ja aktinoliittia. Aksessorisia mineraaleja on yleensä runsaasti. Näistä mainittakoon yleisimmät: zirkoni, epidootti, apatiitti, karbonaatti, kloriitti ja opaakki.

Emäksisiä ja intermediäärisiä vulkaniitteja esiintyy Helsingin alueella poimuttuneina vyöhykkeinä mm. seuraavilla alueilla:

- Vuosaari - Vartiosaari - Laajasalo - Kulosaari
- Santahamina - Vallisaari - Kaivopuisto
- Töölö - Meilahti - Haaga - Pitäjänmäki - Rajamäki
- Munkkiniemi - Lehtisaari
- Kumpula - Toukola
- Torpparinmäki.

Happamien vulkaniittien esiintyminen liittyy läheisesti emäksisempään vulkanismiin. Ne ovat kerrostuneet vulkaniittijakson ylimpiin osiin. Niiden tunnistaminen on usein vaikeaa. Näissä happamissa vulkaniiteissa on vain harvoin laavavirtauksille tyypillisiä rakenteita, vaan niiden primääri-rakenteet ovat yleensä juovaisia ja kerroksellisia tuffiittirakenteita. Kerrokselliset piirteet ovat korostuneet, koska pyroklastinen aines on laskeutunut veteen kerroksen veden pohjalle. Tässä yhteydessä on voinut tapahtua veden virtauksien ja niiden muutoksien aiheuttamaa lajittumista. Kerrostumiin on mahdollisesti laskeutunut myös detritaalista ainesta, johon on voinut liittyä myös karbonaattisia sedimenttejä kuten on todennäköistä esimerkiksi Vuosaaren alueella /30, 61/.

3.2 Syväkivet

3.2.1 Esiintymisestä

Svekofenniidien varhais- ja synkinemaattisessa plutonismissa muodostuivat Helsingin alueen gabrot, dioriitit, kvartsi- ja granodioriitit sekä muutamat pienet hornblenditiittipahkut.

Ne ovat pintasyntyisiä gneissejä ja amfiboliitteja nuorempia. Alueen syväkivistä suurimman osan muodostavat migmatiittiset mikrokliinigraniitit ovat muodostuneet myöhäiskinemaattisessa vaiheessa ja ovat siten edellisiä nuorempia /30, 61/. Syväkivien keskinäiset paljoussuhteet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Syväkivien jakautuminen I koko Svekofenniidien alueella /61/ ja II Helsingin alueella.

Kivilaji	I	II
Peridotiitit, gabrot ja dioriitit	5,9 %	2,2 %
Kvartsi- ja granodioriitit	56,5 %	33,9 %
Graniitit	37,6 %	63,9 %

Emäksisiä ja intermediäärisiä syväkiviä - peridotiitteja, gabroja, dioriitteja - esiintyy Helsingin alueella vähän. Tämän tutkimuksen puitteissa ei ole esimerkiksi voitu erottaa gabroja ja dioriitteja toisistaan, joten ne on käsitelty yhdessä. Ne on merkitty myös liitteenä olevaan kallioperäkartaan samalla rasterilla. Suurin osa näistä kivilajeista liittyy Vuosaaren vulkaniittien jaksoon. Näihin metavulkaaniitteihin läheisesti liittyvät gabromassiivit on tulkittu subvulkaanisiksi magmasäiliöiksi /23, 29/.

Happamista syväkivistä vanhimmat, kvartsi- ja granodioriitit, ovat alunperin olleet hyvin yleisiä. Myöhäiskinemaattisen vaiheen ultrametamorfoosissa graniittiutumisen ja migmatiittiutumisen yhteydessä ne ovat kuitenkin muuttuneet koostumukseltaan graniittisempaan suuntaan. Tämän on aiheuttanut mikrokliinigraniitin tunkeutuminen, mikä on johtanut myös doomimaisten graniittimassiivien muodostumiseen (diapirismi) /16, 30, 61/.

3.2.2 Hornblendiitit

Helsingin alueen muutamien peridotiittisen koostumuksen omaavien kivilajiesiintymät ovat nykyään hornblendiittipahkuja. Ne ovat kooltaan niin pieniä, että niitä ei ole merkitty Helsingin kallioperäkartaan /20/. Näitä ultramafisia

kivilajeja on tavattu lähinnä Laajasalosta ja Sörnäisistä. Brander /5/ ja Seitsaari /60/ ovat kuvanneet Laajasalon tummanvihreää, raekooltaan karkearakeista sekä suuntauksetonta hornblendiiittiä. Sarvivälkkeen lisäksi on kivessä hiukan epidoottia, kloriittia, kalsiittia ja sulfideja. Toinen hornblendiiittiesiintymä on Sörnäisten vankilan alueella, josta sarvivälkekiveä on louhittu saunankiuas-kiveksi /41/.

3.2.3 Gabrot ja dioriitit

Gabrot ja dioriitit on tässä yhteydessä esitetty yhdessä, koska niiden määrä Helsingin alueella on vähäinen ja niitä käsittelevä aineisto liittyy yksinomaan selvästi gabromaisiin kivilajeihin. Aikaisemmassa kirjallisuudessaakin ainoastaan Seitsaari /60/ mainitsee dioriittimaisesta kivistä Kruunuvooren alueella. Aikaisemmin oli kohdassa 3.1.6 maininta metavulkaniitista, josta on käytetty nimitystä "juovadio-riitti" /8, 23/.

Gabrot ovat pääasiassa uraliittiutumisen kautta muodostuneita sarvivälkegabroja, joissa plagioklaasin koostumus on muuttunut albiittisempaan suuntaan (nykyisin andesiini). Pyrokseeneista muodostuneen sarvivälkkeen lisäksi on gabroissa yleensä jonkin verran kvartsia, biotiittia ja epidoottia. Rakenteellisesti ne ovat lähinnä metagabroja niiden mineraalien muuttuneisuuden sekä selvän suuntautuneisuuden johdosta.

Suurin gabromuodostuma Helsingin alueella liittyy Vuosaaren vulkaniittijaksoon. Gabro rajoittuu toisaalta happamiin metavulkaniitteihin ja toisaalta emäksisiin ja intermediäarisiiin metavulkaniitteihin. Kontaktit ovat teräviä eikä mainittavia reaktiosaumoja tai muita muuttumisilmiöitä ole havaittavissa. Tämä gabro on kohtalaisen suuntautunut (näyte No 4). Siinä on sarvivälkkeen ja plagioklaasin (An₃₀) lisäksi runsaasti biotiittia, jolloin kiven koostumus on lähellä dioriittia.

Toinen metagabroksi luokiteltava kivilajimuodostuma on Pakilassa. Kivestä otettu näyte No 14 on huomattavan samankaltainen Vuosaaren näytteen No 4 kanssa. Alkuperäisten mineraalien muuttuminen on voimakasta, josta esimerkkinä ovat omamuotoiset kloriitin ja opaakin täyttämät oliviini-reliktit. Tämän Pakilan kiven gabromaiseen olemukseen on viitattu myös viitteessä /39/.

Muut Helsingin alueella tavattavat metagabrot ovat hyvin pieniä muodostumia. Näistä mainittakoon Lauttasaaren ja Tammisalun amfiboliitteihin liittyvät gabromaiset kivilajiosueet.

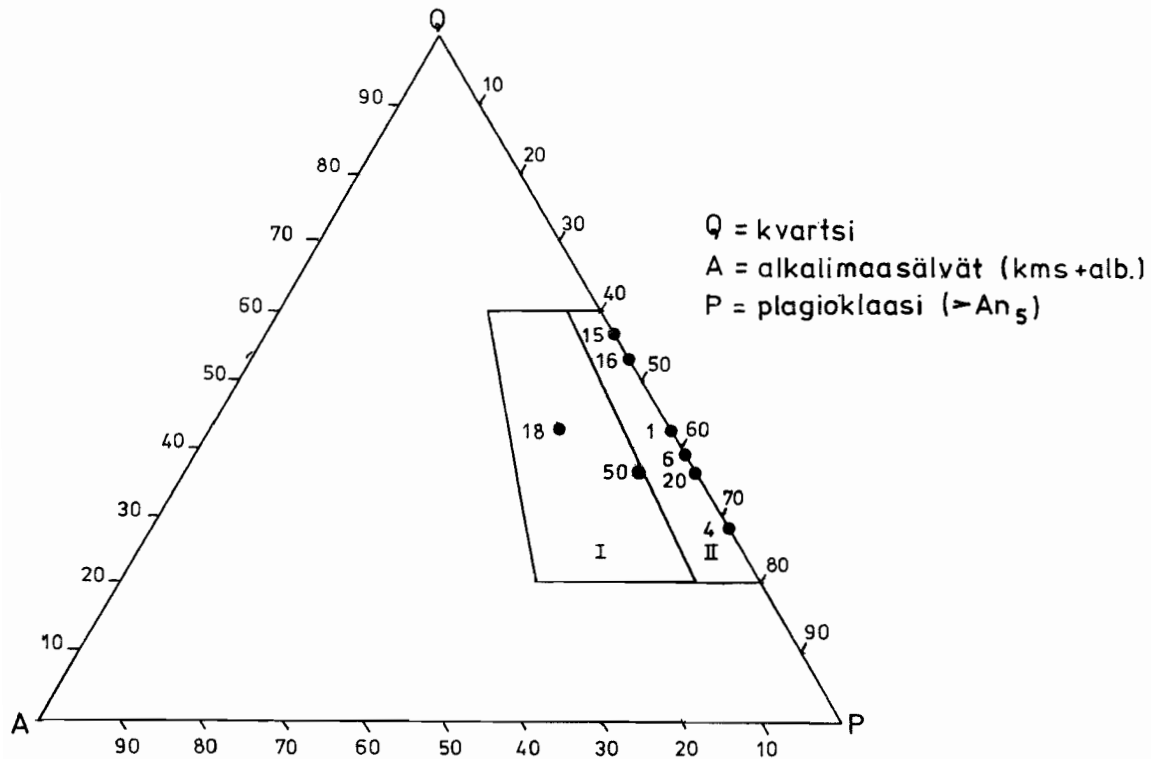
3.2.4 Kvartsi- ja granodioriitit

Helsingin alueen syväkivistä on noin kolmasosa kvartsi- ja granodioriitteja. Nämä syväkivet on käsitelty yhdessä, koska tämän tutkimuksen puitteissa ei ollut mahdollista rajata tarkemmin niiden alueellista esiintymistä. Näyttemateriaalin perusteella voidaan kuitenkin todeta kvartsidioriitin olevan granodioriittia yleisemmän. Kaikki nämä kivilajit ovat jonkin verran metamorfoituneita ja niissä on usein havaittavissa tummien mineraalien jonkinasteista suuntautuneisuutta. Paikoin on näihin kivilajeihin syntynyt metasomaattisesti lisää kalimaasälpää niiden graniittituumisen yhteydessä. Osa näistä kivistä on deformatunut klastisesti ja muuttunut metasomaattisesti alpiitti-epidoottikiviksi. Näitä ns. helsinkiiittejä on lähemmin käsitelty kohdassa 3.2.5.

Mineraalikoostumuksien mukaan sijoittuvat kvartsi- ja granodioriitit kuvan 6 mukaisesti Streckeisen'in luokitusdiagrammiin /62/.

Kvartsin samoin kuin plagioklaasin määrät ovat yleensä 30 - 50 % koko kiven mineraalikoostumuksesta. Plagioklaasi on kvartsidioriiteilla oligoklaasia tai andesiinia (An_{25-35}) ja granodioriiteilla selvästi albiittisempaa (An_{5-20}). Granodioriiteissa on kalimaasälpää yleensä 10 - 20 %. Tummina mineraaleina on pääasiassa biotiittia sekä vähäisemmässä

määrin myös diopsidia, titaniittia ja epidoottia. Yleisimmät aksessorit ovat kloriitti, zirkoni, apatiitti ja muskoviitti. Tummien mineraalien määrä vaihtelee 5 - 20 %.



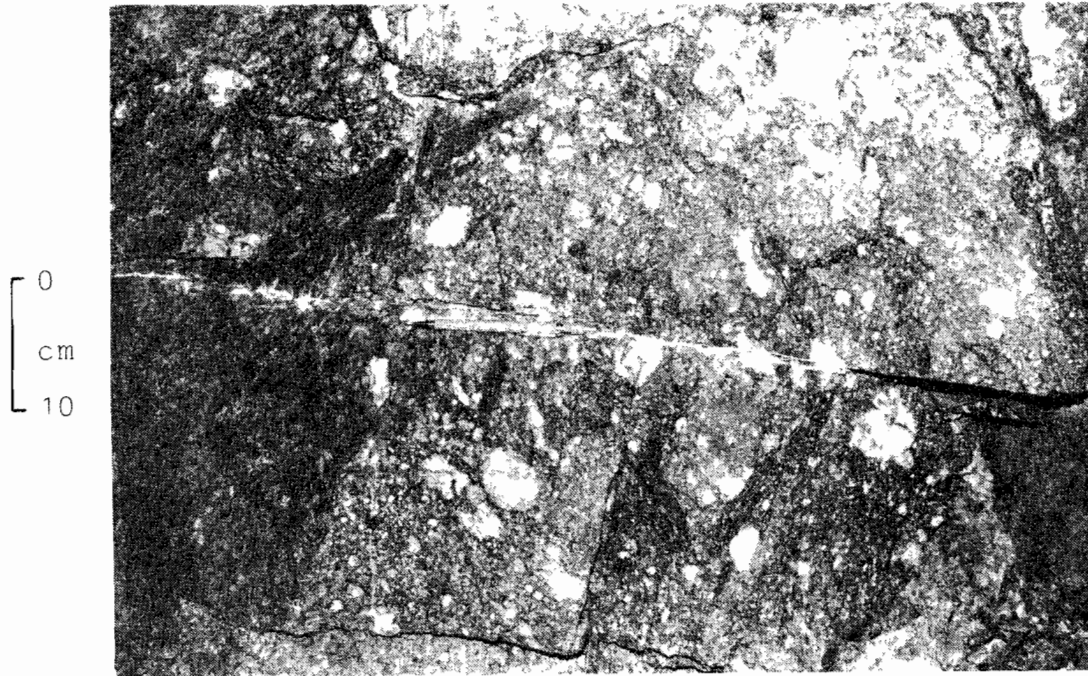
Kuva 6. Tutkittujen kvartsi- ja granodioriittinäytteiden koostumus vaaleiden mineraalien mukaan määritettyinä Streckeisen'in QAP-diagrammissa /62/.
I = granodioriittikenttä ja II = kvartsidioriittikenttä.

Kvartsi- ja granodioriitteja esiintyy Helsingin alueella pääasiassa seuraavilla vyöhykkeillä:

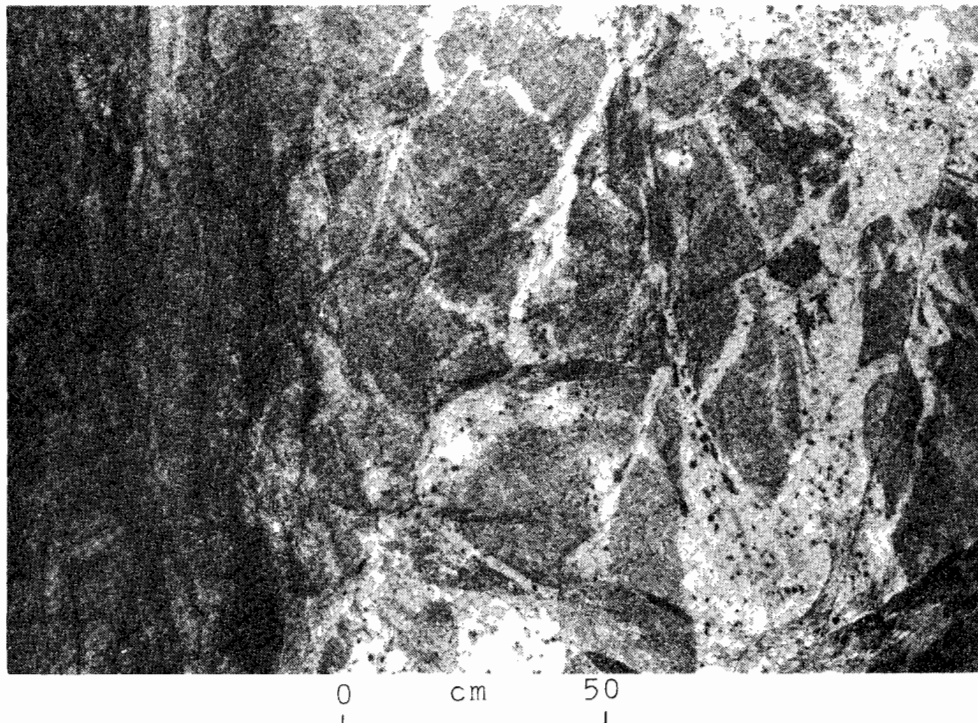
- Konala - Pirkkola
- Hermanni
- Meilahti - Töölö - Kluuvi
- Jakomäki
- Suomenlinna - Santahamina - Laajasalo - Villinki
- Marjaniemi - Mellunmäki.

Nämä intermediääriset syväkivet ovat syntyneet varhais- ja synkinemaattisessa vaiheessa. Ne ovat myöhemmin osittain graniittiutuneet myöhäiskinemaattisen mikrokliinigraniitin

vaikutuksesta. Tämä näkyy esim. kalimaasälvän "ilmestymisenä" kiveen. Paikoin on kalimaasälpää muodostunut kiveen niin runsaasti, että se muodostaa suuria porfyroblastisia rakeita (kuva 7). Porfyroblastinen granodioriitti liittyy laajaan ruhjevyöhykkeeseen, jossa on myös graniittipitoisen, vaalean mikrokliinigraniitin breksioimaa kvartsidioriittia (kuva 8).



Kuva 7. Kvartsidioriittiseen kiveen graniittiutumisen yhteydessä muodostuneita kalimaasälpäporfyroblasteja. Yhteiskäyttötunneli Hesperiankatujen kohdalla.



Kuva 8. Granaattipitoisen, vaalean mikrokliinigraniitin breksioimaa kvartsidioriittia.

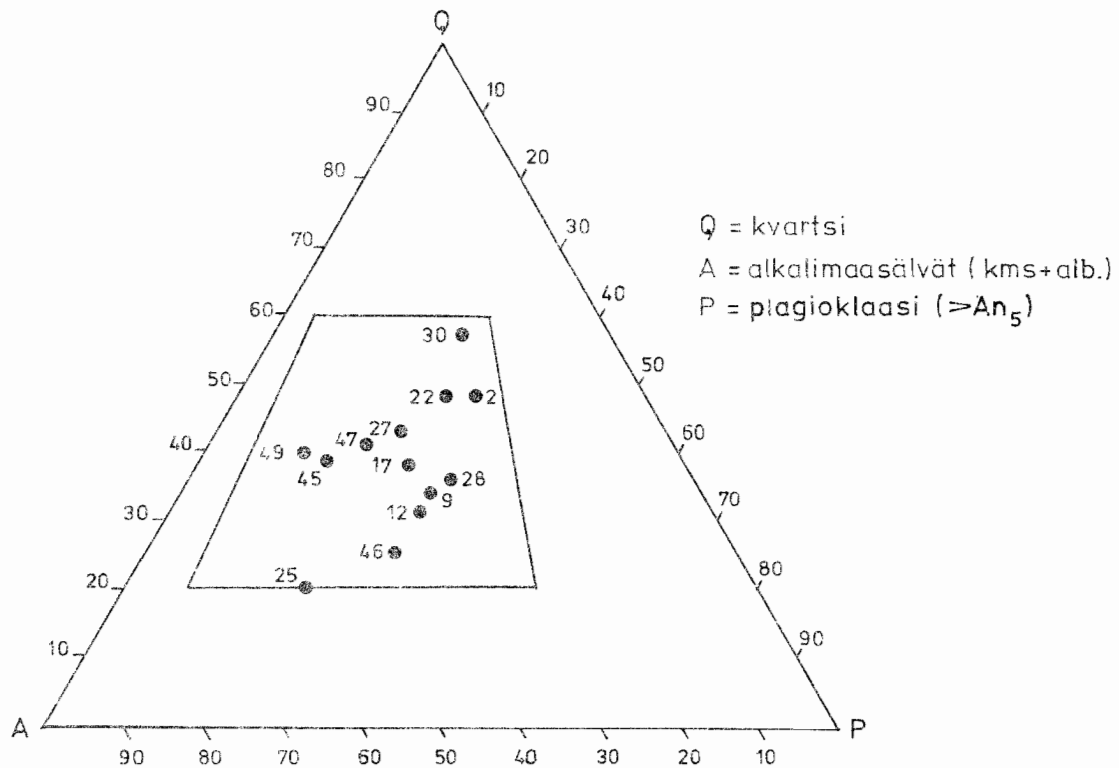
Graniittiutumiseen liittyvä kalimetasomatoosi on edennyt parhaiten kallion rakojen ja ruhjeiden kautta. Sitä on edistänyt tunkeutuneen mikrokliinigraniitin runsas juonimuodostus. Metasomatoosi on kuitenkin pysähtynyt ja jäänyt kesken, koska osa samasta kivistä sisältää runsaasti kalimaasälpää, mutta osassa sitä ei ole laisinkaan /30/. Seitsaari /60/ on esimerkiksi todennut kalimaasälvän esiintyvän Laajasalon kvartsidioriitissa nimenomaan rakovyöhykkeiden ympärillä (kts. 3.4.2).

3.2.5 Graniitit

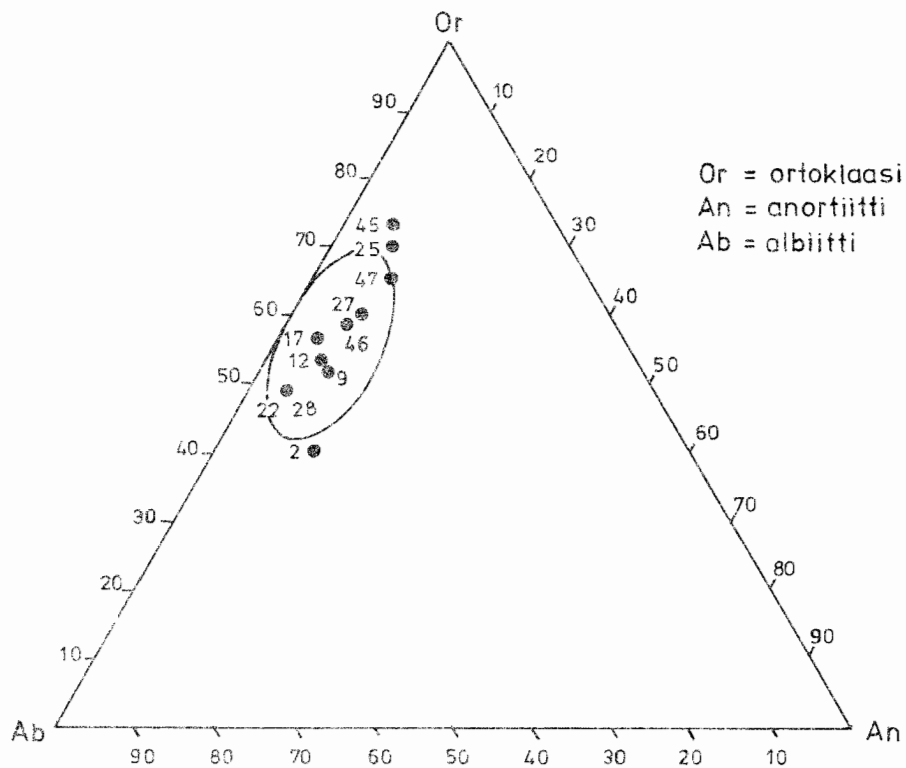
Helsingin alueen graniitit ovat epähomogeenisia, lähes kauttaaltaan migmatiittisia seoskiviä, jotka ovat muodostuneet vähintään kahdesta eri ikäisestä ja koostumukseltaan erilaisesta kivilajikomponentista. Graniitit muodostavat suurimman osan alueen syväkivistä ja lähes kolmasosan kaikista kivilajeista. Väriltään ne ovat yleensä punaisia tai vaaleanpunaisia - harvoin harmaanvalkoisia. Näissä graniiteissa on yleensä korkea kalipitoisuus (K_2O 5 - 7 % /10/), mikä näkyy runsaana kalimaasälpäpitoisuutena (mikrokliini). Tämän vuoksi niistä on käytetty nimitystä mikrokliinigraniitti. Rakenne on granulaarinen. Kivet ovat keskirakeisia ja usein myös karkearakeisia. Myös raekoon on todettu olevan suoraan verrannollinen graniitin kalipitoisuuteen (K_2O %): mitä korkeampi kalipitoisuus on, sitä karkearakeisempi on graniitti /30/. Tämän pegmatiittisen olemuksensa johdosta niitä on kutsuttu pegmatiiteiksi, pegmatiittisiksi graniiteiksi ja pegmatiittigraniiteiksi. Mitään kompleksipegmatiiteille tyypillisiä mineraaleja ei niissä ole tavattu.

Mineraalikoostumuksien mukaan jakautuvat Helsingin alueen graniitit suhteellisen laajalle alueelle Streckeisen'in QAP-luokitusdiagrammissa /62/. Kuvan 9 mukaan suurin koostumusvaihtelu on kvartsin (Q) määrässä.

Migmatiittisten graniittien maasälvät koostuvat kalimaasälvästä (mikrokliini) ja albiittisesta (An_{5-10}) plagioklaasista. Koostumusvaihtelut ovat suhteellisen pieniä (kuva 10).



Kuva 9. Tutkittujen graniittinäytteiden koostumus vaaleiden mineraalien mukaan määritettynä Streckeisen'in QAP-diagrammissa /62/. Kuvassa on rajattuna graniittien koostumuskenttä.



Kuva 10. Tutkittujen graniittinäytteiden maasälpjen koostumuspisteet Or-Ab-An -diagrammissa. Viivalla rajattu kenttä kuvaa mikroklinitgraniitteja /61/.

Kuvan 10 mukaan Helsingin alueen migmatiittiset graniitit ovat pääosiltaan tyypillisiä mikrokliinigraniitteja. Näitä graniitteja tavataan koko Helsingin alueella kaikkiin muihin kivilajeihin liittyneinä sekä suurempina lähes yksinomaan graniitista koostuvina pahkuina ja doomeina. Graniittivaltaisista alueista ovat Helsingissä:

- Kallio - Pasila - Vanhakaupunki - Pihlajamäki
- Punavuori - Katajanokka
- Länsi-Herttoniemi
- Lauttasaari.

Lisäksi muuallakin Helsingin alueella mikrokliinigraniitti lävistää pegmatiittimaisen karkeina juonina ja pahkuina muita kivilajeja. Usein nämä juonet leikkaavat myös mikrokliinigraniittia itseään, mikä osoittaa, että näitä graniitteja on muodostunut eri vaiheissa. Ne sisältävät runsaasti muita kivilajeja sulkeumina. Nämä assimiloituneet kappaleet vaihtelevat muodoltaan särmikkäistä ksenoliiteista aina biotiittirikkaisiin haamumaisiin jäännöksiin saakka. Biotiitti on edelleen reagoinut, minkä tuloksena on kivessä granaattia ja/tai kordieriittia /28, 31/. Kivilajisulkeumat ja niiden tummat jäännökset antavat mikrokliinigraniitille siinä havaittavan suuntauksen, jonka voimakkuus riippuu sulkeumien runsaudesta ja säilyneisyydestä. Mikrokliinigraniitin tunkeutuminen on ollut vähäistä Vuosaaren vulkaniittijakson kivilajeihin, joiden hyvin yhtenäistä rakennetta leikkaavat vain harvat graniittijuonet.

Varhais- ja synkinemaattisessa vaiheessa muodostuneiden syväkivien ja pintakivien graniittiutumisessa on myöhäskinemaattisella mikrokliinigraniitilla keskeinen osuus. Graniittituminen on tapahtunut sekä fysikaalisesti (arteriittisesti) että metasomaattisesti (veniittisesti) /11, 24, 61/.

Arteriittisellä graniittiutumisella tarkoitetaan kalirikkaan magman tunkeutumista liuskeiseen kivilajiin (gneissiin) konkondantisti tai diskordantiksi. Ensimmäisessä tapauksessa vuorottelevat kivessä lähes samanpaksuiset gneissi- ja graniittikerrokset, jotka voivat olla vain muutamien millimetrien paksuisia. Tämä on ns. lit-par-lit -rakenne /24/. Jälkimmäisessä tapauksessa muodostuu kivilajista breksia.

Veniittisessä muodostumistavassa on metasomaattinen diffuusio tärkeä tekijä. Tätä ns. kalimetasomatoosia on käsitelty tarkemmin kohdassa 3.4.2.

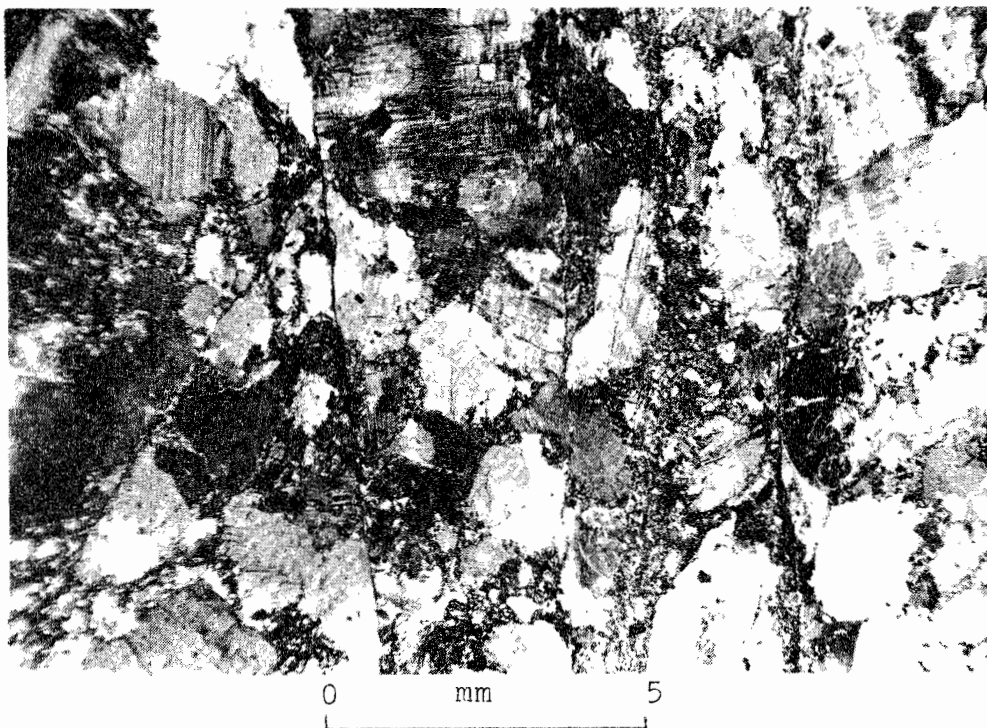
Näin tapahtunut graniittiutumisen on pyrkinyt muuttamaan kaikkien kivilajien koostumukset graniittisiksi vastaten Eskolan /10/ ideaalisen graniitin koostumusta. Esimerkiksi emäksisien ja intermediääristen kivilajien SiO_2 -pitoisuuden kasvu on ollut ilmeinen. Vastaavasti happamissa kivilajeissa (kvartsiitti) on todettu SiO_2 -pitoisuuden pienentyneen graniittiutumisen yhteydessä /24, 25/.

Kalirikkaan graniitin on esitetty muodostuneen aikaisempien kivilajien sulaessa. Tämä palingeeninen muodostumistapa ei kuitenkaan yksin pysty selittämään syntyneen graniittisulan (-liuoksen) korkeaa kalipitoisuutta, koska näissä svekofenialaisissa muodostumissa ei ole ollut niin runsaasti kaliumia. Ainakin osa kaliumista on täytynyt olla alkuperältään juvenista /24/.

Helsingin alueen syväkiviin liittyy punertavaa graniittisen koostumuksen omaavaa albiitti-epidoottikiveä, jota kutsutaan helsinkitiiksi. Tämän nimen A. Laitakari antoi Snursaareltä v. 1912 löytämälleen valkoisen ja punaisen kirjavalle kivelle. Myöhemmin (v. 1917) Laitakari löysi samankaltaista kiveä Alppikadun ja I linjan kulmauksesta sekä Eläintarhasta /40/. Nykyisin käytetään helsinkiitti-nimityksen ohella vastaavatyypisistä kivilajeista nimitystä unakiitti. Tämä termi on alunperin merkinnyt kalirikasta epidoottopitoista graniittia. Helsinkitiin koostumus ei ole primäärinen vaan mineraaliassosaatio on syntynyt todennäköisesti kvartsidioriitista metasomatoosin yhteydessä. Kaikki asteet kvartsidioriitista epähomogeeniseen helsinkiittiin on havaittavissa /21, 24, 30, 48, 66/.

Helsinkiitti esiintyy tyypillisesti pieninä pahkuina ja linsseinä gneissien välissä. Kontaktit sivukiven kanssa vaihtelevat terävistä laajoihin vaihettumisvyöhykkeisiin. Helsinkitiin selvästi kataklastinen rakenne (kuva 11) viittaa sen muodostuessa vallinneisiin liikuntoihin. Tämä kivilaji

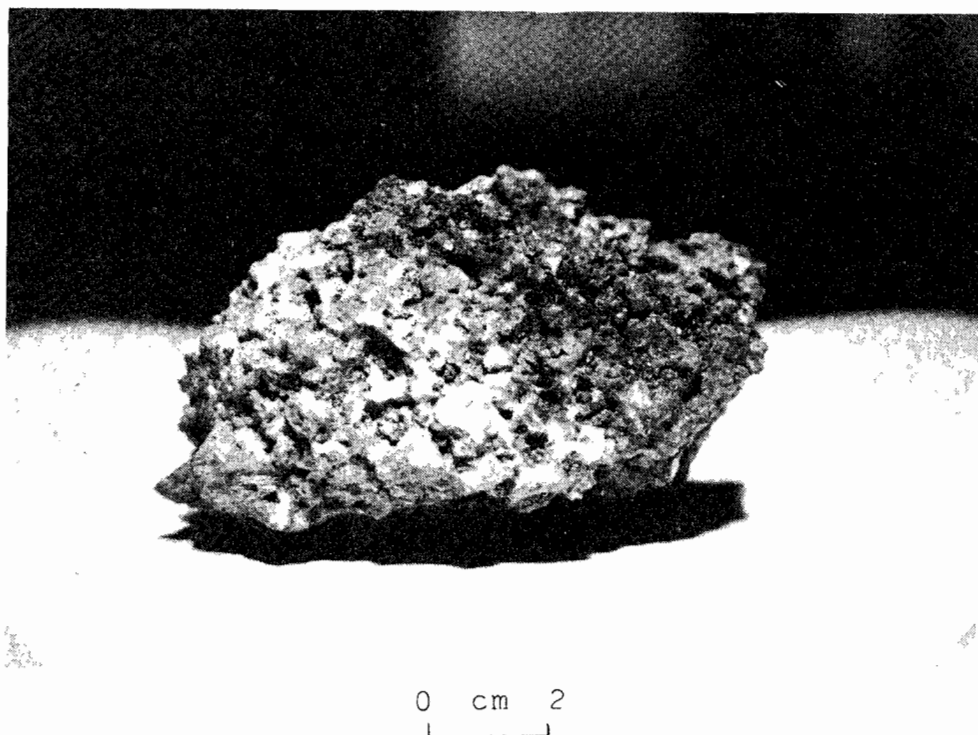
liittyykin usein ruhjeisiin ja rapautuneisiin vyöhykkeisiin tai niiden reunaosiin. Eniten helsinkiittiä tavataan Sörnäisten, Alppilan, Töölön ja Meilahden alueilla.



Kuva 11. Helsinkiitin kataklastista rakennetta (näyte No 36).
Nikolit +. Ruskeasuo.

Toinen mikrokliinigraniitteihin liittyvä hieman erikoinen kivilaji on ns. "korppukivi". Se on rakenteeltaan nimensä mukaisesti hyvin huokoinen (kuva 12). Yleensä tämä ruosteenpunainen, apliittimainen kivilaji on koostunut lähes yksinomaan kalimaasälvästä ja kvartsista. Kivessä on myös jonkin verran vaaleaa kiilletettä. Kvartsi ja maasälpä ovat usein omamuotoisia, mikä voi viitata hydrotermisiin muodostumisolosuhteisiin. Joissakin näytteissä olevat huokokset näyttävät olleen plagioklaasin aikaisemmin täyttämiä. Rapautuneesta ja poisliuenneesta plagioklaasista on jäänyt jäljelle tyhjä aukko ja jonkin verran sekundäärimineraaleja.

"Korppukivi" esiintyy tyypillisesti satunnaisina hyvin pieninä pahkuina. Tunnelitiloissa niihin liittyy usein varsin runsasta vesivuotoa, mikä viittaa niiden esiintymiseen ja mahdollisesti myös syntymiseen juuri runsaasti liuoksia johtavissa vyöhykkeissä.



Kuva 12. "Korppukivi" Hanasaaren syvävarastosta.

3.3 Juonikivet

Helsingin alueella tavatut muutamat juonikivet leikkaavat kaikkia muita kivilajeja ja ovat rakenteeltaan lähes muuttumattomia. Yhteistä näille juonikivilajeille on tumma, lähes musta väri, tiivis ja hienorakeinen rakenne sekä heikko malmipitoisuus. Osaan näistä juonista liittyy myös kvartsi- ja kalsiittitäytteisiä manteleita sekä porfyyristä kvartsia ja plagioklaasia. Muina mineraaleina tavataan augiittia, sarvivälkettä, kloriittia ja biotiittia. Pääasiallisin malmim mineraali on magnetiitti, joka on näissä kivissä pienenä pirotteenä. Näitä lamprofyryjuonia (kersantiitti) on aikaisemmin pidetty diabaaseina /6/.

Juonia on todettu Helsingin alueella Kaisaniemessä, Kallahdenniemen eteläpuolen saarilla, Vuosaarella, Lonnan saarella, Pukinmäessä (näyte No 33), Siltavuorella sekä Vuosaaren pohjoisosassa lähellä Mellunmäkeä. Suuntaukseltaan nämä kaikki juonet ovat luoteis-kaakkoisia.

Sörnäisten lamprofyyrirjuonta on Eskola kuvannut yksityiskohdaisesti /9/. Tämä porfyyrinen muita kivilajeja leikkaava juoni on 5 - 14 cm leveä ja väriltään lähes musta. Kivilaji on muodostunut omamuotoisen oliviinin muuttumistuloksina syntyneistä mineraaleista (kloriitti, karbonaatti, talkki), pyrokseenista ja amfibolista. Tämän alkaanisen juonen koostumus on camptoniitin ja alnöiitin väliltä.

3.4 Malmeista ja muista hyötykivilajeista

Helsingin alueella tavatut malmimineraalisaatiot ovat olleet kooltaan pieniä ja niiden esiintyminen on ollut lähinnä satunnaista. Osa niistä liittyy alueen pieniin karsipahkuihin, jolloin ne ovat tyypiltään oksidimalmeja (magnetiiitti) tai sulfidimalmeja (lyijyhohde, pyriitti, magneettikiisu, sinkkivälke ja kuparikiisu). Magnetiiittista rautamalmia on louhittu Stansvikista ja Munkkiniemestä. Sulfidimalmia on louhittu Laajasalon Kaitalahden ns. hopeakaivoksesta, jossa hopea liittyi lyijyhohteeseen. Lyijyhohdetta esiintyy myös Pakilan alueella, missä kiillegneissistä on tavattu kvartsi-lyijyhohde- sekä lyijyhohdesinkkivälkejuonia. Juoniin liittyy myös suhteellisen runsas hopeapitoisuus /5, 30, 39, 41, 60, 70/.

Helsingin kallioperään liittyy useita pieniä ja suppea-alaisia malmipitoisia kerroksia. Varsinkin alueen metavulkaniitteihin liittyy sulfideja. Esim. Kampin metrotyömaalla on amfiboliitista tavattu pieniä sulfidihorisontteja. Näytteistä tehdyissä analyyseissa on niissä todettu parhaimmillaan olevan kuparia 0,13 %, sinkkiä 0,014 %, kobolttia 0,012 %, rautaa 32,1 % ja hopeaa 37 g/t (analyysi: Outokumpu Oy:n malminetsintä v. 1982).

Radioaktiivista pohjavettä on todettu Malminkadun varrella olevassa porakaivossa sekä Kampin alueen pohjavedessä. Väähäistä uraanipitoisuutta on pohjavedessä todettu myös Puistolassa, Malmilla ja Vartioharjussa /1, 34/.

Malmien lisäksi on Helsingin alueelta louhittu kalkkikiveä ja graniittia rakennustarvikkeiksi. Niitä käytettiin esim. Viaporin linnoituksen rakentamiseen 1700-luvulla. Tärkein

kalkkikivilouhos on ollut Nordsjön louhos Vuosaarella. Sieltä louhittiin kalkkikiven lisäksi dolomiittia sekä erikoisuutena lohenpunaista kalkkikiveä, jota käytettiin mm. sementtimosaikissa. Kalkkikiveä on louhittu myös Tullisaaresta Laajasalossa /30, 41/.

Muista tarvekivistä mainittakoon Herttoniemen kiillegneissin käyttö laattakivinä sekä Sörnäisten vankilan kivilouhoksen sarvivälkekiven käyttö kiuaskivenä Helsingin saunalaitoksissa. Korukivistä voi mainita Stansvikin rautakaivoksen karsikiveen liittyvän ametistikvartsin sekä Kapteeninkadun krysoberylli-esiintymän /30, 41, 42/.

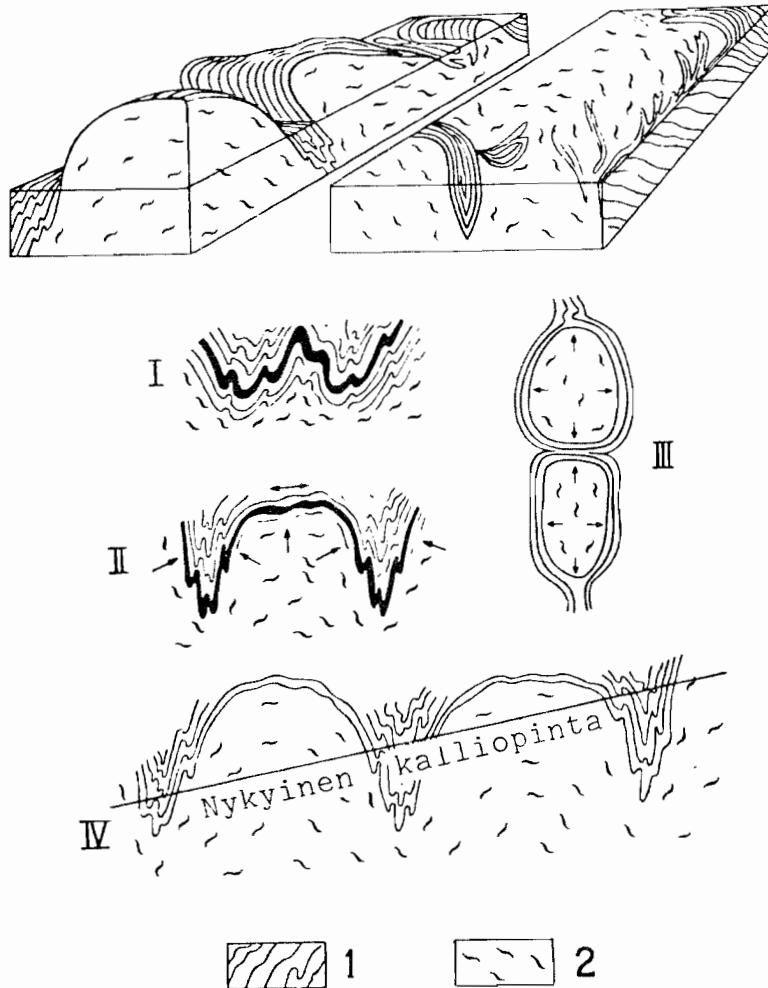
3.5 Syntyolosuhteet

3.5.1 Metamorfoosi

Svekofenniidien varhais- ja synkinemaattisessa vaiheessa tapahtui aluemetamorfoosi, jossa kivilajit kiteytyivät uudelleen pääosiltaan amfiboliittifasieksessa noin 400 - 600 C^o:n lämpötilassa ja noin 500 MPa:n paineessa. Joihinkin alueen gneisseihin syntynyt pyrokseeni viittaa mahdollisesti vielä korkeampaan metamorfoosiasteeseen. Helsingin alueella suhteellisen yleisesti esiintyvä albiitti-epidootti-assosiaatio on syntynyt metasomaattisesti myöhäiskinemaattisessa graniittiutumisen. Tämän laajan graniittiutumisen ovat aiheuttaneet mikrokliinigraniitti-intruusiot, jotka ultrametamorfoosissa ovat muuttaneet ja migmatisoineet alueen vanhempia svekofennialaisia kivilajeja /30, 61, 67/.

Migmatiittiutumisen voidaan käsittää tapahtuneen kahdessa jaksossa. Ensimmäisessä vaiheessa synorogeeniset syväkivet (lähinnä kvartsi- ja granodioriitteja) tunkeutuivat poimuttuneisiin eugeosynkliinivaiheen sedimentteihin. Tunkeutuminen tapahtui poimujen antikliineissa pääasiassa kerrosväleihin, jolloin tuloksena oli konkordantteja linssimäisiä massiiveja. Tämän johdosta jyrkkenivät poimuttuneiden sedimenttien synkliinit isokliineiksi. Tätä vaihetta voidaan pitää koko svekokarjalaisen orogenian kliimax-vaiheena, jolloin aluemetamorfoosi ja deformaatio tapahtuivat yhdessä intruusioden kanssa /30, 61/.

Varsinainen migmatiittiutuminen tapahtui myöhäiskinemaattisessa vaiheessa mikrokliinigraniitin intruusion yhteydessä. Tällöin ultrametamorfoosin tuloksena syntyivät pääosiltaan nykyiset svekofennialaiset migmatiitit. Näitä tapahtumia selvittää kuva 13.



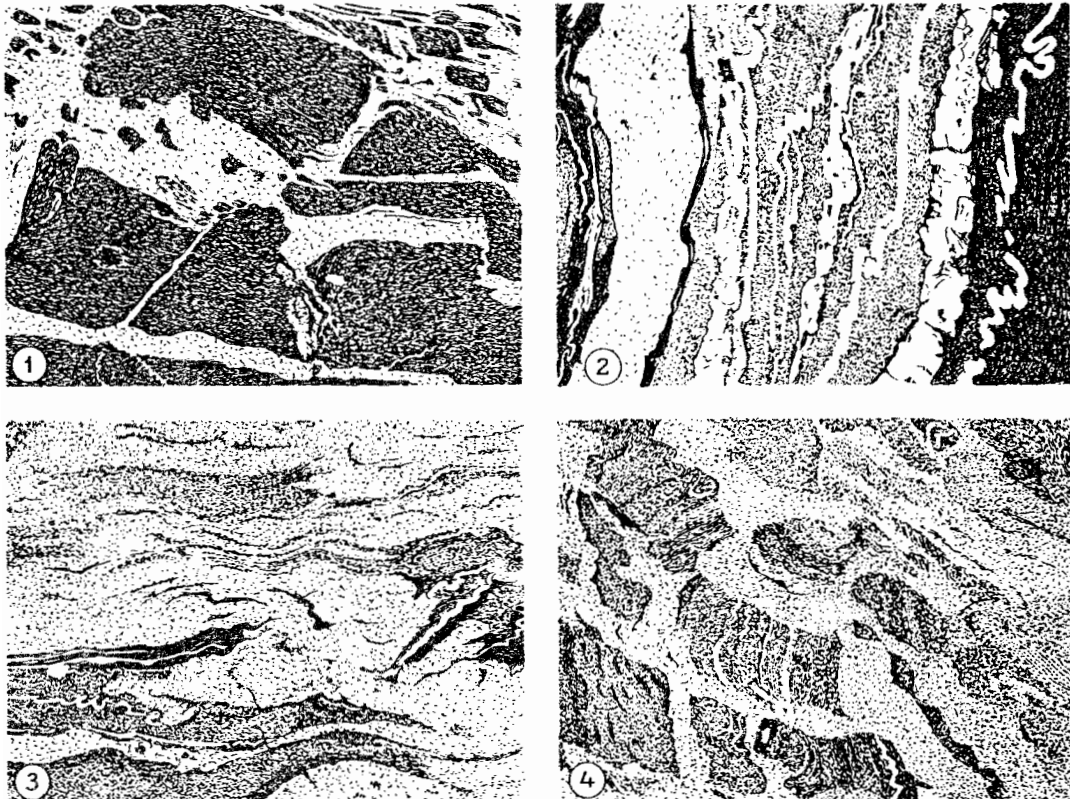
Kuva 13. Migmatiittigraniittidoomien muodostuminen.

1) gneissit, 2) migmatiittigraniitit /7/.

Ensimmäisessä vaiheessa (kuva 13 I) tapahtui poimuttuneiden sedimenttien alaosissa graniittiutuminen, jonka tuloksena muodostunut migmatiittigraniitti alkoi doomimaisesti kohota poimujen antikliineissa (diapirismi). Samanaikaisesti gneissisynkliinit vajosivat graniittidoomien väleihin ja puristuivat jyrkiksi isokliinisiksi poimuiksi. Kohoavien doomien huipulla olleet gneissit venyivät ja litistyiivät (kohta II).

Vierekkäisten graniittidoomien puristukset aiheuttivat sedimenteissä (gneisseissä) ristikkäistä poimutusta (kohta III). Nykyisessä kallionpinnassa näkyvät vaihtelevat tektoniset muodot johtuvat vinosta poimutusvyöhykkeen leikkauksesta (kohta IV). Leikkauksen syvyydestä riippuen voi graniittidoomia ympäröidä jatkuva gneissijakso tai laajemmassa graniittialueessa on näkyvissä epäyhtenäisiä gneissiosueita /7, 61/.

Tässä ultrametamorfoosissa muodostuneet migmatiitit voidaan jakaa rakenteellisesti neljään eri pääryhmään kuvan 14 mukaan.



Kuva 14. Migmatiittien rakenteita: 1) agmatiitti, 2) suoni-gneissi, 3) nebuliitti ja 4) polymigmatiitti /61/.

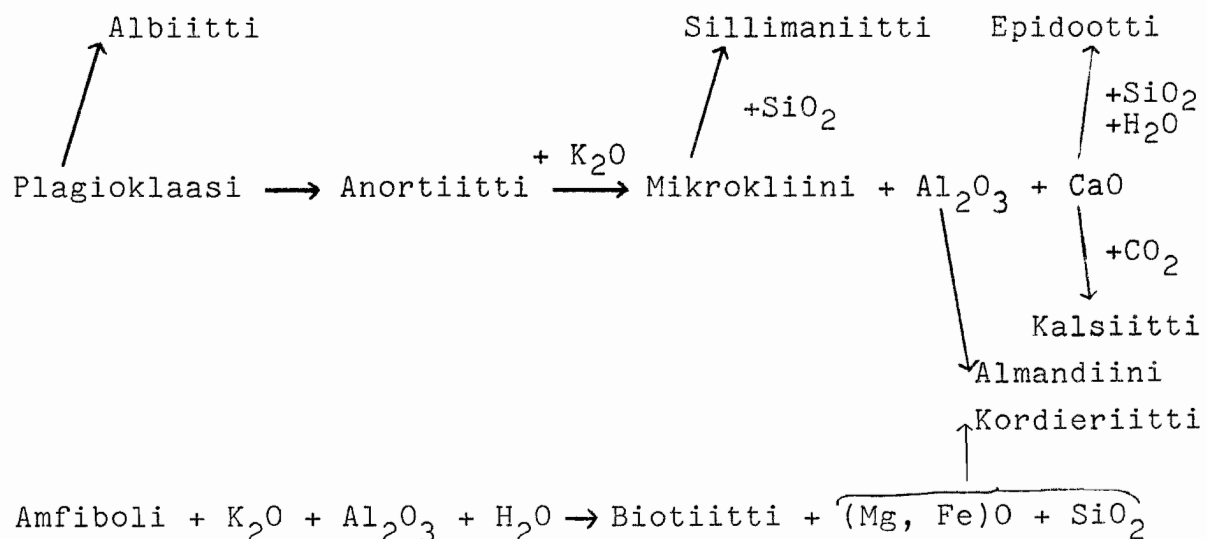
3.5.2 Metasomatoosi

Svekofenniidien tärkein ja vaikuttavin metasomaattinen ilmiö on varhais- ja synkinemaattisten kivilajien yleistä graniittiutumista aiheuttanut kalimetasomatoosi. Graniittiutumista

aiheuttaneiden liuosten lähteinä pidetään mikrokliinigraniittia, joka tunkeutuessaan sitä vanhempiin kivilajeihin on muuttanut niiden koostumusta graniittisemmaksi. Veniittisen muodostumisen lisäksi on graniittisaatioon liittynyt arte-riittinen muodostumistapa /11, 24/.

Kalimetasomatoosi on edennyt rintamana mineraalikiteiden välisessä granulaarifilmissä. Fluidin K-ionit ovat syrjäytäneet isäntäkiven mineraaleista Si-, Ca- ja Na-ioneja, jolloin kiveen on muodostunut kalimaasälpää. Kiven tilavuus ei ole olennaisesti muuttunut. Korvautuneet ionit ovat kulkeutuneet liuokseen pyrkien samalla saavuttamaan konsentraatiotasapainon. Hajonneista mafisista mineraaleista vapautuneet Fe- ja Mg-ionit ovat muodostaneet uusia mineraaleja (esim. biotiitti) plagioklaasin hajoamisen yhteydessä syntyneen Al-ylimäärän ja kivessä olleen SiO_2 :n (kvartsin) kanssa. Biotiitin lisäksi voi kiveen muodostua granaattia (alamandiini) ja/tai kordieriittiä riippuen Al- ja Fe, Mg-suhteesta. Migmatiiteissa on usein havaittavissa graniittisen osan ja tumman assimiloituneen kivilajin (gneissin) kontaktissa musta biotiittirikas sauma. Mikrokliinigraniiteissa esiintyvä alamandiini ja kordieriitti ovat yleensä jäänteitä gneissistä /24, 28/.

Tapahtumia kalimetasomatoosin etenemisessä graniittiutumisen yhteydessä kuvaa hyvin Härmeen /28/ laatima kaavamainen esitys:



Helsingin alueen karsipahkut ovat syntyneet aluemetamorfoosin aikana karbonaattisista sedimenteistä tai vulkaniitteihin liittyneistä karbonaattipitoisista välikerroksista.

Karsikivissä tavataan pyrokseeneja (diopsidi, hedenbergiitti), amfiboleja (sarvivälke, tremoliitti), epidoottia sekä malmineraaleja (magnetiitti, lyijyhohde). Metasomaattinen albiittiutuminen on yksi todennäköinen helsinktiin albiitti-epidootti-assosiaation muodostaja.

4. KALLIOPERÄN RAKENNE JA KIVILAJIEN IKÄSUHTEET

4.1 Kallioperän rakenne

4.1.1 Yleistä

Svekofenniidisten pintasyintyisten kivilajien materiaali on kerrostunut eugeosynkliinivaiheen runsaassa sedimentaatiossa, jossa pääosan kerrostumista muodostivat grauvakat ja arkoo-siset hiekat. Samassa vaiheessa syntyneisiin maankuoren murroksiin on sijoittunut ja purkautunut varhaismagmatismi, jonka tuloksena ovat svekofennialaiset vyöhykkeelliset vulkaniitit. Näitä tapahtumia ovat seuranneet varhais- ja synkinemaattiset poimutusvaiheet, joiden aikana on tapahtunut runsaasti plutonismia. Samanaikaisesti on aluemetamorfoosi ollut voimakkaimmillaan. Myöhäiskinemaattisessa vaiheessa, jossa ylös kohoavat migmatiittigraniittidoomit muodostuivat, on tapahtunut pääasiassa lohkoliikuntoja. Mikrokliinigraniitin tunkeutumista ovat osittain kontrolloineet toisiaan leikkaavat murrenmuotoiset järjestelmät. Alueellinen migmatiittituumeneminen ja graniittituumeneminen on tapahtunut vuorijonon juuriosien korkeassa paineessa ja lämpötilassa sekä migmatiittisten liuosten vaikutuksesta. Alueella esiintyvät juonikivet liittyvät peneplaaniutumisen yhteydessä tapahtuneisiin lohkoliikuntoihin /16, 30, 61/.

4.1.2 Poimutustektoniikka

Varhaiskinemaattisessa vaiheessa alkanut geosynkliinin pohjan kohoaminen aiheutti klastisten ja pyroklastisten kerrostumien poimutusta loivakaateisen akselin mukaisesti. Synkinemaattisessa vaiheessa jatkuneessa poimutuksessa hienorakeiset savi-pitoiset sedimentit (nykyiset kiillegneissit) poimuttuivat plastisesti. Tähän liittyi myös laahuspoimujen muodostusta. Karkeampirakeiset sedimentit (nykyisin kvartsi-maasälpagneissit) olivat jäykähköjä, minkä vuoksi ne poimuttuivat avoimiin loiviin poimuihin. Synkinemaattiseen poimutusvaiheeseen liittyi syväkivien aktiivista intrudoitumista, mikä johti poimujen kulminoitumiseen ja gneissien deformatiiviseen plutonien reunnoilla. Myöhäiskinemaattisessa vaiheessa migmatiittituumenuneet

gneissit olivat hyvin plastisessa tilassa, jolloin niissä tapahtui epäsäännöllistä pienoispoimutusta. Nousevien graniittidoomien väleihin jääneet gneissit puristuivat, ja poimuttuivat lisää. Osa näistä kivilajeista oli vähemmän plastisessa tilassa, mikä johti murrosliikuntoihin /30/.

Nykyisin Helsingin alueella havaittavat poimuakselit ovat yleensä pienoispoimuakseleita ja ne ovat suuntauksiltaan hyvin vaihtelevia. Yleisimmäksi poimuakselin suunnaksi on kuitenkin havaittavissa suunta, joka on sama kivilajien lounais-koillinen suuntaisen pääliuskeisuuden kanssa. Poimuakselikaateet vaihtelevat välillä $10 - 85^{\circ}$ kaadesuunnan ollessa yleensä pohjoisen ja idän välillä. Selvimpiä suuria poimurakenteita muodostavat yhtenäiset metavulkaniitti- ja gneissijaksot. Parhaiten havaittavia poimuja muodostavat esim. Vuosaaren metavulkaniitit sekä Kaivopuiston, Pihlaja-saaren ja Laajasalon Santahaminan amfiboliitit ja gneissit. Näissä havaitut poimuakselit kaatuvat $30 - 85^{\circ}$ koilliseen ja itään. Samantyyppinen poimuakselien suuntaus ja kaade on myös Helsingin länsiosien amfiboliitti- ja kiillegneissivyöhykkeellä.

Yleensä kaikilla Helsingin alueen kivilajeilla on havaittavissa ainakin jonkin asteinen suuntautuneisuus. Gneissien ja metavulkaniittien (amfiboliittien) liuskeisuus on voimakas. Myös migmatiittisissa graniiteissa suuntaus on usein nähtävissä. Liuskeisuusaste riippuu kuitenkin graniitin sisältämien gneissisulkeumien määrästä ja säilyneisyydestä. Jos kivilajissa on havaittavissa kerroksellisuutta, on kiven voimakkain liuskeisuus lähes poikkeuksetta tässä suunnassa. Helsingin kivilajien liuskeisuus on kaateeltaan lähes pystyä. Kaade vaihtelee pystyn molemmin puolin eikä alle 50° kaateita ole todettu.

4.1.3 Magmaintruusiot

Helsingin alueen gabroluokan syväkivet ovat olleet subvulkkaanisia magmasäiliöitä tai vulkaniittien syöttökanavia, jotka ovat liittyneet varhaiskinemaattiseen vulkanismiin. Ne ovat

asettuneet kerrosmyötäisesti vulkaniittien väliin ja niiden kontaktit ovat teräviä. Synkinemaattisen vaiheen happamien granitoidisten kivilajien intruusioidet ovat osittain taivuttaneet ympäröiviä gneissejä ja vulkaniitteja tunkeutuessaan pääosin konformisti ympäröiviin kivilajeihin /30, 61/.

Myöhäskinemaattisen mikrokliinigraniitin intruusiota ovat osittain kontrolloineet EW- ja N30°E-suuntaiset lomittaiset murrossysteemit /30/. Intruusioon liittyen ovat pienimmät mikrokliinigraniitti-intruusioidet ja juonet tunkeutuneet milloin konkordantisti ja milloin jyrkästi leikaten ympäröiviin kivilajeihin. Kontaktit sivukiven kanssa ovat joko hyvin teräviä ilman nähtävää vaihettumis- ja/tai muuttumisvyöhykettä tai graniitin migmatiittisen luonteen mukaisesti asteittain vaihettuvia. Mikrokliinigraniitti on tunkeutunut useissa eri jaksoissa, mistä on osoituksena toisiaan leikkaavat graniittijuonet.

4.1.4 Rakoilu ja ruhjeet

Helsingin kivilajien päärakoilusuunta on lähes poikkeuksetta sama liuskeisuuden suunnan kanssa. Päärakosuunnan lisäksi on kallio rakoillut myös muissa suunnissa. Usein kalliossa on yksi tai kaksi tällaista rakosuuntaa, jotka ovat suppealaisia. Yksi merkittävimpiä päärakoilun lisäksi on vaakarakoilu. Se noudattelee yleensä suurpiirteisesti kallion pintatopografiaa. Vaakarakoilu keskittyy usein muutamaa isompiin laaja-alaisiin rakoihin, joihin liittyy suppealaisempaa ja tiheämpää vaakarakoilua.

Kallion rakoilun tiheys riippuu alueellisten geologisten tekijöiden lisäksi kivilajista. Pääosiltaan on Helsingin migmatiittinen kalliooperä kohtalaisen rakoillutta. Ehjimpiä alueita ovat yhtenäiset graniittiset lohkot. Vastaavasti tiheimmin rakoilleita ovat louskeiset ja hauraat gneissit kuten esim. kvartsi-maasälpägneissit.

Kalliooperän rakoilun on aiheuttanut pääasiassa horisontaalisten pääjännityssuuntien aiheuttamat lohkoliikunnat. Näissä

muodostuvat raot ovat usein yhdensuuntaisia tai lomittaisia rakosysteemejä. Vaakarakoilun syntyyn on todennäköisesti vaikuttanut myös vertikaalisen puristuksen heikkeneminen nykyisen kallionpinnan päällä olleiden kalliomassojen eroosion johdosta.

Yksittäiset raot voivat olla veto- tai siirrosrakoja. Siirrosrakoilu voidaan todeta jatkuvien rakenteiden siirtymisenä siirrostopon suhteen tai liuskeisuuden suuntaisina ns. haarniskarakoina, joiden rakopintojen uurteista voidaan päätellä siirrosuunta. Haarniskaraot ovat hyvin yleisiä Helsingin kallioperässä. Rakojen täyte voi olla kiinteän mineraaliaineksen lisäksi ns. kalliosavea, joka koostuu mineraalien rapautumistuotteena syntyneistä useista savimineraaleista. Joissakin lähellä kallionpintaa olevissa vaakaraoissa on tavattu jopa hiekka- ja silttikerroksia.

Kalliolohkojen liikehdintä on paikoin niin voimakasta, että yksittäiset raot eivät ole riittäneet tasoittamaan jännitystiloja kalliossa, vaan kallioon on syntynyt rakotihentymiä, murroksia ja ruhjeita. Näissä vyöhykkeissä on tapahtunut kalliolohkojen suurimmat siirtymät. Niissä kivi on rikkoutunut ja ruhjoutunut sekä usein myös rapautunut löyhäksi kalliomateriaaliksi. Rapautumisen yhteydessä on ruhjeisiin syntynyt erilaisia savimineraaleja kuten esim. kaoliittia, montmorilloniittia ja vermikuliittia. Rikkoutuneisiin kalliovyöhykkeisiin liittyy tavallisesti myös runsaita pohjavesivirtauksia.

Helsingin alueen kallioperän suurimmat ruhjeet ovat keskittyneet pääosiltaan kolmeen suuntaan: luoteis-kaakkoinen, itä-läntinen ja koillis-lounainen. Luoteis-kaakkoinen ruhjesuunta leikkaa jyrkästi kivilajin yleistä suuntausta. Suurin tämän suuntainen ruhje on ns. Kluuvin ruhje, joka jakaa koko keskikaupungin kahteen osaan. Kaksi viimeksimainittua ruhjesuuntaa liittyvät selvimmin kivilajien liuskeisuuksien suuntiin. Kaupungin rannikko- ja yleinen kalliotopografia ovat ruhjesuuntien kontrolloimia. Jäätikköeroosio on vielä jonkin verran lisännyt korkeuseroja muovaamalla ruhjevyöhykkeet pinnanteiksi. Pääosa näistä Helsingin kallioperän ruhjeista on

vertikaalisessa asennossa, mutta näihin pääruhjeisiin liittyy myös pienempiä loiva-asentoisia ja vaaka-asentoisia heikkousvyöhykkeitä /22, 43/.

4.2 Stratigrafia ja kivilajien ikäsuhteet

Svekofenniidisten muodostumien kerrostumisalusta on vielä tuntematon. Alueen vanhimmat tunnetut kivilajit ovat kvartsi-maasälpägneissejä ja kiillegneissejä, jotka kerrostuivat grau-vakkoina ja epäpuhtaina arkoosisedimentteinä yli 2000 Ma sitten. Kvartsi-maasälpägneissit ovat alkuperäisen raekoostumuksen sekä niihin liittyvien kalkkisedimenttien perusteella olleet geosynkliinivaiheen etumaa-alueen sedimenttejä. Vastaavasti kiillegneissien alkuperäinen hienorakeisuus, ohuet kerrokset ja karbonaattien puuttuminen viittaavat niiden kerrostuneen syvään veteen /30, 61/.

Kvartsi-maasälpägneissien ja osittain myös kiillegneissien sisältämä hiekka-siltti-raekokoluokan sedimentit koostuvat pääosiltaan kvartsista ja oligoklaasisesta plagioklaasista. Tällaisen detrituksen lähtökivilajeina on ollut keskirakeiset, koostumukseltaan graniitti-granodioriitti-kvartsidioriittiluokan syväkivilajit, jotka todennäköisesti ovat kuitenkin kadonneet svekofenniidisen magmatismien prosesseihin /23, 29/. Kvartsi-maasälpägneisseihin liittyvät kalkkikivet ovat voineet muodostua etumaa-alueella levien vaikutuksesta, jolloin niissä esiintyisi stromatoliittirakenteita. Kyseisiä kerrosrakenteita ei varmuudella näissä kivissä ole todettu, mutta vastaavanlaisissa karbonaattimuodostumissa kyläkin /30, 61/.

Emäksiset ja intermediääriset vulkaniitit kerrostuivat edellä mainittujen klastisten sedimenttien päälle. Kontakti on yleensä ohuehko vaihtumisvyöhyke, jossa on vuorokerrostuneisuutta. Viimeisenä vaiheena tässä vulkanismissa kerrostuivat happamat vulkaniitit. Pääosan näistä muodostavat kerrokselliset tuffiitit ja lapillituffiitit. Vähäisemmässä määrin ovat säilyneet agglomeraatit ja tyyny-laavat. Metavulkaniitteihin liittyy myös uraliittiporfyyriittiä. Happamille vulkaniiteille tyypillisiä rakenteita ovat vain kerrokselliset

tuffiitit. Näitä vulkaniitteja on indentifioitu vähän. Niiden tunnistamista vaikeuttaa myös samankaltaisuus kvartsi-maasälpägneissien kanssa /30/.

Etelä-Suomen vulkaniitit kuuluvat ilmeisesti yhteen ja samaan purkausjaksoon, jossa on ollut eri vaiheita. Iältään ne ovat noin 1850 - 1950 Ma. Vulkaniitteihin läheisesti liittyen muodostuivat samanaikaisesti myös synkinemaattiset syväkivilajit (gabrot, kvartsi-granodioriitit ja mahdollisesti graniitit). Etelä-Suomen diopsidi- ja hypersteeni-gneissit sijoittunevat alkavan vulkanismin vaiheeseen /30, 61/.

Myöhäiskinemaattista vaihetta (noin 1800 - 1850 Ma) luonnehtivat migmatiittiutumiseen liittyneet mikrokliinigraniittintruusiot sekä graniittidoomit. Mikrokliinigraniittiin liittyy runsaasti assimiloituneita sivukiven kappaleita, joista on paikoin vain haamumaiset jäänteet jäljellä. Migmatiittirintamaan liittyneet graniittijuonet leikkaavat kaikkia vanhempia kivilajeja sekä myös aikaisemmin muodostuneita mikrokliinigraniittijuonia /30/.

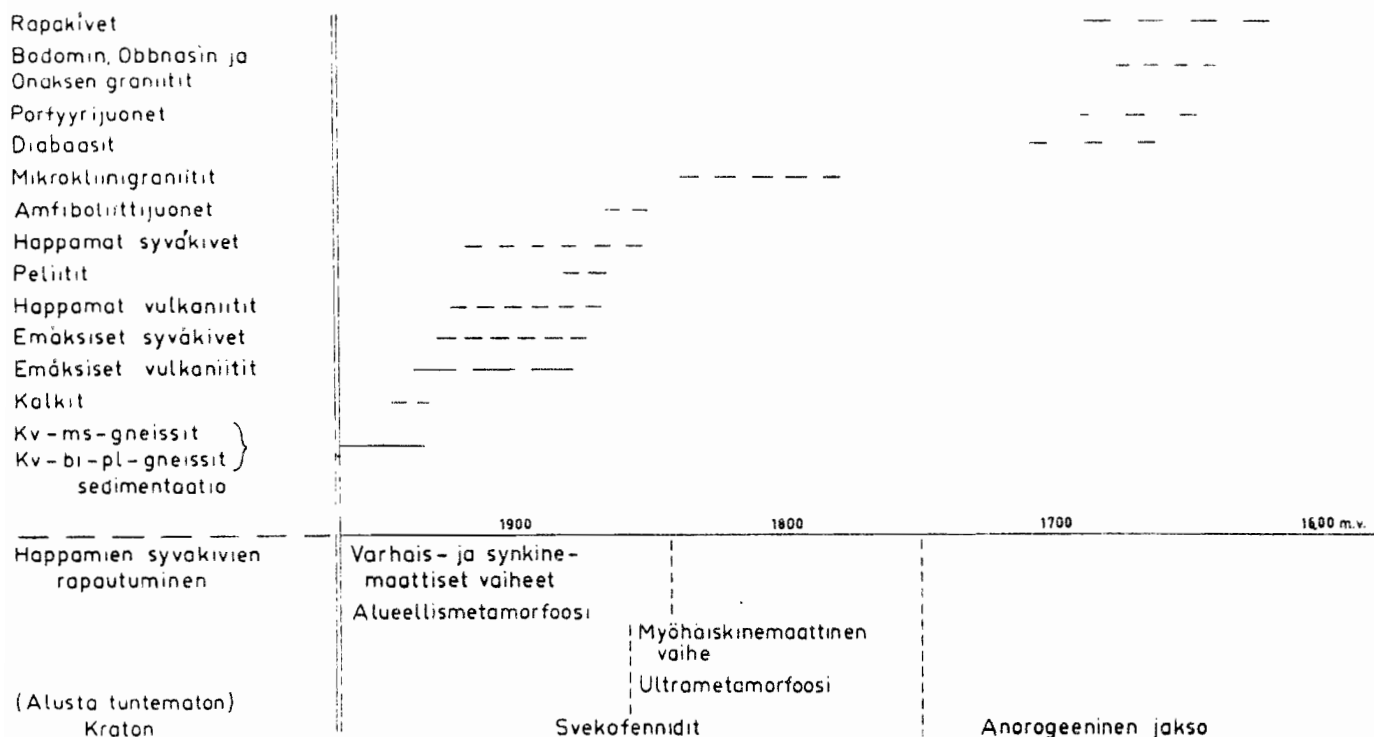
Kaikkia muita kivilajeja nuorempia ovat alueen muutamat juonikivet. Näiden on arvioitu olevan lähes samanikäisiä (noin 1700 Ma), ja ne liittyvät Svekofenniidien kratonivaiheeseen /30, 61/. Juonien ilmeistä samanikäisyyttä osoittaa niiden hyvin samanlainen suuntautuminen.

Koko orogeniasykkelin varhaiskinemaattisesta sedimentaatiosta anorogeenisiin intruusioihin (rapakivigraniitit) kesti noin 500 Ma. Sedimenttien poimuttuminen, metamorfoosi ja syn- ja myöhäiskinemaattisten syväkivien intruusiot tapahtuivat noin 100 Ma:ssa. Yhteenvedo kivilajien prekambrisesta evoluutiosta Helsingin ja koko Etelä-Suomen alueelta on esitetty taulukossa 3 /30, 61/.

4.3 Helsingin kalliooperäkartta

Tässä tutkimuksessa liitteenä oleva Helsingin alueen kalliooperäkartta 1:50 000 perustuu Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston 1978 laatimaan 1:10 000 mittakaavaiseen kalliooperäkarttaan /20/. Mittakaavan suurentamisen

Taulukko 3. Kivilajien prekambriinen evoluutio Etelä-Suomen alueella /30/.



yhteydessä on alueen kivilajisuhteita yksinkertaistettu ja joiltakin osilta on tämän tutkimuksen perusteella kivilajinimityksiä tarkistettu. Migmatiittisten kivilajien kontaktisuhteet ovat hyvin vaihtelevat, joten pääsääntöisesti on karttamitta-kaavan kivilajirajat tulkittava vaihettumisvyöhykkeiksi.

Tässä kartassa on kivilajit merkitty eri rasteroinneilla, miltä osin se selvimmin poikkeaa väritetystä kallioperäkartasta 1:10 000. Eri kivilajeja merkitsevien rasterointien valinnassa on pyritty korostamaan kyseiselle kivilajille tyypillisiä rakenne- ja koostumuspiirteitä. Tämän vuoksi on migmatiittinen graniitti esitetty valkoisella, jossa sen yleensä heikko suuntaus on esitetty nuolilla. Intermediääriset syväkivet ovat graniitteja tummempia, mikä on esitetty myös niiden rasteroinneilla. Tummat gneissit ja amfiboliitit on esitetty tummen-tulla rasterilla. Ne ovat myös hyvin suuntautuneita, mikä on esitetty raidoilla ja juovilla kartalla. Liuskeisuuden alueelliset vaihtelut on pääpiirteessä selvitetty rasterisuuntauksen avulla. Karttaan on merkitty myös mainittavimmat karsi- ja kalkkikiviesiintymät sekä juonikivet.

5. PORAUSMENETELMÄT KALLIORAKENTAMISESSA

5.1 Yleistä

Kalliorakentamisessa yhtenä olennaisena osatekijänä on reikien poraaminen kallioon räjäytystä, kiinnitystä, injektointia ym. varten. Kalliorakentamisen lisäksi porausta käytetään tutkimus- ym. tarkoituksissa kuten porakaivojen teossa. Kallioperän ominaisuudet vaikuttavat poraustulokseen. Tässä tutkimuksessa käsitellään niitä kallion ja kiven ominaisuuksia, jotka vaikuttavat reikien poraamiseen eri porausmenetelmillä. Kallioporausmenetelmiä ja -kalustoja on käsitelty laajalti alan kirjallisuudessa (esim. /17, 19, 49, 51, 71/).

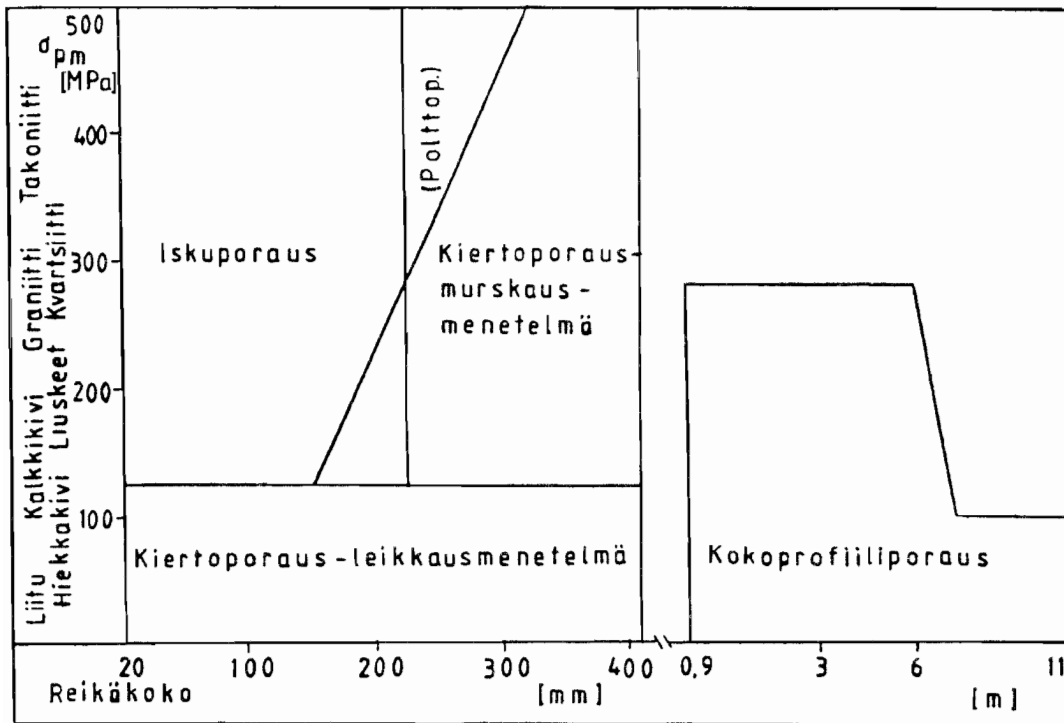
Tunnelirakentamisessa käytetty kokoprofiilimenetelmä on tulevaisuudessa todennäköisesti käytetty porausmenetelmä myös ns. kovissa kivissä. Tämän vuoksi käsitellään porausta myös tämän menetelmän kannalta.

5.2 Porausmenetelmien jako

Kallioporausmenetelmät voidaan ryhmitellä eri osa-alueisiin käyttämällä perustana niitä periaatteita, joilla kivi terän alla rikkoutuu. Yleisimmin käytetyt menetelmät ovat:

- iskuporaus
- kiertoporaus-murskausmenetelmä
- kiertoporaus-leikkausmenetelmä
- kiertoporaus-hiertämismenetelmä eli kallionäytekairaus
- kokoprofiiliporaus.

Iskuporaus on näistä käytetyin menetelmä. Varsinaisesti kovissa kivissä toimivia menetelmiä ovat iskuporauksen lisäksi kiertoporaus-murskausmenetelmä ja kiertoporaus-hiertämismenetelmä. Myös kokoprofiiliporauksista on suppeasti käytetty kovissa kivissä. Menetelmien eri käyttöalueet on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Eri kallioporausmenetelmien pääasiallisimmat käyttöalueet (R. Viitala 1983).

Seuraavassa tarkastellaan iskuporausta, kiertoporaus-murskausmenetelmää ja kokoprofiiliporausta. Kiertoporaus-leikkausmenetelmää ja kallionäytekairausta ei tässä yhteydessä käsitellä.

5.3 Iskuporaus

5.3.1 Iskuporausmenetelmät

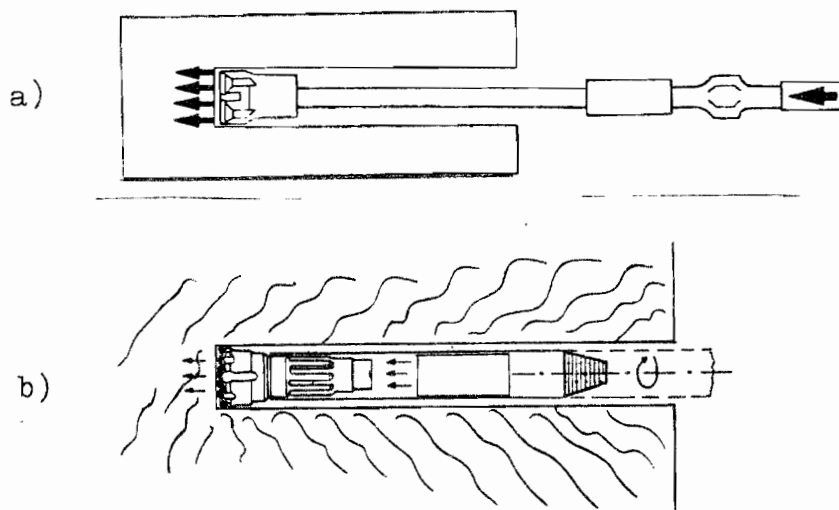
Iskevässä kallioporauksessa käytetään poran iskuenergia terän avulla tapahtuvaan kallion murskaamiseen. Iskuenergia aikaansaadaan porakoneen männän avulla. Mäntä liikkuu joko paineilman tai hydraulioöljyjen avulla.

Iskuporaus jaetaan kahteen eri menetelmään sillä perusteella, miten männän iskuenergia siirretään terään:

- päältälyövä iskuporaus
- uppoporaus.

Päältälyövässä iskuporauksessa männän energia siirtyy terään iskuaaltona poratangon eli kangen avulla (kuva 16 a).

Uppoporausessa mäntä lyö suoraan terään (kuva 16 b). Näin vältetään energiahukka, joka päältälyövässä iskuporausessa aiheutuu tankojen käytöstä.



Kuva 16 a) Pääältälyövä iskuporaus ja b) uppoporaus /71/.

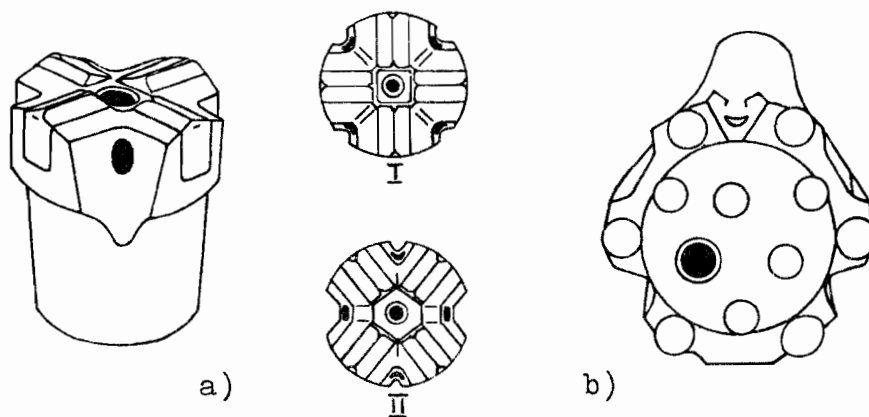
5.3.2 Iskuporauksen poraus- ja porakalustot

Porauskalustolla tarkoitetaan niitä kallioporauslaitteiston osia, jotka suorittavat varsinaisen kivien irroitus työn. Niitä ovat poratangot ja -putket sekä terät eli porakruunut. Porakalusto tarkoittaa itse porakonetta.

Kiintoporissa on vain yksi poratanko eli kanki. Kangen päässä on kiinteä talttamainen terä, joka on varustettu kovametallipalalla. Liittämällä yksittäisiä tankoja kierreholkkien avulla yhteen saadaan porattua syvempiä reikiä. Tämä on ns. jatkotankokalusto. Uppoporausessa käytetään halkaisijaltaan paksumpia putkimaisia jatkotankoja.

Jatkotankokalustossa käytetään kierteillä kiinnitettäviä porakruunuja. Käytössä on myös ns. kartioliitos. Porakruunut ovat pala- tai nastakruunuja. Palakruunuissa porauspää muodostuu talttamaisista kovametallipaloista, jotka on juotettu terään kiinni. Kovametallipalojen sijoituksen suhteen voidaan palakruunut jakaa ristipääteriin ja x-teriin (kuva 17 a). Nastakruunuissa on terän päähän juotettu kovametallinastoja

(kuva 17 b). Nastakruunuilla on todettu olevan tietyissä olosuhteissa huomattavasti suurempi tunkeutumismoisuus kuin palakruunuilla.



Kuva 17. Iskuporakruunuja: a) palakruunu (I ristipääkruunu ja II x-kruunu) ja b) nastakruunu.

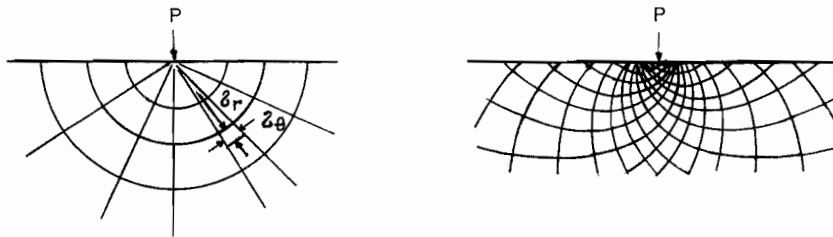
Porauskalustot jaetaan niiden käyttövoiman perusteella a) pneumaattisiin (paineilmakäyttöiset) ja b) hydraulisiin kallioporakoneisiin. Hydraulisella kallioporakoneella saavutetaan pneumaattiseen verrattuna suurempi porausteho ja pienempi energian kulutus ja siten jopa 50 - 100 % suurempi tunkeutumismoisuus /71/.

Yhdessä poraus- ja porakalusto muodostavat koko toimivan porauskalustoyksikön, joka voidaan koota näistä osatekijöistä alustalle porauslaitteeksi. Toimivuuden lisäämiseksi on alustassa usein yksi tai useampi porakone puomiin kiinnitetty ja alusta liikkuu telaketjuilla tai pyörillä. Porauslaitteet vaihtelevat käyttökohteen vaatimusten mukaisesti.

5.3.3 Kiven käyttäytyminen ja murtuminen iskuporauksessa

Kuormitettaessa terällä kiveä syntyy siihen jännityskenttä (kuva 18). Jos kuormittava voima on riittävän suuri, syntyy kiveen murtumia. Murtuminen aiheutuu todennäköisesti sekä

veto- että leikkausjännityksen kiven heikkouskohtiin aikaansaamien jännitystihentymien vaikutuksesta. Heikkouskohtana voi olla esim. kivessä oleva huokostila, hiusrako tai muu epäjatkuvuuskohta /51/.



Kuva 18. Viivakuorman aiheuttama jännityskenttä. Vasemmalla pääjännitysrajektorit ja oikealla maksimileikkausjännitysrajektorit /12, 51/.

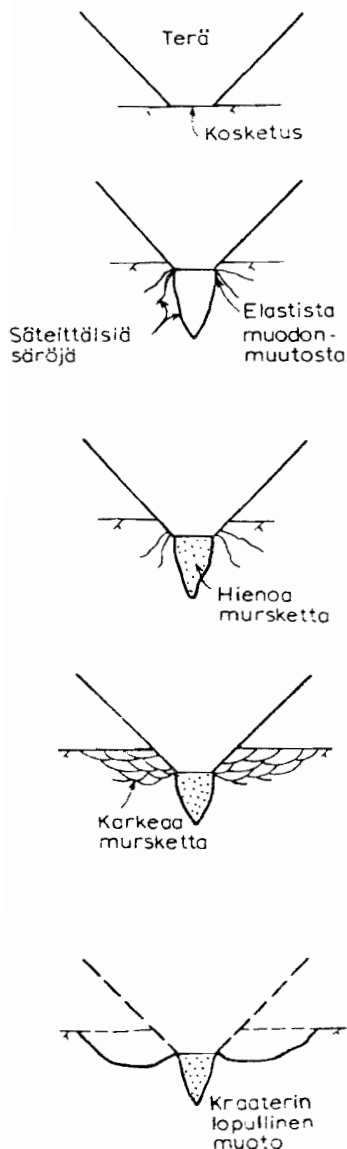
Jos energiamäärä on riittävän suuri, särkyy kuormitettu kivi ja terä tunkeutuu kiveen. Iskuporauksessa kiveä särkevä vaikutus perustuu nopeaan kiven murtolujuuden ylittävään kuormitukseen /51/. Kiven murtuessa terän alla syntyy kiven pintaan kraateri (kuva 19). Terän kovametallipalan siirtyessä pyöri-tyksen johdosta uuteen iskukohtaan tapahtuu kraaterin loveami-
nen (kuva 20).

Loveamisen tehokkuus on verrannollinen loveamisetäisyyteen ja muiden vaikuttavien tekijöiden suhteeseen siten, että aina on löydettävissä tietty optimiloveamisetäisyys, jolloin loveaminen on tehokkaimmillaan /51/. Loveamiseen vaikutta-
via kiven geologisia ominaisuuksia kuten mineraalikoostumusta, raekokoa ja rakennetta käsitellään kohdassa 6.4.

5.3.4 Poraustehoon vaikuttavat kalustotekijät isku- porauksessa

Poraustehoon vaikuttavat porakoneen ominaisuudet ovat:

- isku
- pyöritys
- syöttö
- porausjätteiden poisto.



Kiven pinnalla olevat pienet epätasaisuudet murskautuvat terän kohdatessa kiven.

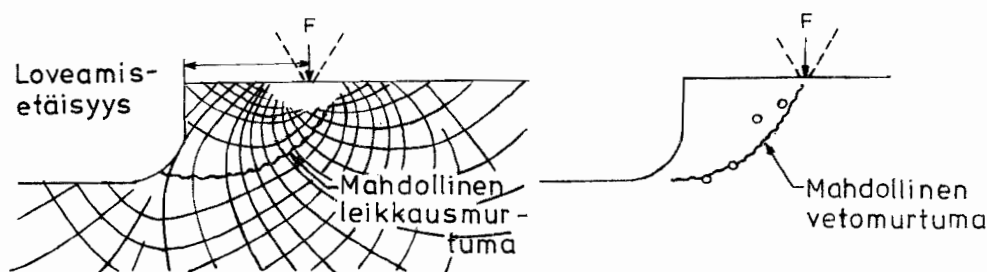
Terään kohdistuvan kuormituksen kasvaessa tapahtuu kivessä kimmainen muodonmuutos, jolloin kiveen samanaikaisesti muodostuu terän reunoilta lähteviä säteittäisiä rakoja.

Murskautunut ja kiinteä kiilavyöhyke muodostuu aivan terän alle. Tämän kiilavyöhykkeen välityksellä siirtyy lisääntyvä voima kiveen, johon varastoituu kimmoenergiaa ja jännitysrajektorit syntyvät.

Kuormituksen aiheuttaman jännityksen saatuttaessa kiven murtolujuuden alkaa säilöjen muodostuminen murren tapahtuessa murskautuneen kiilavyöhykkeen viereisiin kaarevia jännitysrajektoreita pitkin.

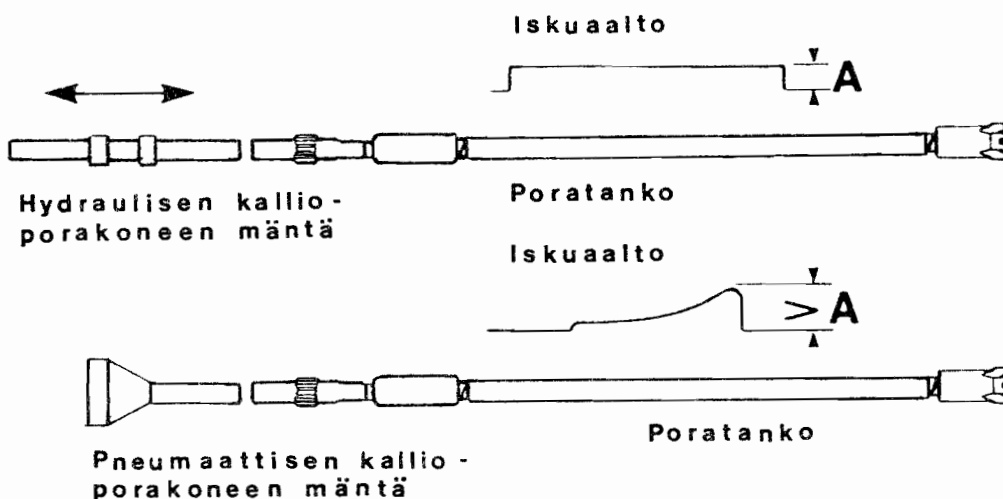
Murskautunut keskikiila sortuu, jolloin terän ja kiven välillä vaikuttava voima hetkellisesti putoaa, kunnes terä kohtaa kraaterin pohjan. Uusi edellä kuvattu tapahtumaketju toistuu tämän jälkeen samanlaisena niin kauan kuin koko iskuenergia on käytetty.

Kuva 19. Kraaterin muodostuminen iskuporauksessa /19/.



Kuva 20. Kraaterin loveaminen. Vasemmalla leikkausmurtuma, oikealla vetomurtuma /13, 51/.

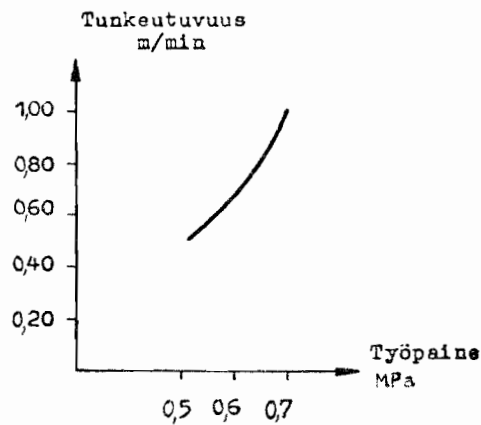
Iskuporauksessa käytetty isku (iskuenergia) saadaan aikaan männän avulla. Männän iskutiheys on normaalisti noin 50 iskua/sek. Iskuaallon pituus on kaksi kertaa männän pituus ja aallon nopeus poratangossa on noin 5000 m/sek vastaten äänen nopeutta teräksessä /71/. Iskuaallon muoto on erilainen hydraulisella ja pneumaattisella porakoneella (kuva 21). Poratankojen jatkoskohdista ja muista kohdista, joissa tangon läpimitta muuttuu, heijastunut iskuaalto kuoletetaan porakoneessa iskunvaimentimella.



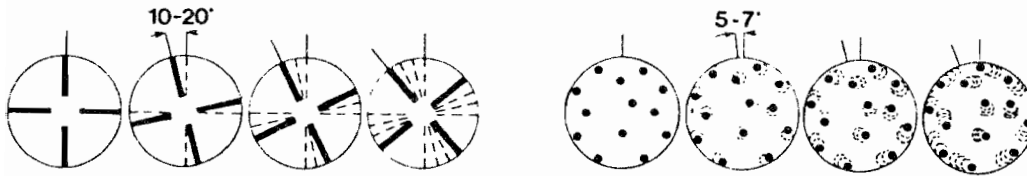
Kuva 21. Hydraulisen kallioporakoneen pitkän, ohuen männän ja pneumaattisen kallioporakoneen kartiomaisen männän aiheuttamien iskuaaltojen välinen ero. A on jännitysjakso teräksessä /71/.

Iskun vaikutus terän tunkeutuvuuteen on suoraan verrannollinen työpaineeseen (kuva 22). Työpaineella tarkoitetaan sitä ilman tai öljyn painetta, joka porakoneessa liikuttaa mäntää. Pneumaattisissa porakoneissa ilmanpaine on yleensä 0,6 - 0,7 MPa ja hydraulisissa vastaavasti öljynpaine on 10 - 25 MPa /10/. Liian korkea työpaine kuluttaa ja rikkoo porauskalustoa.

Poranterän pyöritys tapahtuu poratankoja pyörittämällä. Pyörityksen tarkoituksena on saada terän kovametallipalat iskemään uuteen kohtaan reiän pohjassa (vrt. kraaterin loveaminen kohdassa 5.3.3). Kuvassa 23 on esitetty kahdelle eri porakruunutyyppille käytetyt iskujen väliset pyörityskulmat.

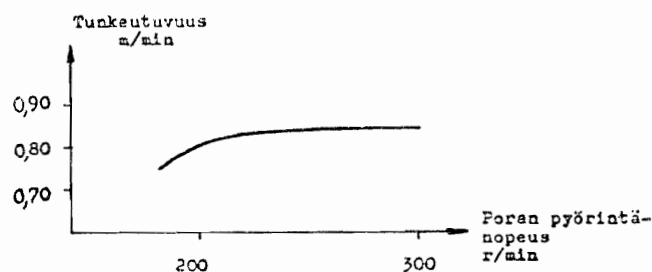


Kuva 22. Työpaineen ja tunkeutuvuuden välinen suhde /17/.



Kuva 23. Pyörityskulmien erot pala- ja nastakruunuissa iskujen välillä /71/.

Pyöritysnopeuden suurentaminen lisää tunkeutumismoitetta tiettyyn arvoon saakka, minkä jälkeen olennaista muutosta ei tapahdu (kuva 24).

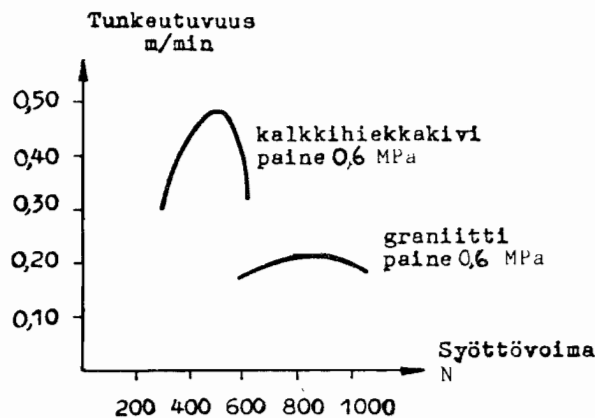


Kuva 24. Pyöritysnopeuden vaikutus tunkeutumismoiteen /17/.

Suuri pyöritysnopeus lisää terän kulumista. Nastakruunuilla terän läpimitan kulumista voidaan vähentää kehänopeutta pienentämällä. Palakruunulla terän läpimitan pienentyminen on vähäistä, koska siinä on sivuilla enemmän kovametallipalaa

kuin nastakruunuilla. Liian alhaisella pyöritysnopeudella kuluu osa männän iskun energiasta jo irrotetun kiven edelleen hienontamiseen ja tunkeutumisnopeus jää näin ollen alhaiseksi /49, 71/.

Syöttövoimalla painetaan poranterää kiveä vasten, jolloin terä on jatkuvasti kosketuksissa reiän pohjaan. Tämä mahdollistaa tehokkaan iskuenergian siirtymisen terästä kiveen. Luonteenomaista syöttövoimalle on, että sitä joudutaan muuttamaan porauksen aikana. Jokaiselle pora- ja porauskalustolle on tietyissä kallio-olosuhteissa olemassa optimisyöttövoima, jolloin tunkeutumisnopeus on suurimmillaan (kuva 25).



Kuva 25. Syöttövoiman vaikutus tunkeutuvuuteen /17/.

Liian pieni syöttövoima heikentää iskuenergian välittymistä terään ja kiveen. Vastaavasti suuri syöttöpaine voi aiheuttaa poran kiinni juuttumista ja kalustovaurioita.

Porausjätteen poistamisen eli huuhtelun tarkoituksena on poistaa irronnut kiviaines reiän ja terän välistä, jotta terän iskuenergiaa ei käytettäisi jo irrotetun aineksen murskaamiseen. Tehokas huuhtelu pienentää etenkin porakruunun kulumista ja lisää täten porauskaluston kestoikää. Porausjätteen eli soijan poisto tapahtuu huuhteluaineen - ilman, veden tai vaahdon - avulla, joka painetaan reiän pohjaan poratangossa olevan huuhtelureiän ja edelleen porakruunun läpi /71/.

Tehokkaan huuhtelun aikaansaamiseksi koko reiän matkalle on huuhteluaineella oltava riittävä nopeus. Vesihuuhtelussa se

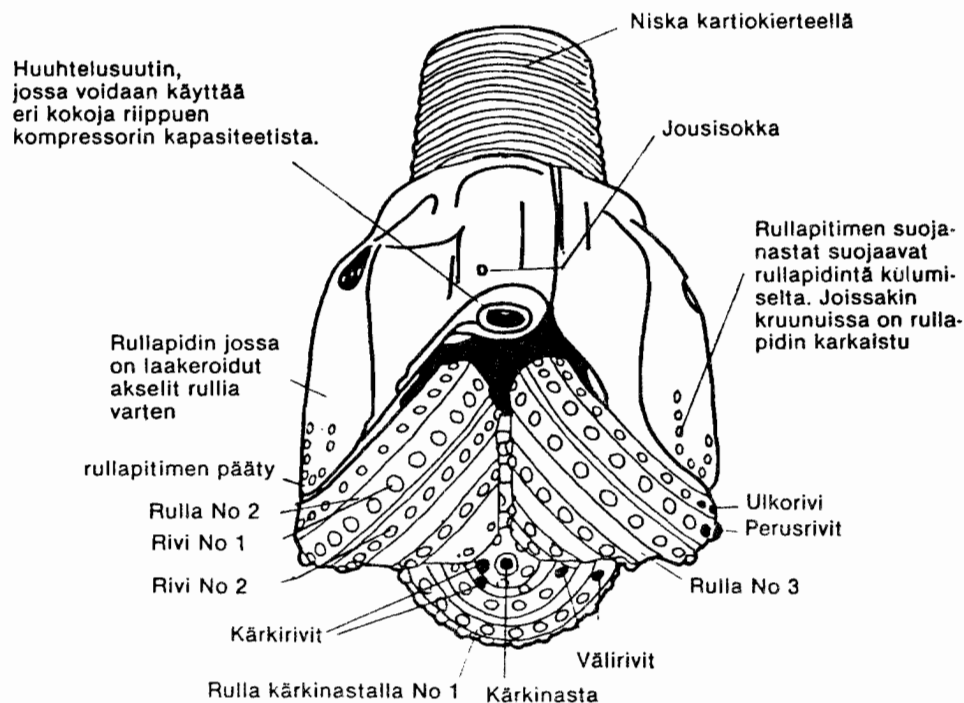
on 0,4 - 1,9 m/sek ja ilmahuuhtelussa 15 - 30 m/sek /71/. Riittämätön huuhtelu voi aiheuttaa porakaluston kiinni juuttumista, alentaa tunkeutumismennopeutta ja lisätä porakruunun ja tangon läpimitan kulumista.

Uppoporausessa kalustotekijät vaikuttavat poraustehoon pääasiassa samalla tavalla kuin päältätyövässä iskuporausessa. Uppoporausessa poraputken ja reiän seinämän välinen pieni etäisyys mahdollistaa erinomaiset huuhtelumuinaisuudet. Iskutehon pysyminen samana poraussyvyydestä riippumatta mahdollistaa uppoporauslaitteiston käytön mm. ylipitkien reikien porauksessa kuten esim. kaivon porauksessa /71/.

5.4 Kiertoporaus-murskausmenetelmä

5.4.1 Menetelmän periaate

Kiertoporaus-murskausmenetelmää luonnehtivat samat toimintaparametrit - pyöritys, syöttö, huuhtelu - kuin iskuporaus-takin. Ainoastaan terän iskevä vaikutus tunkeutumisessa puuttuu. Menetelmän periaate on yksinkertaistettuna seuraava: kartiomaisilla rullilla varustettua porakruunua (kuva 26) painamalla (syöttövoima) ja pyörittämällä suurella voimalla murretaan kivi terän alla. Pyöritys ja syöttö tapahtuvat poraputkien avulla raskaalta alustalta reiän alkupäästä käsin.

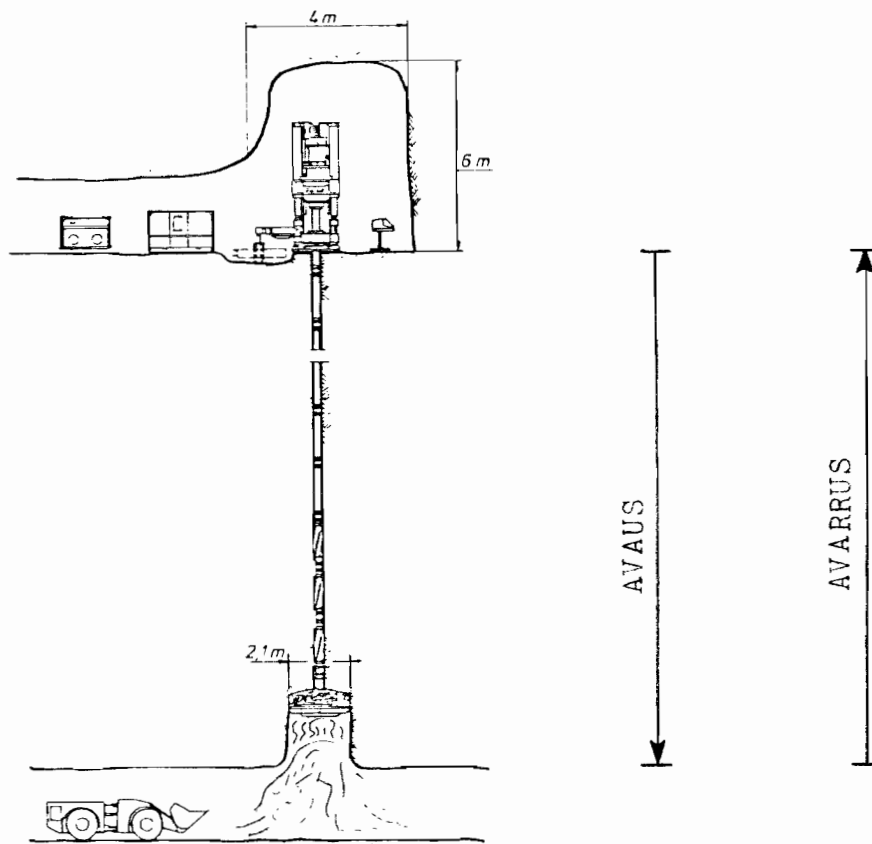


Kuva 26. Kovametallinastoilla varustettu rullakruunu /71/.

Jos tarkastellaan kiven murtumistapahtumaa rullaterän yhden nastan osalta, niin tilannetta luonnehtivat periaatteessa samat tapahtumat kuin iskuporauksessakin. Kokonaisuutena ottaen riveihin sijoitetut nastat murskaavat kiven pieniksi lastuiksi ja pölyksi. Ratkaisevaa kiven murskautumisessa on syöttövoiman suuruus. Tässäkin tapauksessa on määritettävissä tietty optimisyöttövoima, jolloin tunkeutuvuus on hyvä, mutta terän rullien kuluminen ei vielä ole liian voimakasta. Aikaisemmin menetelmää käytettiin ainoastaan öljyporauksessa, mutta nykyään sitä käytetään myös suurten louhintareikien porauksessa.

5.4.2 Menetelmän suhde kokoprofiiliporaukseen

Rullakruunulla porataan reikiä, joiden halkaisija on yleensä 229 - 444 mm /71/. Kuilujen ja nousujen teossa käytetty "kokoprofiilimenetelmä" on toisaalta kiertomurskausporausta ja toisaalta kokoprofiiliporausta (kuva 27).



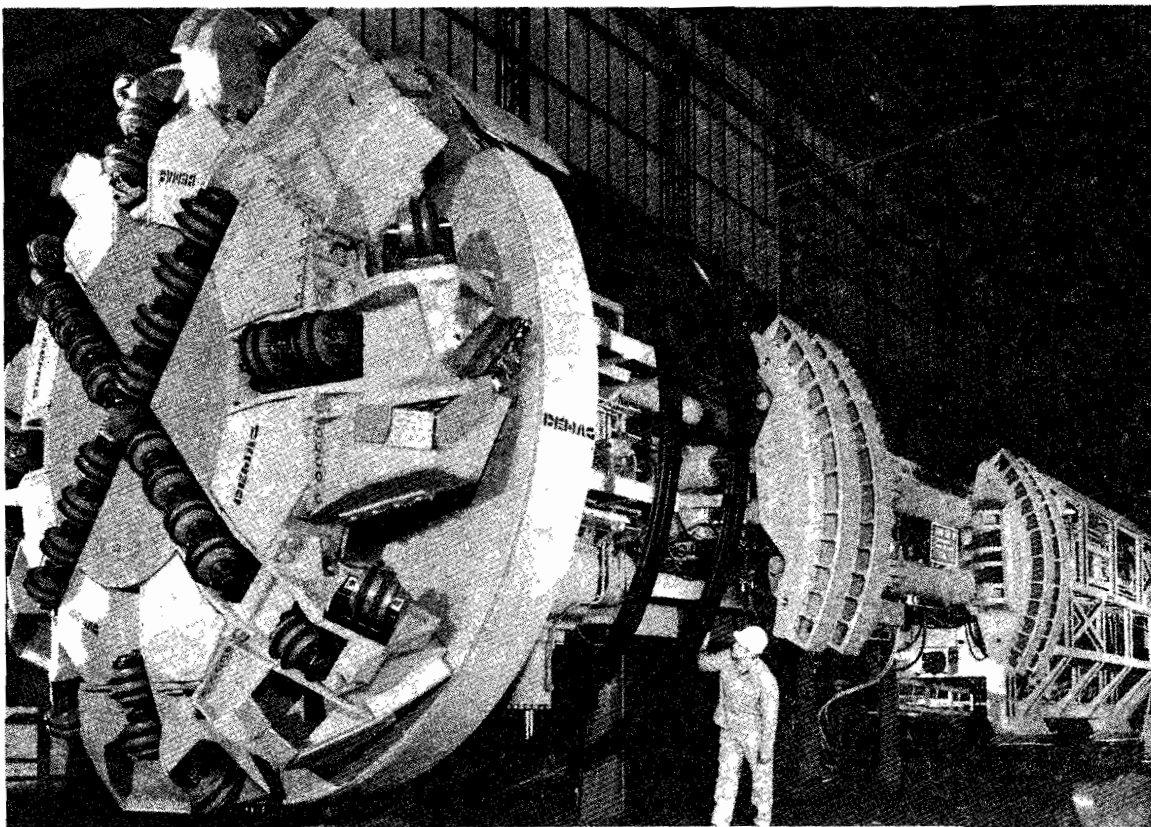
Kuva 27. Nousunajo kokoprofiilimenetelmällä /63/.

Kokoprofiilinousunajossa tehdään ensin ns. pilotti- eli avausreikä kiertoporaus-murskausmenetelmällä. Reiän valmistuttua rullakruunun tilalle asennetaan ns. avarrusterä, jota vetämällä ja pyörittämällä laajennetaan avausreikä halutun suuruiseksi.

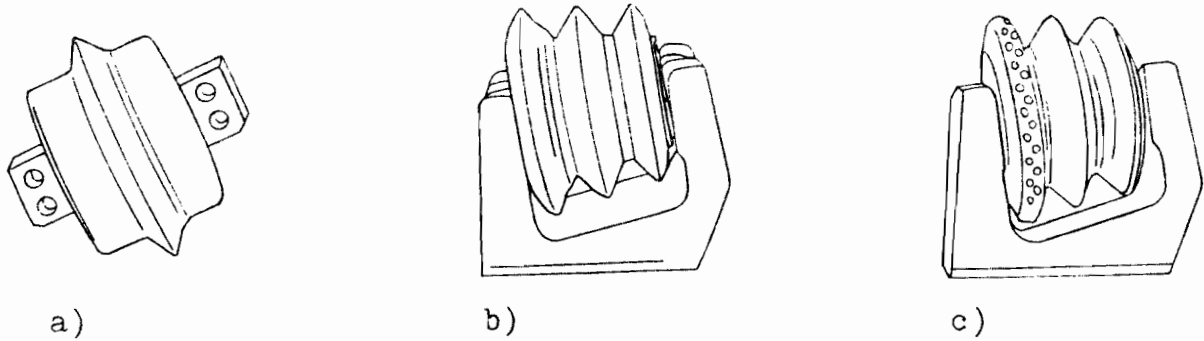
5.5 Kokoprofiiliporaus

5.5.1 Kokoprofiiliporauslaite

Tunnelirakentamiseen on kehitetty menetelmiä ja laitteita, joilla tunnelinajo tapahtuu ilman räjäytystä. Aluksi pehmeissä sedimenttikivissä käytettyjä jyrsin- ja porauslaitteita on kehitetty soveltuviksi poraamiseen myös kovissa kivissä. Käytössä olevat kokoprofiililaitteet (KPL) pystyvät poraamaan koko tunnelin poikkipinta-alan kerralla (kuva 28). Tunnelin halkaisija voi olla jopa 12 m. Jyrsijöiden kiinteät kovametalliterät ovat vaihtuneet pyöriviin rulla- ja kiekkoteriin (kuva 29).



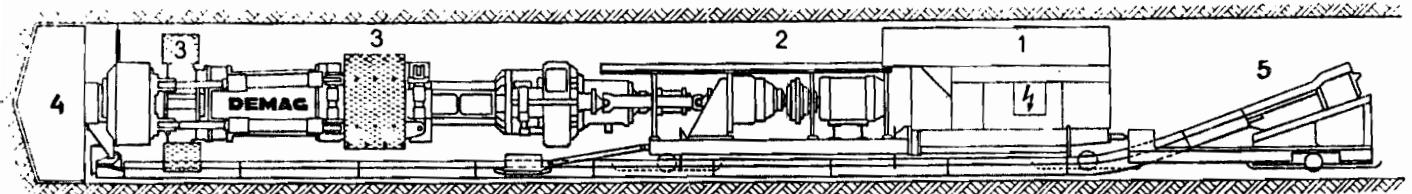
Kuva 28. Kokoprofiiliporauslaite, KPL.



Kuva 29. Käytössä olevia kiekkotteriä: a) yksittäinen kiekkotteri, b) kolme kiekkotteriä yhdessä sekä c) kova-metallinastoilla varustettu kiekkotteri.

Kiekkoterien halkaisijat vaihtelevat 200 - 400 mm ja niiden kuormitusvoimat ovat suuruusluokkaa 5 - 20 t. Teräkartion kulma on yleensä $70 - 100^{\circ} / 3, 15, 44/$.

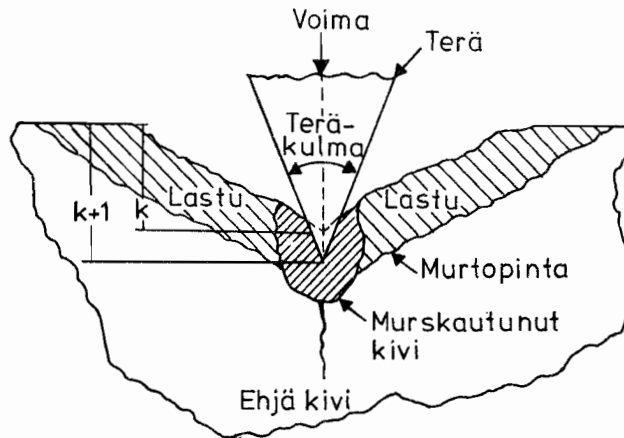
Kokoprofiiliporauslaitteen toimintaperiaate pääpiirteissään on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Kokoprofiiliporauslaite: 1 ohjaushytti, 2 sähkömoottori, 3 hydrauliset puristimet kiinnitystä varten, 4 porauspää, 5 liukuhihna kiviaineksen poistoa varten /32/.

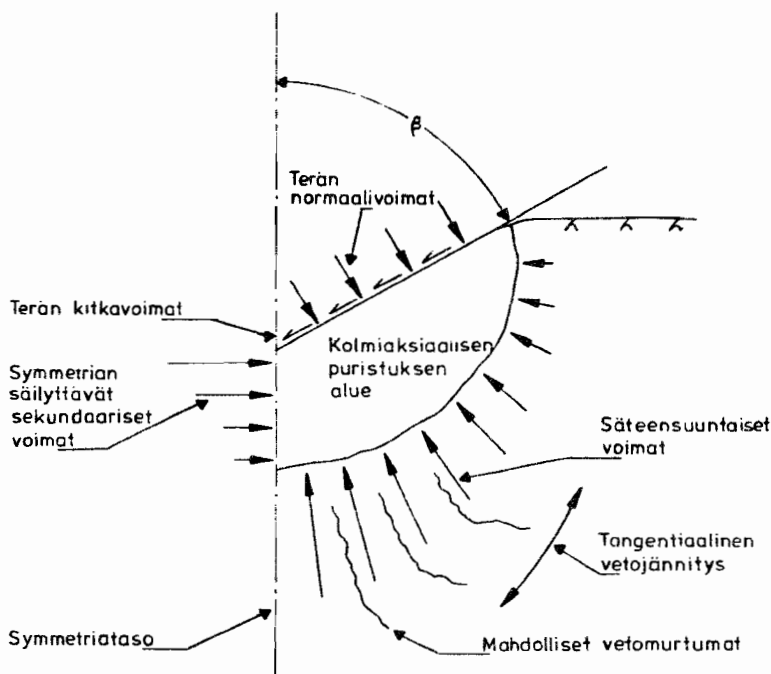
5.5.2 Kiven murtuminen kokoprofiiliporauksessa

Pyöritettäessä ja painettaessa kiekkotteriä suurella voimalla kiven pintaan tunkeutuu terä kiveen rikkoen osan materiaalista pölyksi ja irrottaen osan lastuina (kuva 31). Terän tunkeutumisen suuruus on yleensä 5 - 15 mm/kierros /3/.

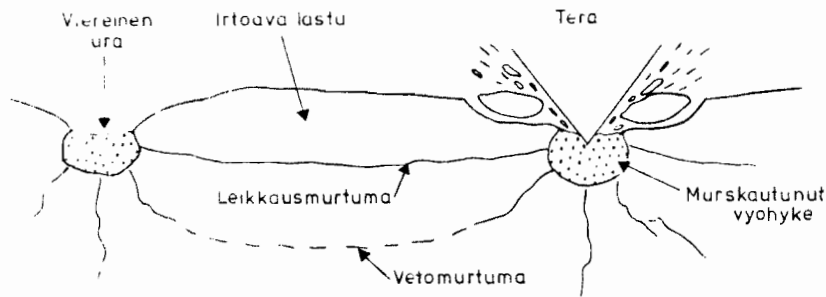


Kuva 31. Yksittäisen kiekkoterän tunkeutuminen kiveen /52/.

Kiveä murskaavan kiekkoterän aiheuttamat voimat ja niiden jakautuminen terässä ja kivessä on esitetty kuvassa 32. Terän alle muodostuva murskautuneen kiven vyöhyke syntyy kolmiakseliallisen puristuksen vaikutuksesta. Tätä vyöhykettä ympäröivässä kivessä vallitsee tangentialinen vetojännitys, jonka vaikutuksesta kiveen syntyy säteittäisiä mikrorakoja. Rakojen muodostuminen johtaa suurempien kappaleiden ns. lastujen irtoamiseen leikkausmurtumien kautta (kuva 33).



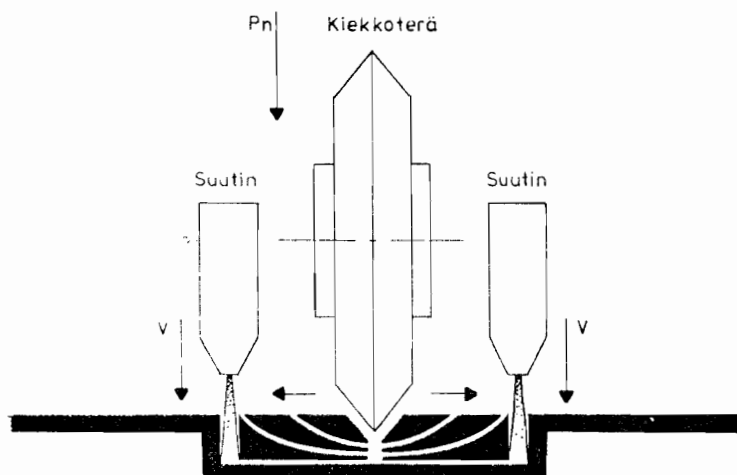
Kuva 32. Voimien jakautuminen kiveä kuormitettaessa yksittäisellä kiekkoterällä /57/



Kuva 33. Murtumien kehittyminen. Sovellettu viitteestä /3/.

Suurin osa kiekkoterällä irrotetusta materiaalista muodostuu kivilastuista. Lastuamisen saamiseksi mahdollisimman tehokkaaksi on kehitetty esim. menetelmä, jossa yksittäiseen kiekkoterään on liitetty korkeapaineiset vesisuihkut (kuva 34). Käytetyt vesipaineet ovat suuruusluokkaa 3200 - 3500 baaria. Jo yksistään nämä erittäin kapeat vesisuihkut pystyvät rikkomään kiveä /2/.

Kiekkok- ja rullaterissä käytetään myös kovametallinastoja (vrt. kuva 29). Jos tarkastellaan yhden nastan aiheuttamaa kuormitusta ja murtumaa kivessä on tilanne hyvin samanlainen kuin iskuporauksessa (vrt. kuva 19 kraaterin synnystä). Riviin asennettujen nastojen yhteisvaikutus on kuitenkin lähes sama kuin sileällä kiekkoterällä. Nastoja käytetään kovissa ja kuluttavissa kivilajeissa. Pehmeissä kivilajeissa ei tunkeutuminen nastaterällä välttämättä ole suurin mahdollinen, koska suurilla tunkeutuvuuksilla voivat nastojen välit alkaa kantaa terää. Tätä ilmiötä ei synny käytettäessä kiekkoteriä /18/.



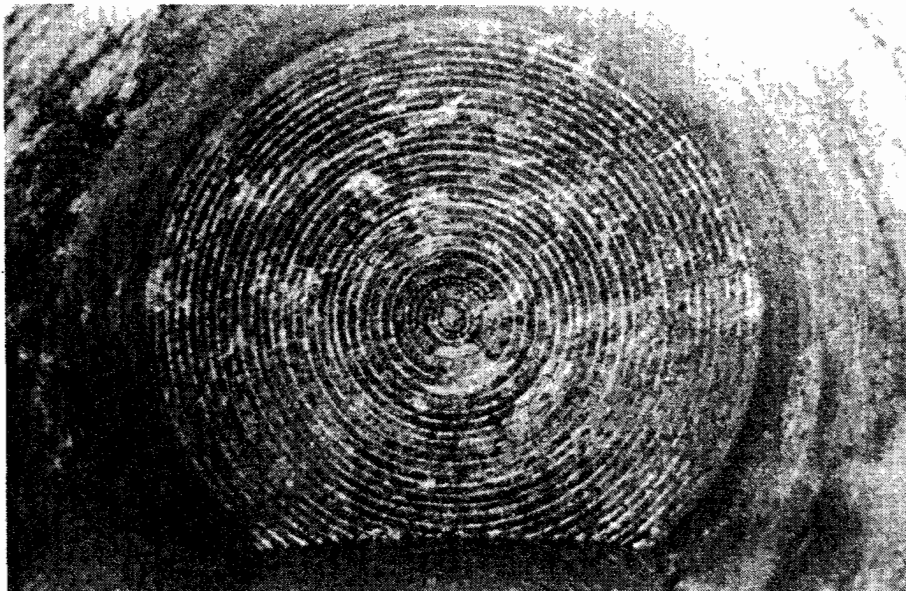
Kuva 34. Tehostettu lastuaminen /2/.

5.5.3 Kokoprofiiliporauslaitteen tunkeutumismopeuteen vaikuttavat tekijät

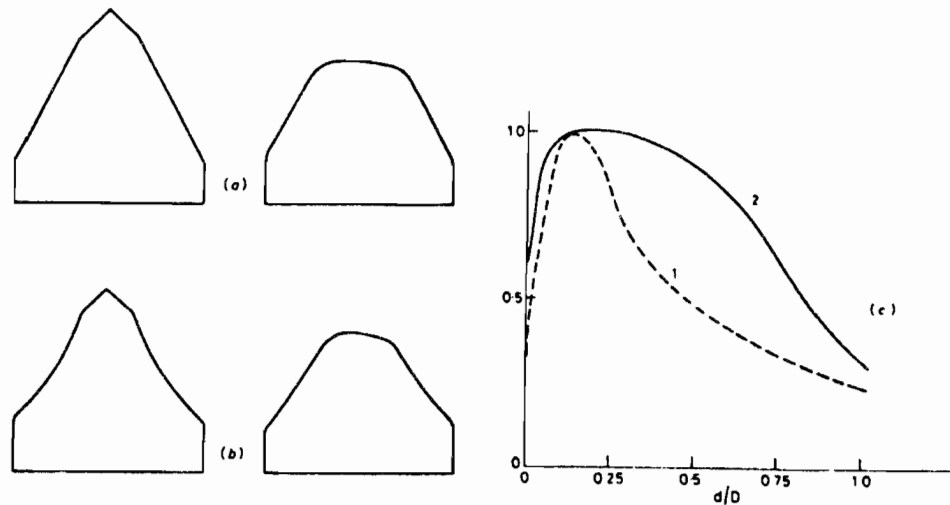
Kokoprofiiliporauslaitteen tunkeutumismopeuteen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- terät ja niiden laatu
- terien lukumäärä ja keskinäinen sijoitus porauspäässä
- porattavan kallion ominaisuudet
- laitteiston tehollinen suorituskyky.

Kallion murtuminen porauksen yhteydessä perustuu useampien terien yhteisvaikutukseen. Yksittäisen kiekkoterän tunkeutumisen periaate käsiteltiin edellisessä kohdassa. Porauspäässä olevat kiekkoterät pyörivät jokainen eri säteellä, jolloin tunnelin päätyyn syntyy samankeskeisiä ympyräuria (kuva 35). Terien kuluminen on myös verrannollinen niiden kulkemaan matkaan (kuva 36).

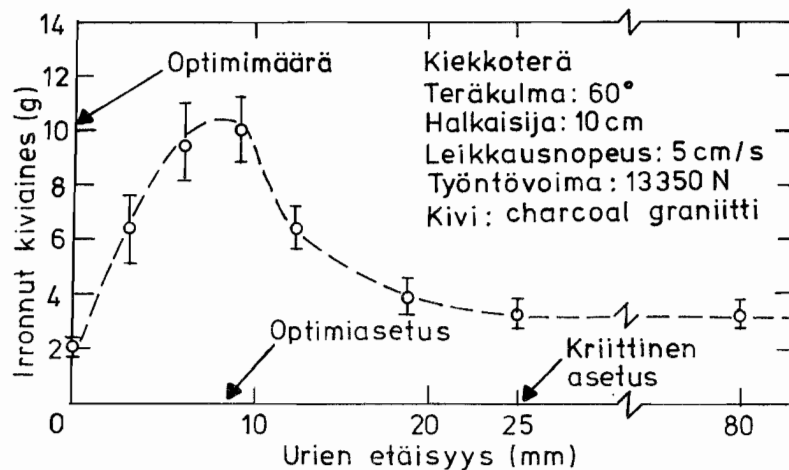


Kuva 35. Tunnelin ($\emptyset$ 3,2 m) pääty kokoprofiiliporauksessa /3/.



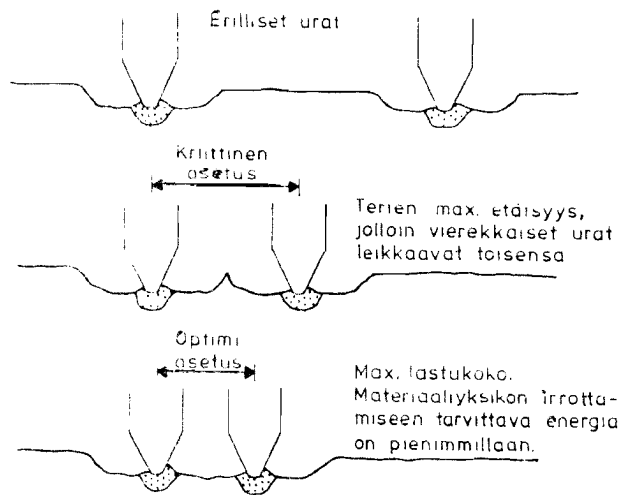
Kuva 36. Kiekkoterien kuluminen a) graniitissa (100 tuntia) ja b) gneississä (50 tuntia). Oikealla käyrä c), joka kuvaa terien suhteellisen käyttöiän korrelaatiota terien sijoituksen kanssa porauspäässä. d/D = teräuran halkaisijan suhde koko poraushalkaisijaan /3/.

Parhaimmillaan kivi murtuu suurina kevyinä urien välistä (katso kuva 33). Kiekkoterien keskinäisellä sijoituksella on tarkoitus saavuttaa ns. optimaalinen lastuaminen. Optimilastuamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa materiaaliyksiön irrottamiseen tarvittava energia on pienimmillään. Jos siis terän energiamäärä pidetään muuttumattomana, on olemassa tietty terien välinen etäisyys, jolloin tapahtuu suurin lastuaminen (kuva 37).



Kuva 37. Lastukoon ja terien etäisyyksien optimointi /54/.

Terien kriittisellä asetusarvolla tarkoitetaan tilannetta, jossa vierekkäisten urien lastuamiset vaikuttavat vain vähän toisiinsa (kuva 38).

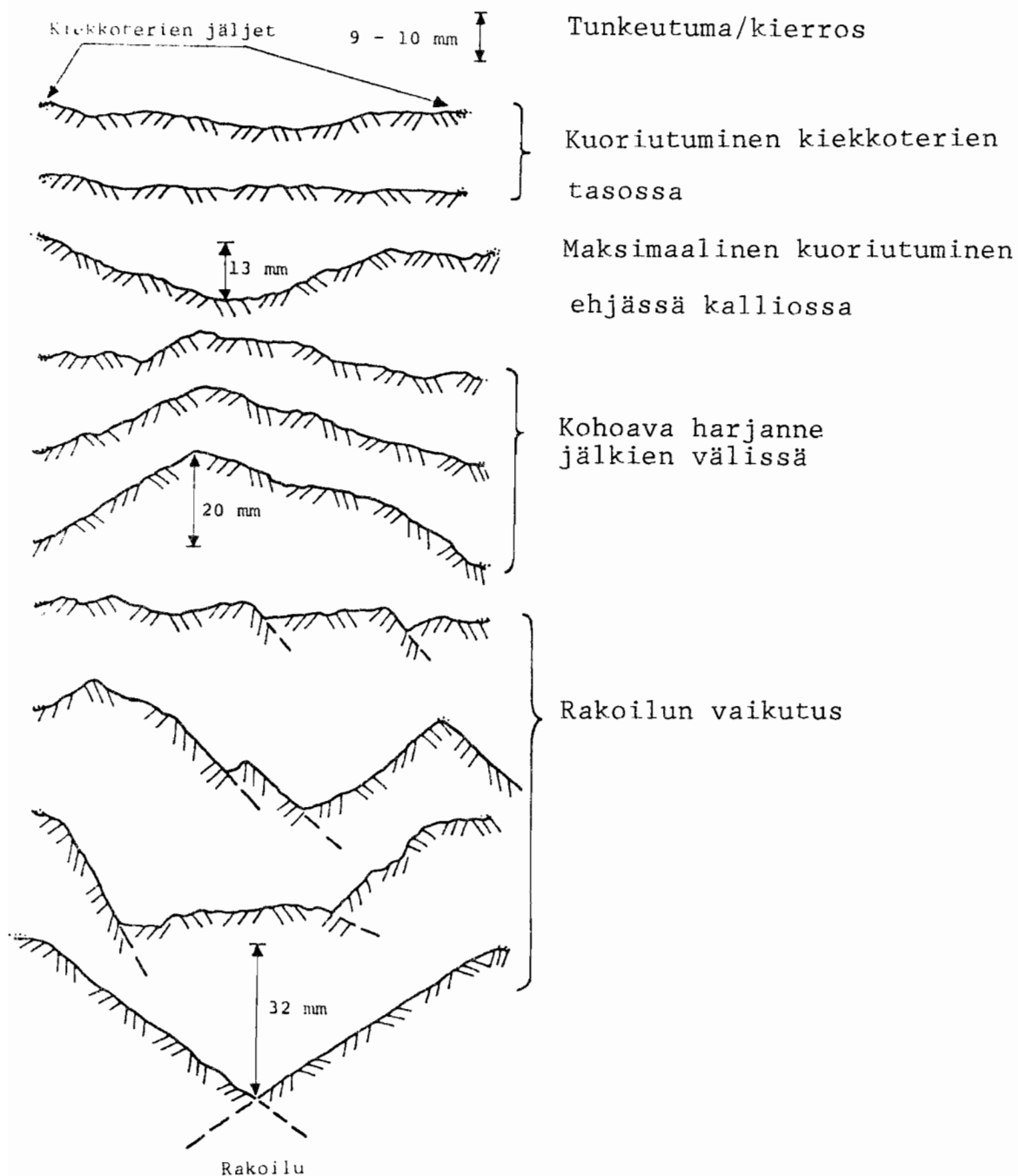


Kuva 38. Optimiasetus ja kriittinen asetus kiekkoterille /55/.

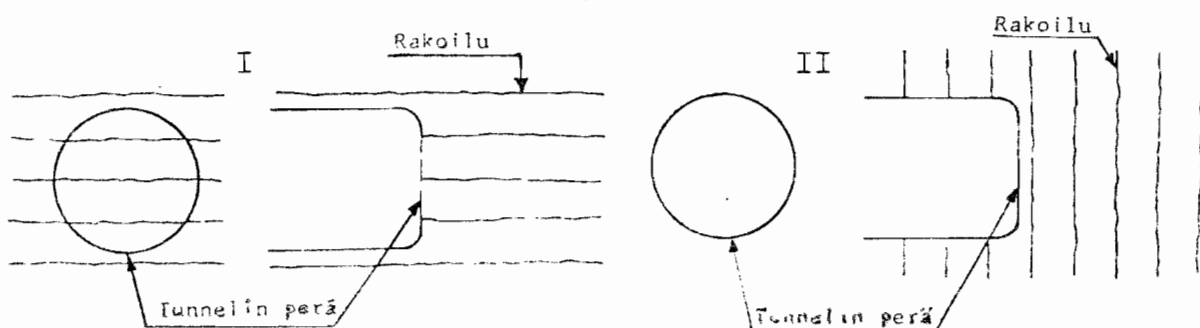
Kallion ominaisuuksista eniten tunkeutumismopeuteen vaikuttaa rakoilu. Rakoilun vaikutus teräurien väliseen lastuamiseen on esitetty kuvassa 39.

Rakoilun suunnalla ja tiheydellä on olennainen vaikutus tunkeutumismopeuteen (kuvat 40 ja 41). Harvan rakoilun (rakoväli > 0,5 m) suunnassa porattaessa on nopeus suurempi kuin porattaessa kohtisuoraan sitä vastaan. Porausnopeus on tiheämpirakoisessa (rakoväli < 0,5 m) kalliossa kuitenkin suurempi porattaessa kohtisuoraan liuskeisuutta vastaan. Tällöin kivi irtaantuu suurina levyinä terien välistä. Parhaimmillaan tunkeutumismopeus voi olla nelinkertainen verrattuna nopeuteen massiivisessa kivessä.

Toinen porausnopeuteen vaikuttava kalliotekijä on liuskeisuus. Kiven suuntautuneisuuden vaikutus lastun irtaamiseen on esitetty kuvassa 42. Kuvasta nähdään, että liuskeisuus vaikuttaa päinvastaisella tavalla terän tunkeutumiseen kuin rakoilu. Yleensä tihein rakosuunta on sama liuskeisuuden suunnan kanssa. Tämä tilanne on esitetty kuvassa 43. Liuskeisuuden vaikutus porausnopeuteen ei kuitenkaan ole läheskään niin suuri kuin rakoilun vaikutus /3/.

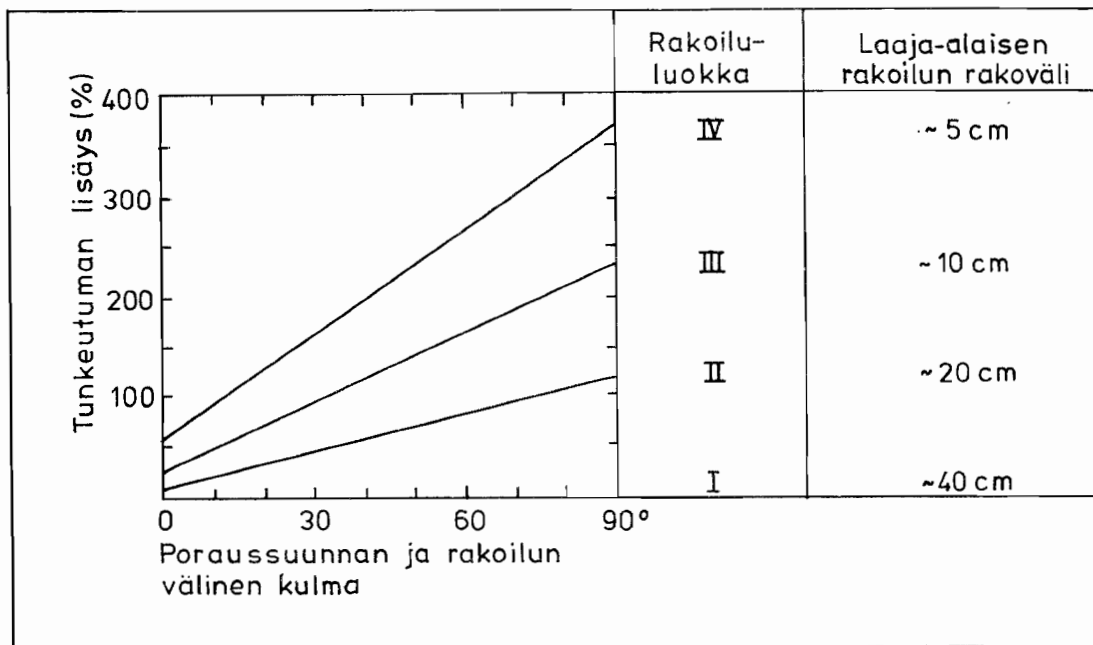


Kuva 39. Homogeenisen ja rakoilleen kiven vaikutus lastuamisen suuruuteen /3/.

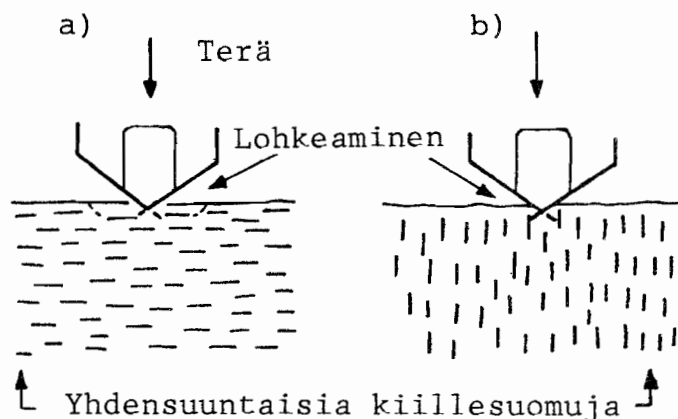


Kuva 40. Harvan rakoilun suunnan vaikutus porausnopeuteen.

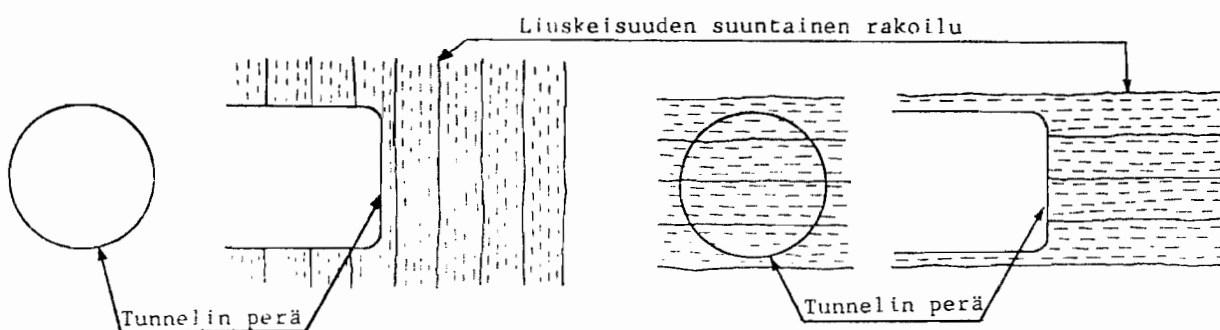
Tapauksessa I nopeus on suurempi kuin tapauksessa II /3/.



Kuva 41. Rakosuunnan ja rakotiheyden vaikutus kokoprofiili-porauslaitteen porausnopeuteen /3, 4/.

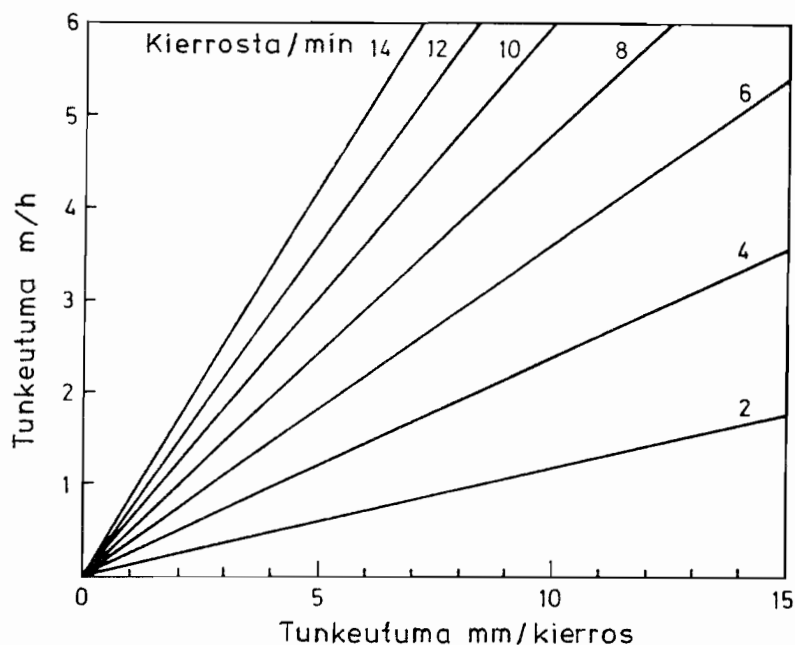


Kuva 42. Liuskeisuuden vaikutus kiven lastuamiseen /3/.



Kuva 43. Kallio-olosuhteiden erilaisuus porattaessa liuskeisuuden suuntaiseen rakoiluun nähden samansuuntaisesti ja kohtisuoraan sitä vastaan /3/.

Kokoprofiiliporauslaitteen tehollisella suorituskvyyllä tarkoitetaan tässä porauspään puristusvoimaa, vääntömomenttia ja pyöritysnopeutta. Laitteiston tehollisia arvoja kuvataan käsitteillä ominaisenergia ja leikkauskerroin. Ominaisenergia on se energiamäärä, joka tarvitaan yksikön suuruisen tilavuuden irrottamiseen. Leikkauskertoimella ymmärretään terässä vaikuttavien tangenttiaali- ja normaalivoimien suhdetta. Pyöritysnopeuden lisääminen myös nopeuttaa tunkeutuvuutta (kuva 44), mutta liian suuri pyöritysnopeus aiheuttaa laitteistossa vaurioita /3, 65/.



Kuva 44. Yhden kierroksen tunkeutumasta määräytyvän kokonais-tunkeutuvuuden riippuvuus pyöritysnopeudesta /4/.

5.5.4 Kivi- ja kalliolaatujen tutkiminen kokoprofiiliporausta varten

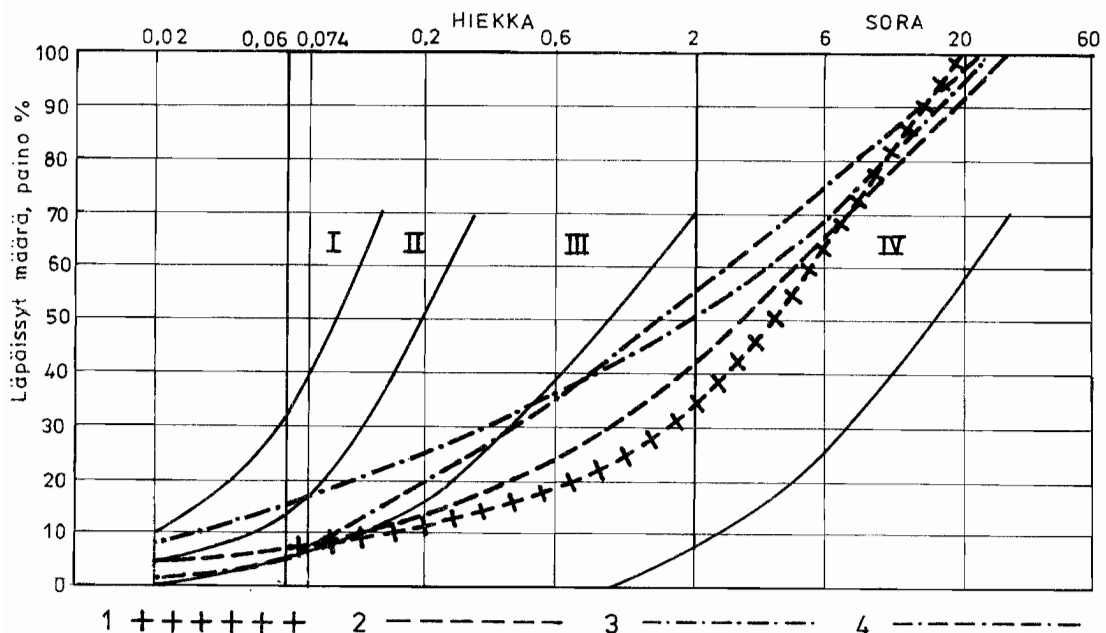
Kokoprofiiliporauslaitteilla saavutettavia porausnopeuksia on pyritty ennakoimaan laboratoriokokeilla. Kokeet jakautuvat tavallisten lujuusominaisuuksien määrittämisen lisäksi erikoiskokeisiin, jotka jäljittelevät poraustapahtumaa. Seuraavassa on luettelonomaisesti esitetty viitteessä /3/ mainittuja koemenettelyjä:

Morell ja Larson:	- Shore-kovuus - tiheys, kimmomoduli - puristus- ja vetomurtolujuus
Ross ja Hustrulid:	- puristusmurtolujuudella ei korrelaatiota - laboratorio-olosuhteissa tehtävät kiekkoteräkoheet
Tarkoy:	- kokonaiskovuus Schmidt'in iskuvasaralla ja kiven kulutusindeksin avulla
Handewith:	- tunkeutumisindeksi voima-tunkeutumisdiagrammista - kallion rakoilu otettava huomioon
Blindheim:	- kiven DRI-arvo - kallion rakoiluluokitus
Laitevalmistajat	
Robbins:	- puristusmurtolujuus - taivutuslujuus - kulutusindeksi - mikroskooppitutkimus: kvartsin määrä ja anisotropia
Jarva:	- puristusmurtolujuus - Tarkoy'n menetelmä Shoren iskuvasaralla - kulutusindeksi
Wirth:	- puristus- ja vetomurtolujuus - kuluttavat mineraalit
Demag:	- kiven lujuusominaisuudet - porauskoe laboratoriossa

5.5.5 Kokoprofiiliporauksessa syntyvän kivi- aineksen laatu

Kokoprofiiliporauksessa syntyvällä sepelimäisellä murskeella olisi esim. Helsingin olosuhteissa suuri taloudellinen arvo. Tässä yhteydessä on tutkittu Hanasaaren öljyvaraston kokoprofiilimenetelmällä (ks. kohta 5.4.2) tehdyn pystykuilun murskeen tärkeimpiä ominaisuuksia.

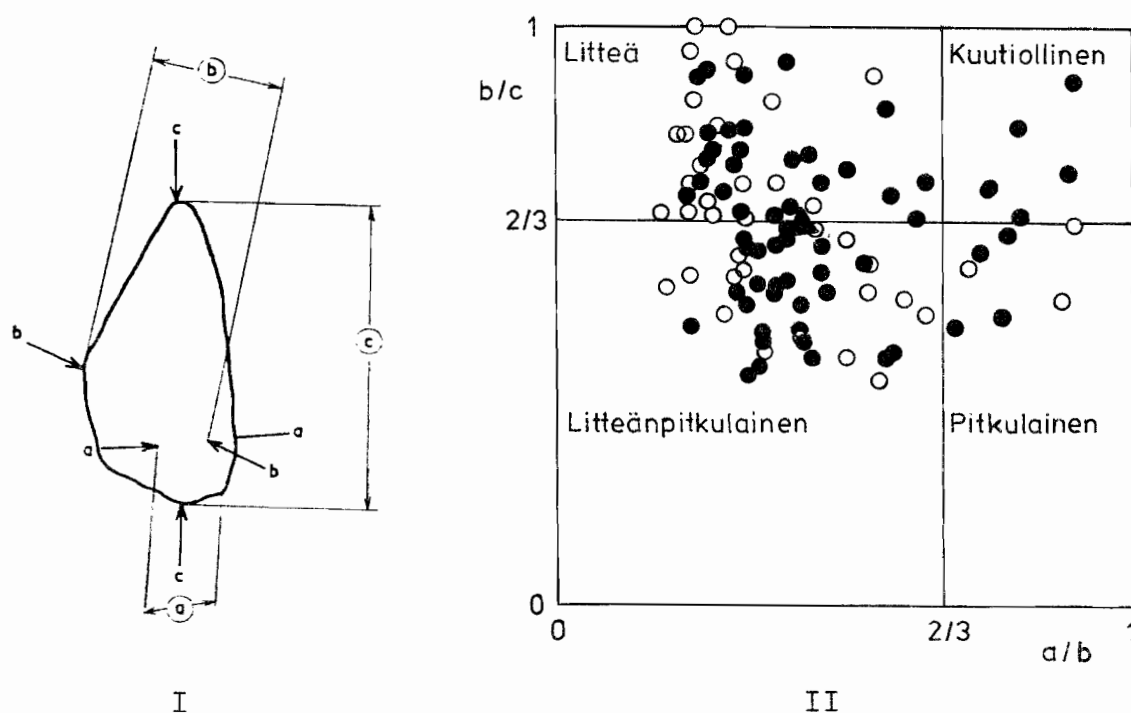
Kuvassa 45 on esitetty em. murskeen kuivaseulonnalla määritetty raekokojakauma. Samassa kuvassa on kirjallisuudesta saatuja kokoprofiiliporaussepelin rakeisuuskäyriä.



Kuva 45. Kokoprofiiliporauksessa syntyneen sepelin rakeisuuskäyriä: 1 kiillegneissi ja graniitti, Hanasaaren öljyvarasto, 2 - 4 vihreäliuske /3/. Vyöhykkeet I - IV ovat routimisvyöhykkeitä /58/.

Kuvan 45 mukaan murskeen sisältämä hienoaainemäärä ($\phi < 0,074$ mm) vaihtelee välillä 6 - 15 %. Rakeisuuskäyrät leikkaavat routimisvyöhykkeen IV ylärajan, joten kyseiset materiaalit voivat olla routivia. Myös kapillaarikokeen /46/ mukaan materiaali on routivaa. Vastaavanlaisia tuloksia on saatu myös muualla /3/.

Porauksessa syntyvän materiaalin muoto-ominaisuuksia on selvitetty Hanasaaren näytteestä seulotusta 8 - 16 mm:n sepeleistä. Kuvassa 46 on esitetty satunnaisesti valittujen 100 näytekappaleen muotoarvojen jakautuminen. Keskimääräinen raemuoto on litteämpitkulainen.



Kuva 46. Hanasaaren öljyvaraston pystykuilun murskeesta seulotun 8 - 16 mm:n sepelin muotoarvojen jakautuminen. I Rakeiden mittojen määrittäminen /46/. II Muotoarvojen jakautuma /72/ graniittisilla rakeilla (○) ja gneissirakeilla (●). ▲ on kaikkien rakeiden (100 kpl) muotoarvojen keskiarvo.

5.5.6 Kokoprofiiliporausmenetelmän edut ja haitat

Kokoprofiiliporausmenetelmän edut verrattuna poraus-räjäytysmenetelmällä tapahtuvaan tunnelinajoon ovat:

- haitallisia louhintatärinöitä ei ole, mikä mahdollistaa häiriöttömän tunnelirakentamisen asutuskeskuksissa
- kokoprofiiliporaus on nopea: nykyisillä laitteilla kovissakin kivissä on porausnopeus jopa 3 m/h
- lujitustarve on vähäistä, koska kallio ei rikkoudu ympäristöstä kuten tapahtuu räjäytyksen yhteydessä

- samasta syystä on tunnelin tiivistystarve vähäisempää ja tiivistäminen on myös helpommin suoritettavissa
- tunnelilla on kalliomekaanisesti edullinen, pyöreä muoto
- sileäpintaisuus mahdollistaa suuremmat virtausnopeudet vesi- ja viemäritunneleissa (kuva 47)
- tunnelista saadaan tasalaatuista mursketta.



Kuva 47. Valmis sileäpintainen kalliötunneli /32/.

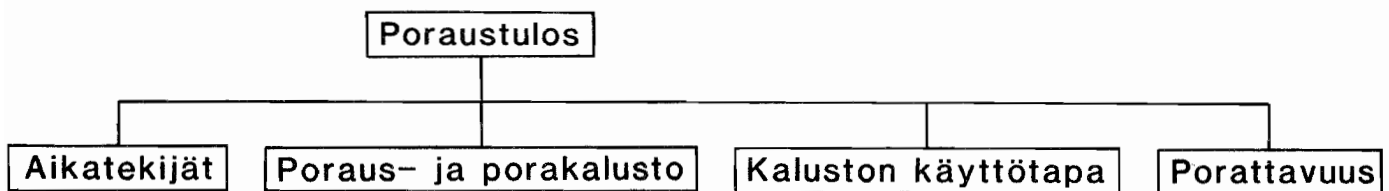
Vastaavasti haitat ovat seuraavat:

- korkeat laitekustannukset rajoittavat kokoprofiiliporausmenetelmän pitkiin ja suuriin tunnelirakennuskohteisiin
- korkeat teräkustannukset (puolet käyttökustannuksista)
- rakennusaikana on käytössä vain yksi tunnelin perä.

6. KIVILAJIEN PORATTAVUUS

6.1 Poraustulokseen vaikuttavat tekijät

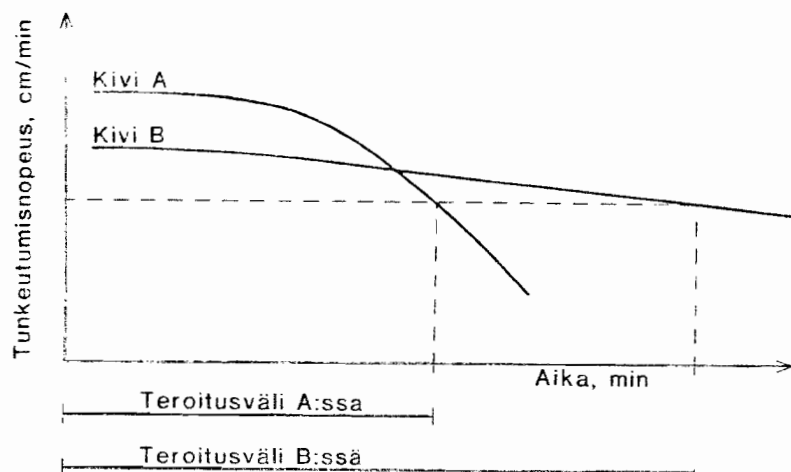
Porattavuus on materiaaliominaisuus. Porattavuus käsitteenä on erotettava käsitteestä poraustulos, jolla tarkoitetaan sitä, miten tehokkaasti tiettyyn kiveen tietyllä kalustolla saadaan porattua reikiä. Porattavuuden ohella muita poraustulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat kalusto, sen käyttötapa ja aikatekijät (kuva 48). Aikatekijöitä ovat esim. terien vaihtoon käytetty aika.



Kuva 48. Poraustulokseen vaikuttavat tekijät.

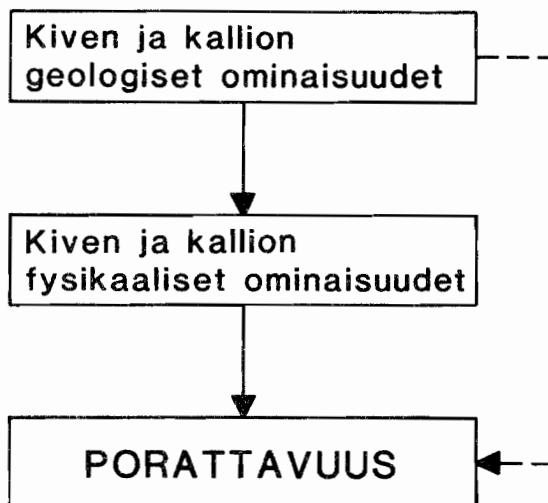
6.2 Porattavuus

Porattavuudella tarkoitetaan niitä kivilaji- ja kallioperäominaisuuksia, jotka vaikuttavat poranterän tunkeutumiseen ja kulumiseen /71/. Määritelmän havainnollistamiseksi on kuvassa 49 esitetty kahden erilaisen kiven vaikutus porattavuuteen.



Kuva 49. Tunkeutumisnopeuden muuttuminen terää eri tavalla kuluttavissa kivilajeissa

Porattavuudella voidaan ymmärtää kiven kykyä vastustaa poranterän murskausvaikutusta sekä kykyä kuluttaa terää. Porattavuuteen vaikuttavat kiven ja kallion fysikaaliset ominaisuudet. Ne ovat puolestaan johdettavissa niistä geologisista tekijöistä ja olosuhteista, joissa kivimateriaali on muodostunut (kuva 50).



Kuva 50. Porattavuuteen vaikuttavat kiven ja kallion ominaisuudet.

Porattavuuteen vaikuttavat materiaaliominaisuudet voidaan jakaa kivi- ja kalliomittakaavaisiin tekijöihin. Kallion mittakaavassa vaikuttavat rakoilu, ruhjeet, kalliovesi ym. tekijät. Tässä tutkimuksessa on porattavuutta käsitelty pääasiassa kivimittakaavassa.

Kivimateriaalin porattavuusominaisuuksia voidaan tutkia

- suorilla in-situ kokeilla poraamalla louhintakalustolla tai kokoprofiililaitteella
- epäsuorasti määrittelemällä kiven ja kallion fysikaalisia perusominaisuuksia kiviläytteenä ja tekemällä niiden pohjalta kokemusperäisiä johtopäätöksiä
- osittain suoraan ja osittain epäsuorasti määrittelemällä porattavuus laboratoriossa sovelletuilla kokeilla, jotka jäljittelevät poraustapahtumia.

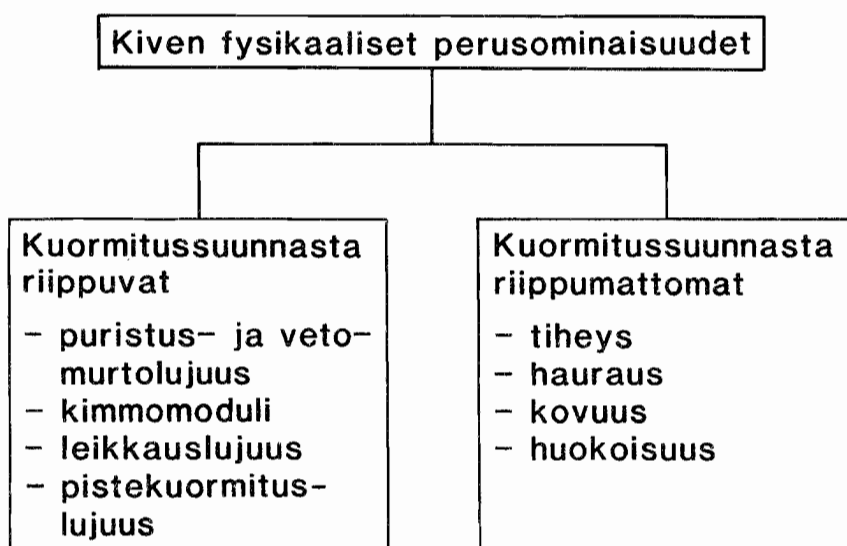
Suorat kentällä tapahtuvat porauskokeet antavat kaikkein parhaimman tuloksen, mutta niiden toteuttaminen ei yleensä ole kustannussyistä mahdollista. Jäljelle jäävät siis epäsuorat porattavuuden määritysmenetelmät.

Porattavuuden määrittämiseksi ISRM (International Society for Rock Mechanics) /41/ on suositellut joukon menetelmiä geologisen materiaalin kovuuden ja kulutuskestävyyden määrittämiseksi. ISRM:n esittämät menetelmät kattavat kaiken kivimateriaalin eikä niillä saada riittävästi esiin kovien kivien kovuseroja. Lisänä ISRM onkin suositellut käytettäväksi olosuhteisiin soveltuvia lisämenetelmiä.

6.3 Porattavuuteen vaikuttavat fysikaaliset perusominaisuudet

6.3.1 Kiven fysikaaliset perusominaisuudet

Fysikaalisilla perusominaisuuksilla tarkoitetaan tässä yhteydessä kiven tavallisimpia kalliomekaanisia arvoja. Ne jakautuvat kuvan 51 mukaan.

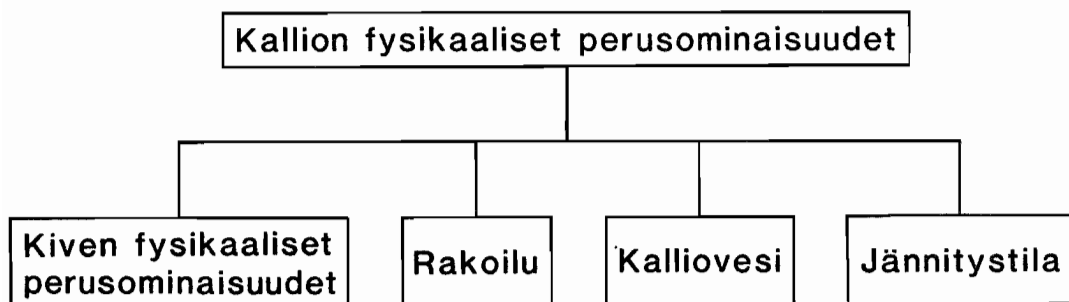


Kuva 51. Kiven fysikaaliset perusominaisuudet.

Kiven fysikaalisia perusominaisuuksia käytetään mm. kivi- ja kalliomateriaalin kuvaamiseen kalliomekaanikassa stabiiliteettilaskelmissa. Puristumurtolujuutta on usein käytetty porattavuuden standardina, varsinkin kokoprofiili-porauksessa /71/. Näillä arvoilla ei kuitenkaan pystytä täsmällisesti määrittämään kiven porattavuutta.

6.3.2 Kallion fysikaaliset perusominaisuudet

Porattavuuteen vaikuttavat kallion fysikaaliset perusominaisuudet voidaan jakaa kuvan 52 mukaisesti.



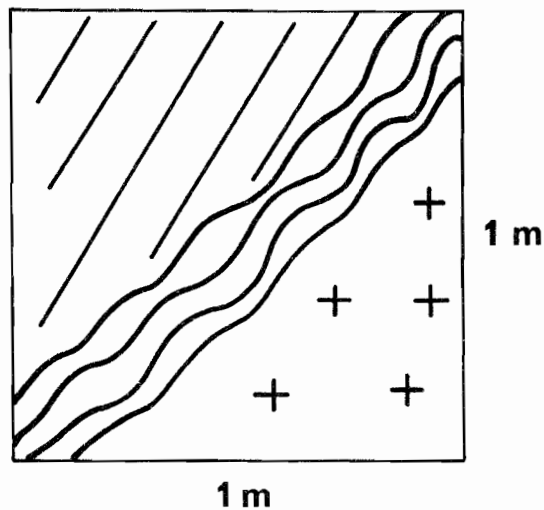
Kuva 52. Kallion fysikaaliset perusominaisuudet.

Rakoilu on kivimateriaalin ominaisuuksien lisäksi tärkein kallion porattavuuteen vaikuttava ominaisuus. Rakoilu yleensä vaikeuttaa porausta. Porattaessa vinosti rakoiluun nähden on porakruunulla taipumus kääntyä rakoilun vaikutuksesta, jolloin seurauksena voi olla terän ja tangon kiinni juuttuminen. Toisaalta porattaessa kohtisuoraan rakoilua vastaan voi tunkeutumismnopeus olla suurempi kuin ehjässä kivessä. Rakotiheys ja -suunta vaikuttavat myös kokoprofiiliporaukseen (vrt. kohta 5.5.3).

6.4 Porattavuuteen vaikuttavat geologiset ominaisuudet

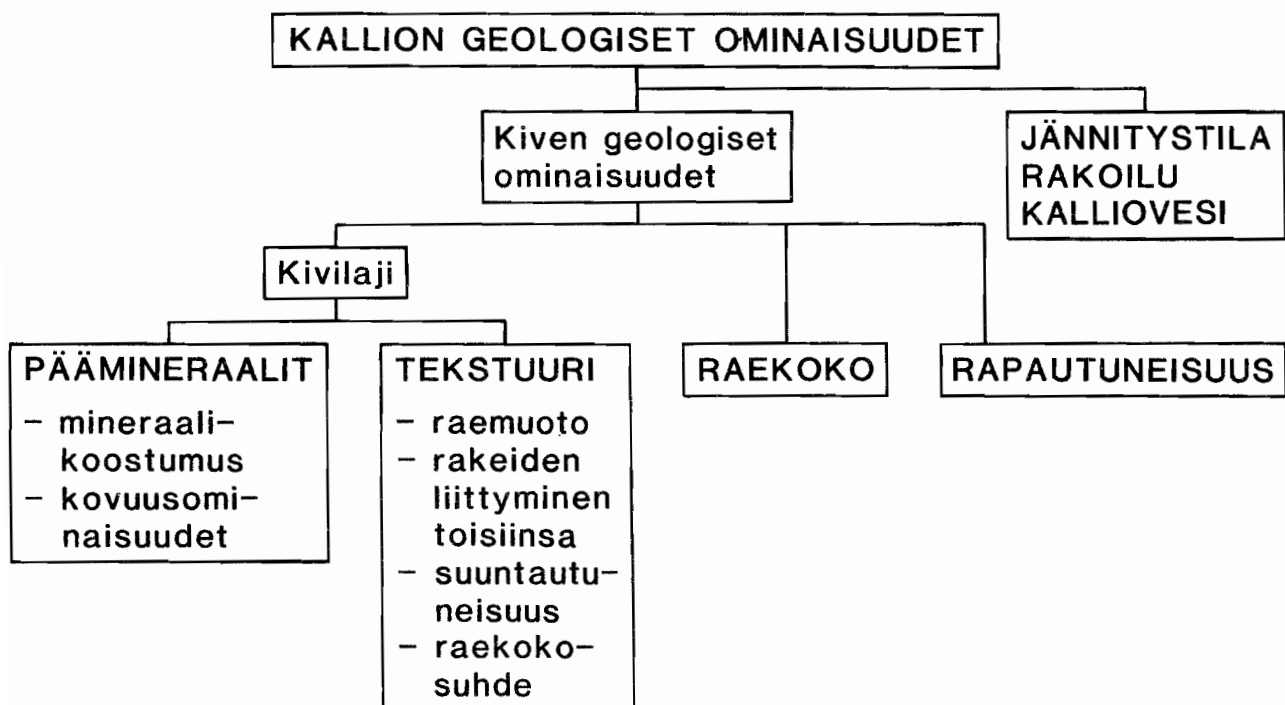
6.4.1 Geologisen materiaalin tutkiminen porattavuuden kannalta

Geologisten ominaisuuksien tutkiminen ja tunteminen on välttämätöntä määrittettäessä porattavuutta pienistä laboratorio-mittakaavaisista kiviläytteistä. Alueen tai paikan geologiset olosuhteet määräävät sen, miten monta eri koetta on tehtävä porattavuuden määrittämiseksi. Näytteiden edustavuuteen on täten kiinnitettävä erityistä huomiota. Esimerkiksi kuvan 53 tilanne on tyypillinen Helsingin alueella.



Kuva 53. Tyypillinen kivilajiolosuhteiden muuttumisen mittakaava Helsingissä.

Kallion porattavuuden kannalta tärkeisiin fysikaalisiin suureisiin vaikuttavat geologiset ominaisuudet on jaettu kuvan 54 mukaisesti.



Kuva 54. Kallion porattavuuden kannalta tärkeisiin fysikaalisiin tekijöihin vaikuttavat geologiset ominaisuudet.

6.4.2 Kiven geologiset ominaisuudet

Kiven porattavuuden kannalta tärkeisiin fysikaalisiin suu-
reisiin vaikuttavat geologiset ominaisuudet jakautuivat
kuvan 54 mukaisesti. Mineraalikoostumus ja tekstuuri- eli
mikroskooppinen rakenne määräävät kivilajinimen. Raekoko
ja rapautuneisuus eli mineraalien muuttuneisuus ovat kivi-
lajin kannalta toisarvoisia. Porattavuuden kannalta ne
ovat kuitenkin tärkeitä tekijöitä.

Päämineraalit määräävät pääosiltaan kiven kovuus- ja hauraus-
ominaisuudet. Poranterän kuluminen on suoraan verrannollinen
porattavan kiven mineraalikovuuksiin. Mm. Helsingin alueen
kivilajien yleisimpien mineraalien kovuusominaisuuksia on
esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kivilajien yleisimpien mineraalien kovuusomi-
naisuuksia. Rosiwalin hiontakovuudet on saatu
viitteestä /59/.

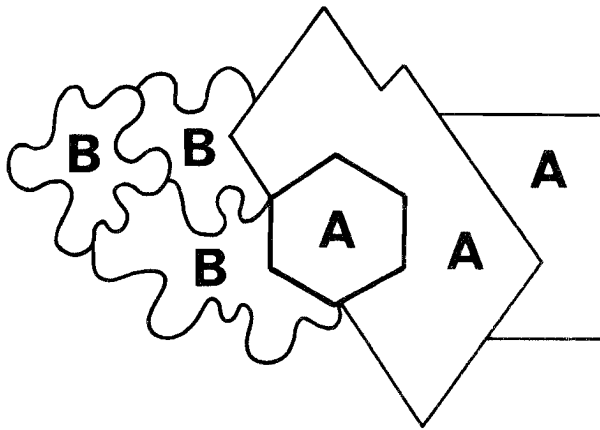
Mineraali	Esiintyminen Hgin kivila- jeissa, %		Mohsin naarmutus- kovuus	Rosiwalin hionta- kovuus
	vaaleat	tummat		
Kvartsi	20-50	0-30	7	120
Plagioklaasi	20-55	10-50	6	37
Kalimaasälpä	0-60	0-10	6	37
Kiilteet	0-10	0-30	2-2,5	1-3
Sarvivälke	0-5	0-60	5-6	6,5-37
Kalsiitti	kalkkikivi		3	4,5

Porattavuuteen vaikuttavat yksittäisten mineraalien lohkea-
misominaisuudet. Porauksen kannalta hankalia ovat sitkeät
mineraalit, kuten esim. amfibolit ja kiilteet sekä kuituiset
mineraalit kuten asbesti. Joidenkin mineraalien etevä loh-
keaminen (maasälvät, kalsiitti) helpottaa osaltaan porauk-
sessa syntyvien rakojen ja murtumien muodostumista.

Tekstuuri kuvaa mineraalien keskinäistä suhdetta. Porattavuuden kannalta tärkeitä rakenneominaisuuksia ovat:

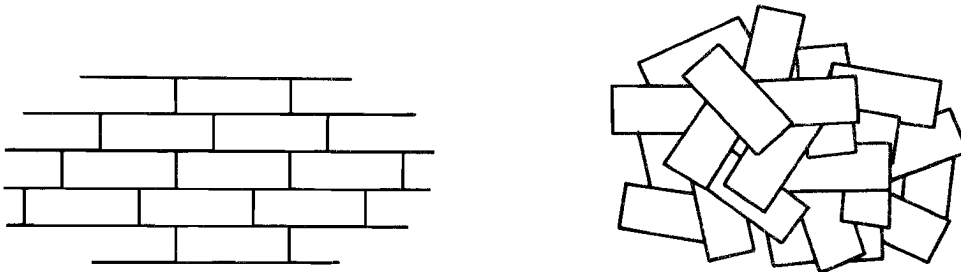
- raemuoto
- rakeiden liittymistapa
- suuntautuneisuus
- raekokosuhde.

Mineraalikiteiden muoto antaa jo osittain kuvan siitä, miten rakeet ovat liittyneet toisiinsa. Raemuodoltaan omamuotoiset mineraalikiteet ovat yleensä heikommin sitoutuneet ympäristöönsä kuin epämääräisen muotoiset rakeet (kuva 55).



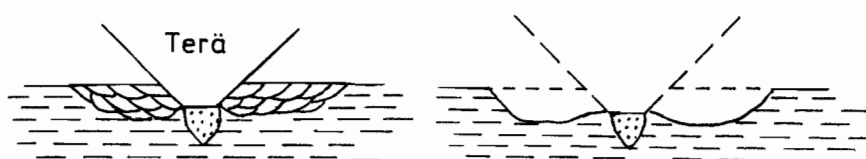
Kuva 55. Mineraalikiteiden muodon vaikutus niiden keskinäiseen sitoutumiseen. A on omamuotoiset rakeet, B on täysin vierasmuotoiset rakeet.

Mineraalien muodostaman rakenteen lujuutta ei välttämättä aina voida päätellä kiteiden omamuotoisuuden perusteella, vaan on myös huomioitava tapa, jolla rakeet liittyvät toisiinsa (kuva 56).

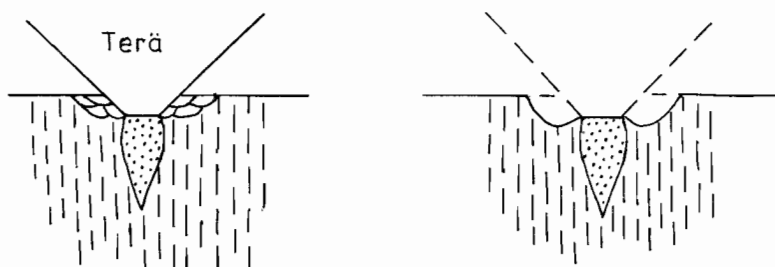


Kuva 56. Omamuotoisuudeltaan samanlaisista kiteistä muodostuneet kaksi eri lujuuden omaavaa rakennetta.

Kivilajin suuntautuneisuus eli liuskeisuus vaikuttaa porattavuuteen sitä enemmän, mitä voimakkaampi se on. Porauskulma on määräävä tekijä. Porattaessa kohtisuoraan liuskeisuutta vastaan tunkeutumisenopeus on suurempi kuin liuskeisuuden suunnassa. Kuvassa 57 on esitetty liioitellussa muodossa voimakkaasti liuskeisen kiven vaikutus kraaterin syntymiseen iskuporauksessa (vrt. kuva 19). Liuskeisuuden vaikutusta kokoprofiiliporaukseen on käsitelty kohdassa 5.4.3.



a. Kohtisuoraan liuskeisuutta vastaan

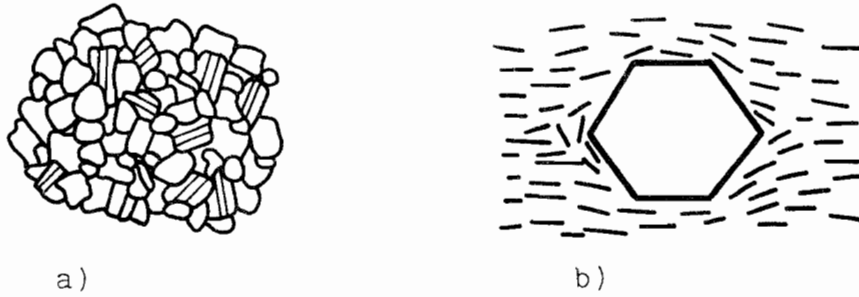


b. Liuskeisuuden suunnassa

Kuva 57. Voimakkaan liuskeisuuden vaikutus kraaterin muodostumiseen iskuporauksessa.

Porattaessa vinossa kulmassa liuskeisuuden suuntaan nähden on porakruunulla taipumus kääntyä joko liuskeisuuden suuntaiseksi tai kohtisuoraan sitä vastaan. Hyvin liuskeisissa kivissä (esim. fylliitti) voi tämä vääntyminen johtaa terän ja tangon kiinni juuttumiseen.

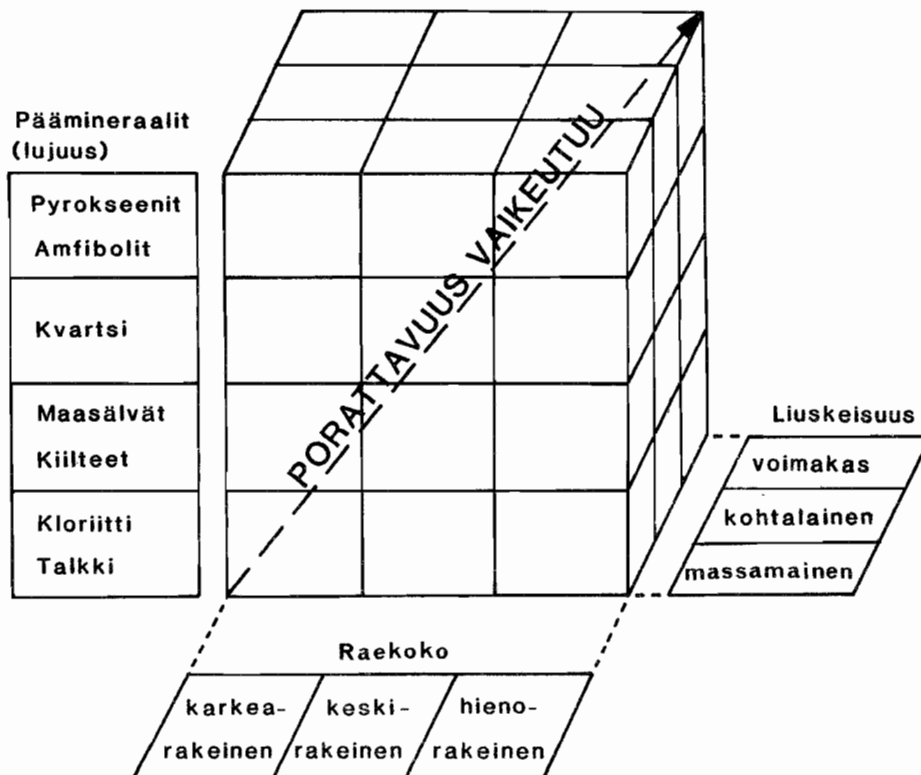
Raekokosuhteella tarkoitetaan tässä yhteydessä kivilajin mineraalien raekokojakaumaa. Jos kyseinen suhde on pieni, vastaa se rakenteeltaan tasarakeista kiveä. Suuri raekokosuhte on esim. porfyirisillä ja porfyroblastisilla kivilajeilla (kuva 58).



Kuva 58. a) on tasarakeinen ja b) on porfyryrinen tai porfyroblastinen kivilaji.

Raekoolla on oleellinen vaikutus porattavuuteen. Raekoon kasvaessa myös tunkeutumismisnopeus kasvaa. Raekoon vaikutus terän kulumiseen ei ole yhtä selvä. Esimerkiksi kvartsin aiheuttaman kulumisen suuruus ei välttämättä ole verrannollinen raekokoon, vaan lähinnä sen esiintymistapaan - raemuotoon. Terän kulumisen on suurimmillaan kvartsin esiintyessä hienorakeisina kiteinä tai karkeampina epämääräisen muotoisina rakeina.

Yhteenvedo mineraalikoostumuksen, raekoon ja liuskeisuuden vaikutuksesta kiven porattavuuteen on esitetty kuvassa 59.



Kuva 59. Mineraalikoostumuksen, raekoon ja liuskeisuuden vaikutus kiven porattavuuteen. Kuva sovellettu viitteestä /35/. Geotekninen osasto julkaisu 34

6.4.3 Kallion geologiset ominaisuudet

Kiven geologisten ominaisuuksien lisäksi porattavuuteen vaikuttavat jännitystila, rakoilu ja kalliovesi, jotka ovat rinnastettavissa kallion fysikaalisiin ominaisuuksiin (vrt. kuva 54). Tässä yhteydessä ei käsitellä yksityiskohtaisemmin näiden tekijöiden vaikutusta.

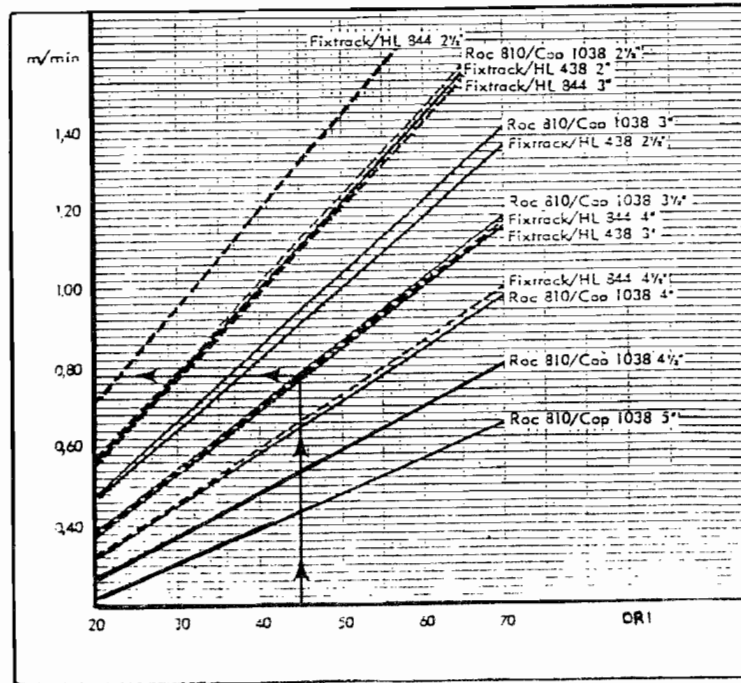
6.5 Porattavuuden määrittäminen sovelletuilla fysikaalisilla menetelmillä

Pelkästään kiven kalliomekaanisiin perusominaisuuksiin pohjautuvilla porattavuusarvioilla ei ole saatu riittävän täsmällisiä ja yksiselitteisiä tuloksia. Huomattavasti parempia tuloksia on saatu kokeilla, joissa jäljitellään poraustapahumaa. Seuraavassa on lueteltu viitteessä /49/ mainittuja menetelmiä, jotka on kehitetty lähinnä iskuporauksen arvioimista varten. Sovellettuja laboratoriomittakaavaisia tutkimusmenetelmiä ovat

Carcia:	pudotuskokeessa syntyvän kraaterin tilavuuteen perustuva porattavuusindeksi
Hartman:	edellisen kaltaiseen pudotuskokeeseen perustuva teoria porattavuudesta
Protodiakonov:	pudotus-murskauskokeella määritettyyn lujuuslukuun perustuvat porattavuusarviot sekä menetelmään myöhemmin tehdyt täsmennykset
White:	laboratorioporakoneella määritetty porattavuusindeksi
Selmer-Olsen:	kiven haurausarvoon ja porauskokeeseen perustuva porausnopeusindeksi DRI sekä kuluttavuuskokeeseen perustuva kulumisindeksi BWI
Wijk /69/:	tappikuormituskokeeseen perustuva poran tunkeutumisnopeuden määrittäminen.

Laajin kirjallisuusaineisto on edellämainituista kokeista norjalaisen Selmer-Olsenin kehittämällä porausnopeusindeksillä. Norjan teknillisen korkeakoulun tekemissä tutkimuksissa /53/ on kerätty suuri joukko eri kivilajien DRI-arvoja sekä näissä

todetuista tunkeutumismennoista eri iskuporauskalustoille ja kokoprofiiliporauslaitteilla. Kuvassa 60 on esitetty esimerkki norjalaisten käyttämästä menetelmästä arvioida tunkeutumismennojen eri pora- ja porauskalustoille kiven DRI-arvon perusteella.



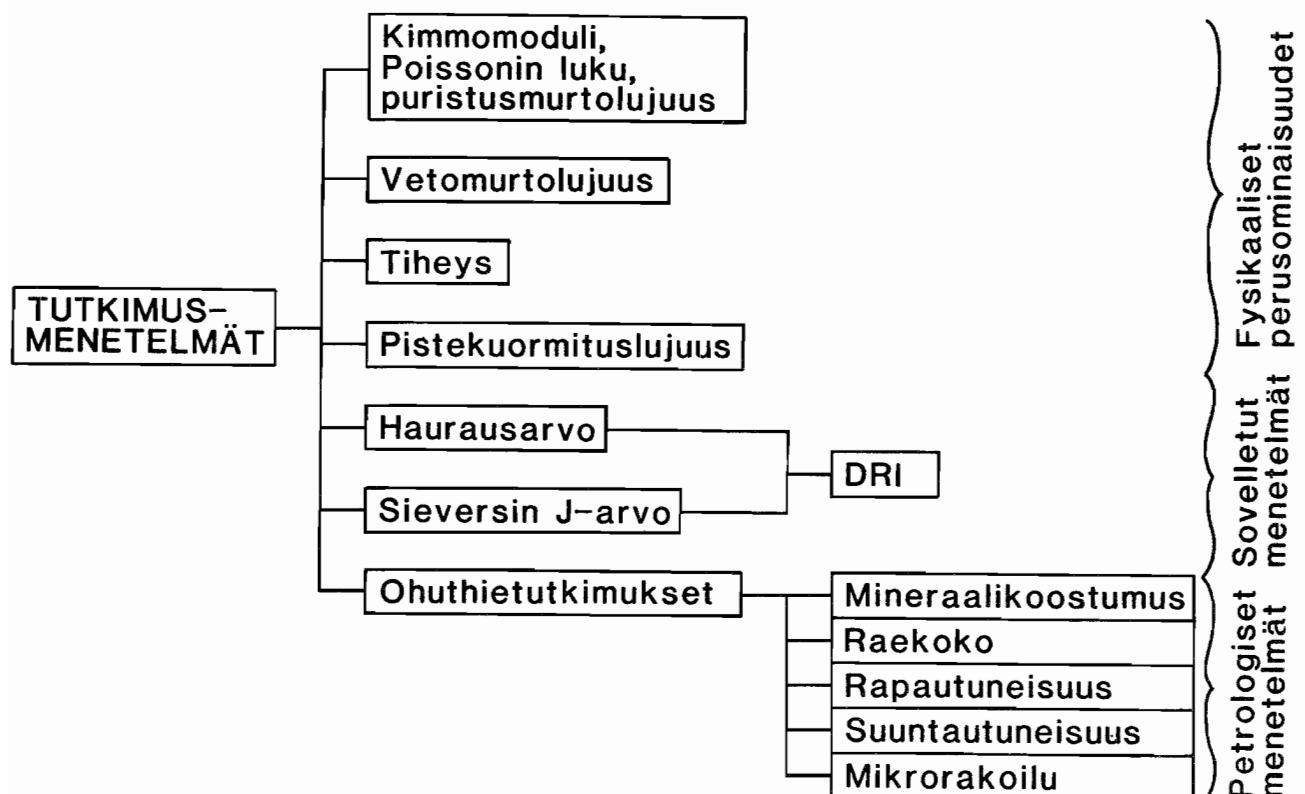
Kuva 60. Tunkeutumismennojen määrittäminen tunnetulle pora- ja porauskalustolle kiven DRI-arvon avulla. Arvot on saatu toisen tangon tunkeutumalle. Käytetty terä on nastakruunu /53/.

7. TUTKIMUSMENETELMÄT

7.1 Tutkimusmenetelmien ja -materiaalin valinta

Tutkimuksessa päädyttiin määrittämään edustavista näytepisteistä kivilajin petrologisten ja fysikaalisten perusominaisuuksien lisäksi kiven porausnopeusindeksi, DRI (kuva 61). Porausnopeusindeksin määrittämisen eduiksi muihin vastaaviin kokeisiin verrattuna voitiin katsoa:

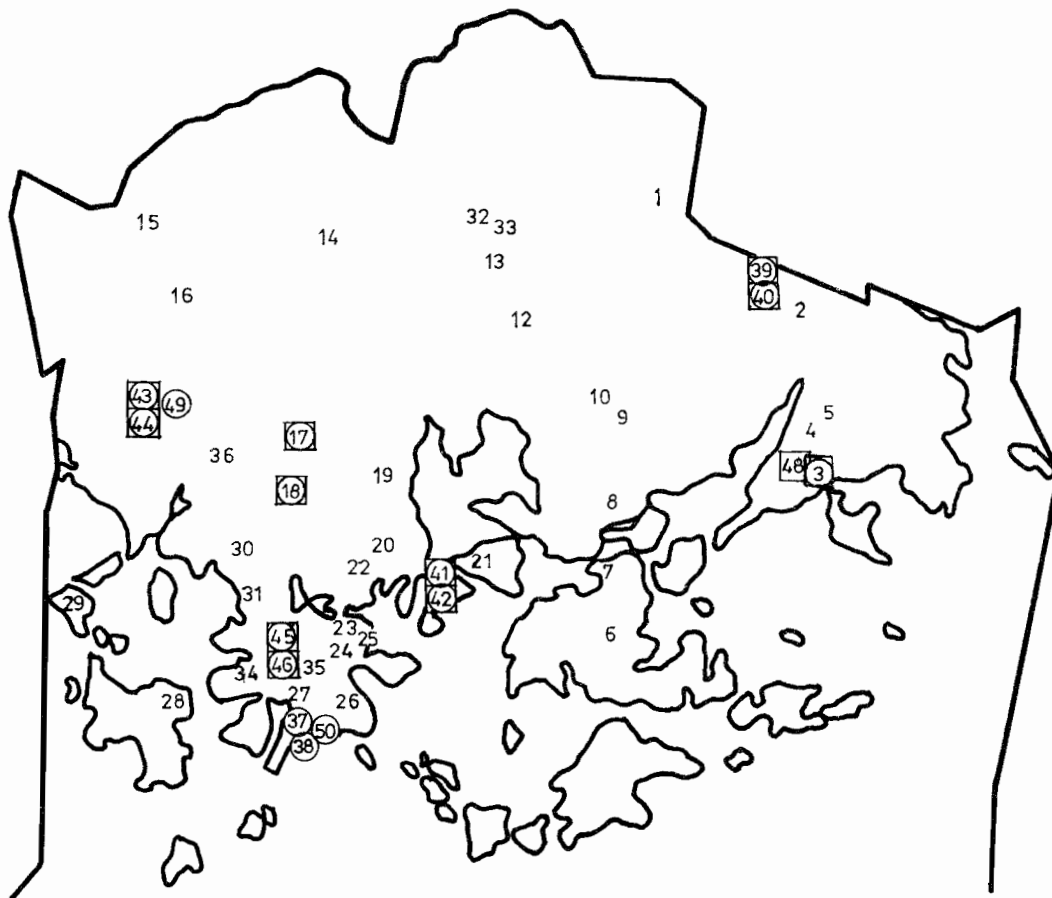
- käytettävissä oleva laaja kirjallisuusaineisto, jossa on runsaasti DRI:n määrittämiä myös kovista kivistä
- menetelmän soveltuvuus porattavuuden määrittämiseen sekä iskuporauksessa että kokoprofiiliporauksessa
- mahdollisuus tehdä määrittäykset Teknillisen korkeakoulun vuoriteollisuusosaston louhintatekniikan laboratoriossa.



Kuva 61. Tutkimusmenetelmät.

Tutkimusalueen vaihtelevien kivilajisuhteiden vuoksi oli koemateriaalin valinta keskitettävä pääkivilajityyppeihin. Helsingin alueen pääkivilajit ovat graniitti, kiillegneissi ja amfiboliitti, jotka kaikki ovat migmatiittisia eli seoksia.

Kairattuja kallionäytepisteitä on Helsingin alueella runsaasti. Tämän tutkimuksen vaatimuksia (riittävän ehjä, rapautumaton, pääkivilaji...) vastaavia kairauspisteitä on rajoitetusti. Kallionäytteistä otettujen valokuvien perusteella valittiin 12 näytteenottopistettä. Lisäksi otettiin kolme lohkenäytettä, joista kairattiin sydännäytteet koikeita varten. Näytteenottopisteet jakautuivat Helsingin alueella kuvan 62 mukaisesti.



Kuva 62. Näytteenottopisteet, joista tehtiin ohuthietutkimukset (numero) ja joista määritettiin kalliomekaaniset perusominaisuudet (○) ja DRI-arvot (□).

Viidestä paikasta (Kamppi, Munkkisaari, Mustikkamaa, Pohjois-Mellunmäki ja Tali) valittiin kaksi näytepistettä. Tutkimalla kivilajin ominaisuuksia samalta alueelta otetuista kahdesta eri näytteestä voitiin selvittää kyseisen kivilajin ominaisuuksien yhdenmukaisuutta. Tutkimuksissa käytetyn materiaalin näytteenottopaikat, kivilajit sekä kalliolaadut rakennusgeologisen kallioluokituksen /37/ mukaan on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Näytteenottopaikkojen kalliolaatu rakennusgeologisen kallioluokituksen /37/ mukaan.

Näyte no	Paikka	Kivilaji	Kalliolaatu näytteenotto-paikassa
37	Munkkisaari	sv-kgn	Li 2/h,s
38	"	sv-kgn	Li 2/h,s
50	"	grdr	Ma 2/h
39	Pohjois-Mellunmäki	sgn	Se 2/h
40	"	sgn	Se 2/h
41	Mustikkamaa	kgn	Li 3/h,s
42	"	sv-kgn	Li 2/s
43	Tali	amf	Li 2/h,s
44	"	amf	Li 2/h,s
49	"	gr	Ma 3/h
45	Kamppi	gr	Ma 3/h
46	"	gr	Ma 2/h
47	Viikki	gr	Ma 2/h
17	Pasila	gr	Ma 1/h
18	Länsi-Pasila	gr	Ma 3/h
3	Vuosaari	amf	Li 2/h
48	"	tuff	Li 2/k,h

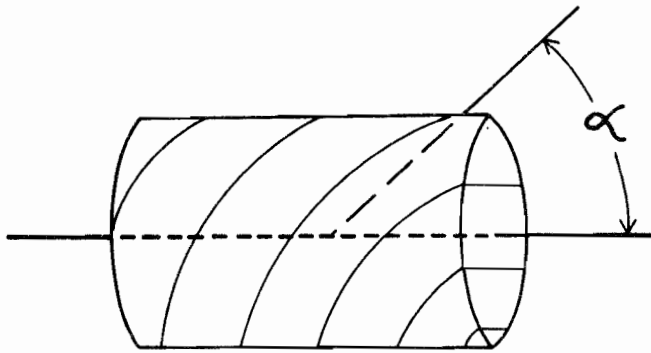
Koetulosten laskemisessa käytetyt kaavat on saatu viitteistä /37, 46/ ja Teknillisen korkeakoulun vuoriteollisuusosaston louhintatekniikan laboratorion tutkimusmonisteista.

Kairasydännäytteiden lisäksi otettiin muita kivilajinäytteitä Helsingin alueelta yhteensä 33 eri pisteestä. Näytteistä tehdyillä ohuthietutkimuksilla selvitettiin Helsingin alueen kallioperän mineralogialla sekä edellämainittujen koepisteiden kivilajien edustavuutta. Kaikkien näytteenottopisteiden tarkempi sijainti ilmenee näytteenotustulosten liitte 6).

7.2 Kimmomoduli, Poissonin luku ja puristusmurtolujuus

Kimmomodulin, Poissonin luvun ja puristusmurtolujuuden määrittämiseksi näytteet valmistettiin ISRM:n ohjeiden /37/ mukaisesti seuraavin poikkeuksin. Määritykset tehtiin Ø 32 mm:n kairaussydännäytteille ja kustakin näytteenotto-pisteestä tehtiin kolme koekappaletta.

Näytteistä huomioitiin mahdollinen liuskeisuus (kuva 63) sekä murtuminen kokeessa mikrorakoa pitkin.



Kuva 63. Liuskeisuuden kulman määrittäminen puristusnäytteestä.

Määritykset tehtiin TKK:n louhintatekniikan laboratorion puristinlaitteistolla. Kimmomoduli määritettiin ns. sekanttimodulina piirturin käyrältä. Kimmomodulin arvo laskettiin kaavasta:

$$E = \frac{4 \cdot \Delta F \cdot (l_0 - 0,009)}{\pi \cdot \Delta l \cdot d_0^2} \quad (1)$$

missä: E on kimmomoduli, GPa
 ΔF " voiman lisäys, N
 l_0 " koekappaleen alkuperäinen pituus, m
 Δl " koekappaleen pituuden lyhenemä F:n alueella, m
 d_0 " koekappaleen alkuperäinen läpimitta, m

Kaavan (1) tekijä 0,009 johtuu lyhenemäanturien telineen paksuudesta. Näytteen efektiivinen pituus on siis 9 mm lyhyempi kuin sen kokonaispituus.

Poissonin luku laskettiin kaavasta:

$$\gamma = \frac{\Delta d(l_0 - 0,009)}{d_0 \cdot \Delta l} \quad (2)$$

missä: γ on Poissonin luku

Δd " koekappaleen paksunema ΔF :n alueella, m

Δl " koekappaleen lyhenemä ΔF :n alueella, m

l_0 " koekappaleen alkuperäinen pituus, m

d_0 " koekappaleen alkuperäinen läpimitta, m

Yksiaksiaalinen puristusmurtolujuus laskettiin kaavasta:

$$\sigma_{pm} = \frac{4F}{\pi d_0^2} \quad (3)$$

missä: σ_{pm} on puristusmurtolujuus, MPa

F " koekappaleen murtokuormitus, N

d_0 " koekappaleen halkaisija, m

7.3 Vetomurtolujuus

Vetomurtolujuus määritettiin epäsuorasti viivakuormituslujuutena ns. Brasilian kokeella ISRM:n suositusten /37/ mukaisesti. Tulokset määritettiin kolmen kokeen keskiarvona. Liuskeisuuden ja rakoilun suunnat määritettiin poikkeamina koekappaleen pituusakselista (ks. kuva 63). Vetomurtolujuus laskettiin kaavasta:

$$\sigma_{vm} = \frac{2F}{\pi d_0 l_0} \quad (4)$$

missä: σ_{vm} on vetomurtolujuus, MPa

F " koekappaleen murtokuormitus, N

d_0 " koekappaleen halkaisija, m

l_0 " koekappaleen pituus, m

7.4 Tiheys

Tiheys määritettiin Brasilian kokeissa käytetyistä näytteistä kolmen koekappaleen tulosten keskiarvona. Näytteiden tiheydet laskettiin kaavasta:

$$\gamma_s = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \gamma_{H_2O} \quad (5)$$

missä: γ_s on näytteen tiheys, kg/m^3
 m_1 " näytteen paino ilmassa, kg
 m_2 " näytteen paino vedessä, kg
 γ_{H_2O} " veden tiheys määrittelylämpötilassa, kg/m^3

Käytetyllä menetelmällä määritetään kiven näennäistiheys, joka poikkeaa kiven todellisesta tiheydestä sen huokoisuudesta riippuen.

7.5 Pistekuormituslujuus

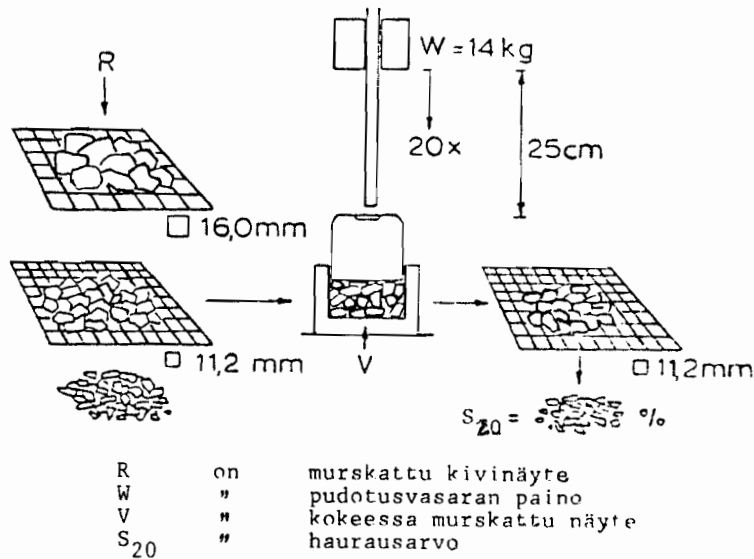
Osalle näytteistä tehtiin myös pistekuormituskoe. Koe valittiin erääksi tutkimusmenetelmäksi tutkimuksen kuluessa, jolloin kaikista näytepaikoista ei enää ollut käytettävissä valmiiksi kairattua näytemateriaalia. Määritykset tehtiin ISRM:n suositusten /37/ mukaan. Pistekuormitusindeksi laskettiin kaavasta:

$$I_s = \frac{F \cdot A}{d_o^2} \quad (6)$$

missä: I_s on pistekuormitusindeksi, MPa
 F " kuormituspaine murtohetkellä, MPa
 A " puristussyylinterin männän pinta-ala,
 $13,335 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
 d_o " koekappaleen halkaisija, m

7.6 Haurausarvo

Haurausarvon määrittäminen suoritettiin menetelmällä, joka perustuu kiven ns. ruotsalaiseen haurausarvoon. Norjalaiset ovat hieman muuttaneet menettelytapaa /53/. Haurausarvo kuvaa kivilajin iskunkestävyyttä toistuvassa pudotuskokeessa. Koejärjestely on esitetty kuvassa 64. Haurausarvot määritettiin 2 - 3 kokeen keskiarvona.



Kuva 64. Haurausrarvon määrittäminen /53/.

Haurausrarvokoeita varten punnittiin seulottua fraktiota määrä, joka saatiin kaavasta /53/:

$$M = 500 \frac{\gamma_N}{\gamma_k} \text{ (g)} \quad (7)$$

missä: M on yhdessä kokeessa tarvittava näytemäärä, g

γ_N " näytekivilajin tiheys, kg/m³

γ_k " kivilajien keskimääräinen tiheys, $2,66 \cdot 10^3$ kg/m³

Tämän toimenpiteen tarkoituksena oli pitää näytetilavuus samana kivilajista riippumatta. Haurausrarvo laskettiin kaavasta /53/:

$$S_{20} = \frac{M_L}{M} \cdot 100 \quad (8)$$

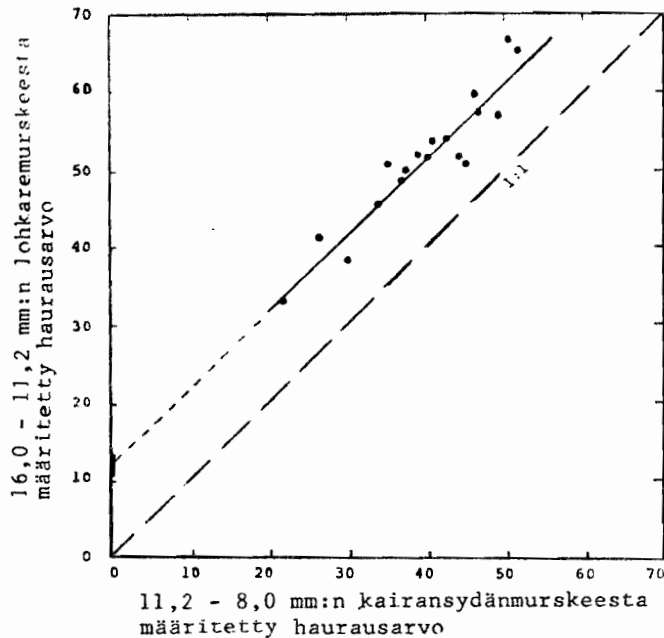
missä: S₂₀ on haurausrarvo

M_L " seulan läpäissyt materiaali, g

M " alkuperäinen näytemäärä, g

Norjalaisten /3, 53/ mukaan pitää kairasydämällä 8,0 - 11,2 mm fraktiosta tehtyyn S₂₀-arvoon lisätä 11 - 13 yksikköä, jotta ne vastaisivat lohkarista tehtyjä S₂₀-arvoja (kuva 65). Sama on todettu TKK:n vuoriosaston louhintatekniikan laboratorion tutkimuksissa. Tästä syystä on päädytty seuraavalaisiin korjauksiin:

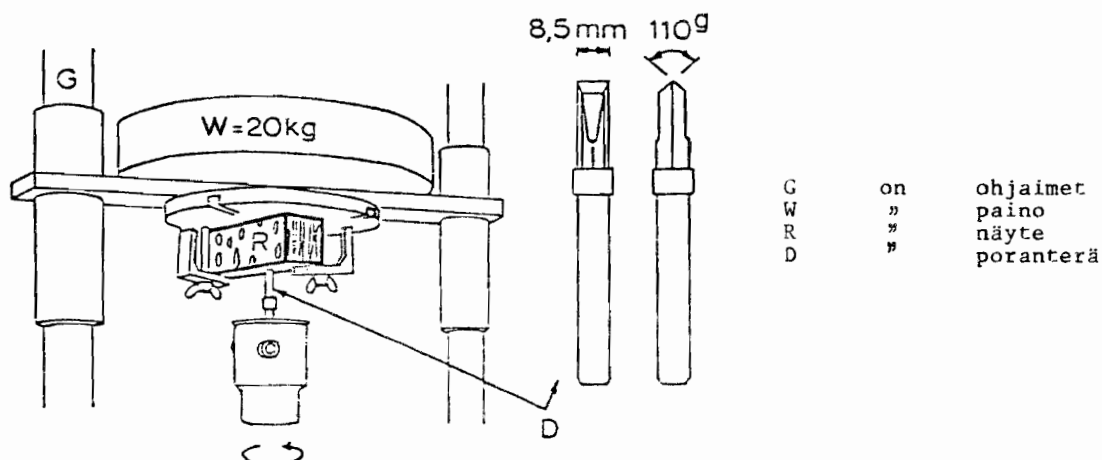
- karkearakeisille, graniittisille kiville 13 yksikköä
- keskirakeisille, graniittisille kiville 12 yksikköä
- keskirakeisille, tummille kiville (kiillegneissi ja amfiboliitti) 11 yksikköä.



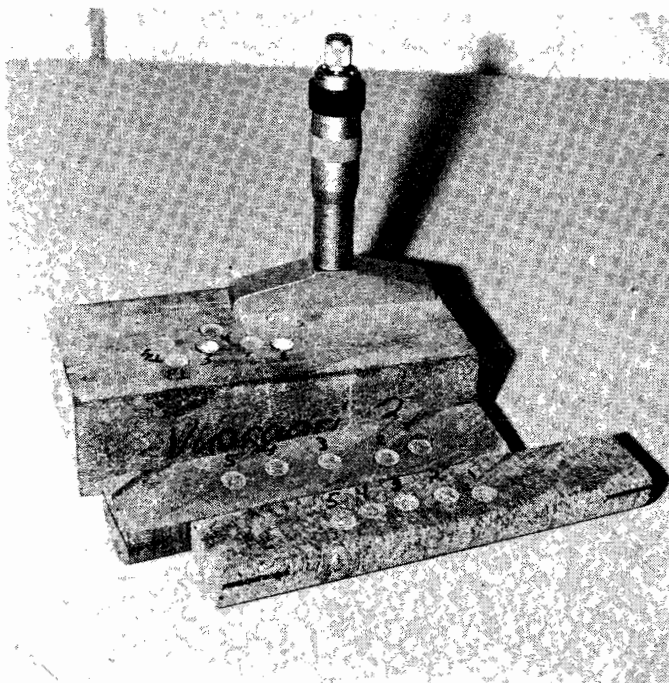
Kuva 65. Kairasydännäytteistä määritetyn S_{20} -arvon korjaus /3/.

7.7 Sieversin J-arvo

Sieversin J-arvo on pienen laboratorioporanterän 200 kierroksen jälkeinen tunkeutuma kiviinäytteeseen ja sitä käytetään määrittettäessä näytteen DRI-arvo /53/. Porassa ei ole iskua. Koemenettely on esitetty kuvassa 66. Koetulokset ilmoitettiin viiden kokeen keskiarvona.



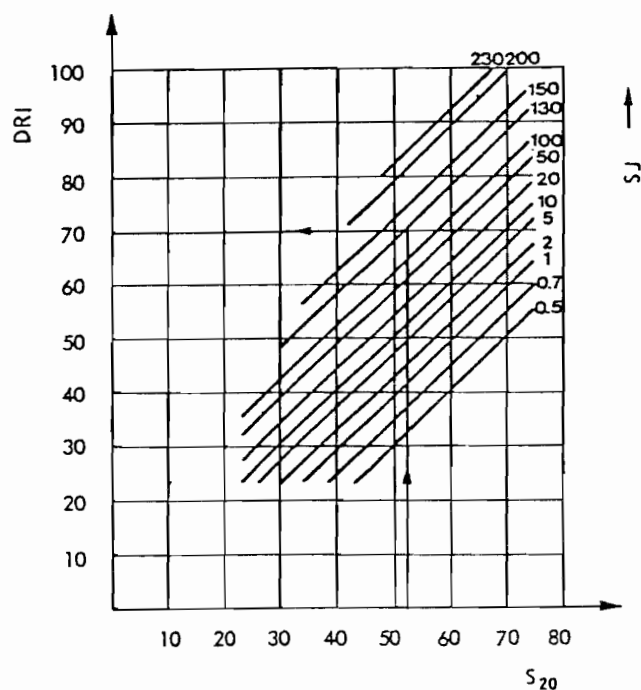
Kuva 66. Sieversin J-arvon määrittäminen.



Kuva 67. Sieversin J-arvojen määrittämisessä käytettyjä kiviläytteitä.

7.8 Porausnopeusindeksi DRI

Kiviläytteen porausnopeusindeksi määritetään haurausarvon ja Sieversin J-arvon perusteella. Norjalaiset /53/ ovat laatineet nomogrammin, josta DRI-arvon lukeminen tapahtuu (kuva 68).



Kuva 68. DRI-arvon määrittäminen haurausarvon (S_{20}) ja Sieversin J-arvon (SJ) perusteella /67/.

Koska laitteistossa saattaa olla vähäisiä eroja norjalaisiin verrattuna, on tässä tutkimuksessa saaduista DRI-arvoista käytetty merkintää DRI'.

7.9 Ohuthietutkimukset

Jokaisesta näytteestä valmistettiin ohuthie, joka mahdollisimman hyvin edusti kyseistä kivilajia. Hie'et analysoitiin polarisaatiomikroskoopilla. Niistä määritettiin mineraalikoostumus, raekoko, rapautuneisuus, rakenne, suuntautuneisuus sekä mahdollinen mikrorakoilu.

Mineraalikoostumus sisälsi kivilajin muodostavien mineraalien tunnistamisen ja niiden prosentuaalisen jakautuman määrittämisen päämineraalien osalta 1000 pisteestä point counter -menetelmällä. Raekoko määritettiin keskimääräisenä raekokona. Samalla huomioitiin pääasiallinen raekoon vaihteluväli. Rapautuneisuudessa tutkittiin mineraalien muuttumista ja kivilajin rakenteen löyhtymistä. Suuntautuneisuus selvitettiin ohuthie'en lisäksi makroskooppisesta kivinäytteestä. Mikrorakoilusta havainnointiin rakojen runsaus ja laatu. Laadulla tarkoitetaan raoissa olevaa sekundäärimineraalitäytettä sekä sen puuttumista.

8. TUTKIMUSTULOKSET

8.1 Tiheys, kimmomoduli, Poissonin luku,
puristus- ja vetomurtolujuus

Tulokset tiheyden, kimmomodulin, Poissonin luvun, puristus- ja vetomurtolujuuden määrittämisestä on esitetty taulukossa 6. Mittausarvot on ilmoitettu pääasiassa kolmen kokeen keskiarvoina. Puristus- ja vetomurtolujuuden kohdalla mainitut liuskeisuuden kulmat on mitattu poikkeamina pituussuunnista kuvan 63 mukaisesti. Tutkimustulokset on esitetty yksityiskohtaisemmin liitteissä 1 ja 2. Seuraavassa tutkimustulosten käsittelyssä on käytetty kivilajien karkeaa jakoa vaaleisiin kiviin (graniitti, granodioriitti ja suonigneissi) ja tummiin kiviin (amfiboliitti, sarvivälke-kiillegneissi, kiillegneissi ja tuffiitti).

Taulukko 6. Tutkittujen kiviäytteiden kalliomekaaniset perusominaisuudet.

Paikka	Näyte no	Kivi- laji	Tiheys $\gamma (10^3 \text{ kg/m}^3)$	Kimmo- moduli E (GPa)	Poissonin luku, ν	Puristumurtolujuus		Vetomurtolujuus	
						σ_{pm} (MPa)	Liuskei- suuden kulma ($^\circ$)	σ_{vm} (MPa)	Liuskei- suuden kulma ($^\circ$)
Munkkisaari	37	sv-kgn	2,86	103,7	0,22	248,7	0	8,7	5
"	38	sv-kgn	2,76	91,0	0,20	251,8	20	7,7	10
"	50	grdr	2,65	76,2	0,36	272,8	-	15,7	-
Pohjois- Mellunmäki	39	sgn	2,62	69,1	0,26	124,7	25	7,7	15
"	40	sgn	2,65	53,2	0,23	115,0	0	6,6	0
Mustikkamaa	41	kgn	2,70	78,5	0,21	159,8	50	10,9	50
"	42	sv-kgn	2,76	85,7	0,30	157,7	80	9,8	55
Tali	43	amf	2,93	97,4	0,30	232,2	35	13,7	40
"	44	amf	2,98	103,7	0,25	242,1	65	15,3	60
"	49	gr	2,62	64,7	0,27	148,7	-	13,3	-
Kamppi	45	gr	2,62	65,7	0,10	123,0	-	7,9	-
"	46	gr	2,63	65,5	0,31	135,3	-	8,4	-
Viikki	47	gr	2,63	65,5	0,28	125,1	-	8,2	-
Pasila	17	gr	2,63	74,2	0,19	208,9	-	8,6	-
Länsi-Pasila	18	grdr	2,64	74,8	0,28	184,9	-	8,7	-
Vuosaari	3	amf	2,96	82,2	0,16	133,1	85	18,4	85

Näytekappaleiden tiheydet vaihtelivat $2,62 - 2,98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ja keskiarvo oli $2,73 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Samasta näytteestä (3 m:n pituinen $\emptyset 32 \text{ mm}$ kairansydännäyte) tehdyissä kolmessa määrittäyksessä oli suurin keskihajonta vain 1,3 %. Tiheydeltään painavin kivilaji oli Talin amfiboliitti (No 44), jossa mineraalikoostumuksen määrittäyksen mukaan oli myös korkein amfiboli- ja pyrokseenipitoisuus (42 %). Vastaavasti tiheydeltään kevyimpiä olivat graniitit Talista (No 49) ja Kampista (No 45) sekä suonigneissi Pohjois-Mellunmäestä (No 40). Mineraalikoostumuksen mukaan niissä oli hyvin runsaasti kalimaasälpää sekä kvartsia ja vain vähän plagioklaasia.

Kokeissa saatujen kimmomodulien keskiarvo oli $78,2 \text{ GN/m}^2$ ja keskihajonta vaihteli välillä 2,0 - 10,4 %. Keskimääräinen kimmomoduli on suomalaisille kiville noin $60 - 70 \text{ GN/m}^2$ /47/. Tässä tutkimuksessa saatu korkeampi keskiarvo johtuneen tummien kivien runsaammasta osuudesta näytteissä. Kimmomodulin arvot jakautuvat selvästi tummien ja vaaleiden kivien välillä. Pienin kimmomodulin arvo on Pohjois-Mellunmäen suonigneissillä (No 40), mikä selittyy kiven hyvin korkealla kalimaasälpäpitoisuudella (noin 70 %) ja korkealla raekoolla.

Poissonin lukujen arvot näytteillä vaihtelivat välillä 0,16 - 0,37. Keskiarvo oli 0,25, mikä vastaa keskimääräistä Poissonin lukua suomalaisille kiville /46/. Keskihajonta oli usein suuri (6 - 47 %). Mitään selvää jakautumaa eri kivilajien suhteen ei muodostunut.

Puristusmurtolujuuksien vaihteluväli oli 115 - 273 MPa ja keskiarvo oli 179,2 MPa. Keskihajonta oli 3 - 26 %. Suomalaisilla kivillä puristusmurtolujuus vaihtelee välillä 40 - 300 MPa keskiarvoluvun ollessa suuruusluokkaa 100 MPa /46/. Suurimmat lujuusarvot olivat amfiboliiteilla. Poikkeuksena oli kuitenkin Vuosaaren amfiboliitti (No 3), jonka puristusmurtolujuus 133 MPa oli selvästi alle tässä tutkimuksessa saadun keskiarvon. Kokeessa Vuosaaren kivi murtui muutamiksi levymäisiksi kappaleiksi, kun kivinäytteet yleensä rikkoutuivat hienoksi murskeeksi. Vastaavasti graniittisille kiville hyvin korkean puristusmurtolujuuden 273 MPa sai granodioriittinäyte Munkkisaaresta (No 50). Kyseisen kiven lujuus voitaneen

selittää sen hienorakeisen sekä hyvin tiiviin ja tasarakeisen rakenteen avulla. Alhaisia puristusmurtolujuuksia edustivat Pohjois-Mellunmäen karkearakeiset suonigneissinäytteet.

Liuskeisuuden suunnan vaikutusta puristusmurtolujuuteen ei näillä koejärjestelyillä voitu todeta. Hieman odottamattomina tuloksina voidaan kuitenkin pitää Vuosaaren (No 3) ja Mustikkamaan (No 42) näytteiden suhteellisen alhaisia puristusmurtolujuuksia, vaikka puristus tapahtui lähes kohtisuoraan liuskeisuutta vastaan.

Vetomurtolujuuksien keskiarvo oli 10,6 MPa arvojen vaihdellessa välillä 6,6 - 18,4 MPa. Keskihajonta oli 4 - 38 %. Yleensä graniittisilla näytteillä sekä Pohjois-Mellunmäen suonigneissillä vetomurtolujuudet olivat selvästi alle kokeen keskiarvon. Poikkeuksena oli kuitenkin Munkkisaaren granodioriitti (No 50), jonka vetomurtolujuus oli 15,7 MPa. Selvästi suurin vetomurtolujuus oli Vuosaaren amfiboliitilla (No 3).

8.2 Pistekuormituslujuus

Tähän tutkimukseen liittyvät pistekuormituslujuudet on määrittänyt Leena Korkiala maarakennusmekaniikan ja pohjarakennuksen erikoistytössään /38/. Pistekuormituskokeen tulokset on esitetty taulukossa 7. Taulukossa on määritetty pistekuormitusindeksin (I_s) perusteella vastaava pistekuormitusindeksi Ø 50 mm kairasydännäytteelle ($I_s(50)$), vetomurtolujuus (σ_t) ja puristusmurtolujuus (σ_p).

Pistekuormitusindeksit Ø 32 mm kairasydännäytteillä vaihtelivat välillä 9,0 - 18,8 MPa keskiarvon ollessa 12,8 MPa. Keskihajonta oli 6,7 - 19,7 %. Pistekuormituskokeen tulokset osoittivat samantyyppistä kivilajien lujuusjakaumaa kuin puristus- ja vetomurtolujuudetkin. Munkkisaaren granodioriitilla oli hyvin korkea pistekuormitusindeksi. Alhaisimmat arvot olivat Pohjois-Mellunmäen karkearakeisella suonigneissillä. Pistekuormitusindeksien perusteella määritettyjä puristus- ja vetomurtolujuuksia sekä tavanomaisella puristuskokeella saatuja puristus- ja vetomurtolujuuksia on verrattu keskenään kohdassa 9.1.

Taulukko 7. Määritetyt pistekuormituslujuudet.

Paikka	Näyte no	$I_s(32)$ (MPa)	σ_p (MPa)	σ_t (MPa)	Liuskei- suuden kulma	$I_s(50)$ (MPa)
Munkkisaari	37	11,7	187,6	11,2	//	8,5
"	38	10,9	175,5	10,5	//	8,1
"	50	18,8	302,4	18,0	-	14,6
Pohjois- Mellunmäki	39	10,9	175,2	10,4	-	8,1
"	40	9,0	144,1	8,6	-	6,7
Tali	43	16,1	259,4	15,5	$\perp$	11,8
"	44	15,2	252,9	15,1	//	11,2
"	49	14,5	232,6	13,9	-	10,0
Kamppi	45	10,6	170,7	10,2	-	7,8
"	46	10,9	175,5	10,5	-	8,0
Viikki	47	11,3	181,9	10,8	-	8,5

8.3 DRI'-arvo

Laboratoriokokeissa määritetyt haurausarvot, Sieversin J-arvot sekä näitä vastaavat DRI'-arvot on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Määritetyt porausnopeusindeksit.

Paikka	Näyte no	Kivi- laji	Hauraus- arvo S_{20}	Siever- sin J-arvo	DRI'
Pohjois- Mellunmäki	39	sgn	53,0	2,8	47
"	40	sgn	58,6	3,0	54
Mustikkamaa	41	kgn	35,7	3,8	32
"	42	sv-kgn	42,6	3,3	38
Tali	43	amf	41,4	3,3	38
"	44	amf	36,6	3,7	33
Kamppi	45	gr	55,6	2,2	49
"	46	gr	57,2	1,7	48
Pasila	17	gr	53,0	2,0	46
Länsi-Pasila	18	grdr	55,0	2,2	40
Vuosaari	3	amf	37,0	19,3	41
"	48	tuff	38,0	2,0	32

Haurausarvojen keskiarvoksi saatiin vaaleille kiville (6 kpl) 55,4 ja tummille kiville (6 kpl) 38,6. Norjalaisten /53/ tutkimusaineistosta lasketut keskiarvot ovat vaaleille kiville (39 kpl graniitteja) 54,2 ja tummille kiville (27 kpl amfiboliitteja, dioriitteja ja gabroja) 42,8. Vaaleiden ja samalla haurauden mineraalien runsaus kivessä näkyy johdonmukaisesti korkeampana haurausarvona. Sieversin J-arvojen keskiarvo vaaleille kiville oli 2,8 ja tummille kiville 5,9. Kirjallisuudesta /53/ määritetyt vastaavat keskiarvot ovat 9,5 vaaleille kiville ja 34,7 tummille kiville. Norjalaisten määrittelyyn verrattuna ovat Helsingin kivilajit Sieversin J-arvon perusteella huomattavasti kovempia.

DRI'-arvot vaihtelivat välillä 32 - 54 keskiarvon ollessa vaaleilla kivillä 49 ja tummilla kivillä 36. Norjalaisten aineiston perusteella vastaa ensinmainittu arvo keskimääräistä DRI-arvoa ja jälkimmäinen alhaista DRI-arvoa. Samassa luokituksessa erittäin alhaisen DRI:n arvo on 21 ja erittäin korkean DRI:n arvo 114 /53/. Haurausarvon ja Sieversin J-arvon yhteydessä mainitun aineiston DRI-arvojen keskiarvo on vaaleille kiville 54 ja tummille kiville 48.

8.4 Ohuthietutkimukset

Osasta tämän tutkimuksen kivilajityytteistä määritetyt mineraalikoostumukset ja kivilajit on esitetty taulukossa 9. Taulukossa 10 on laboratoriokokeissa käytettyjen näytteiden mikroskooppitutkimusten tuloksia. Lisäksi jokaisesta näytteestä on tehty hiekortti, jossa on tiedot mm. mikroskooppisesta rakenteesta, mineraalien muuttuneisuudesta, mikrorakoilusta, suuntautuneisuudesta ja vallitsevasta raakoosta. Laboratorionäytteiden ohuthieistä on liitteenä myös valokuvat (liitteet 3 - 5).

8.5 Virhelähteet

Laboratoriokokeiden tuloksiin voi jäädä virheitä, jotka johtuvat:

- a) näytteestä
- b) menetelmästä
- c) suoritustavasta.

Taulukko 9. Mineraalikoostumukset ja kivilajit näytteistä
No 1 - 36.

Paikka	Näyte no	Kivi- laji	Mineraalikoostumus %									Aks
			Kv	Pl	Kms	Ki	Amf	Py	Op	Ka		
Jakomäki	1	kvdr	33	54		12						1
Mellunmäki	2	gr	45	28	19	7						1
Vuosaari	3	amf	6	22		6	56		8			2
"	4	sv-gb	11	29		25	34					1
"	5	kv-msgn	15	49	9	25						2
Laajasalo	6	kvdr	31	49		19						1
"	7	kv-msgn	44	36		18						2
Roihuvuori	8	sv-kgn	22	28		31	11					8
Myllypuro	9	gr	32	30	32	3						3
"	10	kgn	29	49		21						1
Pihlajamäki	12	gr	31	32	36							1
Pukimäki	13	kgn	26	23	8	42						1
Pakila	14	sv-gb		24			57		6			13
Kaarela	15	kvdr	51	38		10					ti ₃	1
Kannelmäki	16	kvdr	49	44				3				1
Pasila	17	gr	36	26	33	2						3
Länsi-Pasila	18	grdr	40	40	14	5						1
Kumpula	19	amf		38			59					3
Hermannin	20	kvdr	56	33		9						2
Kulosaari	21	amf		58			40					2
Torkkelinmäki	22	gr	39	21	20	19						1
Kruunuhaka	23	kv-msgn	40	33		25						2
"	24	kgn	25	57		17						1
"	25	gr	19	22	55	4						+
Kaivopuisto	26	amf		48			48					+
Punavuori	27	gr	42	23	34	1						+
Lauttasaari	28	gr	33	31	30	6						+
Lehtisaari	29	amf	4	35			59					2
Meilahti	30	gr	51	21	17	10						1
Taka-Töölö	31	amf	12	42			45					1
Pukimäki	32	kar	27	32	10		8	10		6	epd ₅	2
"	33	juonik	2	40		5					lasi ₅₂	2
Lapinlahti	34	kalk				8	serp ₁₃		ol ₇	69	kand ₂	1
Kamppi	35	sv-kgn	11	42		16	27					4
Ruskeasuo	36	hels	7	61	17						epd ₁₄	1

Tuloksia voidaan tarkastella esim. keskihajonnan avulla (kts. liitteet 1 ja 2). Seuraavassa on esitetty lyhyesti tekijän arvio tuloksien luotettavuudesta. Yhteenvedona kokeista voidaan todeta, että

- tiheyden määrittystarkkuus on hyvä ja tulokset ovat edustavia
- kimmomodulin määrittystarkkuus on hyvä
- Poissonin luvun määrittys on tarkkuudeltaan kohtalaisen huono
- puristusmurtolujuuden määrittystarkkuus on kohtalainen, sillä osalle näytteistä on määritetty "minimiarvo"
- vetomurtolujuuden määrittystarkkuus on kohtalaisen hyvä
- pistekuormitusindeksin määrittystarkkuus on hyvä
- DRI'n määrittystarkkuus on hyvä huomioimalla se tarkkuus, millä tulos annetaan haurausarvon ja Sieversin J-arvon avulla
- ohuthietutkimukset antavat kohtalaisen hyvän arvion kiven todellisesta mineraalikoostumuksesta.

Taulukko 10. Ohutietutkimuksien tuloksia näytteistä, joista määritettiin kalliomekaaniset ominaisuudet. Raekoon lisäksi on sulkeissa ilmoitettu vaihteluväli. 0 on rapautumaton, 0-1 on vähän rapautunut (mikrorakojen ympäriltä) tai plagioklaasi on runsaasti serisiittiyntynyt. Mikrorakoilussa 0 tarkoittaa tiivistä rakoilua, ● on täytteen (kv, karb, ep, kl, ym.) rakoilu ja - ei havaittu.

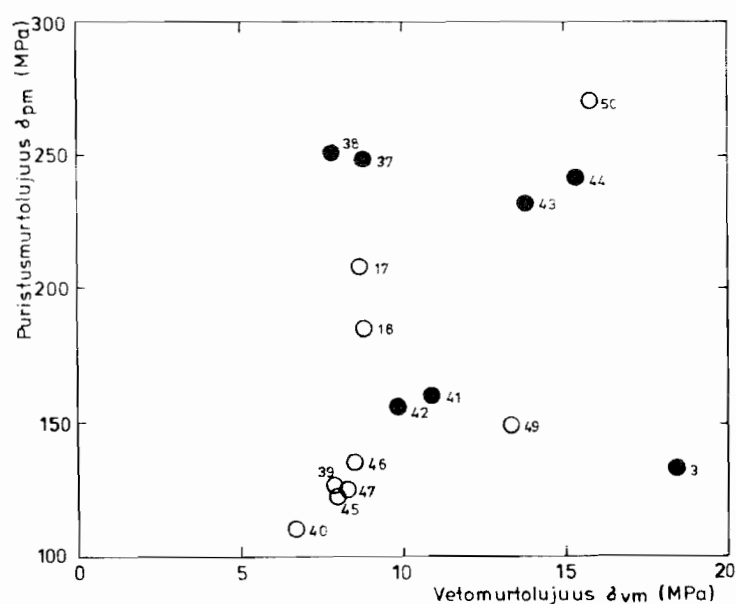
Paikka	Näyte no	Kivilaaji	Mineraalikoostumus (til.-%)						Keskimääräinen raekoko (mm)				Paputuneisuus	Mikrorakolu
			Kv	Pl	Kms	Ki	AP	Maut	Kv	Pl	Kms	Ki	AP	
Munkkisaari	37	sv-kg	18	40		19	21	2	0,3(0,6-0,05)	0,5(1-0,05)		0,5(1,5-0,2)	0,4(1-0,1)	0
"	38	sv-kg	30	42		23	2	3	0,2(0,8-0,05)	0,4(2-0,05)		0,4(2-0,1)	0,2(1-0,05)	0-1
"	50	gr	34	55	7	2		2	0,4(3-0,1)	1,5(10-0,2)	0,5(2-0,1)			0
Pohjois-Mellurmäki	39	sg	30	13	42	15			3,0(10-0,1)	2,0(4-0,5)	3,0(6-0,5)	2,0(3-0,2)		0
"	40	sg	12	10	71	7			3,0(6-0,1)	2,0(4-0,5)		1,0(3-0,2)		0
Mustikkamaa	41	kg	23	51		26			0,6(1,5-0,05)	1,0(2-0,1)	5,0(10-0,2)	1,0(2-0,1)		0-1
"	42	sv-kg	22	44		8	25		0,8(2-0,05)	1,0(2-0,1)		0,5(1,5-0,1)	0,4(2-0,05)	0
Tali	43	amf	17	41			41	1	0,3(1-0,1)	0,4(1-0,1)			1,0(2-0,1)	0
"	44	amf	12	46			42		0,3(1-0,05)	0,5(1-0,05)			1,0(2-0,1)	0
"	49	gr	40	13	46	1			0,2(4-0,01)	0,3(2-0,1)	2,0(10-0,5)			0
Kamppi	45	gr	36	15	42	7			0,2(4-0,05)	1,5(3-0,5)	2,0(5-0,1)	1,0(2-0,5)		0-1
"	46	gr	25	30	43	2			2,0(5-0,1)	2,0(5-0,5)	2,0(5-0,2)			0
Vilkki	47	gr	39	19	37	5			2,0(4-0,05)	1,0(2,5-0,1)	1,0(2-0,2)	0,5(1,5-0,1)		0
Pasila	17	gr	36	26	33	2		3	2,0(4,0-0,1)	1,5(3,0-0,2)	1,0(3,0-0,1)	0,5(1,0-0,1)		0
Länsi-Pasila	18	grdr	40	40	14	5		1	2,0(5-0,1)	1,5(3-0,1)	1,5(4-0,1)	0,8(1,5-0,1)		0-1
Vuosaari	3	amf	6	22		6	56	10	0,1(0,3-0,01)	0,1(1,5-0,05)		0,5(1,0-0,1)	0,5(1,0-0,05)	0
"	48	tuff	39	21	4	7	11	18	0,1(0,3-0,01)	0,1(0,3-0,01)	0,2(0,4-0,001)	0,1(0,4-0,05)	0,3(1,5-0,1)	0

x) kivi kiinteää mikrobresiaa

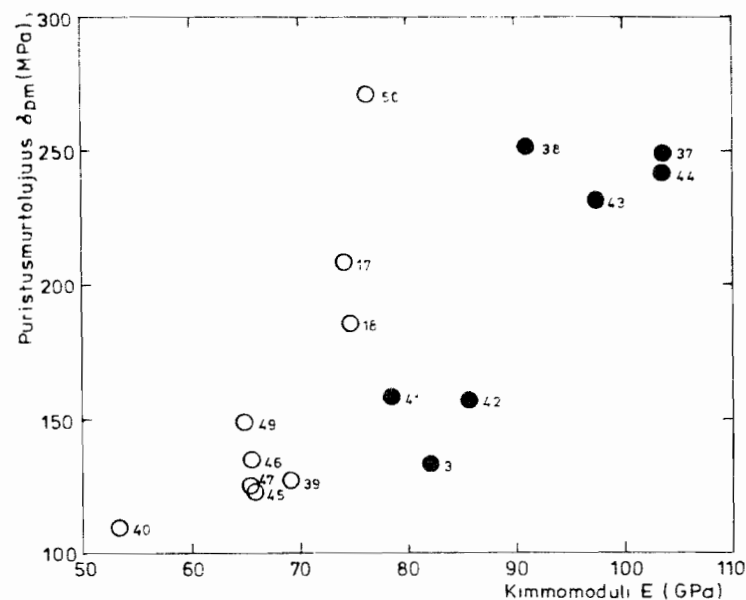
9. TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI JA VERTAILU

9.1 Fysikaalisten perusominaisuuksien vertailu

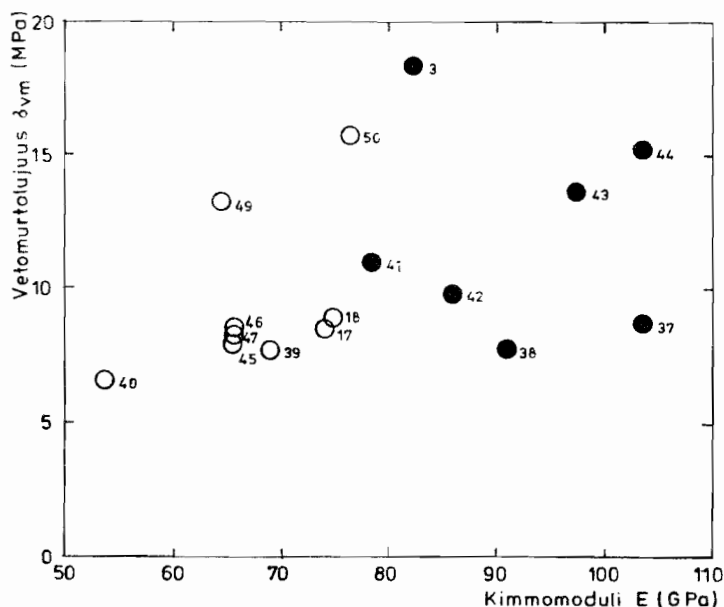
Kuvissa 69 - 71 on esitetty kivilajien kalliomekaanisten perusominaisuuksien (kimmomoduli, puristus- ja vetomurtolujuus) keskinäinen jakautuminen. Kaikissa tämän luvun kuvissa on vaaleat kivilajit merkitty O-merkillä ja tummat kivet ●-merkillä. Merkin vieressä on näytenumero.



Kuva 69. Puristus- ja vetomurtolujuuden korrelaatio.



Kuva 70. Puristumurtolujuuden ja kimmomodulin korrelaatio.



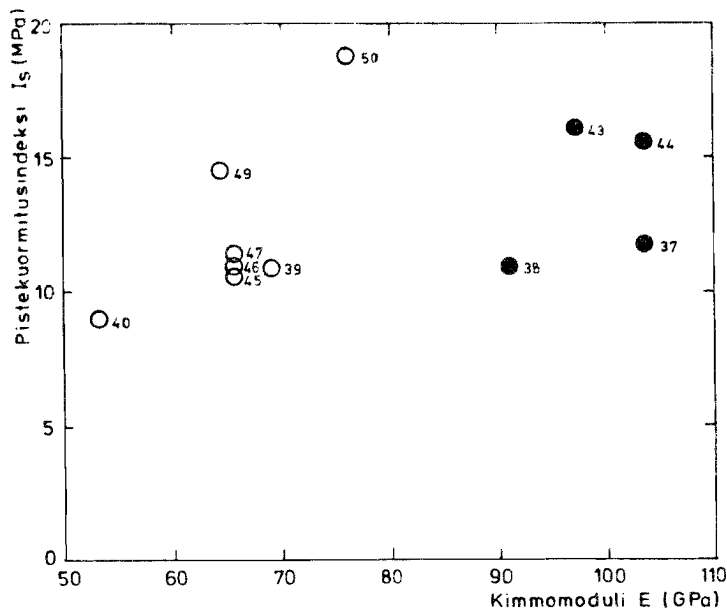
Kuva 71. Vetomurtolujuuden ja kimmomodulin korrelaatio.

Kuvista on nähtävissä tuloskeskittymä (Not 45, 46, 47...), joka edustaa Helsingin seudun mikrokliinigraniitteja. Niiden kimmomodulien arvot ovat 60 - 70 GPa. Veto- ja puristusmurtolujuudet vaihtelevat välillä 5 - 10 MPa ja 130 - 150 MPa. Tulokset vastaavat keskimääräisiä lujuusarvoja suomalaisille kiville /46, 47/. Graniittisissa kivissä kimmomodulin kasvaessa kasvaa myös puristuspurtolujuus. Vastaavaa riippuvuutta ei ole vetomurtolujuuden suhteen. Eräänä poikkeuksena on kuitenkin Munkkisaaren granodioriitti (No 50), jolla on korkeat lujuusarvot. Tämä ei johdu kiven mineraalikoostumuksesta, vaan sen rakenteellisista ominaisuuksista.

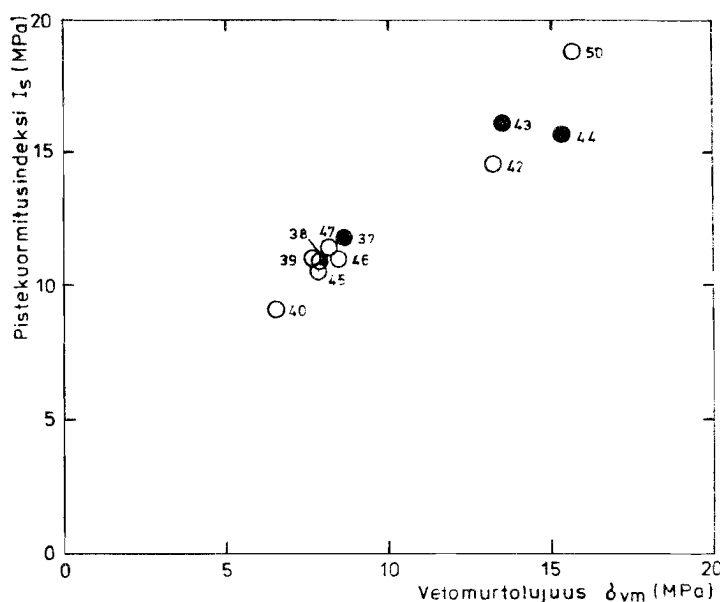
Tummillä kivillä lujuusarvot ovat suurempia kuin vaaleilla kivillä. Ominaisuuksien hajonta on suuri, mikä selittyy suuremmilla eroilla mineraalikoostumuksissa ja rakenteissa. Erityisen poikkeavalla tavalla käyttäytyy Vuosaaren amfiboliitti (No 3), jolla on suhteellisen alhainen puristuspurtolujuus.

Samalta alueelta samasta kivilajista otettujen näytteiden lujuusarvot ovat hyvin lähellä toisiaan (esim. Not 37 ja 38, 39 ja 40, 41 ja 42, 43 ja 44 sekä 45 ja 46). Tämä on selvästi havaittavissa kuvasta 69, jossa on verrattu näytteiden puristus- ja vetomurtolujuuksia. Täten yhdestäkin edustavasta näytteestä tehdyillä tutkimuksilla voidaan saada suuruusluokallinen käsitys tutkittavan alueen kivilajin ominaisuuksista.

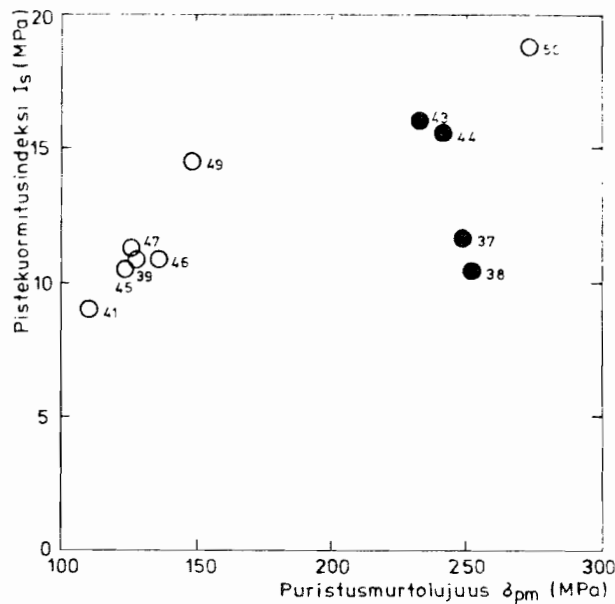
Kuvissa 72 - 74 on käsitelty pistekuormitusindeksin suhdetta kimmomoduliin sekä puristus- ja vetomurtolujuuteen. Kuvista voidaan todeta, että Helsingin mikrokliinigraniitteja kuvaava pistekeskittymä korreloi myös pistekuormitusindeksin kanssa. Kuvista ilmenee myös, että pistekuormitusindeksi korreloi hyvin vetomurtolujuuden kanssa. Tulos on odotettu, sillä kyseiset koemenetelmät ovat samantyyppisiä (vrt. kohdat 7.3 ja 7.5). Puristumurtolujuuden ja varsinkaan kimmomodulin suhteen ei pistekuormitusindeksi korreloi läheskään yhtä hyvin. Molemmissa tapauksissa ovat vaaleiden ja tummien kivien erot kuitenkin selvät.



Kuva 72. Pistekuormitusindeksin ja kimmomodulin korrelaatio.



Kuva 73. Pistekuormitusindeksin ja vetomurtolujuuden korrelaatio.



Kuva 74. Pistekuormitusindeksin ja puristumurtolujuuden korrelaatio.

Pistekuormitusindeksin sekä puristus- ja vetomurtolujuuden välille esitetään usein korrelaatio. Yleisimmät saadut korrelaatiot ovat /33/:

$$\sigma_p = 16,1 \cdot I_s \quad (9)$$

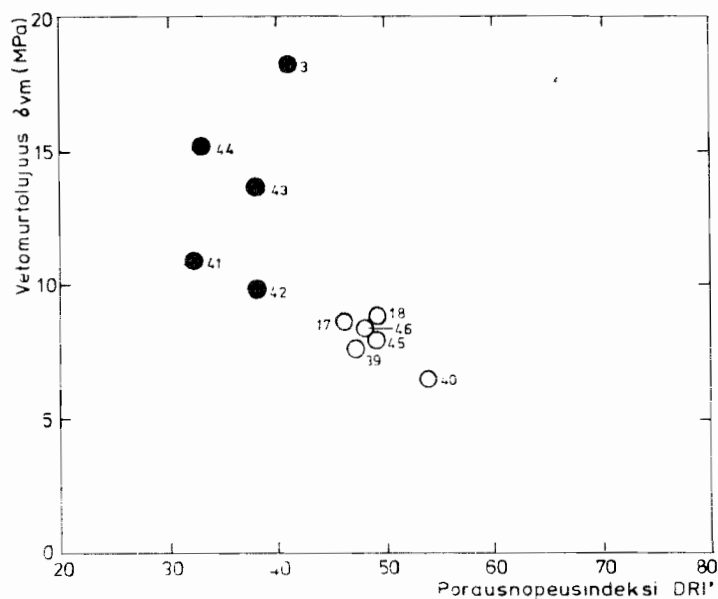
$$\sigma_t = 0,96 \cdot I_s \quad (10)$$

joissa: σ_p on puristumurtolujuus, MPa
 σ_t " vetomurtolujuus, MPa
 I_s " pistekuormitusindeksi, MPa

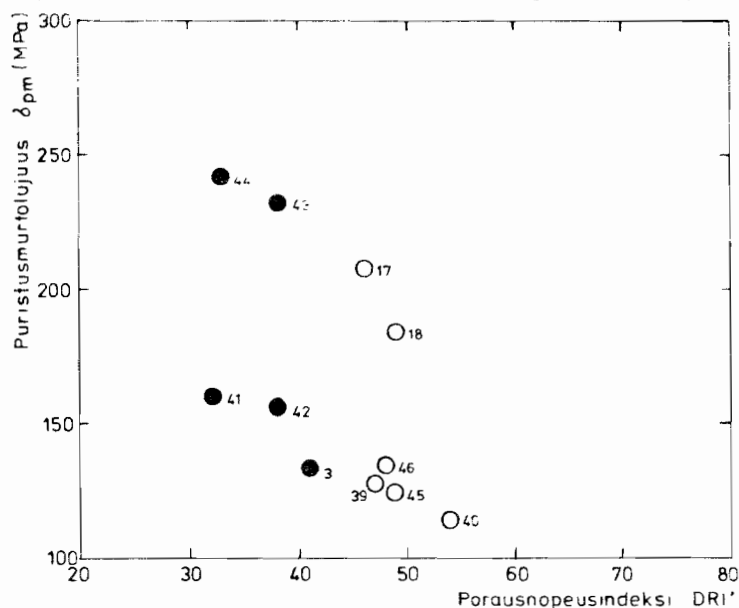
Tässä tutkimuksessa saatiin kuitenkin hieman pienemmät korrelaatiokertoimet: puristumurtolujuus 14,4 ja vetomurtolujuus 0,88 /38/ (vrt. kuvat 73 ja 74).

9.2 DRI'-arvojen vertailu fysikaalisiin perusominaisuuksiin

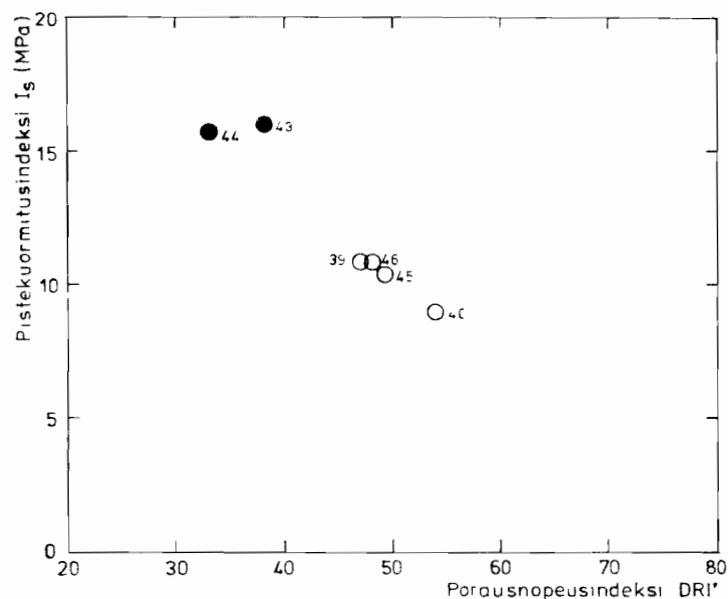
Tässä yhteydessä on selvitetty miten näytteistä määritetyt kalliomekaaniset perusominaisuudet suhtautuvat vastaaviin DRI'-arvoihin. Arvojen korrelaatiot on esitetty kuvissa 75 - 78.



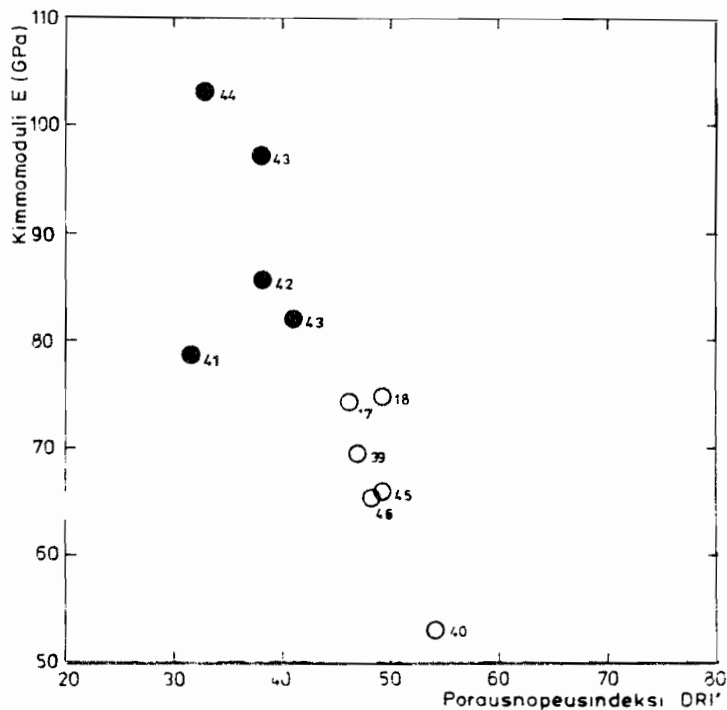
Kuva 75. Vetomurtolujuuden ja porausnopeusindeksin korrelaatio.



Kuva 76. Puristusmurtolujuuden ja porausnopeusindeksin korrelaatio.



Kuva 77. Pistekuormitusindeksin ja porausnopeusindeksin korrelaatio. Geotekninen osasto julkaisu 34



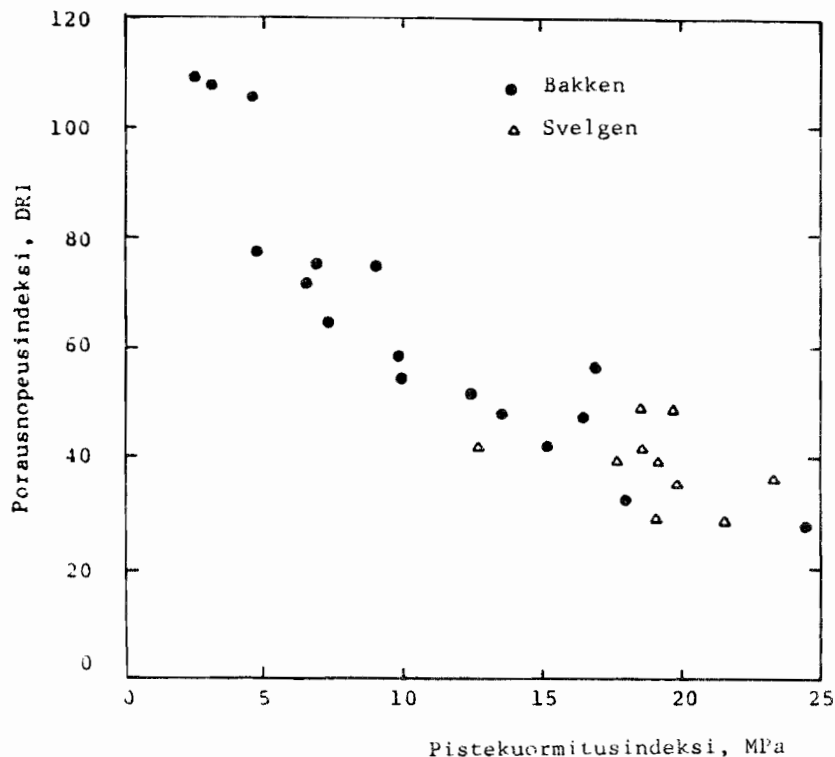
Kuva 78. Kimmomodulin ja porausnopeusindeksin korrelaatio.

Kuvista ilmenee, että kimmomodulin korrelaatio DRI':n kanssa on erittäin hyvä. Lähes lineaarisesta jakautumasta on vain yksi poikkeava arvo: kiillegneissi Mustikkamaalta (No 41). Poikkeama johtuu ennenkaikkea alhaisesta DRI'-arvosta, sillä näytteellä oli pieni haurausarvo ($S_{20} = 35,7$). Tämä voi johtua kiven mineraalikoostumuksesta. Kivessä on muihin näytteisiin verrattuna eniten biotiittia ja toiseksi eniten plagioklaasia. Se on myös kohtalaisen suuntautunut ja keskimääräiseltä raekooltaan lähellä hienorakeista.

Puristumurtolujuuden ja DRI':n suhteen koetulokset jakautuivat kahteen eri vyöhykkeeseen, joilla on samanlainen korrelaatio. Pääasiallisin syy Pasilan graniitin (No 17) ja Länsi-Pasilan granodioriitin (No 18) poikkeavaan käyttäytymiseen on ilmeisesti niiden huomattavan pieni kalimaasälpäpitoisuus. Rakenteellisesti ne eivät paljoakaan eroa muista tiiveistä graniiteista.

Vetomurtolujuus korreloi DRI':n kanssa vaaleilla, graniittisilla kivillä hyvin. Tummillä kivillä jakauma on laajempi, mutta havaittavissa on korrelaatio kasvavan vetomurtolujuuden ja alenevan DRI':n välillä.

Pistekuormituslujuuden ja DRI:n välinen aineisto on suppea (6 kpl), mutta näiden osalta on korrelaatio erittäin hyvä. Kuvan 77 pistejakaumassa on kuten muissakin DRI:n korrelaatiokuvissa selvä vaaleiden kivien lujuusalue sekä tätä hieman laajempi tummien kivien lujuusalue. Kuvassa 79 on vertailun vuoksi esitetty Blindheimin /3/ esittämä piste-kuormitusindeksien ja niitä vastaavien DRI-arvojen korrelaatio.



Kuva 79. Bakken ja Svelgen aineistoihin perustuva piste-kuormitusindeksien ja vastaavien DRI-arvojen korrelaatio /3/.

9.3 Kivilajin mineraalikoostumuksen ja rakenteen vaikutus koetuloksiin

Kvartsi on yleisin kivilajeja muodostava mineraali Helsingin alueella, sillä sitä esiintyy jokaisessa näytteessä. Yleisiltä ominaisuuksiltaan se on kova ja hauras. Suoritetuissa laboratoriokokeissa kvartsin vaikutus näkyy selvimmin Sieversin J-arvojen pienuutena. Kovuutensa johdosta kvartsin terää kuluttava ominaisuus on suuri.

Plagioklaasi on toinen hyvin yleinen mineraali. Ominaisuuksiltaan sitä voidaan pitää suhteellisen kovana ja hauraana.

Kivilajin rakenteessa plagioklaasi esiintyy toisiin rakeisiin sitoutuneena listakkeena. Muodostunut rakenne on varsin luja etenkin, jos plagioklaasia on kivessä runsaasti (esim. diabaasit ja anartosiitit). Tutkituissa näytteissä oli kahdessa (Not 41 ja 50) yli 50 % plagioklaasia. Molemmat näytteet olivat lujuusominaisuuksiltaan poikkeavia. Mustikkamaan kiillegneississä (No 41) oli myös eniten biotiittia. Sen haurausarvo oli tämän tutkimuksen pienin. Toinen runsaasti plagioklaasia sisältävä näyte oli granodioriitti Munkkisäarestä (No 50), jonka kalliomekaaniset lujuusarvot olivat huomattavan suuret.

Kalimaasälpä on lähinnä graniittisten kivien mineraali. Se on ominaisuuksiltaan suhteellisen kova, hauras, ja helposti lohkeava. Kalimaasälvän hauraus ilmenee hyvin esim. Pohjois-Mellunmäen näytteestä (No 40), jonka haurausarvo oli tämän tutkimuksen suurin. Kivessä oli runsaasti karkearakeista kalimaasälpää. Saman näytteen kalliomekaaniset arvot olivat myös muita alhaisemmat. Yleensä runsaasti kalimaasälpää sisältävillä näytteillä oli keskimääräistä heikommat kalliomekaaniset lujuusarvot.

Kiilteet ovat selvästi ominaisuuksiltaan sitkeitä ja pehmeitä. Niiden sitkeys ilmeni esimerkiksi haurausarvoissa (näyte No 41) ja puristusmurtolujuuksissa (näyte No 38).

Amfibolien sitkeä ominaisuus ilmeni kaikista amfiboliittien koetuloksista: korkeat kimmomodulien, puristus- ja vetomurtolujuuksien arvot sekä selvästi keskimääräistä alhaisemmat haurausarvot. Muista poikkeavana amfiboliittina oli kuitenkin Vuosaaren näyte No 3, jolla oli keskimääräistä alhaisempi puristusmurtolujuus, mutta selvästi korkein vetomurtolujuus. Todennäköisenä syynä tähän on kivilajin mineraalikoostumus (yli 50 % sarvivälkettä), hienorakeinen raekoko ja voimakkaasti suuntautunut rakenne. Tehdyissä kokeissa kivi murtui listakkeiksi ja levymäisiksi kappaleiksi.

Eri kivilajien päämineraalien ominaisuudet kontrolloivat kiven käyttäytymistä tehdyissä kokeissa. Ominaisuuksiltaan yhteneväisin kivilajiryhmä oli vaaleat graniittiset kivet, mikä

ilmeni niiden sijoittumisesta yleensä varsin suppeille alueille edellä esitetyissä kuvissa. Tämä johtuu niiden hyvin samankaltaisista mineraalikoostumuksista ja rakenteesta.

Tummat kivet olivat jo mineraalikoostumuksiltaan vaihtelevampia, mikä osaltaan johti niille määritettyjen lujuusominaisuuksien suurempaan hajontaan. Toinen tuloshajontaa lisäävä tekijä oli kivilajien suuremmat rakenne-erot. Koetuloksissa tummien kivien lujuusarvot erottuivat suurempina vaaleiden kivien arvoista. Varsinkin kivilajien DRI'-arvojen määrittäminen jakoi tummat kivet selvästi erilleen vaaleista kivistä.

9.4 DRI'-arvojen ja koeporaustulosten vertailu kirjallisuusarvoihin

Osa laboratoriossa suoritetuista DRI'-arvoista tehtiin kohteista, joista oli käytettävissä louhintaporauskalustolle tehtyjen koeporausten tulokset. Näiden tulosten avulla voitiin selvittää DRI'-arvojen suhteellista paikkansapitävyyttä.

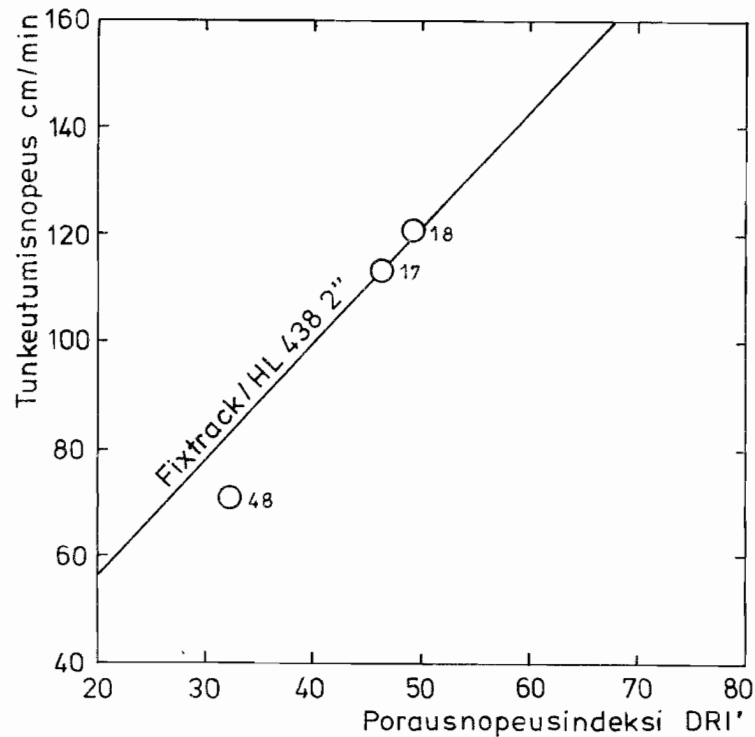
Koeporauksia oli suoritettu mm. Pasilassa, Länsi-Pasilassa ja Vuosaarella (porakone HL 438 T, palakruunu Ø 45 mm). Tarkeemmin tehtyjä koeporauksia on selvitetty viitteessä /56/. Saatujen tunkeutumismisnopeuksien keskiarvot olivat:

Pasila (No 17)	145,2 cm/min
Länsi-Pasila (No 18)	154,9 "
Vuosaari (No 48)	91,7 "

Koeporauksissa saatuja tunkeutumismisnopeuksia sekä niitä vastaavia DRI'-arvoja on verrattu norjalaisten /53/ tuloksiin. Koska koeporaukset on suoritettu Ø 45 mm:n kruunulla, on koeporaustulokset laskennallisesti korjattu vastaamaan norjalaisten käyttämää 51 mm:n kruunukokoa. Muutoskaava on esitetty viitteessä /17/. Korjatuiksi tunkeutumismisnopeuksiksi saadaan:

Näyte No	Ø 45 mm	Ø 51 mm
17	145,2 cm/min	113,0 cm/min
18	154,9 "	120,6 "
48	91,7 "	71,4 "

Kuvassa 79 on norjalaisten /53/ laatima suorituskäyrä Ø 51 mm:n kruunulla varustetulle Fixtrack/HL 438 porakoneelle eri DRI-arvojen suhteen (vrt. kuva 60). Jos edellämainittujen koeporauksien korjatut tunkeutumismopeudet ja niitä vastaavat DRI'-arvot sijoitetaan kuvaan 80, saadaan käsitys siitä, miten tämän tutkimuksen tulokset korreloivat norjalaisten saamien arvojen kanssa.



Kuva 80. Koeporausten tuloksien ja DRI'-arvojen vertailu. Louhintaporauskalustolla (HL 438/51 mm) Helsingissä suoritettujen koeporausten korjatut (kts. teksti) tulokset ja niitä vastaavat DRI'-arvot on merkitty 0-merkillä. Yhtenäinen viiva kuvaa norjalaisten /53/ esittämiä vastaavan poraus- ja porakaluston tunkeutumismopeuksia DRI-arvojen suhteen.

Kuvasta voidaan todeta, että vaaleiden kivien osalta arvot ovat yhtäpitäviä. Vuosaaren kivien osalta tulos viittaa siihen, että kyseessä olevalla DRI'-arvolla tulisi päästä 15 - 20 % suurempaan tunkeutumismopeuteen. Vertailu voi kuitenkin sisältää epätarkkuuksia, jotka johtuvat seuraavista tekijöistä:

- muutoskaavalla laskettu kruunukoon vaikutus tunkeutumismopeuteen on arvio

- koeporausten arvot ovat ensimmäiselle tangolle, norjalais-
ten arvot ovat toiselle tangolle
- tässä määritettyjen DRI'-arvojen suhtautumista Norjassa
määritettyihin DRI-arvoihin ei vielä tunneta.

Yhteenvetona koetuloksista voitaneen todeta, että ainakin
vaaleilla graniittisilla kivillä DRI-arvon käyttö poratta-
vuuden arvioimisessa on perusteltua. Samalla tulokset kui-
tenkin osoittavat Vuosaaren metavulkaniittien erikoiset
lujuusominaisuudet.

9.5 DRI'-arvojen ja kirjallisuuden kokoprofiili- poraustulosten vertailu

Kokoprofiiliporauksessa kivi- ja kallio-olosuhteet vaikutta-
vat suoraan porausnopeuteen. Porausnopeudella tarkoitetaan
tässä yhteydessä tehollisena porausaikana saavutettua keski-
määräistä nopeutta.

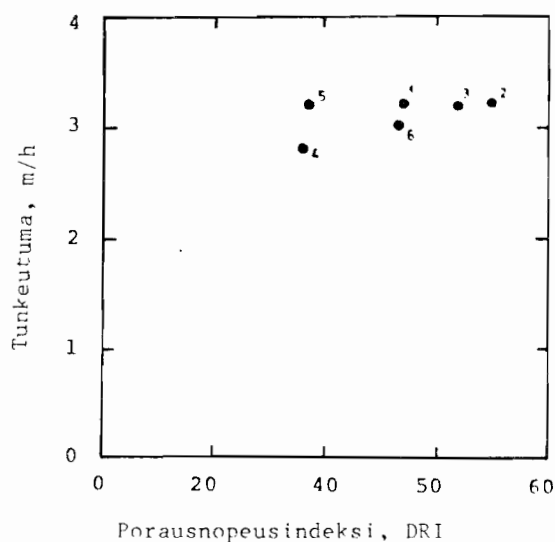
Laajin kokoprofiiliporauksen nopeutta käsittelevä tutkimus-
aineisto on norjalaisella O. T. Blindheimillä /3/. Hän on
tehnyt runsaasti vertailuja eri kivilaji- ja kalliooperäolo-
suhteiden DRI-arvojen ja rakotiheyksien vaikutuksista ko-
olosuhteissa saatuihin porausnopeuksiin. Kokoprofiiliporaus-
laitteen porausnopeus on pääasiassa kalliomittakaavainen omi-
naisuus. Kiven ominaisuudet määräävät vain porausnopeuden
minimi-arvon (vrt. kuva 41), minkä arvioinnissa voidaan käyt-
tää kiven DRI-arvoa. Paras porausnopeuden arviointi koko-
profiiliporauksessa saadaan yhdistämällä määritetyt kivila-
jien DRI-arvot sekä tiedot kallion rakoilusta (rakotiheys,
rakosuunnat).

Eräänä esimerkkinä on esitetty Oslossa 1970-luvun alkupuolella
rakennettu pääviemäritunneli, joka porattiin Robbinsin KPL:lla
(Ø 33,15 m, 26 yksittäistä kiekkoterää) /3/. Taulukossa 11
on esitetty tunnelityömaalla vallinneet kivilajiolosuhteet
ja niissä saavutetut porausnopeudet. Kuvassa 81 on edellä-
mainittuihin taulukkotietoihin perustuen esitetty DRI-arvojen
ja porausnopeuksien korrelaatio.

Taulukko 11. Franzebråten, Oslo. Robbinsin KPL:lla tehdyn viemäritunnelin kivilajien ominaisuudet ja saavutetut porausnopeudet /3/.

Näyte		Porausnopeus m/h		S ₂₀	SJ	DRI	σ_{pm} MPa ¹⁾	I _s MPa ¹⁾
No	Kivilaji	Osaväleillä	Keski-arvo					
1	Kalkkikivi	3,3 3,0 3,5	3,2	50	20	54	70	4,6
2	Saviliuske	2,9 3,1 3,5	3,2	60	56	70	34	1,1
3	Saviliuske	3,2 3,0 3,3	3,2	54	54	64	36	1,4
4	Diabaasi	2,8	2,8	32	19	36	125	14,5
5	Porf. syeniitti	2,7 3,7	3,2	40	4	37	128	12,2
6	Menaiitti	3,0	3,0	45	43	53		

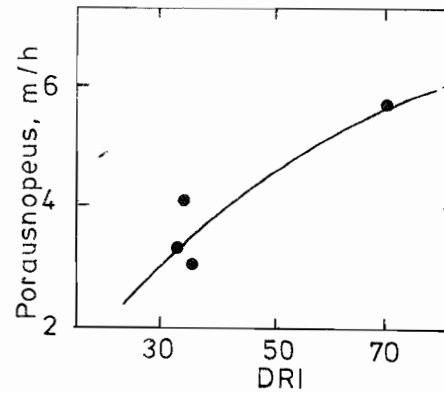
1) Arvot on määritetty vedellä kyllästetyistä näytteistä.



Kuva 81. Franzebråten, Oslo. Porausnopeusindeksien ja DRI-arvojen korrelaatio /3/.

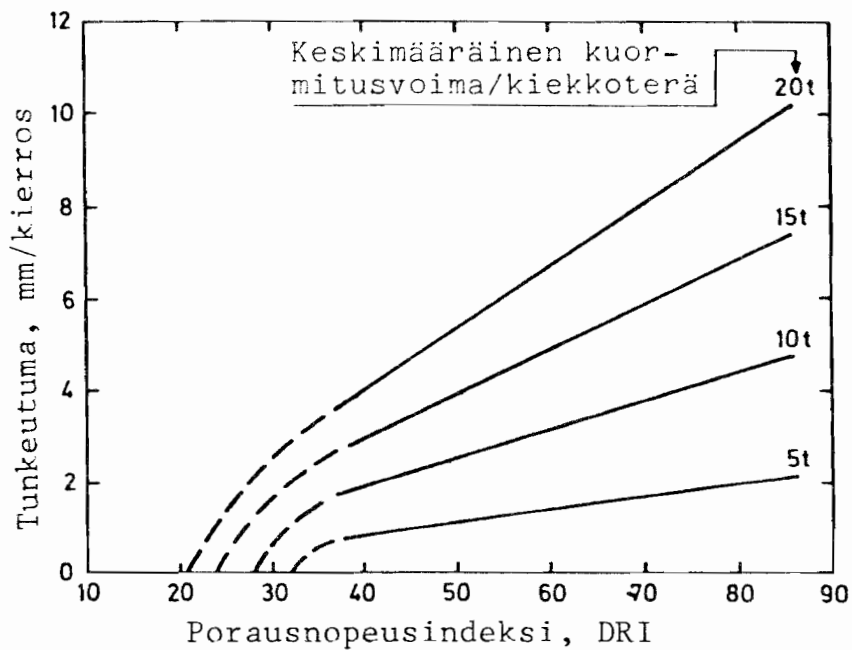
Edellä esitetyn kuvan porausnopeudet näyttävät olevan DRI-vaihteluista täysin riippumattomia. Näissä on porausnopeuksissa mukana kuitenkin seisokit, jolloin porausta ei tapahtunut. Taulukko antaa suuruusluokallisen käsityksen KPL:n porausnopeuksista. Myöhemmin samassa porauskohteessa saatiin kuvassa 82 esitetyt porausnopeudet. Kuvasta voi todeta porausnopeuden lisääntyvän DRI-arvon ja rakotihyden kasvaessa.

Kivilaji	Rakoval- väli (cm)	DRI	Poraus- nopeus m/h
Diabaasi	7,5	36	2,8
Porf. syeniitti	7,5	37	2,7
"	4	37	3,7
Saviliuske	10	70	5,6

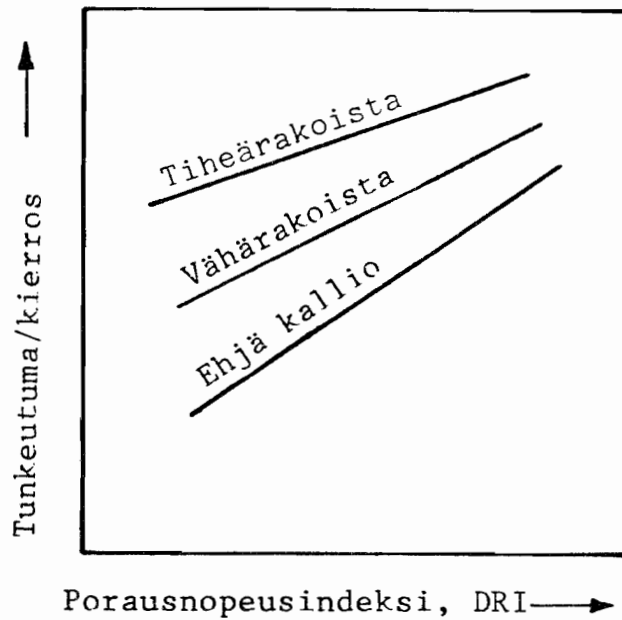


Kuva 82. Franzebråten, Oslo. Kivilajin DRI:n ja rakotiheyden vaikutus porausnopeuteen /3/.

Kuvissa 83 ja 84 on esitetty yhteenveto kiven DRI-arvon vaikutuksesta yhden kiekkoterän tunkeutumiseen eri kuormitusvoimilla sekä DRI-arvon vaikutuksesta porausnopeuteen eri rakotiiheyksissä kalliossa.



Kuva 83. Kiven DRI-arvon ja kuormitusvoiman vaikutus yksittäisen kiekkoterän tunkeutumiseen. Rakoval-
väli on yli 40 cm /4, 53/.



Kuva 84. Kiven DRI:n ja rakotiheyden periaatteellinen vaikutus porausnopeuteen /3/.

Kuvasta 84 nähdään, että voimakkaasti rakoilleessa kivessä on porausnopeus vähän riippuvainen kivilajiominaisuuksista.

Tässä tutkimuksessa määritetyt DRI'-arvot (kts. taulukko 8) vaihtelevat välillä 32 - 54 keskiarvon ollessa 42. Norjalaisten määrittämien eri kivilajien DRI-arvojen vaihteluväli on 19 - 99. Keskiarvo on 49, mikä poikkeaa vain vähän edellämäinitun Helsingin seudun kivilajien keskimääräisestä DRI-arvosta. Kokoprofiilimenetelmällä on porattu tunneleita kivilajeihin, joiden DRI-arvot vaihtelevat välillä 36 - 72 /3, 4, 53/.

Helsingin seudun kallioperä on keskimäärin kohtalaisen rakoillutta ts. laaja-alaisempien rakojen rakotiheys on suuruusluokkaa 0,30 - 0,50 m. Näiden lisäksi on kalliossa vaihtelevissa määrin suppea-alaista rakoilua ja mikrorakoja. Tiheärakoisia (rakoväli alle 0,1 m /37/) rakovyöhykkeitä on Helsingin alueella runsaasti, mutta ne ovat yleensä kapeita. Tihein rakosuunta on lähes poikkeuksetta sama liuskeisuuden suunnan kanssa.

Edellisen perusteella voidaan todeta, että kokoprofiiliporaus on Helsingin olosuhteissa teknisesti ja kohteen mukaan myös taloudellisesti mahdollista.

9.6 Porattavuuden määrittäminen kiven ja kallion fysikaalisten perusominaisuuksien ja geologisten ominaisuuksien sekä sovellettujen menetelmien avulla

Parhaat kiven porattavuutta kuvaavat tulokset laboratorioolosuhteissa saadaan sovelletuilla koemenetelmillä. Kokeet suoritetaan kuitenkin pienillä näytekappaleilla. Usein koemenettely on myös sen verran hankala ja hidas, että suurien näytemäärien käsittely tulee kalliiksi. Kiven perusominaisuuksien määrittäminen esim. pistekuormituskokeella on nopeaa. Jos esim. kalliorakennuskohteesta määritetään porattavuutta sovelletulla laboratoriomenetelmällä, voidaan samanaikaisesti suoritettun laajan pistekuormituskoesarjan perusteella tehdä varmempia johtopäätöksiä porattavuudesta koko alueella. Liittämällä tähän vielä tiedot alueella vallitsevista geologisista olosuhteista saadaan enemmän varmuutta alueen kivilajien porattavuuden arvioimiseen. Tutkimuksissa tarvittavien edustavien näytteiden ottaminen etenkin epähomogeenisista kivilajeista on vaikeaa. Tämän vuoksi on näytteenoton tapahduttava asiantuntevasti.

10. YHTEENVETO

Helsingin alueen kallioperä on osa vanhaa prekambrista Sveko-fenniidien muodostumaa, joka koostuu syväkivialueista, niitä ympäröivistä liuske- ja gneissijaksoista sekä vulkaniittivyöhykkeistä. Vanhimmat kivilajit - gneissit ja kvartsimasälpägneissit - kerrostuivat geosynkliinivaiheessa jo noin 2200 - 1900 Ma sitten. Tähän vaiheeseen liittyi myös alueen vulkanismi. Tämän jälkeen seurasi synkinemaattisten ja myöhäskinemaattisten syväkivilajien - kvartsi- ja granodioriitit sekä mikrokliinigraniitti - intruusioidet. Lopputuloksena eri metasomatoosi- ja metamorfoosivaiheiden jälkeen muodostui kivilajisuhteiltaan hyvin vaihteleva ja seoksinen kallioperä, joka vuosimiljoonien eroosion jälkeen muodostaa kallion pintaosan.

Pintasyntysisistä kivilajeista on eniten kiillegneissejä (noin 34 % kaikista kivilajeista) sekä emäksisiä ja intermediaarisia metavulkaniitteja (noin 15 %). Syväkivistä valtaosa on migmatiittisia graniitteja (noin 29 % kaikista kivilajeista). Kvartsi- ja granodioriitteja on noin 15 %.

Pääkivilajeille tehdyissä laboratoriokokeissa tutkittiin niiden lujuusominaisuuksia porattavuuden kannalta. Tätä ennen oli selvitettävä ne kiven ja kallion fysikaaliset ja geologiset tekijät, jotka vaikuttavat iskuporauksessa ja kokoprofiiliporauksessa. Kokeissa saatujen tulosten perusteella osoittautuivat Helsingin kivilajit lujuusominaisuuksiltaan keskimäärin Suomen kivilajeja lujemmiksi ja porattavuudeltaan keskimäärin pohjoismaisia kivilajeja vaikeammiksi. Määritettyjen porausnopeusindeksien (DRI'-arvot) keskiarvo oli 42, mikä laajan norjalaisen aineiston perusteella on alle keskimääräisen DRI-arvon (49). Huolellisesti määritetyn DRI'-arvon luotettavuus on hyvä.

Lujuus- ja porattavuusominaisuuksien suhteen yhtenäisin kivilajiryhmä oli mikrokliinigraniitit. Vaaleat (granitoidiset)

kivilajit erottuivat tummista (gneissit ja amfiboliitit) kivilajeista heikompien lujuusominaisuuksiensa ja helpompien porattavuuksiensa suhteen. Lujuusominaisuuksiltaan poikkeavin ja porattavuudeltaan hankalin kivilaji oli Vuosaaren metavulkaniitti.

Näytteistä määritettyjen porattavuusindeksien (DRI'-arvot) avulla ja kirjallisuudessa esitettyjen tutkimustulosten perusteella arvioitiin kokoprofiiliporauksen olevan mahdollista esim. Helsingin kallioperää vastaavissa olosuhteissa. Tiheästirakoilleessa kalliossa kivilajiominaisuudet (DRI-arvot) vaikuttavat vähemmän kokoprofiiliporauksen tunkeutumisnopeuteen. Menetelmällä saatavan sepelimäisen louheen arvo on suurempi ja sen käyttömahdollisuudet ovat laajemmat kuin poraamalla ja räjäyttämällä saadulla karkealla louheella.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. AARTOVAARA, G. (1923) Radiumpitoista, voimakkaasti radioaktiivista vettä Helsingissä. Teknill. aikakauslehti, ss. 111-116 (ref. Härme, M., 1980).
2. BAUMANN, L., HENEKE, J. (1981) High pressure water jets aid TBMs. Tunnels & Tunneling Vol.13.1, ss. 21-26.
3. BLINDHEIM, O. T. (1979) Bergartens Borbarhet, Borbarhetsbrognoser for tunnelanlegg. NTH, Trondheim. ISSN 0332-5113, 406 s.
4. BLINDHEIM, O. T., DAHL-JOHANSEN, E. (1979) Ny prognosemodell for indrifter og kostnader ved fullprofilboring av tunneler. Fjellsprengningsteknikk 1979, Norsk jord og fjellteknisk forbund. Tapir 1980, ss. 10.1-10.11.
5. BRANDER, VON G. (1929) Über die Petrographie von Degerö und Sandhamn. Bull. Comm. Géol. Finlande. 85, ss. 47-49.
6. CRONSTRÖM, G. (1937) Undersökning av ett antal diabasgångar i trakten omkring Helsingfors. Käsik. Hgin yliop., Geol. laitos. 27 s.
7. EDELMAN, N. (1949) Structural history of the eastern part of the Gullkrona Basin, SW-Finland. Bull. Comm. Géol. Finlande 148. 48 s.
8. ESKOLA, P. (1941) Erkki Mikkola und der heutige Stand der präkambrischen Geologie in Finnland. Geol. Rundschau 32, ss. 452-483.
9. " (1954) Ein Lamprophyrgang in Helsinki und die Lamprophyrprobleme. Tsch. Min. u. Petr. Mitt., Folge 3, IV, 1-4, ss. 329-337.
10. " (1956) Postmagmatic potash metasomatism of granite. Bull. Comm. Geol. Finlande 172, ss. 85-100.
11. " (1960) Granitentstehung bei Orogenese und Epirogenese. Geol. Rundschau 50, ss. 105-113.
12. FROCHT, M. M. (1948) Photoelasticity. John Wilay & Sons, Inc., New York. Vol 2 (ref. Pajari, J., 1975).
13. GARNER, N. E. (1961) The photoelastic determination of the stress distribution caused by a bit tooth on an indexed surface. MS Thesis. University of Texas (ref. Pajari. J., 1975).

14. GEOLOGINEN TUTKIMUSLAITOS (1979) Kertomus toiminnasta vuonna 1978. 81 s.
15. GRABB, G. J., HIGNETT, H. J. (1980) A laboratory and pilot-scale study on the cutting of chalk containing flints. Tunnels & Tunneling Vol. 12.1, ss. 29-33.
16. GRIFFIN, V. S. Jr. (1979) Diapirism, polydeformation and amoeboidal tectonic patterns in the Svecofennidic area of southwestern Finland. GTL, tutk.rap. 41. 16 s.
17. GRÖNFORS, T. (1969) Kallioporakoneiden ominaisuudet. Rakennustaito 5-6/1969, ss. 151-153.
18. HAKALEHTO, K. (1972) Kallion kokoprofiiliporauksen porattavuus. Kalliotekniikan päivät 1972. Julkaisu B6, VMY, ss. 133-147.
19. HARTMAN, H. L. (1959) Basic studies of percussive drilling. Mining. Eng., 1/1959, ss. 68-75 (ref. Pajari, J., 1975).
20. HELSINGIN GEOTEKNISET KARTAT (1978) Kallioperäkartta. Hgin kaup. geotekn. osasto.
21. HUOPANIEMI, P. (1957) Helsingistä ja siihen liittyvistä kivilajeista Meilahdessa Helsingissä. Pro gradu, Hgin Yliop., Geol. laitos. 70 s.
22. HYYPPÄ, E. (1960) Helsingin seudun geologiaa. Hgin kaupungin julkaisu, 9. 7 s.
23. HÄRME, M. (1954) Kallioperäkartan selitys, lehti 2042, Karkkila. English summary: Explanation to the map of rocks. Suomen geologinen kartta 1:100 000. GTL. Otaniemi. 42 s.
24. " (1958) Examples of the granitization of plutonic rocks. Bull. Comm. Géol. Finlande 180, ss. 45-63.
25. " (1959) Examples of the granization of gneisses. Bull. Comm. Géol. Finlande 184, ss. 41-58.
26. " (1962) An example of anatexis. Bull. Comm. Géol. Finlande 204, ss. 113-125.
27. " (1964) A zoned skarn dike in Silvola, southern Finland. Bull. Comm. Géol. Finlande 218, ss. 99-105.
28. " (1965) On the potassium migmatites of southern Finland. Bull. Comm. Géol. Finlande 219. 43 s.
29. " (1978) Keravan ja Riihimäen kartta-alueiden kallioperä. Summary: Precambrian rocks of the Kerava and Riihimäki map-sheet areas. Suomen geologinen kartta 1:100 000, Kallioperäkartan selitykset, 2043 Kerava, 2044 Riihimäki. GTL. Otaniemi. 51 s.

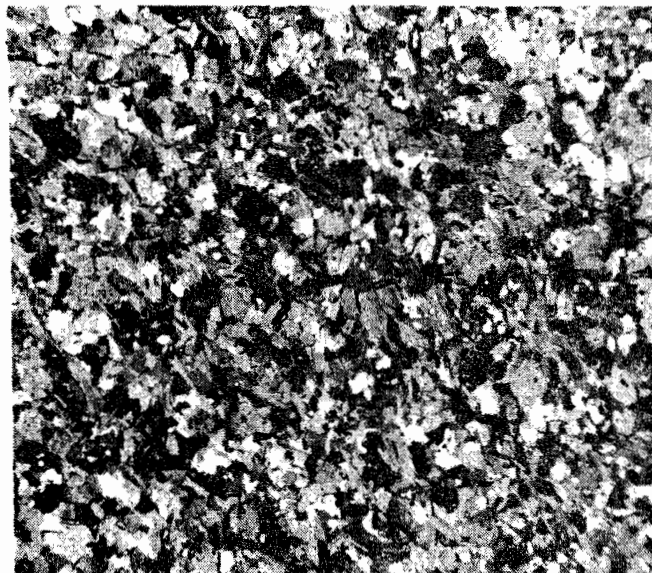
30. HÄRME, M. (1980) Suomen geologinen yleiskartta 1:400 000. Lehti C1-D1 Helsinki. Kallioperäkartan selitys. English summary: Precambrian rocks of the area of the generalgeological Helsinki map-sheet (C1-D1). GTL. Otaniemi. 95 s.
31. HÄRME, M. & LAITALA, M. (1955) An example of granitization. Bull. Comm. Géol. Finlande 168, ss. 95-99.
32. HÖGLUND, K. (1969) Laserstyrd jätteborr anläggertunlar utan sprängning. Särtryck ur Byggnadsindustrin 15. 1969. 5 s.
33. ISRM (1981) Rock stress, rock mechanics and monitoring, ISRM suggested methods. Pergamon Press, London.
34. KAHLOS, H. & ASIKAINEN, M. (1973) Natural radioactivity of ground water in the Helsinki area. Institute of Radiation Physics, Report SFL-A 19 (ref. Härme, M., 1980).
35. KAURANNE, L. K., GARDEMEISTER, R., KORPELA, K. & MÄLKKI, E. (1972) Rakennusgeologia II. TKY. Otaniemi. 530 s.
36. KONTTINEN, L. (1953) Etelä-Suomen peruskallion emäkiset vulkaniitit. Pro gradu, Hgin Yliop. Geol. laitos. 47 s.
37. KORHONEN, K-H., GARDEMEISTER, R., JÄÄSKELÄINEN, H., NIINI, H., VÄHÄSARJA, P. (1974) Rakennusalan kallioluokitus. VTT, Geotekn. lab. tiedonanto 12. 91 s.
38. KORKIALA, L. (1983) Helsingin yleisimpien kivilajien muodonmuutos- ja lujuusominaisuudet. Käsik. TKK, Rak.os. Otaniemi. 26 s.
39. KULOPALO, M. (1946) Pakilan malmilöydöt. GTL. Geotekn. julk. 46, ss. 10-11.
40. LAITAKARI, A. (1918) Einige Albitepidotgesteine von Südfinnland. Bull. Comm. Géol. Finlande 51. 13 s.
41. " (1946) Helsingin ympäristön kallioperän kaivannaiset. GTL, Geotekn. julk. 46, ss. 7-9.
42. " (1949) Ametistikvartsia. Geologi 1, s. 28.
43. LAITI, I. & SARASTE, A. (1959) Selostus Helsingin keskusta-alueen geologisesta rakenteesta. Hgin kaup. esikaupunkiliikenteen suunnittelukomitean mietintö B, 1959, I, ss. 22-26.
44. LINDQVIST, P-A., RÄNMAN, K-E. (1982) Ge fullborrnigen en chans. Väg- och vatten byggaren 3, ss. 58-60.
45. LYYTIKÄINEN, E. (1957) Meilahden leptiittigneissi ja siihen liittyvät kivilajit. Pro gradu. Hgin yliop. Geol. laitos. 41 s.

46. MAARAKENNUSALAN TUTKIMUS- JA SUUNNITTELUOHJEITA (1970)
Osa II laboratoriotutkimukset. Tvh 2.660.
Valtion painatuskeskus, Helsinki. 153 s.
47. MATIKAINEN, R., LAPPALAINEN, P., MIKKOLA, P.,
ROSENLUND, O., SÄRKKÄ, P. & WITH, E. (1981)
Jännitystilamittaukset Suomessa. VMY. Julk.
A 64, Espoo. 109 s. (ref. Särkkä, P. &
Johansson, E., 1982).
48. MELLIS, O. (1932) Zur Genesis des Helsingfors. Geol.
Fören. i Stockholm, Förh. 54, ss. 419-435.
49. MURTOARO, J. O. (1971) Eräiden kivilajien poratta-
vuuskokeiluja erillispyörityskoneella. Tutkinto-
tehtävä, TKK, V-os. Otaniemi. 88 s.
50. OZDEMIR, L., MILLER, R. & WANG, F-D. (1976) Rock-
Cutter Boreability Parameters. Second Annual
Report. Excavation Engineering and Earth
Mechanics Institute. Colorado School of
Mines. 223 s.
51. PAJARI, J. (1975) Kiven käyttäytymisestä iskuporauk-
sessa. Tutkintotehtävä, TKK, V-os. Otaniemi.
129 s.
52. PAUL, B. & SIKARSKIE, D. L. (1965) A Preliminary
Theory of Static Penetration by a Rigid Wedge
into a Brittle Material. Trans. Soc. of
Mining Eng. of AIME, ss. 372-382 (ref. Blind-
heim, O. T., 1979).
53. PROJECT REPORT 8-79 (1979) Drillability. Institutt
for Anleggsdrift, Geologisk Institutt, NTH.
Trondheim. 100 s.
54. RAD, P. F. & McGARRY, F. J. (1970) Thermally Assisted
Cutting of Granite. Proc. 12th Symp. on Rock
Mech. AIME, ss. 721-757 (ref. Blindheim, O. T.,
1979).
55. RAD, P. F., SCHMIDT, R. L. (1973) Tunneling Machine
Research. Development of an Experimental Full-
scale Research Rock Cutting Device. U.S. Bureau
of Mines, Report of Invest. 7787. 18 s.
56. RAUDASMAA, P. (1981) Graniitit ja Etelä-Rastilan
tunneli. Porattavuustutkimus. Hgin kaup.
GEO Tno 2232.3. 2 s.
57. REICHMUTH, D. R. (1963) Correlation of force-dis-
placement data with physical properties of rock
for percussive drilling systems. Proc. 5th Symp.
Rock Mech. Minnesota, ss. 33-59 (ref. Blindheim,
O. T., 1979).
58. RIL 121 (1979) Pohjarakennusohjeet SFS 4315, s. 21

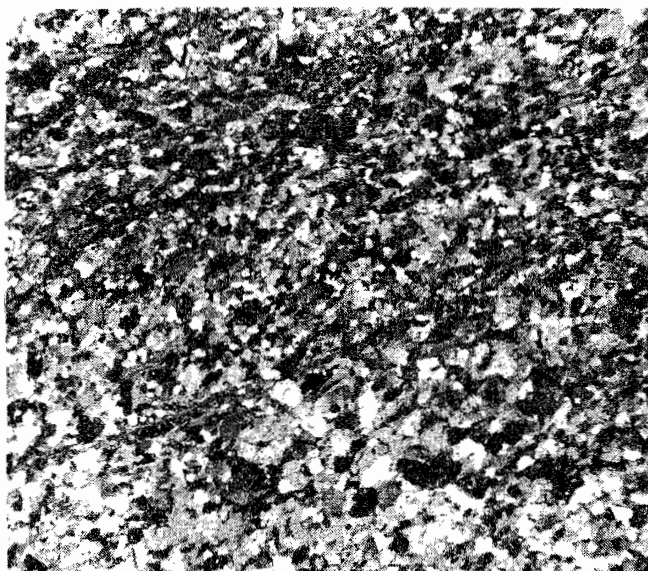
59. SCHUMANN, W. (1973) Kivet ja mineraalit. Otava, Helsinki. 222 s.
60. SEITSAARI, J. (1943) Degerön ja Santahaminan kallio-perä. Pro gradu, Hgin Yliop. Geol. laitos. 56 s.
61. SIMONEN, A. (1980) The Precambrian in Finland. Geol. Surv. Finland, Bull. 304. 58 s.
62. STRECKEISEN, L. (1973) Plutonic rocks. Classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Geotimes 10/1973, ss. 26-30.
63. SUNDQUIST, P. (1982) Kaivoksen avaus ja louhinnan valmistavat työt. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja. Julkaisu B 29, VMY, ss. 321-334.
64. SÄRKKÄ, P., JOHANSSON, E. (1982) Kalliomekaniikka. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja. Julkaisu B 29, VMY, ss. 45-129.
65. TUNNELIN KOKOPÄÄDYN MEKAANINEN PORAUUS KEHITTYÄ Paineilmautiset 3/1981. OY Julius Tallberg Ab, s. 17.
66. TYRVÄINEN, A. (1959) Alppikadun helsinkiläistä ja siihen liittyvistä kivilajeista. Pro gradu, Hgin Yliop. Geol. laitos. 56 s.
67. VANNINEN, M. (1952) Helsingin länsipuoleisen alueen kalliooperästä. Pro gradu, Hgin Yliop. Geol. laitos. 31 s.
68. WEGMANN, C. E. & KRANCK, E. H. (1931) Beiträge zur Kenntnis der Svekofenniden in Finnland. Bull. Comm. Géol. Finlande 89. 107 s.
69. WIJK, G. (1982) Bergmaterials Stampelhållfasthet och Borbarhet. Bergmekanikdag, BeFe. Swedish Rock Mechanics Research Foundation. Stockholm, ss. 61-71.
70. VIRTANEN, P. (1959) Hevossalmen-Stansvikin alueen kalliooperä Laajasalossa. Pro gradu, Hgin Yliop. Geol. laitos. 53 s.
71. ZABLOCKI, A. (1982) Louhintatyöt ja kalusto. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja. Julkaisu B 29, VMY, ss. 203-270.
72. ZINGG, Th. (1935) Beiträge zur Schotteranalyse. Min. Petrog. Mitt. Schweiz. 15. ss. 39-140.

Paikka	Näyte no	Tiheys			Kimmomoduli			Poissonin luku		
		$\gamma (10^3 \text{ kg/m}^3)$	$\bar{\gamma} (10^3 \text{ kg/m}^3)$	$S\gamma (\%)$	$E (\text{GPa})$	$\bar{E} (\text{GPa})$	$SE (\%)$	γ	$\bar{\gamma}$	$S\gamma (\%)$
Munkkisaari	37-1	2,858	2,859	0,06	93,4	99,7	6,04	0,34	0,22	46,60
	-2	2,858			105,4			0,19		
	-3	2,861			100,3			0,14		
	38-1	2,764	2,763	0,02	103,1	103,7	2,41	0,22	0,20	7,51
	-2	2,763			101,5			0,20		
	-3	2,763			106,4			0,19		
	50-1		2,650		75,0	76,3	1,27	0,34	0,37	7,25
	-2				76,6			0,35		
	-3				77,3			0,36		
	-4				76,1			0,40		
Pohjois-Mellunmäki	39-1	2,626	2,624	0,17	71,2	69,1	6,82	0,32	0,26	23,19
	-2	2,628			63,7			0,20		
	-3	2,619			72,4			0,27		
	40-1	2,652	2,649	0,50	51,1	53,2	6,03	0,26	0,23	13,04
	-2	2,634			56,9			0,23		
	-3	2,660			51,6			0,20		
Mustikkamaa	41-1	2,704	2,696	0,50	79,1	79,4	2,16	0,23	0,21	31,71
	-2	2,680			81,2			0,27		
	-3	2,702			77,8			0,14		
	42-1	2,723	2,756	1,27	91,9	85,7	6,73	0,26	0,30	15,93
	-2	2,751			84,7			0,28		
	-3	2,793			80,5			0,35		
Tali	43-1	2,930	2,929	0,36	95,2	97,4	1,96	0,21	0,30	25,23
	-2	2,938			98,5			0,33		
	-3	2,918			98,5			0,35		
	44-1	2,995	2,984	0,63	103,1	103,7	2,41	0,34	0,25	38,00
	-2	2,962			101,5			0,25		
	-3	2,994			106,4			0,15		
	49-1		2,617		64,8	64,7	10,4	0,25	0,27	13,19
	-2				55,8			0,28		
	-3				65,9			0,24		
	-4				72,1			0,32		
Kamppi	45-1	2,635	2,617	0,58	71,4	66,4	8,78	0,22	0,16	30,81
	-2	2,611			60,0			0,13		
	-3	2,607			67,8			0,14		
	46-1	2,625	2,629	0,42	72,0	65,5	8,60	0,27	0,31	11,65
	-2	2,642			62,4			0,34		
	-3	2,621			62,1			0,32		
Viikki	47-1	2,633	2,626	0,42	67,3	65,5	3,54	0,24	0,28	18,90
	-2	2,614			66,4			0,34		
	-3	2,633			62,9			0,26		
Pasila	17-1	2,626	2,627	0,07	71,6	74,2	4,74	0,09	0,19	44,74
	-2	2,629			72,8			0,25		
	-3	2,629			78,2			0,22		
Länsi-Pasila	18-1	2,639	2,637	0,18	78,9	74,8	5,54	0,24	0,28	12,54
	-2	2,633			70,6			0,31		
	-3	2,642			74,9			0,28		
Vuosaari	3-1	2,966	2,961	0,27	78,7	82,2	5,32	0,15	0,16	6,25
	-2	2,966			87,1			0,16		
	-3	2,952			80,8			0,17		

Liitteiden 3-5 kuvien leveys vastaa luonnossa yhtä senttimetriä (1 cm). Suluissa on ilmoitettu nikolien asennot.



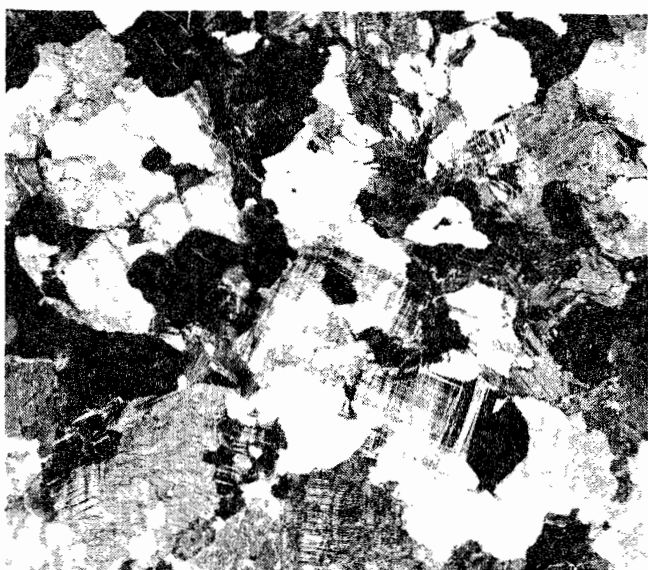
Munkkisaari No 37 (x)



Munkkisaari No 38 (x)



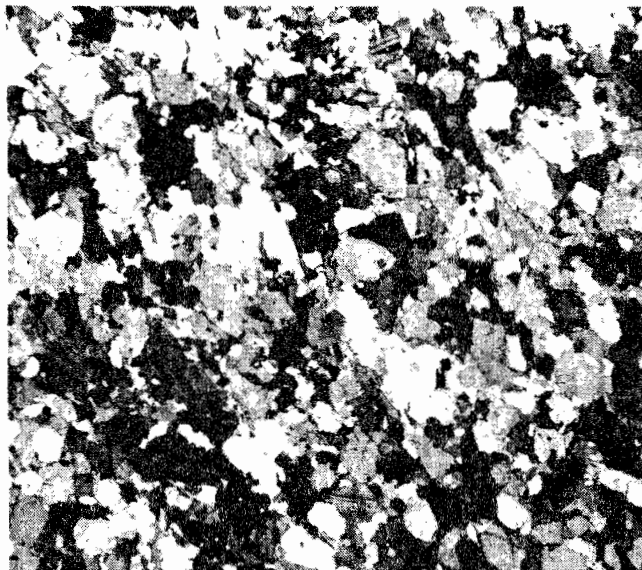
Munkkisaari No 50 (x)



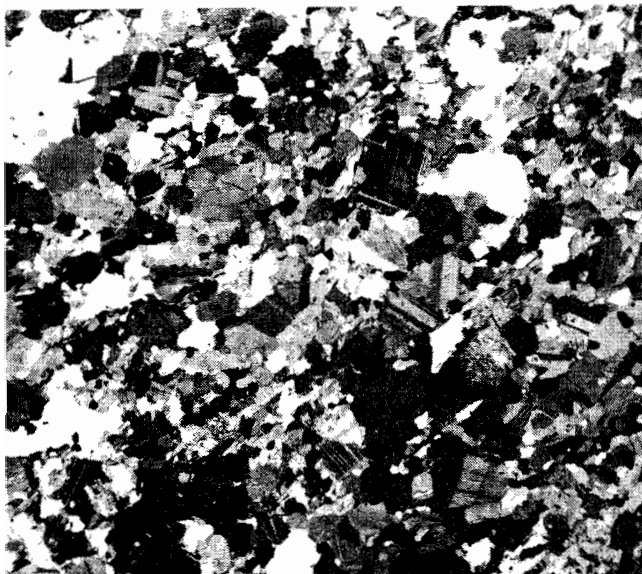
Pohjois-Mellunmäki No 39 (x)



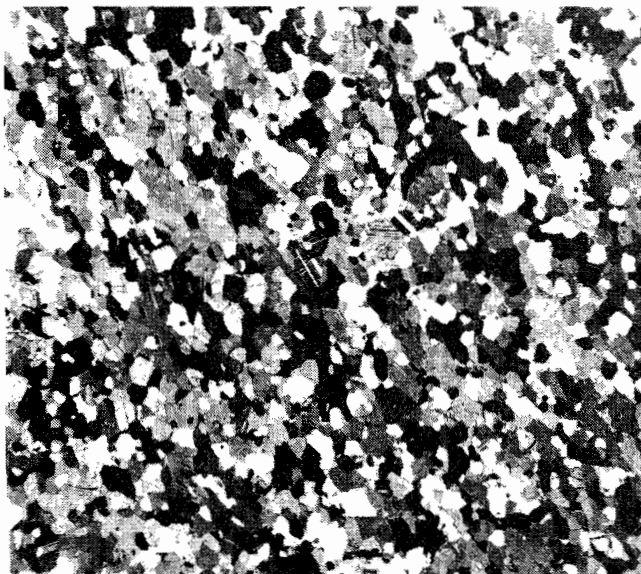
Pohjois-Mellunmäki No 40 (x)



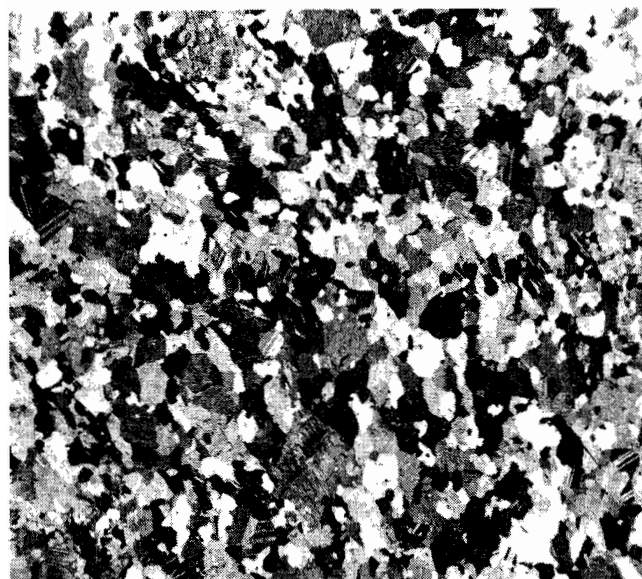
Mustikkamaa No 41 (x)



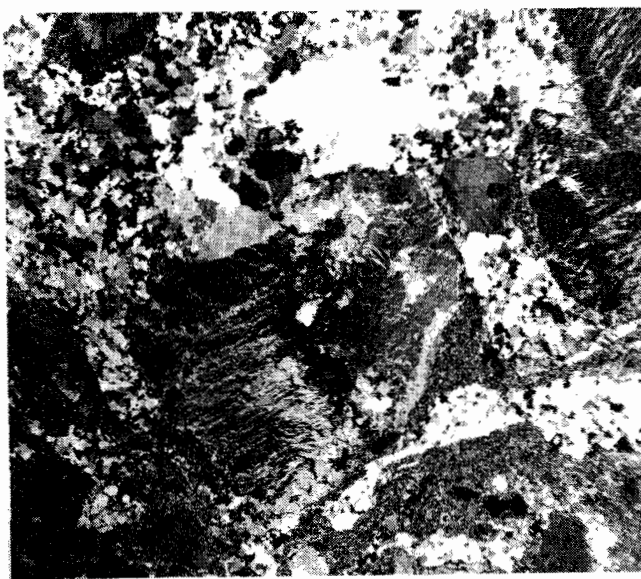
Mustikkamaa No 42 (x)



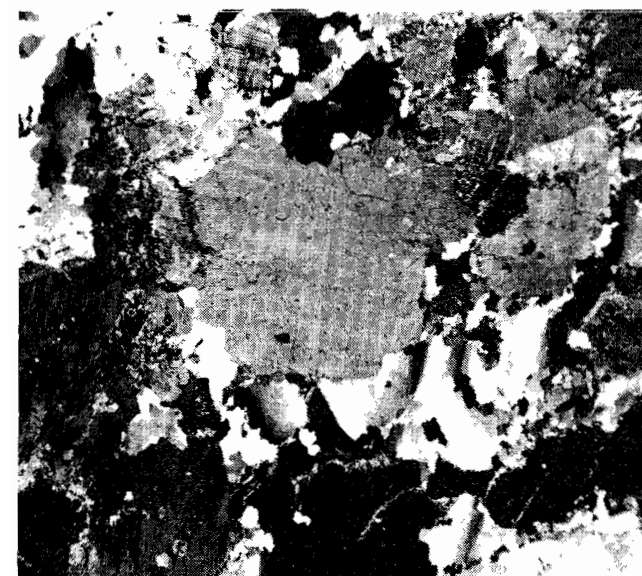
Tali No 43 (x)



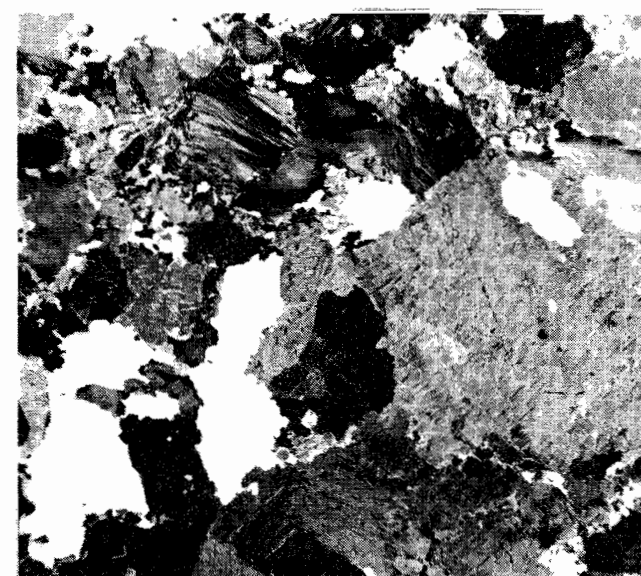
Tali No 44 (x)



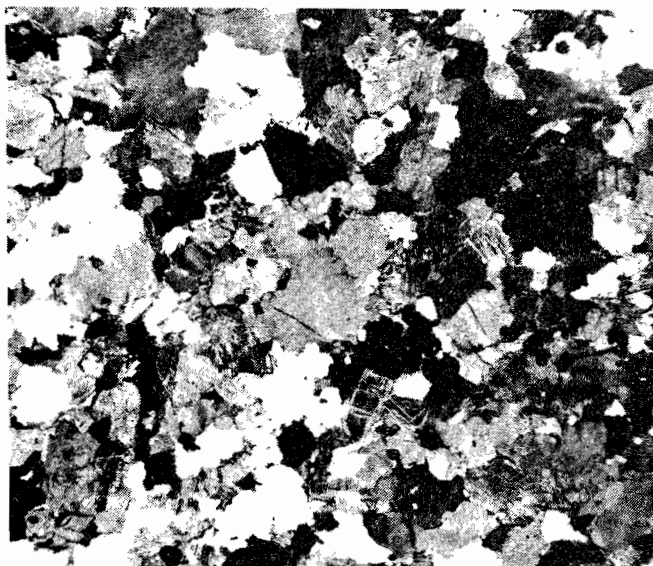
Tali No 49 (x)



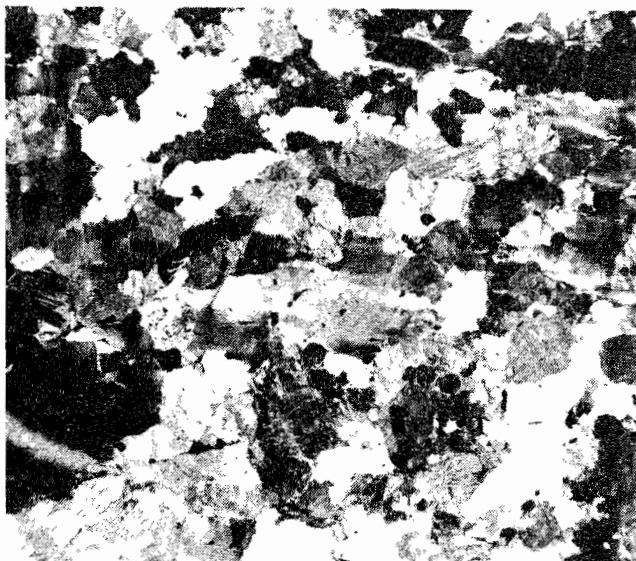
Kamppi No 45 (x)



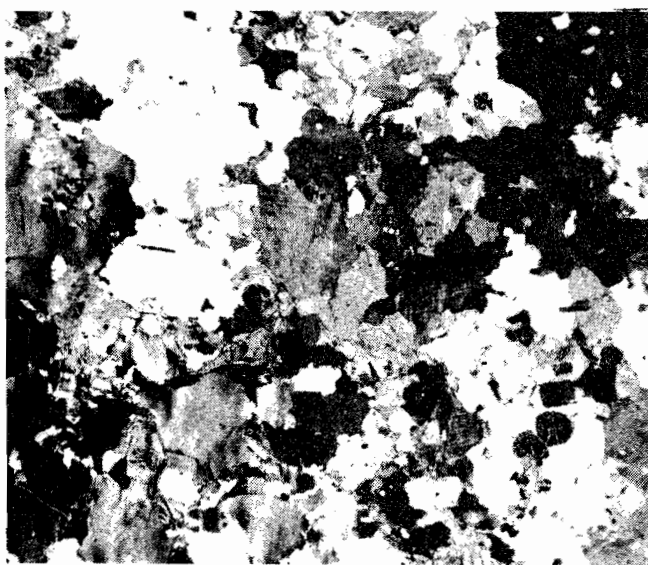
Kamppi No 46 (x)



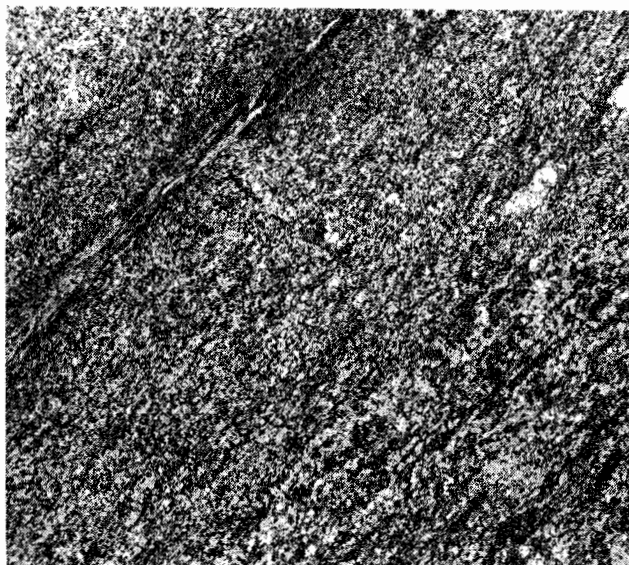
Viikki No 47 (x)



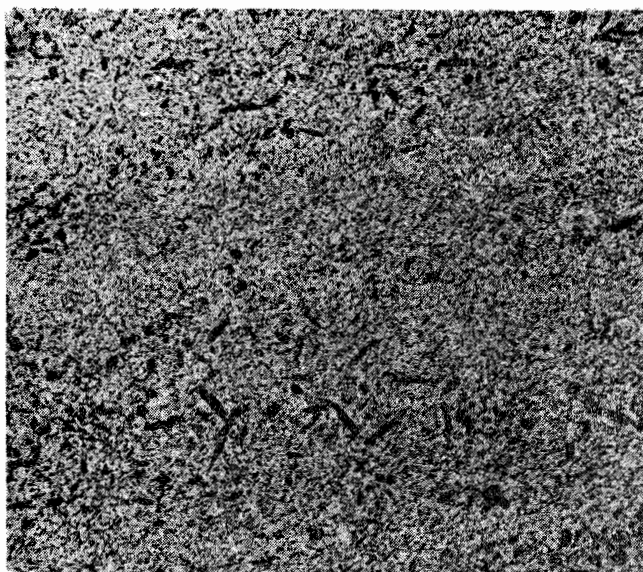
Pasila No 17 (x)



Länsi-Pasila No 18 (x)



Vuosaari No 3 (x)



Vuosaari No 48 (x)

PI	XHKI	YHKI	XVALT	YVALT
1	28165.000	56705.000	6683366.000	559445.000
2	25470.000	59910.000	6680716.000	562687.000
3	21925.000	60015.000	6677173.000	562842.000
4	23130.000	59725.000	6678374.000	562535.000
5	23230.000	59960.000	6678477.000	562769.000
6	18755.000	55600.000	6673942.000	558471.000
7	20110.000	55335.000	6675293.000	558188.000
8	21485.000	55460.000	6676669.000	558293.000
9	23630.000	55940.000	6678821.000	558743.000
10	23940.000	55180.000	6679120.000	557979.000
12	25345.000	53605.000	6680503.000	556385.000
13	26570.000	22640.000	6681297.000	525406.000
14	26510.000	49540.000	6681611.000	552304.000
15	27340.000	46170.000	6682394.000	548923.000
16	25785.000	48610.000	6680874.000	551384.000
17	23505.000	49140.000	6678601.000	551946.000
18	21410.000	48860.000	6676502.000	551695.000
19	22360.000	50950.000	6677481.000	553772.000
20	20690.000	50865.000	6675810.000	553710.000
21	20375.000	52945.000	6675524.000	555794.000
22	20110.000	50420.000	6675224.000	553273.000
23	19080.000	50300.000	6674193.000	553167.000
24	18715.000	50200.000	6673826.000	553072.000
25	18685.000	50210.000	6673796.000	553083.000
26	17545.000	50365.000	6672659.000	553254.000
27	17325.000	46895.000	6672390.000	549787.000
29	19575.000	44510.000	6674607.000	547371.000
30	20660.000	47580.000	6675735.000	550426.000
31	19865.000	47975.000	6674945.000	550832.000
32	27050.000	52495.000	6682193.000	555251.000
33	27035.000	52520.000	6682178.000	555276.000
34	18125.000	48370.000	6673211.000	551251.000
35	18230.000	49380.000	6673330.000	552259.000
36	22550.000	47305.000	6677621.000	550124.000
37	16829.000	49122.000	6671926.000	552021.000
38	16811.000	49032.000	6671906.000	551931.000
39	26230.000	59186.000	6681466.000	561953.000
40	26235.000	59286.000	6681472.000	562053.000
41	19559.000	52212.000	6674698.000	555073.000
42	19612.000	51755.000	6674745.000	554615.000
43	22923.000	46011.000	6677976.000	548825.000
44	22792.000	45900.000	6677843.000	548716.000
45	18207.000	49204.000	6673305.000	552084.000
46	18176.000	49137.000	6673273.000	552017.000
47	24379.000	52586.000	6679523.000	555379.000
48	21935.000	59640.000	6677178.000	562467.000
49	22792.000	45900.000	6677843.000	548716.000
50	16829.000	49122.000	6671926.000	552021.000

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
8. Raudasmaa, P., Metrotunnelien injektointi. 1977. 120,-
9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
11. Arkima, O., Kluuvien ruuhkeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunnelien teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Härmäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallistekniikoiden tunnelien louhintakustannusselvitys. 1982. 50,-
28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 70,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-
31. Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. 1983. 30,-
32. Havukainen, J., Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar. 1983. 30,-
33. Havukainen, J., The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines. 1983. 30,-
34. Salmelainen, J., Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. 1983. 50,-

HELSINGIN KALLIOPERÄKARTTA

