

YDINJÄTTEEN LOPPUSIJOITUSTILAN JÄNNITYSANALYYSI

Heikki Noro

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 13
No. 3 1980 s. 1...9

YHTEENVETO: Kirjoituksessa esitetään tunnelimaisen kalliosijoitustilan materiaasesti epälineaarinen jännitysanalyysi. Laskelmat on suoritettu elementtimenetelmällä tasomuodonmuutostilassa käyttäen 8-solmuista isoparametrasta elementtiä. Materiaalimallina on lineaarinen Mohr-Coulombin myötöehtofunktio, jossa on kaksi parametria: materiaalin koheesio ja kitkakulma. Kuormituksina ovat kallion oma paino ja jääkaudelta peräisin olevat jäännösjännitykset, sekä jätteen jälkilämmön aiheuttama lämpökuorma. Laskelmien ensisijaisena tarkoituksena on ollut selvittää materiaaliparametrien ja lämpökuorman vaikutus myötäneen alueen suuruuteen. Tämän jälkeen on esitetty edellytykset, joiden voimassa ollessa suoritettua jännitysanalyysiä voidaan soveltaa myös käytännön olosuhteissa.

JOHDANTO

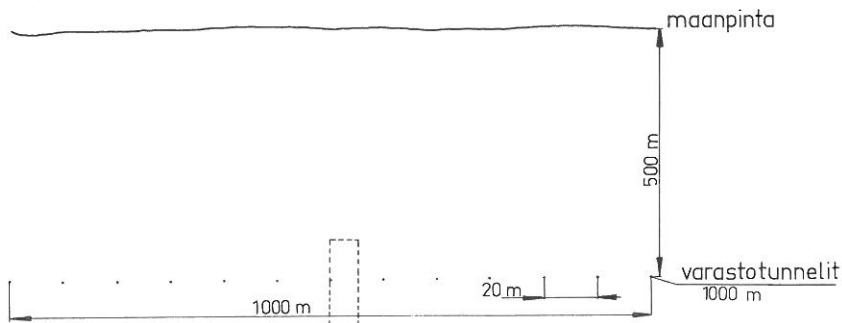
Korkea-aktiivisen, lämpökehittävän ydinjätteen loppusijoitusta ei ole vielä ratkaistu riittävän luotettavasti. Kokonaan loppusijoituksesta luopuminen, jolloin jäte hävitettäisiin tai kuljetettaisiin pois maapallolta, on käytännössä vielä toteutumatta tai ainakin liian kallista. Tällä hetkellä resurssit keskitetäänkin jätteiden sijoittamiseksi maapallolle siten, että ne saadaan eristetyisi biosfääristä mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti. Jo nyt on matala-aktiivista jätettä sijoitettu vanhoihin suolakaivoksiin. Lisäksi lähinnä taloudellisten näkökohtien takia on ajateltu sopivia merensyvänteitä ja napajäätiköitä sijoitusalueiksi. Näissä vaihtoehtoissa on radioaktiivisten päästöjen mahdollisuus kuitenkin selvästi olemassa, joten ainakin korkea-aktiivisen jätteen lopulliseksi sijoitusvaihtoehdoksi jää nykyisten näkymien mukaan varastoimien maankuoren geologisiin muodostumiin (kallio, suolamuodostelmat).

Skandinavian alueella geologiselle sijoituksen ainoa vaihtoehto on kallioperä, joka täyttääkin suurelta osin loppusijoitusvarastoinnin vaatimukset: kallioperä on stabiili, esimerkiksi suuret maanjäristykset ovat hyvin epätoennäköisiä ja kallioperässä on riittävän suuria yhtenäisiä ehjiä alueita. Asiaan liittyvien riittämättömästi selvitettyjen seikkojen vuoksi säädettiin Ruotsin valtiopäivillä huhtikuussa 1977 laki, jossa esitettiin mm., että uusia ydinvoimaloita ei saa käynnistää ennen kuin käytetyn polttoaineen jatkokäsittely pystytään osoittamaan voitavan suorittaa täysin turvallisesti.

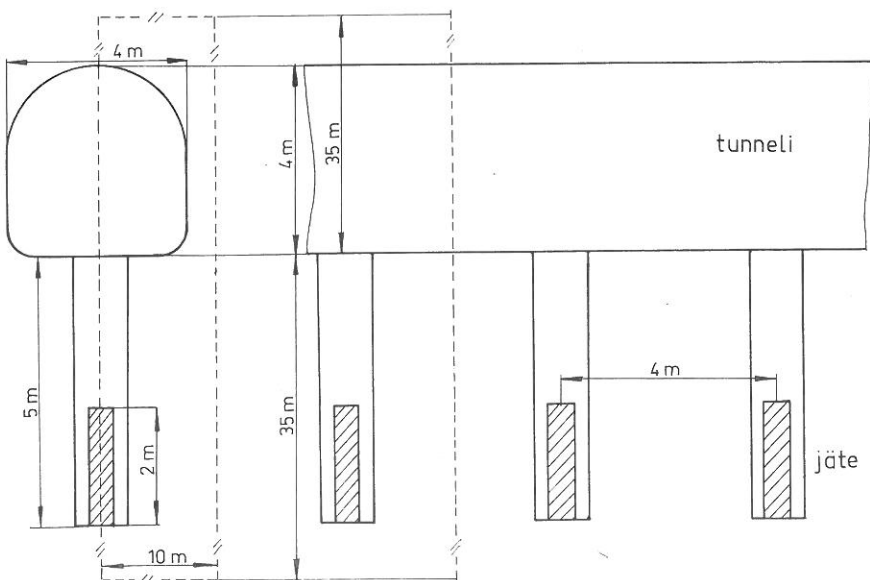
Tämän seurauksena syntyi ns. KBS (KärnbränsleSäkerhet)-raportti, joka käsittelee lähinnä juuri korkea-aktiivisen lasitetun jätteen lopullista sijoittamista kallioperään. KBS-raportti on myös perustana tälle tutkimukselle.

SIJOITUSTILA

Lopullinen sijoituspaikka asetetaan riittävän syvälle ehjään peruskallion osaan, jolloin mahdollisesti vapautuvien radioaktiivisten nuklidien kulureitti biosfääriin vaikeutuu. Samalla jääkauden seurauksena syntynyt rikkonainen pintavyöhyke ei pääse vaikuttamaan haitallisesti. Sijoittamalla jäte hyvin syvälle ei kuitenkaan saavuteta olennaista etua; pikemminkin päinvastoin, sillä kallion paineesta voi seurata tarpeetonta halkeilua sijoitustunnelien ympäristössä. Näiden periaatteiden mukaan saadaan kuvan 1 mukainen sijoitustila [1].



Kuva 1. Kalliosijoitustila



Kuva 2. Sijoitustunnelin pitkittäis- ja poikittäisleikkaukset

Tällaisen sijoitustilan yksityiskohdat, ilmastointi, jätteiden kuljetus jne. on selostettu lähteessä [2]. Sijoitustunnelin ja -reikien rakenne ja mitat selviävät kuvasta 2.

Jäte sijoitetaan väliaikaisvarastoinnin jälkeen (esim 20 v) erikokoisiin kapseleihin suljettuna kuvassa 2 näkyviin sijoitusreikiin. Lämmönkehityksensä riippuen voidaan reikien etäisyyttä muuttaa (nyt 4 m) ja siten saada aikaan haluttu kokonaislämpökuormitus.

KUORMITUKSET

Ehjässä, homogeenisessa ja stabiilissa kalliossa vaikuttaa syvyydellä h vertikaalipaine

$$P_1 = \rho gh, \quad (1)$$

missä ρ on kallion tiheys g on vetovoiman kiihtyvyys. Horisontaalipaineelle P_2 saadaan otaksuen tasomuodonmuutostilan lauseke

$$P_2 = \frac{\nu}{1-\nu} P_1 = K P_1, \quad (2)$$

missä Poissonin luvuksi ν tulee lähteen [3] mukaan keskimäärin arvo 0,25 (0,1...0,29) eli $K = 1/3$. Vertikaalipaineelle saatu lauseke näyttää pätevän eri mittausten mukaan melko hyvin, kun taas horisontaalipaineen kohdalla on tilanne nimenomaan Skandinavian peruskalliossa sellainen, että kerroin K vaihtelee rajojen 0,2 ja 4 välissä (lähteet [4] ja [5]). Vaihtelu on todella suuri, sillä esimerkiksi hydrostaattinen painejakautuma vastaisi vain arvoa $K = 1$ ($\nu = 0.5$). Varsinkin suuret arvot selittyvät lähteen [4] mukaan seuraavasti. Jääkauden aikaista jääkuorta vastaava horisontaalipaineen liissäys vaikuttaa yhä vieläkin (vaakasuoja jäännösjännitys), joten kerroin K voi olla jopa suurempi kuin yksi. Tälle kokonaiskertoimelle on voimassa

$$K = K_K + \frac{\rho_1 H_1 (K_K - K_0)}{\rho H}, \quad (3)$$

missä

$$0,2 < K_K < 1,$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \text{ (aikaisemmin } K),$$

ρ_1 ja ρ ovat jään ja kallion tiheydet,

H_1 on jääkerroksen paksuus,

H on syvyys kalliopinnan alapuolella.

Kun $\rho_1 = 950 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.25$, $H = 500 \text{ m}$, $H_1 = 3000 \text{ m}$ ja

$K_K = 1$, saadaan $K = 2,4$, eli siis $p_2 = 2,4 p_1$. Saatu arvo vastaa myös koe-
tuloksia, joten vertikaali- ja horisontaalipaineina voidaan käyttää edelli-
sen mukaisesti seuraavia arvoja: $p_1 = \rho gh$ ja $p_2 = 2,0 \cdot p_1$.

Kun em. jännityskenttää muutetaan esimerkiksi louhimalla kallioperään
tunneli, syntyy - materiaalin käyttäytyessä epälineaaraisesti - loughintajär-
jestyksestä riippuva uusi jännityskenttä. Tässä tutkimuksessa ei ole kuiten-
kaan selvitetty loughintajärjestyksen vaikutusta jännitysjakautuman kehittymi-
seen, vaan em. painekuormitukset kasvatetaan askelittain täyteen arvoonsa
laskentamallin reunoilla. Tämä menetelmä kuvaa periaatteessa tunnelin lou-
hintaa tavalla, joka häiritsee alkuperäistä jännityskenttää mahdollisimman
vähän. Loughintajärjestyksen vaikutusta tutkittaessa joudutaan suorittamaan
hyvin todennäköisesti 3-dimensioinen jännitysanalyysi, jota on kuvattu mm.
lähteessä [6].

Valmiiksi loughittuun jätetunneliin vaikuttavat kuormitukset voidaan jakaa
kahteen ryhmään: Jo ennen jätteen sijoittamista vaikuttavat kuormitukset ja
vasta jätteen sijoittamista lähtien vaikuttavat kuormitukset. Ensimmäiseen
ryhmään kuuluu juuri aiemmin mainittu painekuormitus ja jälkimmäiseen jätteen
jälkilämmöstä aiheutuva lämpökuorma. Näiden lisäksi ovat mahdollisia myös
satunnaisesti esiintyvät kuormitukset, kuten maanjäristykset, meteorit jne.,
joihin ei kuitenkaan tässä yhteydessä puututa. Em. jälkilämmön synnyttämä
muuttuva lämpötilakenttä on laskettu differenssimenetelmällä käyttäen suora-
viivaista verkkoa. Kallion lämpöominaisuudet ja jätteen lämmönkehitys ovat
tässä tapauksessa sellaiset, että laskennan seuranta-ajaksi riittää n. 40
vuotta. Lämpölaskuissa on materiaaliominaisuuksien oletettu olevan lämpöti-
lasta ja muodonmuutoksista riippumattomia.

TUNNELIN JÄNNITYSANALYYSI

Materiaalimalli

Kallion mekaanista käyttäytymistä on kuvattu lineaarisella Mohr-Coulombin
myötöfunktioilla. Yleinen käytäntö on ollut sellainen, että materiaalissa,
jossa sisäisellä kitkalla on merkitystä, katsotaan rikkoutumisen tai myötä-
misen tapahtuvan, kun pienin ja suurin pääjännitys (lasketaan kuten tasojän-
nitystilassa) saavuttavat tietyn myötökriteerin mukaiset arvot. Kallion on
myös todettu olevan tällainen kitkamateriaali, jolle voidaan käyttää kuvan 3
mukaista myötökriteeriä.

Myötöpinnan yhtälöksi saadaan

$$\tau = c - \sigma \tan \phi,$$

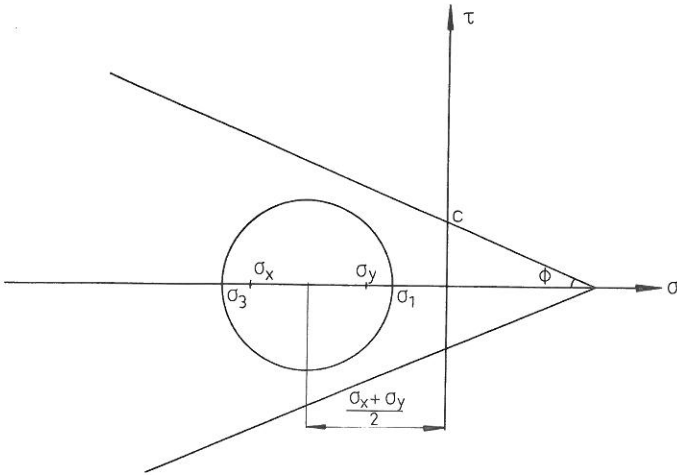
(4)

missä

τ on leikkausjännitys,

c on materiaalin koheesio (leikkauslujuus),

σ on normaali-jännitys (positiivinen vedon vallitessa),
 ϕ on kitkakulma ($\tan\phi = \text{kitkakerroin}$)



Kuva 3. Lineaarinen Mohr-Coulombin myötöehto

Myötämistä tapahtuu silloin kun σ_2 ja σ_3 ovat sellaiset, että kuvassa 3 esitetty ympyrä ei mahdu myötöpinnan sisälle, eli kun

$$\sigma_1 \geq \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}\sigma_3 + \frac{2\cos\phi}{1+\sin\phi}c. \quad (5)$$

Muussa tapauksessa materiaali käyttäytyy kimmoisesti. Koska usein tulee kuitenkin kysymykseen 3-dimensioinen tai ainakin tasomuodonmuutostilan mukainen analyysi, ei kuvan 3 mukainen 2-dimensioinen (tasojännitystilä) myötöehto ehkä anna tarpeeksi luotettavaa kuvaa materiaalin käyttäytymisestä. Tämän takia joudutaan ottamaan huomioon myös keskimäinen pääjännitys, joka voi tapahtua mm. seuraavasti. Tutkittavan pisteen jännitystilän kolme deviaatiojännitysinvarianttia ovat [6]:

$$J_1 = \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z), \quad (6)$$

$$J_2 = \bar{\sigma}^2 = \frac{1}{2}(S_x^2 + S_y^2 + S_z^2) + \sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2, \quad (7)$$

$$J_3 = S_x S_y S_z + 2\sigma_{xy}\sigma_{yz}\sigma_{zx} - S_x\sigma_{yz}^2 - S_y\sigma_{xz}^2 - S_z\sigma_{xy}^2, \quad (8)$$

missä

$$S_x = \sigma_x - \sigma_m, \quad S_y = \sigma_y - \sigma_m, \quad S_z = \sigma_z - \sigma_m. \quad (9)$$

Deviaatiojännitysten pääjännitykset ovat yhtälön $S^3 - J_2 S - J_3 = 0$ juuret. Ratkaisua ei saada kuitenkaan suoraan, vaan joudutaan ottamaan käyttöön muut-

tuja θ_0 (Lode-kulma), joksi saadaan tiettyjen trigonometrinen operaatioiden jälkeen [6]

$$-\frac{\pi}{6} \leq \theta_0 = \frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\bar{\sigma}^3}\right) \leq \frac{\pi}{6} \quad (10)$$

ja invariantit ovat siis σ_m , $\bar{\sigma}$, θ_0 . Näistä seuraa pääjännityksille arvot

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \begin{Bmatrix} \sin(\theta_0 + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin\theta_0 \\ \sin(\theta_0 + \frac{4}{3}\pi) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_m \\ \sigma_m \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

Kuvan 3 avulla saadaan tulos

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\bar{\sigma}\cos\phi - (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi. \quad (12)$$

Sijoittamalla tähän äsken saadut σ_1 :n ja σ_3 :n lausekkeet seuraa

$$F = \sigma_m \sin\phi + \bar{\sigma} \cos\theta_0 - \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \sin\theta_0 \sin\phi - \bar{\sigma} \cos\phi = 0 \quad (13)$$

juuri myöden alkaessa. Myötöfunktio F on muulloin negatiivinen.

Plastisen muodonmuutoksen normaalisuusperiaatteen mukaan plastinen venymämuutos

$$d\{\epsilon\}_p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}, \quad (14)$$

missä $d\lambda$ on verrannollisuuskerroin [7] ja [8]. Myötöfunktio voidaan derivoida luonnollisesti suoraan kaikkien jännityskomponenttien suhteen, mutta derivointi on edullista suorittaa ensin aikaisemmin mainittujen invarianttien σ_m :n, $\bar{\sigma}$:n ja θ_0 :n suhteen, jolloin saadaan

$$\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_m} \frac{\partial \sigma_m}{\partial \{\sigma\}} + \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} + \frac{\partial F}{\partial \theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial \{\sigma\}}. \quad (15)$$

Mohr-Coulombin myötöfunktioille saadaan

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_m} = \sin\phi, \quad (16)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}} = \cos\theta_0 \left[1 + \tan\theta_0 \tan 3\theta_0 + \frac{\sin\phi}{\sqrt{3}} (\tan 3\theta_0 - \tan\theta_0) \right], \quad (17)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \theta_0} = \frac{(\sqrt{3}) [\sin\theta_0 + (1/\sqrt{3}) \cos\theta_0 \sin\phi]}{2\bar{\sigma}^2 \cos 3\theta_0}. \quad (18)$$

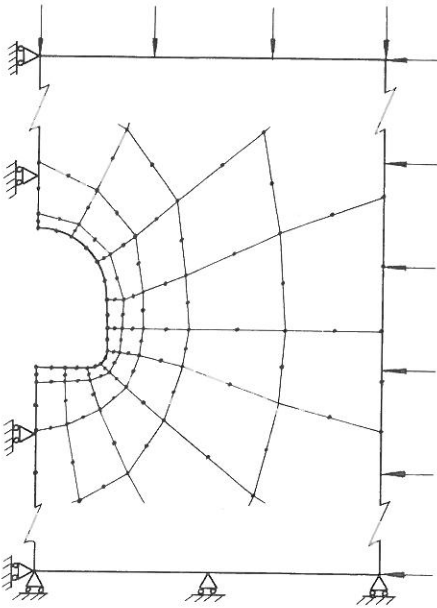
Näin voidaan siis käsitellä myös 3-dimensioinen myötäminen perustuen kuvan 3 mukaiseen havainnolliseen esitykseen.

Laskentamalli

Jännitysanalyysi on suoritettu tasomuodonmuutostilassa elementtimenetelmään perustuvalla levyprobleemojen ratkaisemiseen laaditulla tietokoneohjelmalla [8]. Käytetty elementti on 8-

solmuinen isoparametrinen, materiaalisesti epälineaarinen, materiaalin ollessa kimmoplastisesti muokkauslujittuva. Kuvassa 2 katkoviivalla rajatusta analysoitavasta alueesta on laskelmia varten laadittu elementtiverkko, jossa on 55 elementtiä ja 204 kaksivapausasteista solmua. Osa elementtiverkosta, kuormitukset ja reunaehdot on esitetty kuvassa 4. Pystysivun tuenta seuraa symmetriasta, kun taas vaakasivun tuenta on tavanomainen approksimaatio. Muilla sivuilla vaikuttavat kaavojen (1) ja (2) mukaiset painekuormitukset.

Lähteessä [8] on selostettu laskentamenetelmä, johon on sovitettu von Misesin myötöfunktion tilalle kaavan (13) mukainen Mohr-Coulombin funktio.



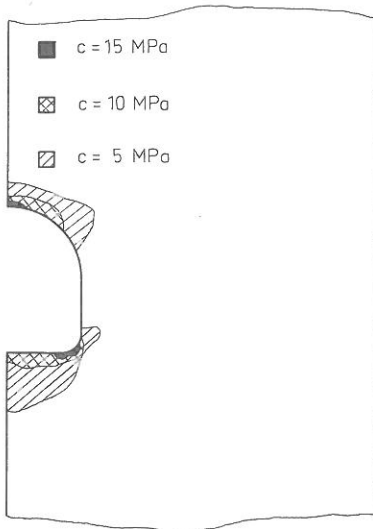
Kuva 4. Osa elementtiverkkoa

TULOKSET

Suoritettujen laskelmien avulla on arvioitu kallion ominaisuuksien ja lämpökuorman vaikutusta tunnelin seinämän jännitystilaan ja myötävien alueiden suuruuteen. Kuvasta 5 todetaan, että koheesioin vaikutus myötäneen alueen suuruuteen on huomattava. Tällainen tilanne on käytännössäkin mahdollinen, sillä kalliomateriaaleille suoritettavat mittaukset [3] osoittavat, että Mohr-Coulombin myötöfunktion parametrit c ja ϕ voivat vaihdella suuresti paikan funktiona.

Kuvasta 6 käy ilmi, että lämpökuorma kasvattaa selvästi myötäneen alueen suuruutta.

Korkea-aktiivisen jätteen lopullinen sijoitustila pyritään rakentamaan mahdollisimman ehjään ja homogeeniseen peruskallioon. Tällaisen alueen löytäminen vaatii kallioperän perusteellista tutkimista koeporauksin kallion ominaisuuksien selvittämiseksi ja halkeilleiden alueiden välttämiseksi. Mikäli on onnistuttu löytämään riittävän korkealaatuinen alue, voidaan laskel-



Kuva 5. Myötöalueet koheesiofunktiona.



Kuva 6. Lämpökuorman vaikutus myötöön ($c = 15 \text{ MPa}$)

mien antamia tietoja käyttää hyväksi arvioitaessa jätetunnelin mekaanista käyttäytymistä.

LOPPUSANAT

Tässä tutkimuksessa on suoritettu materiaalisesti epälineaarinen jännitys-analyysi tasomuodonmuutostilassa elementtimenetelmällä ydinjätteen kalliosijoitustilalle Skandinavian oloissa. Materiaalimalli perustuu lineaariseen Mohr-Coulombin myötöehtoon, parametreinä materiaalin koheesio ja kitkakulma. Varastotunnelia kuormittavat kallion oma paino ja jääkaudelta peräisin olevat jäännösjännitykset sekä jätteen jälkilämmön aiheuttama lämpökuorma. Suoritettujen laskelmien mukaan myötäneen alueen suuruus riippuu voimakkaasti koheesioarvosta ja lämpökuormasta.

Tämän takia analyysin sovellettavuus huononee melkoisesti, ellei sijoituspaikan kalliomateriaalin murto-ominaisuuksia, esihalkeamia ja kuormitusolosuhteita tunneta suhteellisen tarkasti. Lisäksi kallioperästä on löydettävä riittävän suuri, ehjä ja homogeeninen alue sjoitustilaa varten. Jotta siis yleensä voidaan ryhtyä kalliosijoitukseen, täytyy mm. suorittaa riittävä määrä koeporauksia. Näiden avulla saadaan myös ne välttämättömät tiedot, joihin perustuen jännitysanalyysin tuloksia voidaan jollakin varmuudella soveltaa käytännössä.

KIRJALLISUUTTA

- [1] KBS 54:04, Rock mechanics analyses, Joe L. Ratigan, Hagconsult AB, September 1977, 13 s. + liitt. 31 s.
- [2] KBS 38, Utforming av bergrumsanläggningar, Alf Engelbrektson, UBB, Arne Finné, KBS, Stocholm, December 1977. 33 s. + liitt. 21 s
- [3] KBS 48, The mechanical properties of the rocks in Stripa, Kråkemåla, Finnsjön and Blekinge, Graham Swan. 54 s.
- [4] KBS 49, Bergspänningsmätningar i Stripa gruva, Hans Carlsson, Högskolan i Luleå, Augusti 1977. 21 s. + liitt. 2 s.
- [5] KBS 64, Spänningsmätningar i Skandinavisk berg-grundförutsättningar, resultatet och tolkning, Sten G.A. Bergman, Stockholm, November 1977. 27 s.
- [6] Desai Chandrakant S. and Christian John T., Numerical Methods in Geotechnical Engineering. New York, 1976. Ss. 24-30, 65-79, 123-146, 719-727.
- [7] Nayak G.C. and Zienkiewicz C.O., Elastoplastic stress analysis. A generalization for various constitutive relations including strain softening. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 5, 113-135 (1972).
- [8] Ikonen, K., Tasojännitystilan epälineaarinen analyysi, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ydinvoimatekniikan laboratorio, Tiedonanto 41, 1979. 46 s. + liitt. 33 s.

Heikki Noro, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ydinvoimatekniikan laboratorio