

KALLION JÄNNITYSTILAN MITTAUSPAIKAN MÄÄRITTÄMINEN JÄNNITYSOPTISEN TUTKIMUKSEN PERUSTEELLA

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 2 No. 4 1969 ss. 174—181; Kustannusosakeyhtiö Rakennustekniikka, Helsinki

K. O. HAKALEHTO — P. J. PULKKINEN

Yleistä

Yhteenveto: Suoritetussa tutkimuksessa on ollut tarkoitus määrittää ne alueet tietyn louhoksen ympärillä, missä jatkuva jännitystilän mittaus olisi edullisinta suorittaa. Mitattavaan jännitystilaan ja erityisesti mitattaviin muutoksiin vaikuttavat sekä vallitsevassa jännityskentässä tapahtuneet muutokset että louhoksessa tapahtuneet, esim. sortumien aiheuttamat, muutokset. Tarkastelun kohteena on n. 30° vertikaalisuunnasta kallistunut louhoksen kattopuoli. Louhos sijaitsee Pyhäsalmen kaivoksessa.

Tutkimus on suoritettu jännitysoptista menetelmää hyväksi käyttäen. Menetelmällä on rajoituksesta huolimatta huomattava merkitys tällaisissa tutkimuksissa. Se on suhteellisen helppokäyttöinen ja halpa ja tapahtumien vaikutusta voidaan helposti ennakoita erilaisin mallein ja kuormitusolosuhtein. Sen heikkous on ei-kimmoisen käyttäytymisen huomiotta jättäminen.

Tutkimus on suoritettu tasotutkimuksena. Louhoksen pituus suunnassa päitä lähestyttäessä näiden vaikutus tulee erikseen ottaa huomioon.

Suoritetujen tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että edullisin paikka mittausten jatkuvalle suorittamiselle on lähellä louhoksen yläpäästä, kuitenkin sellaisella etäisyydellä, että mahdollinen särkynyt vyöhyke ei ulotu mittauskohtaan saakka. Tällaisessa kohdassa jännitystilän muutokset ovat suurimmat sekä vallitsevien jännitysten että louhoksen muodon muuttuessa. Tapahtumien luotettavaa seuraamista varten mittauksia on suoritettava eri etäisyyksillä louhoksesta.

Jännitystilän muutokset ovat kaikissa tapauksissa pienimmät louhoksen keskikohdalla tason $z = 100$ lähistöllä. Tämä alue on jännitysten muutosten mittausten kannalta epäedullinen louhoksen kokonaiskäyttäytymistä selvitettyä.

Koska kallion jännitystilän mittaus on edelleen melko kallista ja kohtaa monia vaikeuksia, mittauspisteet on pyrittävä sijoittamaan mahdollisimman edullisesti, jotta mittaustulokset antaisivat mahdollisimman paljon tietoa niistä tapahtumista, joita halutaan tarkkailla. Esitetty jännitysoptisen menetelmän hyväksikäyttö auttaa jännitystilän mittausten suunnittelussa niin, että mittauspisteet voidaan sijoittaa sekä tekniseltä että taloudelliselta kannalta mahdollisimman edullisesti.

Yhä enenevässä määrin käytännön louhintatekniikassa on ryhdytty käyttämään hyväksi niitä tietoja, joita kalliomekaniikan tutkimus on tuonut esiin kiven ja kallion käyttäytymisestä. Kalliomekaniikan eräänä tehtävänä on pyrkiä selvittämään, millaisia jännitystiloja vallitsee luonnontilaisessa kalliiossa ja syntyy kallioon louhittujen tilojen vaikutuksesta. Kallion jännitystilän määrittämiseksi on olemassa useitakin menetelmiä [1]. Suomessa on ollut käytössä ns. Hast'in menetelmä [2], [3]. Yleispiirteinä menetelmistä voidaan todeta, että ne perustuvat muutoksen mittaamiseen. Mittaustuloksista lasketaan alunperin vallinnut jännitystila.

Useimmissa käytössä olevissa menetelmissä muutos saadaan aikaan irrottamalla mittauskohda kairaamalla ympäröivästä kalliosta. Tätä varten on yleensä kairattava kaksi reikää, joista pienempään, ensiksi kairattuun, sijoitetaan mittausselin. Irroitus kalliosta vallitsevasta jännityskentästä suoritetaan kairaamalla edellisen reiän kanssa yhdensuuntainen suurempiläpimittainen reikä. Mittaamalla pienemmän reiän halkaisijan muutos eri suunnissa voidaan laskea paikalla vallitseva jännitystila, josta usein käytetään nimitystä »absoluuttinen jännitystila». Jos kuitenkin ollaan kiinnostuneita yksinomaan jännitystilän muutoksista, irtikairausta ei silloin tarvitse suorittaa. Tällöin mittausselin sijoitetaan haluttuun kohtaan ja suunnataan halutulla tavalla sekä seurataan mittaustuloksia ajan funktiona. Jatkuvilla mittauksilla on erityinen merkitys louhostilojen tarkkailussa, sillä jännitystilän muutos johtuu joko vallitsevan yleisen kentän jännitystilän muutoksesta tai louhitun tilan muodon muutoksesta.

Pyhäsalmen kaivoksessa on suoritettu joukko jännitystilän mittauksia. Erääksi mittauskohteeksi on valittu pitkäkö louhos,

jonka kaltevan kattopuolen käyttäytymisen on erityisen mielenkiintoista, koska tällaisen katon kyseessä ollessa on aina olemassa vaara, että osa kattoa sortuu louhokseen. Nyt esitettävän tutkimuksen tarkoitus on ollut auttaa jännitystilän mittauspisteiden oikeassa valinnassa, jotta kallion käyttäytymistä louhoksen ympärillä voitaisiin näillä mittauksilla seurata mahdollisimman hyvin.

Tässä tutkimuksessa on käytetty jännitysoptista menetelmää, joka on verraten nopea ja helppokäyttöinen. Sen heikkous kallion käyttäytymistä tutkittaessa on se, että geologisten tekijöiden ja ei-kimmoisen käyttäytymisen huomioon ottaminen on vaikeaa. Jos kuitenkin jännitystilän muutoksen yleiset piirteet ovat tarkasteltavina, jännitysoptinen menetelmä antaa hyvän ensimmäisen aproksimaation. Menetelmän suuri etu on se, että etukäteen voidaan suhteellisen helposti tutkia erilaisten muotojen ja kuormitusolosuhteiden vaikutusta jännitystiloihin suunniteltavien louhosten ympärillä.

Jännitysoptisten kokeiden suoritus

Jännitysoptiikka perustuu siihen, että eräät isotrooppiset aineet jännityksen alaisina tulevat anisotrooppisiksi ja siis kahtaistaitteisiksi. Tätä ilmiötä käytetään hyväksi tarkastelemalla jännitysoptisesta materiaalista tehtyä mallia polarisoidussa valossa.

Jännitysoptista menetelmää on kuvattu useissa eri teoksissa [4], [5], eikä sen yksityiskohtiin ole tarpeellista tässä yhteydessä puuttua.

Tämän tutkimuksen kohteena oli louhoksen vertikaalileikkaus. Tilaa voidaan käsitellä tasojännitystilana, koska louhoksen pituus on riittävän suuri ja päiden vaikutus ulottuu vain niiden välittömään läheisyyteen. Mallina käytettiin levyä, jonka paksuus oli 8 mm ja levyn muut mitat 30 cm x 30 cm. Materiaalina oli Araldit D ja levyn valmistus suoritettiin valamalla. Levyihin tehtiin louhoksia kuvaavat aukot sijoittamalla valun aikana asianomaiselle kohdalle valumuotissa louhoksen poikkileikkausta kuvaava styroksista leikattu kappale.

Levyä kuormitettiin laitteessa, jossa oli mahdollisuus kaksisuuntaiseen puristukseen hydraulisia sylintereitä hyväksi käyttäen. Vaikeinta oli järjestää tasaisesti jakautunut kuormitus siten, ettei reunoille syntynyt pistekuormia. Toinen vaikeus oli se, että levyä oli kuormitettava omassa tasossaan niin, ettei sivulle taipumista päässyt syntymään.

Mallit kuvattiin sekä isoklinien että isokromaattien määrittämiseksi. Käytetty jännitysoptinen laitteisto oli Schneider-Grossflächen-Spannungsprüfer II/400.

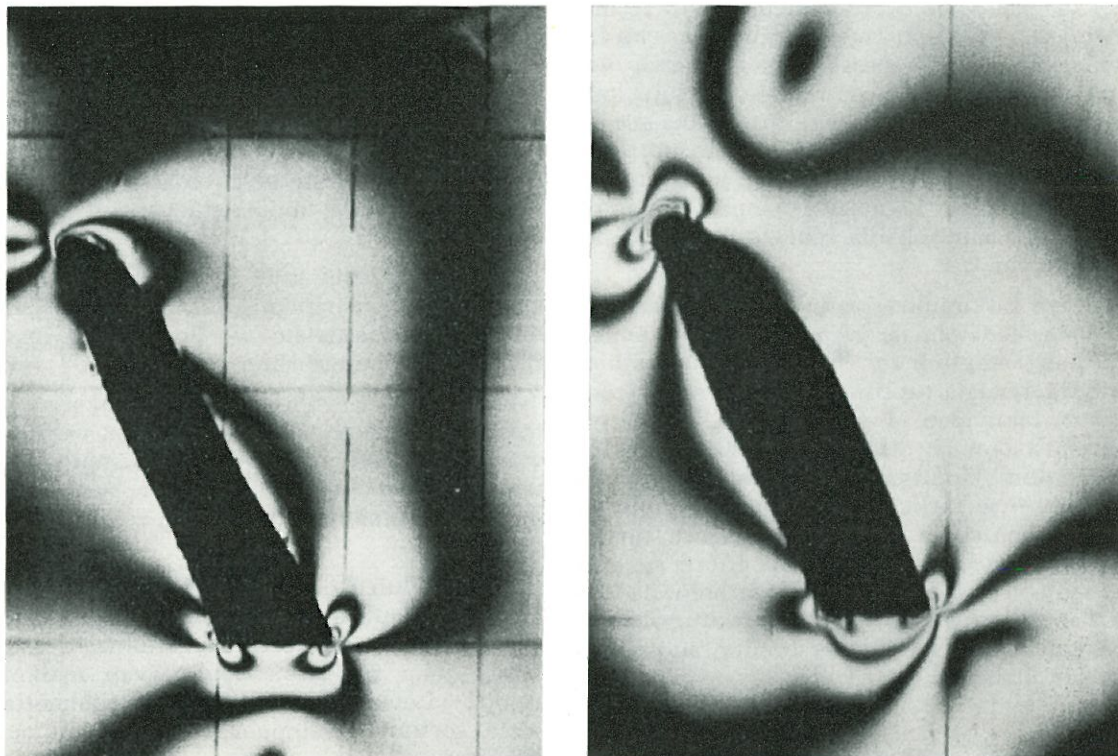
Kokeet suoritettiin eri kuormituksissa ja tässä yhteydessä tulokset esitetään vallitsevien jännitysten (levyn kuormitusten) suhteiden ollessa $\sigma_h/\sigma_v = 1$ ja $\sigma_h/\sigma_v = 2$, jossa σ_h = horisontaalijännitys ja σ_v = vertikaalijännitys.

Tarkastelun kohteeksi valittiin kaksi erimuotoista louhosta. Kapeampi malli kuvaa alkuperäisen suunnitelman mukaista louhosta, joka noudattaa louhittavan malmin rajoja. Leveämpi malli kuvaa tilannetta, jossa sortuma kattopuolella on laajentanut louhosta.

Tulokset

Kuvat 1 ja 2 esittävät isokromaattikuvia. Horisontaali- ja vertikaalijännityksen suhdetta muutettaessa tapauksesta $\sigma_h/\sigma_v = 1$ on siirrytty tapaukseen $\sigma_h/\sigma_v = 2$ siten, että horisontaalijännitys on nostettu kaksinkertaiseksi vertikaalijännityksen pysyessä muuttumattomana.

Kuvissa 3 ja 4 on esitetty sekä jännitystilat louhosten pinnalla että suurimmat leikkausjännitykset linjoilla, jotka ovat 10 m ja 30 m etäisyyksillä alkuperäisen louhoksen kattopuolen keskiosasta. Arvot on ilmaistu suhteellisina arvoina vallitsevaan horisontaalijännitykseen verrattuna. Tällöin on syytä ottaa huomioon, että tapauksessa $\sigma_h/\sigma_v = 2$ suhteellinen arvo, joka on sama kuin tapauksessa $\sigma_h/\sigma_v = 1$ vastaa kaksinkertaista absoluuttista arvoa, kun σ_v pysyy muuttumattomana.



Kuva 1. Isokromaattit alkuperäisen ja laajentuneen louhoksen ympärillä, kun $\sigma_h/\sigma_v = 1$.

Fig. 1. Isocromatics around the original and the enlarged opening, $\sigma_h/\sigma_v = 1$.

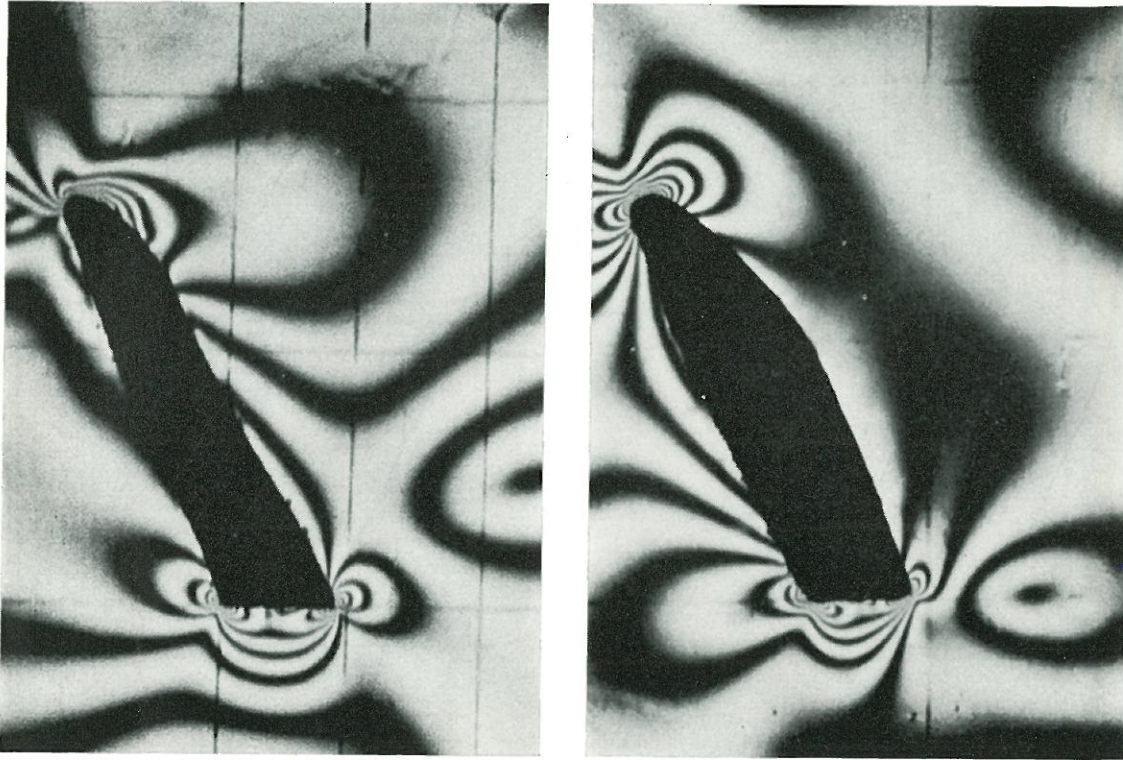
Kuvaan 5 on piirretty jännitystrajektorit louhosten välittömässä ympäristössä. Esitetäväksi on otettu tapaus $\sigma_h/\sigma_v = 2$, koska erityinen mielenkiinto tutkimuksessa kohdistuu jännitysten muutoksiin, jotka aiheuttavat louhoksen muodon muuttumisesta.

Tarkastelemme ensin kuormitussuhteen vaikutusta. Kummassakin kuormitustapauksessa pääjännitykset pysyvät louhoksen pinnalla puristuksena (kalliomekaniikassa positiivisina), kun jännitykset σ_h ja σ_v ovat puristusta. Tapauksessa $\sigma_h/\sigma_v = 2$ lähestytään kuitenkin arvoa nolla alkuperäisen louhoksen kattopuolen keskiosan alapuolella. On mahdollista, että vielä lisäämällä horisontaalijännitystä syntyy vetojännityksiä melko laajallekin kattopuolen alueelle. Koska tämän tutkimuksen tarkoitus on edullisten jännitystilän mittauspisteiden selvittäminen, niin laajempi selvitys kattopuolen vetojänni-

tyksistä ei toisi oleellista lisää tutkimuksen päämäärää varten.

Louhosten pinnalla, missä vapaata pintaa vastaan kohtisuora pääjännitys on nolla, saavutetaan pinnan tangentin suuntaisen jännityksen huippu louhoksen yläpäässä. Alaspäin edettäessä tapahtuu nopea lasku ja jännityksen tasaantuminen. Suurimmassa osassa kattopuolta vallitsee melko tasainen jännitys, kunnes lähellä alakulmaa jännitys alkaa jälleen nousta. Alakulman jännityshuipun suuruus riippuu oleellisesti kulman muodosta.

Jos tarkastelemme absoluuttisten jännitysten muutoksia, niin vertikaalijännityksen pysyessä muuttumattomana suurin jännitys louhoksen yläpäässä on muuttunut n. 1,75 kertaiseksi alkuperäisestä, kun vallitseva horisontaalijännitys on kaksinkertaistunut. Koska jännityksen absoluuttiset arvot ovat



Kuva 2. Isokromaatit alkuperäisen ja laajentuneen louhoksen ympärillä, kun $\sigma_h/\sigma_v = 2$.

Fig. 2. Isocromatics around the original and the enlarged opening, $\sigma_h/\sigma_v = 2$.

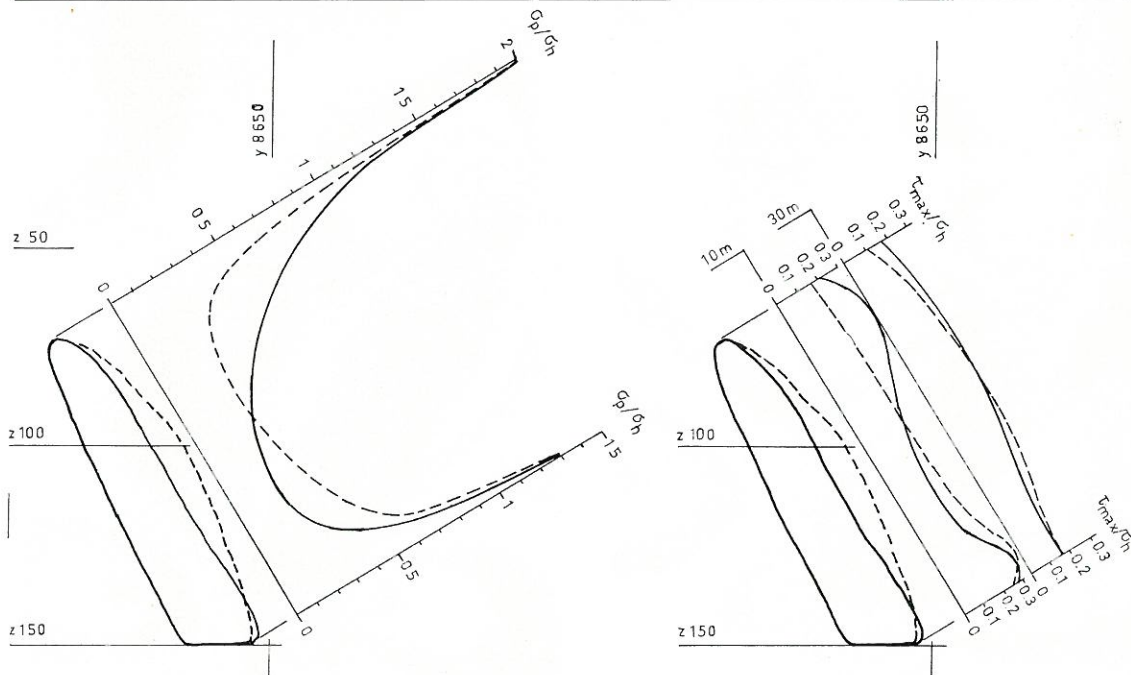
korkeita juuri yläpäässä, tämä merkitsee huomattavaa jännityksen arvon muuttamista. Tason $z = 100$ kohdalla on alkuperäisen louhoksen muodon antamista käyristä todettavissa, että jännityksen absoluuttinen arvo on muuttunut n. 1,3 kertaiseksi vallitsevan horisontaalijännityksen kaksinkertaisuudessa. Koska alkuperäiset absoluuttiset arvot ovat tällä kohdalla pieniä, muutosten absoluuttiset arvot ovat myös pieniä.

Myös leikkausjännitysten muutokset kuormitussuhteen muuttuessa ovat suhteellisesti suurimmat lähellä louhosten yläosaa. Tämä koskee molempia tarkasteltavia etäisyyksiä louhoksesta.

Louhoksen muodon muutoksen vaikutus louhoksen pinnan jännityksiin nähdään selvästi täyden viivan ja katkoviivan eroista kuvissa 3 ja 4. Jos vallitsevassa jännityskentässä ei tapahdu muutoksia eli σ_h/σ_v py-

syy vakiona, niin muodon muuttuminen aiheuttaa suurimmat muutokset lähellä louhoksen yläosaa. Sen sijaan tason $z = 100$ kohdalla muutokset ovat vähäisiä, mutta lisääntyvät alaosaan lähestyttäessä.

Jos tarkastelemme kohtaa, joka on louhoksen pinnalla 5 m louhoksen huipusta akselin suunnassa, niin laajentuneessa louhoksessa jännitys on n. 0,6 kertaa alkuperäisessä louhoksessa vallinnut jännitys. Sen sijaan tason $z = 100$ kohdalla jännitys laajentuneessa louhoksessa on n. 0,9 kertaa alkuperäinen jännitys. Kun vielä otetaan huomioon, että jännitysten absoluuttiset arvot ovat huomattavasti suuremmat louhoksen yläpään lähellä kuin keskiosassa, niin yläosassa tapahtuvan muutoksen merkitys tulee ilmeiseksi. Lähellä alakulmaa tapahtuvat muutokset ovat siinä määrin terävän kulman muodosta riippuvia, että niiden



Kuva 3. Louhoksen kattopuolen jännityssuhteet σ_p/σ_h pinnalla ja τ_{max}/σ_h 10 m:n ja 30 m:n etäisyydellä louhoksesta. Yhtenäinen viiva edustaa alkuperäistä louhoksesta ja katkoviiva laajentunutta louhoksesta, $\sigma_h/\sigma_v = 1$.

Fig. 3. Stress ratios σ_p/σ_h on the surface of the hanging wall and τ_{max}/σ_h at the distances of 10 m and 30 m from the opening. The original opening, full line; the enlarged opening, broken line. $\sigma_h/\sigma_v = 1$.

hyväksi käyttäminen louhoksen kokonaismuotoa tarkasteltaessa on epävarmempaa kuin pyörityneemmässä yläosassa tapahtuvien muutosten.

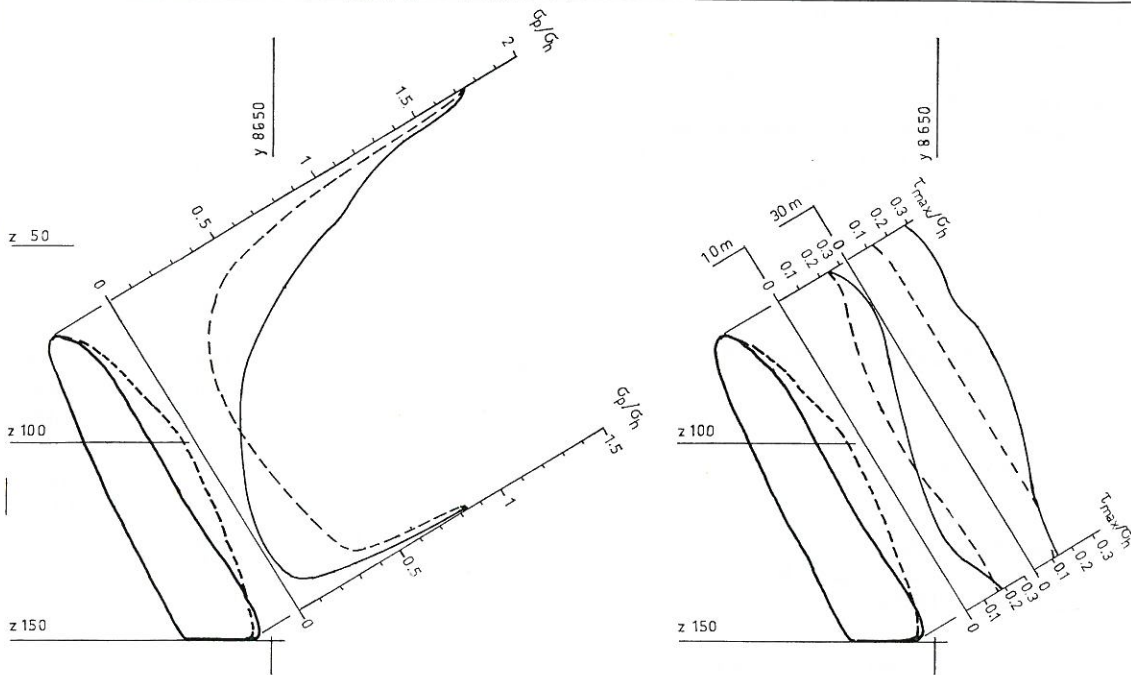
Jännitystrajektoreiden (kuva 5) antamista pääjännitysten suunnista ilmenee, että oleellisia suunnanmuutoksia ei muodon muuttuessa tapahdu. Niiden suunnanmuutosten varmistaminen, jotka ovat havaittavissa, vaatisivat huomattavasti perusteellisemmat detaljikokeet. Pääsuuntien pienet muutokset on vaikea määrittää kalliosta suoritetuista mittauksista niin, että niitä voitaisiin luotettavasti käyttää hyväksi tilanteen tulkinnaassa.

Leikkausjännitysten muutokset louhoksen muodon muuttuessa ovat eri etäisyyksillä selvimmän havaittavissa kohdissa, jotka ovat

louhoksen akselisuunnassa louhoksen yläosassa.

Jännitystilän mittausta paikan määrittäminen

Kun saatuja tuloksia pyritään käyttämään hyväksi asettamaamme tarkoitusta varten eli edullisten jännitystilän mittausta paikkojen määrittämiseen, niin on otettava huomioon, miten jännitystila muuttuu edettäessä louhoksesta kiinteään kallioon. Käsittelemisämme tapauksissa saavutetaan suurin ja pienin pääjännityksen arvo louhoksen pinnalla. Pinnasta ulospäin edettäessä pääjännitykset muuttuvat siten, että ne riittävän kaukana ovat jännitysten σ_v ja σ_h suuruiset ja suuntaiset. Oltaessa louhoksen lähellä lou-



Kuva 4. Louhoksen kattopuolen jännityssuhteet σ_p/σ_h pinnalla ja τ_{max}/σ_h 10 m:n ja 30 m:n etäisyydellä louhoksesta. Yhtenäinen viiva edustaa alkuperäistä louhosta ja katkoviiva laajentunutta louhosta, $\sigma_h/\sigma_v = 2$.

Fig. 4. Stress ratios σ_p/σ_h on the surface of the hanging wall and τ_{max}/σ_h at the distances of 10 m and 30 m from the opening. The original opening, full line; the enlarged opening, broken line. $\sigma_h/\sigma_v = 2$.

hoksen muodolla on voimakas vaikutus jännitystilaan ja vaikutus heikkenee ulospäin edettäessä.

Toisaalta on myös otettava huomioon tapoilla jännitystilaa mitataan. Kun nimenomaan lähemme siitä, että paikalla on tarkoitus suorittaa jatkuvia mittauksia, niin on kaksi lähtökohdatilannetta. Joko määritetään ensin absoluuttinen jännitystila ko. paikalla ja jätetään sen jälkeen jatkuvatoiminen mittari paikalle tai mitataan yksinomaan muutoksia tietystä hetkestä alkaen ilman, että määritetään ensin absoluuttinen jännitystila. Jatkuvatoimisessa mittauksessa muutos voidaan mitata yhdestä reiästä joko yhdessä suunnassa tai kolmessa suunnassa. Kolmisuuntaisessa mittauksessa jatkuva jän-

nitystila voidaan määrittää reikää vastaan kohtisuorassa tasossa.

Edullisimman yhdessä suunnassa tapahtuvan mittauksen suunnan valintaa varten tarkastellaan tasojännitystilassa tapahtuvaa pyöreän reiän säteen muutoksen riippuvuutta pääjännityksistä. Jos

a = reiän säde

u_r = säteen muutos

E = materiaalin kimmomoduuli

S_1 = suurempi pääjännitys

S_2 = pienempi pääjännitys

θ = kulma u_r :n ja S_1 :n suuntien välillä niin [5 s. 108]

$$u_r = \frac{a}{E} [(S_1 + S_2) + 2(S_1 - S_2) \cos 2\theta] \quad (1)$$

Vastaavassa tasomuodonmuutostilan yhtälössä esiintyy vakiokerroin $(1 - \nu^2)$, jossa ν = Poisson'in luku, yhtälön muuten pysyessä muuttumattomana.

Tarkastellaan yhtälön (1) pohjalta kolmea tapausta. Ensiksi anturi mittaa S_1 :n suunnassa, jolloin $\theta = 0^\circ$ ja $\cos 2\theta = 1$. Tällöin tasojännitystilassa

$$u_r = \frac{a}{E}(3S_1 - S_2) \quad (2)$$

Toiseksi mittaus suoritetaan S_2 :n suunnassa, jolloin $\theta = 90^\circ$ ja $\cos 2\theta = -1$. Tällöin

$$u_r = \frac{a}{E}(3S_2 - S_1) \quad (3)$$

Kolmanneksi anturi on S_1 :n ja S_2 :n suuntien puolittajan suunnassa, jolloin $\theta = 45^\circ$ ja $\cos 2\theta = 0$. Tällöin

$$u_r = \frac{a}{E}(S_1 + S_2) \quad (4)$$

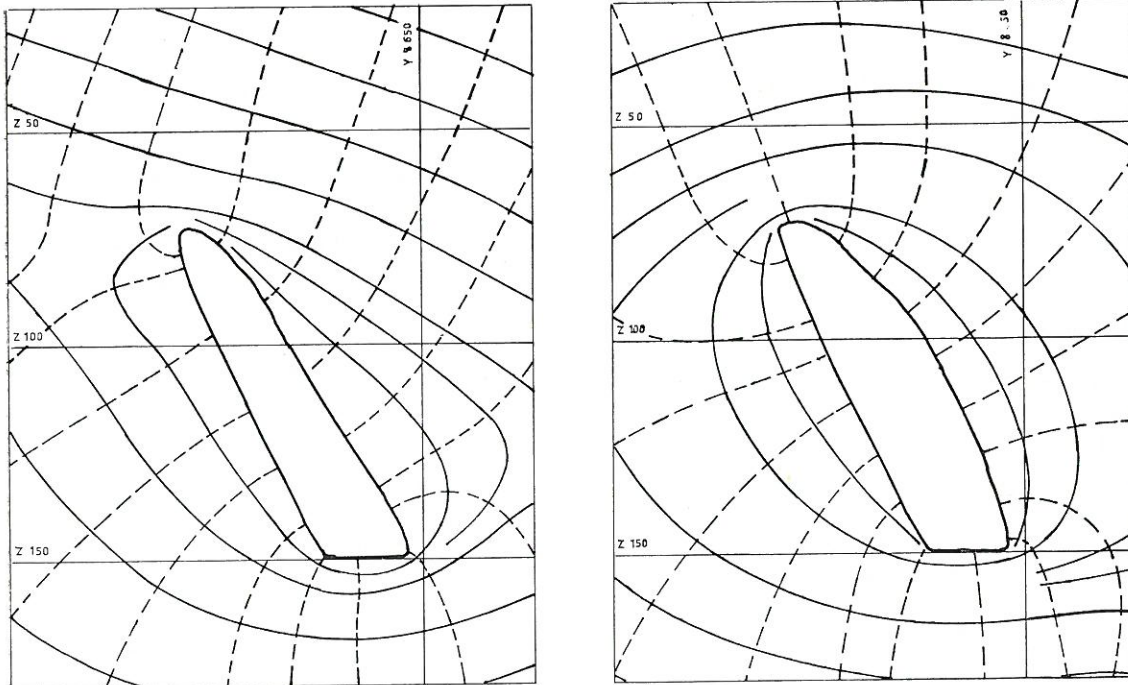
Yhtälöistä 2, 3 ja 4 voidaan päätellä, että jatkuvatoiminen yksisuuntainen mittaus riippuu suuresti siitä suunnasta, mihin anturi sijoitetaan. Edullisen suunnan määrittäminen vaatisi tietoja pääjännitysten muutosten keskinäisistä suuruuksista. Yksisuuntaisessa mittauksessa ei luonnollistakaan voida todeta pääjännitysten suunnan muutoksia. Kolmisuuntainen mittaus ei ole riippuvainen anturien suuntaamisesta, kuten yksisuuntainen mittaus. Se on siten ehdottomasti varmempi tapa seurata jännitystilän muutoksia.

Suoritettujen jännitysoptisten kokeiden perusteella voidaan määrittää kohdat, joissa jännitystilän mittaus on edullisinta suorittaa eli missä jännitystilassa tapahtuvat muutokset ovat herkimmin indikoitavissa.

Kuva 5. Jännitystrajektorit alkuperäisen ja laajentuneen louhoksen ympärillä, $\sigma_h/\sigma_v = 2$.

Fig. 5. Stress trajectories around the original and the enlarged opening, $\sigma_h/\sigma_v = 2$.

JÄNNITYSTRAJEKTORIT



Toteamme ensimmäiseksi jännitystilän muutoksen mittauksen kannalta epäedullisimman kohdan, jossa muutokset jännityksissä ovat pienimmät. Tämä kohta on sama sekä vaikuttavan kentän muutosten että louhoksen muodon muutoksen tapahtuessa. Pienimmän muutoksen alue sijaitsee louhoksen keskikohdalla tason $z=100$ ympäristössä. Tällä alueella oleva mittari voi jättää havaitsematta louhoksen muodossa tapahtuneet muutokset. Toisin sanoen kattopuolelta saattaa sortua huomattavia alueita ilman, että $z=100$ alueelle sijoitetut mittarit rekisteröivät jännitystilän muutoksen.

Lähellä louhoksen alaosaa on alue, jossa muutoksia tapahtuu huomattavasti enemmän kuin louhoksen keskiosassa. Täällä on kuitenkin otettava huomioon kulman suuri vaikutus. Pienet muutokset terävässä kulmassa louhoksen pohjalla vaikuttavat voimakkaasti jännityksiin kulman lähistöllä. Tällöin kokonaisuuden kannalta epäoleellinen tapahtuma antaa saman indikaation kuin suuri kokonaistapahtuma. Siitä syystä alaosan lähetyvillä suoritettavat mittaukset eivät yksin anna luotettavaa kuvaa muutoksesta.

Selvästi edullisin alue jännitystilän muutosten seuraamiselle on lähellä louhoksen yläosaa. Täällä jännitysten reagointi vallitsevien jännitysten muutoksiin ja louhoksen muodon muutoksiin on voimakkainta. Jos halutaan saada varmuus siitä, kumpi tekijä muutoksen aiheuttaa, on syytä suorittaa mittauksia eri etäisyyksillä louhoksesta. Eri etäisyyksille sijoitetut mittauspisteet antavat myös mahdollisuuden ilmiöiden laajuuden tarkempaan selvittämiseen.

Lähimmäksi louhosta sijoitettu mittaus-

piste on herkin muutoksille. Se ei kuitenkaan saa olla niin lähellä, että mittaus tapahtuu louhosta mahdollisesti ympäröivässä särkyneessä vyöhykkeessä. Tällainen vyöhyke saattaa esiintyä erityisesti päiden ympäristössä. Särkynyt vyöhyke vaikuttaa luonnollisesti myös lähetyvillä vallitsevaan jännitystilaan, mutta ei muuta yleispiirteistä edullisimman mittausta paikan määrittelyä.

Suoritettu jännitysoptinen tarkastelu ei ota huomioon mainitun särkyneen vyöhykkeen vaikutusta. Se ei myöskään puutu geologisten tekijäin vaikutukseen. Tästä johtuen suoritettua analyysiä on pidettävä yleisluontoisena, joka vaatii tuekseen paikallisen geologian selvittämisen lopullisia ratkaisuja tehtäessä. Huolimatta yleisestä luonteestaan (tai ehkä juuri siitä johtuen) suoritettua tarkastelua voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi esitettyyn tarkoitukseen jo sellaisessa vaiheessa, jolloin louhoksen suunnittelu suoritetaan.

Kirjallisuutta

1. *Jaeger, J. C., Cook, N. G. W.*, Fundamentals of Rock Mechanics, Methuen & Co, London 1969.
2. *Hast, N.*, The Measurement of Rock Pressure in Mines, Sveriges Geologiska Undersökning Nr. 560, Stockholm, 1958.
3. *Matikainen, R.*, Kallion jännitystilamittausten soveltaminen louhinnan suunnitteluun ja valvontaan, Lisensiaattityö, TKK, 1967.
4. *Frocht, M. M.*, Photoelasticity, John Wiley & Sons, New York, Vol. 1 1941, Vol. 2. 1948.
5. *Obert, L., Duvall, W. I.*, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley & Sons, New York, 1967.

K. O. Hakalehto, tekn.tri, TKK vuoriteollisuusosasto, Otaniemi

P. J. Pulkkinen, tekn.yo., TKK vuoriteollisuusosasto, Otaniemi