

KALLIORAKENTEIDEN JÄYKKYYDEN MERKITYS SORTUMIEN HALLITSEMISESSA

KALLE HAKALEHTO

Rakenteiden Mekaniikka
6 (1973) 1, s. 3...14,
Rakenteiden Mekaniikan
Seura, Helsinki

YHTEENVETO

Kalliorakenteet, jotka muodostuvat kallion louhinnan yhteydessä, ovat monessa suhteessa muista rakenteista poikkeavia. Eräs merkittävä piirre niissä on usein ilmenevä pienempi tai suurempi rikkonaisuus.

Viime vuosina on eri laboratorioissa tutkittu kiven käyttäytymistä särkyneessä tilassa. Ns. jäykän puristuskoneen kehittäminen teki tutkimukset mahdollisiksi. Oleellinen tekijä särkyneen näytteen (ohi maksimilujuuden kuormitetun) käyttäytymisen tarkastelussa on kuormitussysteemin ja kuormitettavan näytteen jäykkyyksien suhteella. Tästä suhteesta riippuen murtuminen on joko äkillinen, hallitsematon tai vähittäinen, hallittu.

Laboratoriokokeilla hankittua tietoa on sovellettu kalliorakenteisiin. Tässä kirjoituksessa on esimerkkinä kalliopilari. Koko louhintasysteemin ja pilarin jäykkyyksiä on verrattu keskenään. Jäykkyyksien laskemisen on tehnyt mahdolliseksi elementtimenetelmän käyttö.

Jäykkyyksien tunteminen antaa mahdollisuuden hallita murtumistapaa. Tällöin on mahdollista entistä paremmin kontrolloida louhinnan yhteydessä ilmenevää kallioräiskettä ja sortumia. Tämä vaatii ennakkosuunnittelun lisäksi paikalla tapahtuvan tilanteen kehityksen rekisteröinnin.

JOHDANTO

Kalliota louhittaessa muodostuu kalliorakenteita, joiden tarkoitus ja luonne vaihtelevat louhintakohteen mukaan. Louhittaessa pysyviä tiloja ts. säiliöitä, tunneleita jne, joita tullaan käyttämään määräämättömän pituinen aika, rakenteiden merkitys on jossain määrin toinen kuin kaivoksessa, jossa joissain tapauksissa vaaditaan vain lyhyt aika, minkä rakenteen on kestettävä.

On luonnollista, että erilainen käyttötarkoitus ja -aika asettavat erilaisia vaatimuksia rakenteille. Yleensä asetettu vaatimus rakenteen mitoittamiselle on, että sen tulee kestää suurin siihen kohdistunut kuormitus. Useimpien muiden rakenteiden kyseessä ollen tämä vaatimus on riittävä, mutta kalliorakenteita käsiteltäessä suurimman kuormituksen kriteeri ei aina johda mielekkääseen lopputulokseen. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota siihen, että kalliorakente on harvoin täysin särkymätön. Tämä merkitsee sitä, että jossain vaiheessa ainakin paikallisesti kuormitus on ylittänyt kallion lujuuden.

Kalliorakennetta ei myöskään voida käsitellä täysin yksittäisenä rakenteena, vaan se on nähtävä louhintasysteemin osana. Tämä merkitsee, että niin kauan kuin louhintaa suoritetaan, rakenne joutuu jatkuvasti vaihtuvaan kuormitustilanteeseen ja vielä louhinnan jälkeen ajasta riippuvien muutosten alaiseksi.

Kalliorakenteen ja koko louhintasysteemin jäykkyyksien tarkastelu on tuonut mahdollisuuden hallita se tapa, millä kalliorakente murtuu. Tällä on erittäin suuri merkitys vaikeissa louhintatilanteissa, joissa äkillinen, hallitsematon sortuma voi aiheuttaa suuria ja korvaamattomia menetyksiä.

KUORMITUSSYSTEEMIN JA NÄYTTEEN JÄYKKYYS

Laboratoriossa määritetty puristuslujuus on ollut yleisimmin käytetty arvo kiven lujuusominaisuuksia kuvattaessa. Koekappaleen lopullinen murtuminen on tapahtunut useimmissa tapauksissa äkillisesti saavutettaessa maksimilujuutta vastaava kuormituksen arvo tai välittömästi sen jälkeen (kuva 1). Jäykkyyden merkitys kiven murtumisessa tuli huomion kohteeksi vasta joitakin vuosia sitten kun ns. jäykkiä puristuskoneita alettiin kehittää kivinäytekokeita varten [1, 2].

Koska kallio on harvoin täysin yhtenäinen ilman eri tyyppisiä murtumia, heräsi laboratoriokokeita suoritettaessa kiinnostus jo osittain särkyneen kivinäytteen käyttäytymiseen. Kokemuksesta tiedettiin, että esim. kaivoksessa pilari, joka on särkynyt, kantaa vielä tietyn kuormituksen. Särkyneen kivinäytteen käyttäytymistä kuvaa jännitysmuodonmuutoskäyrä maksimilujuuden saavuttamisen jälkeen. Tätä käyrän osaa ei kuitenkaan voitu rekisteröidä konventionaalisissa kokeissa koekappaleen lopullisen murtumisen äkillisyyden takia.

Syy lopullisen murtumisen äkillisyyteen oli kuormitussysteemin ja koekappaleen jäykkyyksien suhteellisessa erossa. Yleisesti käytetty puristuskone koostuu monista eri osista (hydrauliikka, pilarit, levyt, ruuvit jne.), jotka kaikki vaikuttavat koneen ominaisuuksiin. Näistä osista riippuu koneen jäykkyys, jolla on todettu olevan oleellinen merkitys siihen tapaan, jolla puristettavan koe-

kappaleen murtuminen tapahtuu.

Kun määritetään puristuskoneen jäykkyys on otettava huomioon kunkin osan vaikutus, joita käsitellään kimmoisina elementteinä. Kimmoisen elementin jäykkyys määritellään vaikuttavan voiman suhteena vastaavaan voiman suunnassa syntyvään siirtymään. Jos lähdetään kuormittamattomasta tilanteesta, niin

$$k = \frac{F}{U} \quad (1)$$

missä k on jäykkyys

F on vaikuttava voima

U on siirtymä.

Kimmoenergia W , joka on varastoituneena elementtiin voiman F vaikuttaessa on

$$W = \frac{F^2}{2k} \quad (2)$$

Jos kiviäytteen poikkipinta-ala on A , pituus L ja kimmomoduli E , niin sen jäykkyys k_k on

$$k_k = \frac{AE}{L} \quad (3)$$

Puristuskoneen ja kiviäytteen jäykkyyksien vaikutus näytteen murtumistapaan käy ilmi kuvasta 2. Tavallisen, ns. pehmeän puristuskoneen jäykkyys on pienempi kuin koekappaleen, jolloin koneen karakteristinen käyrä AB kuvassa 2a laskee loivemmin kuin koekappaleen karakteristinen käyrä AC . Tällöin koneessa on varastoituneena viivoitettua aluetta vastaava energiamäärä, joka vapautuu äkillisesti koekappaleen murtuessa, kun lujuuden maksimiarvo on saavutettu. Lopullinen murtuminen on tällöin hallitsematon ja murtuminen on usein myös äänekkäs.

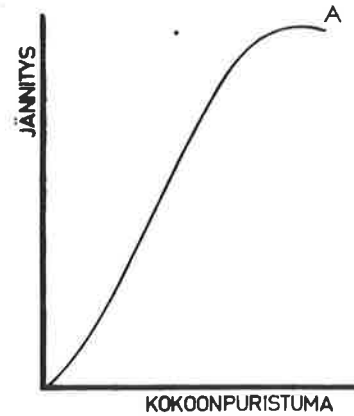
Jäykän koneen karakteristinen käyrä laskee koekappaleen käyrää jyrkemmin (kuva 2b). Pystysuora AD vastaisi äärettömän jäykkää

Kuva 1.

Jännitys-kokoonpuristuma -käyrän tyypillinen muoto kiviäytteelle kuormituksen tapahtuessa konventionaalilla "pehmeällä" puristuskoneella. Piste A vastaa lopullista äkillistä murtumista.

Fig. 1

A typical stress-strain curve for a rock specimen tested in a conventional "soft" testing machine. The final violent failure at the point A.



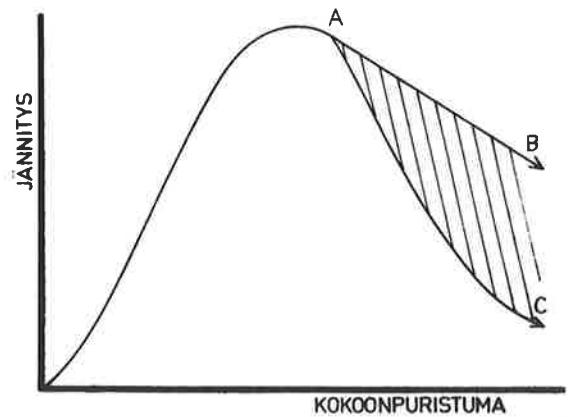
Kuva 2.

Puristuskoneen ja kiviäytteen suhteellisten jäykkyyksien merkitys murtumiseen.

a) Puristuskoneen karakteristinen käyrä, AB, on loivempi kuin kiviäytteen, AC. Tällöin puristuskoneessa on varastoituneena energiaa, joka purkautuu pisteen A jälkeen ja aiheuttaa kiviäytteen äkillisen murtumisessa.

Fig. 2a

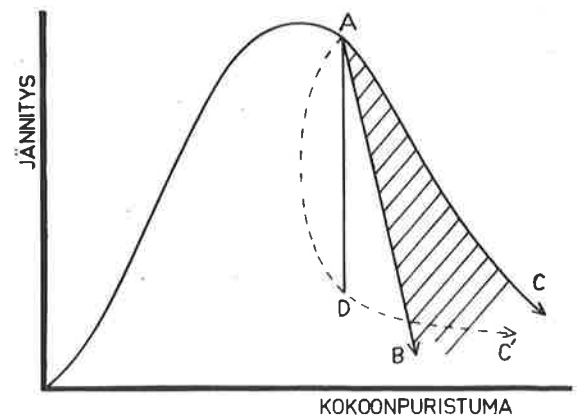
The characteristic curve of the testing machine, AB, is less steep than that of the rock specimen, AC. Energy is stored in the testing system and causes the violent failure of the specimen after the point A.



b) "Jäykän" puristuskoneen karakteristinen käyrä, AB, laskee jyrkemmin kuin kiviäytteen käyrä, AC. Tällöin on mahdollista rekisteröidä käyrä AC, koska kuormitussysteemi kykenee ottamaan vastaan energiaa. Servo-ohjatuilla jäykällä puristuskoneella on pystytty seuraamaan jopa käyrän ADC' mukaista näytteen käyttäytymistä.

Fig. 2b

"Stiff" testing machine has generally a steeper characteristic curve, AB, than that of the rock specimen, AC. In this case it is possible to register the full stress-strain curve for the specimen. It has been possible with a servo controlled stiff testing machine to register even the curve ADC'.



konetta. Jäykkä kone pystyy ottamaan vastaan koekappaleesta vapautuvaa energiaa eikä äkillistä murtumista tapahdu ja murtumistapahtuma pystytään hallitsemaan. Tämä edellyttää konventionaalisesta poikkeavaa puristuskonetta. Jäykissä koneissa on käytetty hyväksi sekä pilarien lämpölaajenemista [1, 2] että servo-ohjausta [3]. Nopeasti toimiva servo-ohjaus on välttämätön jäykimpiä kivinäytteitä puristettaessa, sillä näytteen jäykkyys saattaa olla niin suuri, että näytteen karakteristinen käyrä seuraa kuvassa 2b katkoviivalla merkittyä käyrää AC'.

Jäykällä koneella kivinäytettä voidaan kuormittaa niin, että murtuminen on hallittu ja jännitys-muodonmuutoskäyrä saadaan rekisteröidyksi myös maksimilujuusarvon jälkeen kuormituksen vähentyessä, mutta muodonmuutoksen kasvaessa. Tämä käyrän osa kuvaa särkyneen näytteen käyttäytymistä. Jäykkiä puristuskoneita ja niillä suoritetuja kokeita on käsitelty viime aikoina useissa eri yhteyksissä [1, 2, 3, 4]. Nämä tutkimukset ovat antaneet uutta entistä realistisempaa tietoa kiven ja kallion murtumiskäyttäytymisestä, joka on johtanut huomattavaan edistymiseen myös kalliorakenteiden stabiliteetin selvittämisessä.

LOUHINTAMALLIEN JÄNNITYSTEN MÄÄRITYS

Ennen kuin edellä esitettyä jäykkyyden analysointia voidaan käyttää hyväksi kalliorakenteissa, on pystyttävä määrittämään sekä kalliorakenteen että koko louhintasysteemin jäykkyys. Yksittäisen rakenteen jäykkyys voitaisiin määrittää mittaamalla, mutta laajemman kokonaisuuden kyseessä ollen täytyy löytää jokin muu tapa jäykkyyden määrittämiseksi.

Jäykkyyksien määrittämisessä tarvitaan tieto siirtymistä ja

voimista. Tehokkain tapa näiden selvittämiseksi on viime aikoina voimakkaasti yleistynyt elementtimenetelmän käyttö louhintamallien jännitysten ratkaisemiseksi [5, 6].

Elementtimenetelmää käytettäessä jaetaan tarkasteltava systeemi äärelliseen määrään elementtejä, jotka ajatellaan yhdistetyiksi toisiinsa ainoastaan nurkkapisteistään. Elementteinä käytetään tasoa tarkasteltaessa yleisesti kolmioita, mutta myös nelikulmioita. Elementtitiheys on suurin alueilla, joista halutaan tarkimpia tietoja ja missä muutokset jännityksissä ovat suurimmat. Ainoa oletus, joka tehdään, on, että jokaiselle elementille määrätään siirrosfunktio. Useimmiten käytetään lineaarista siirrosfunktiota, joka merkitsee sitä, että tasot pysyvät tasoina. Elementtimenetelmän antama tulos lähestyy tarkkaa ratkaisua sitä mukaa kuin elementtikoko pienee ja lähestyy pistettä.

Elementtisysteemin nurkkapisteiden tasapainoyhtälöt ovat muotoa

$$\{F\} = [k_n] \times \{U\} \quad (4)$$

jossa $\{F\}$ esittää elementtien nurkkapisteissä vaikuttavia voimia, $\{U\}$ nurkkapisteiden siirtymiä ja $[k_n]$ on $n \times n$ suuruinen jäykkyysmatriisi.

Kun louhittavien tilojen muoto on määrätty ja asianomainen louhintamalli elementtijakoineen tehty sekä kunkin elementin materiaaliominaisuudet määritetty, ratkaistaan yhtälö (4) ottaen huomioon alku- ja reunaehdot kussakin tapauksessa. Reunaehtoina tulee kyseeseen mallin elementtijaon ulkoreunojen nurkkapisteiden siirtymä-, jännitystilanne. Matriisiyhtälön ratkaiseminen vähänkään monimutkaisemmassa tapauksessa vaatii suhteellisen suuren tietokoneen käyttöä. Lasketut lopputulokset voidaan ilmaista esimerkiksi element-

tien nurkkapisteiden jännityksinä ja siirtyminä tai jännityksinä kussakin elementissä.

Elementtimenetelmän käyttöön ottaminen laskettaessa louhintamallin jännityksiä on tehnyt mahdolliseksi käsitellä tapauksia, jotka ovat muilla keinoin olleet mahdottomia ratkaista. Menetelmä sallii minkä tahansa muotoisen louhoksen huomioon ottamisen. Se on lisäksi erittäin joustava siksi, että kullekin elementille voidaan antaa halutut materiaaliominaisuudet ja kussakin elementissä voidaan käyttää haluttua jännityksen ja muodonmuutoksen välistä riippuvuutta.

KALLIORAKENTEEN JÄYKKYYS

Seuraavassa tarkastellaan pilaria kalliorakenteena. Pilarin jäykkyys (k_p) määritellään pilarin kokonaiskuormituksen (F_p) ja sen aiheuttaman keskimääräisen siirtymän (U_p) suhteena

$$k_p = F_p / U_p. \quad (5)$$

Useat tekijät vaikuttavat jännitysten jakautumaan pilarissa ja vain erittäin harvoin se on tasainen. Pilarin jäykkyyttä laskettaessa suoritetaan kuitenkin kuormituksen ja siirtymien tasaus vastaamaan tasaista jakautumaa ja keskimääräistä tilannetta. Pilarin kuormitus ja siirtymät lasketaan pilarin elementtien jännityksistä ja nurkkapisteiden siirtymistä.

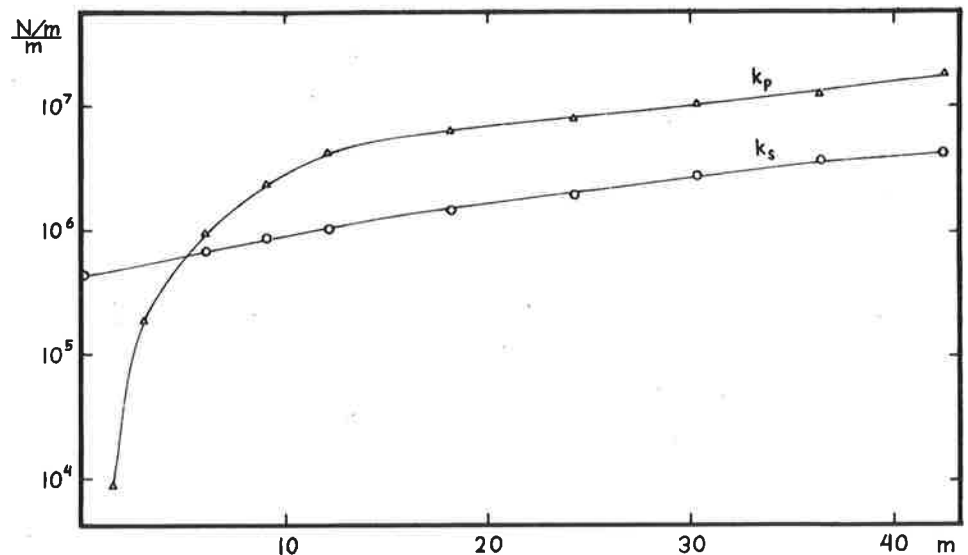
Laskettua pilarin jäykkyyttä joudutaan vertaamaan koko louhintasysteemin jäykkyyteen. Pilarin kuormitus on seurausta louhintasysteemistä, jolla tarkoitetaan sitä kokonaisuutta, joka sisältää alkuperäisen kallion ja siihen louhitut tilat. Mallissa systeemi ulotetaan riittävän etäälle louhittujen tilojen ulkopuolelle niin, että mallin reunoilla vallitsee kallion in-situ tila.

Koska mallin reunoilla oletetaan kallion in-situ tilan aiheuttamat vakiosiertymät, jotka eivät riipu louhittavista rakenteista, voidaan pilaria kuormittavan louhintasysteemin jäykkyys laskea kahden eri tavalla käyttäytyvän pilarin avulla. Kumpikin pilari sijoitetaan vuorotellen samaan malliin ja systeemin jäykkyys (k_s) saadaan yhtälöstä

$$k_s = \frac{F_{p1} - F_{p2}}{U_{p1} - U_{p2}} \quad (6)$$

jossa F_{p1} ja F_{p2} ovat pilarien 1 ja 2 kuormitukset sekä U_{p1} ja U_{p2} kuormituksia vastaavat siirtymät.

Blake [7] on käyttänyt mallissaan pilarina 1 kalliopilaria sekä pilarina 2 hiekkatäytepilaria. Hän on myös laskenut tulokset, jotka esitetään kuvassa 3.



Kuva 3. Pilarin jäykkyys, k_p , ja kuormittavan systeemin jäykkyys, k_s , pilarin paksuuden funktiona erälle louhokselle.

Pillar stiffness, k_p , and loading system stiffness, k_s , as a function of pillar thickness for a stope.

RAKENTEIDEN JÄYKKYYDEN MERKITYS LOUHITTAESSA

Käsiteltäessä laboratoriossa suoritettavia puristuskokeita kävi ilmi kuormitusjärjestelmän ja kuormitettavan rakenteen (näytteen) jäykkyyksien suhteen vaikutus murtumistapaan, joka oli joko äkillinen, hallitsematon tai vähittäinen, hallittu. Samanlaisista jäykkyyksien vaikutusta murtumistapaan voidaan tarkastella käsiteltäessä pilareita ja sitä kuormittavaa järjestelmää.

Kuvassa 3 on eräässä tapauksessa pilarin ja louhintajärjestelmän jäykkyys esitetty pilarin paksuuden funktiona. Niin kauan kuin pilarin jäykkyys on suurempi kuin järjestelmän jäykkyys on odotettavissa pilarin äkillinen osittainen tai täydellinen sortuminen, kun kuormitus saavuttaa kriittisen arvon. Sen sijaan kun järjestelmä on jäykempi kuin pilari, äkillistä sortumista ei ole odotettavissa.

Riippuu suuresti kulloinkin käytettävästä elementtijärjestelmästä kuinka hyvin kallion rakenteelliset ominaisuudet tulevat otetuksi huomioon jäykkyyksien määrittämisessä.

Murtumistavan hallitsemisella voidaan katsoa olevan erityistä merkitystä louhittaessa kaivoksissa. Kaivoksessa äkillinen sortuma voi merkitä katastrofaalista tilannetta, mutta sortuma hallittuna saattaa jopa edistää louhinnan suorittamista. Tästä syystä näissä olosuhteissa kalliorakennetta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon sekä rakenteen lujuus ja kuormitus että rakenteen ja louhintajärjestelmien jäykkyydet. Vain erittäin harvoissa tapauksissa voidaan olettaa kalliorakenteen olevan täysin ehjänä.

Edellä olevan pohjalta määrättyyn kalliorakenteeseen ja sen käyttäytymiseen voidaan vaikuttaa lujuutta lisäämällä, mitä voidaan määrättyissä rajoissa suorittaa erilaisilla lujitusmenetelmillä tai jäykkyyttä pienentämällä, jolloin murtuminen tulee hallituksi. Kun

rakenteen lujuutta pyritään lisäämään, niin yleensä samalla lisätään myös sen jäykkyyttä. Tämä merkitsee sitä, että äkillisen sortuman mahdollisuus kasvaa, jos rakenteen kuormitus ylittää lujuuden. Toisaalta kun rakenteen jäykkyyttä pienennetään, niin yleensä myös lujuutta alennetaan.

Esimerkkinä olosuhteista, missä jäykkyyden alentamisella saat-
taa olla oleellista merkitystä voidaan mainita pois louhittava pila-
ri. Jos pilari joudutaan louhimaan asteettain, pilarin kantava poik-
kipinta-ala pienenee ja jännitys pilarissa kasvaa. Tällöin voidaan
tulla tilanteeseen, jolloin ylitetään pilarin lujuus ja jos pilarin
jäykkyys on liian suuri, sortuma on äkillinen. Sen sijaan jos pila-
rin jäykkyyttä pienennetään, saatetaan tehdä mahdolliseksi pilarin
louhiminen sekä välttää äkillinen sortuma ja mahdolliset siitä joh-
tuvat vaikeudet.

Kalliorakenteen jäykkyyden pienentämiskeinona voidaan käyt-
tää esim. rakenteen osittaista särkemistä räjäyttämällä. Tämä saat-
taa vaikuttaa nurinkuriselta, mutta on osoittautunut määrättyissä
tapauksissa tehokkaaksi keinoksi kallioräiskeen hallinnassa [7].

On luonnollista, että suunnittelu on kontrolloitava louhin-
nan suorituksen aikana. Edellä esitetty jäykkyyksien huomioon otta-
minen luo mahdollisuuden mallin kehittämiseen suunnittelun pohjak-
si, jonka tarkkuutta voidaan tarkkailla työn suorituksen yhteydessä
mittauksilla.

KIRJALLISUUTTA

- 1 Cook, N.G.W., Hojem, J.P.M., A Rigid 50-Ton Compression and
Tension Testing Machine. South African Mech. Eng., 16 (1966),
s. 89...92.
- 2 Wawersik, W.R., Detailed Analysis of Rock Failure in Laboratory

- Compression Tests. Ph.D. Thesis, University of Minnesota. 1968.
- 3 Rummel, F., Fairhurst, C., Determination of the Post-Failure Behavior of Brittle Rock using a Servo-Controlled Testing Machine. *Rock Mechanics*, 2 (1970) 4, s. 189...204.
 - 4 Brady, B.T., Duvall, W.I., Horino, F.G., A Study of the Post-Failure Characteristic of Brittle Rock. *Symp. Int. Soc. Rock Mech. Nancy, Oct. 1971*, paper II-21.
 - 5 Zienkiewicz, O.C., Cheung, Y.K., *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*. McGraw-Hill, New York 1967. 272 s.
 - 6 Goodman, R.E., Taylor, R.L., *Methods of Analysis for Rock Slopes and Abutments*. *Proc. Eighth Symposium on Rock Mechanics, in Failure and Breakage of Rock*, ed. Fairhurst, AIME, 1967. s. 303...320.
 - 7 Blake, W., *Rock Burst Mechanics*. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 67 (1972) 1, s. 60.

Kalle Hakalehto, dosentti, Tampereen teknillinen korkeakoulu.