

Jouko Nurminen ja Seppo Orivuori

Rakenteiden Mekaniikka, Vol 21  
No 2 1988, s. 31...47

#### TIIVISTELMÄ

Artikkelissa tarkastellaan massiivisen betonipadon alle syntyvän nosteen suuruuden laskemista. Stationaarisen suotovirtaustilan oletetaan noudattavan Laplacen differentiaaliyhtälöä. Transienttisuuden saa aikaan yhtälön oikealle puolelle lisätty kallioperän vedenvarastoitumiskyvyn huomioon ottava termi. Esimerkkeinä vertaillaan kaksi- ja kolmedimensioisten mallien antamia tuloksia sekä valmiin vesivoimalaitoksen perustuksista tehtyjä painemittauksia kolmedimensioisen elementtimallin antamiin tuloksiin. Laskelmat suoritettiin Imatran Voima Oy:ssä kehitetyillä elementtimenetelmään perustuvilla tietokoneohjelmilla.

#### JOHDANTO

Betonipadon alle pääsee käyttötilanteessa kallion tiivistyspyrkimyksistä huolimatta suotautumaan vettä aiheuttaen padon alapintaan nostavan vedenpaineen. Padon stabiliteetin laskemiseksi on tämän nosteen mahdollisimman tarkka tunteminen tarpeen. Nosteen arvioiminen todellista pienemmäksi voi aiheuttaa padon sortumisen. Laskettaessa todellista suuremmalla nosteella, tulee patoon ylimääräistä varmuutta, jonka kustannusvaikutus on merkittävä. Patoon vaikuttavista kuormista, kuten sen omapaino, ulkoisen vapaan veden paine padon pintoja vastaan ja noste, on viimeksi mainittu suuruudeltaan epäselvin. Nosteen suuruus on RIL:n kuormitusnormeissa /11, 12/ määritelty kuvan 1 mukaisesti. Sekä suomalaisissa että ulkomaisissa normeissa virtaustilaa on tarkasteltu vain kaksidimensioisena, eikä kallioperän laatua ole



lainkaan huomioitu. Normeissa padon perustus on lisäksi esitetty tasaisena, vaikka käytännössä se on useimmiten monimuotoisempi, kuva 2.

Edelliseen viitaten katsottiin Imatran Voima Oy:n silloisella rakennussuunnitteluosastolla (nykyään rakennusosasto) tarpeelliseksi tutkia elementtimenetelmän soveltuvuutta betonipadon nosteen määrittämiseen suotovirtaustehtävän avulla.

### SUOTOVIRTAUKSEN TEOREETTISTA TAUSTATIIETOA

Suotovirtaustehtävät voidaan jaotella kuvan 3 mukaisesti eri tapauksiin virtauksen dimensioisuuden, ajasta riippumisen ja reunaehtojen perusteella. Todellisuudessa pohjavirtaus on aina kolmedimensioista. Riittävä tarkkuus saavutetaan kuitenkin useissa tapauksissa ratkaisemalla tehtävä alempidimensioisena. Esimerkiksi pato, jonka poikkileikkaus ei sanottavasti muutu patolinjan suunnassa, kannattaa käsitellä kaksidimensioisena. Tasaiseksi eli stationaariseksi kutsutaan virtausta, jonka vedenpaine kalliassa vaihtelee ainoastaan paikan suhteen. Epätasaisessa eli ajasta riippuvassa (transientissa) virtauksessa paine muuttuu edellisen lisäksi myös ajan suhteen. Suotovirtauksen sanotaan olevan rajoitettua kaikkien virtausalueen rajapintojen ollessa ennalta määrättyjä. Tällaisena voidaan pitää virtausta läpäisemättömän betonipadon alitse. Vapaassa suotovirtauksessa jokin rajapinta vaihtelee virtauksen mukana, esimerkiksi maapadon lävitse tapahtuvassa virtauksessa ei merkäviivan sijaintia ennalta tiedetä.

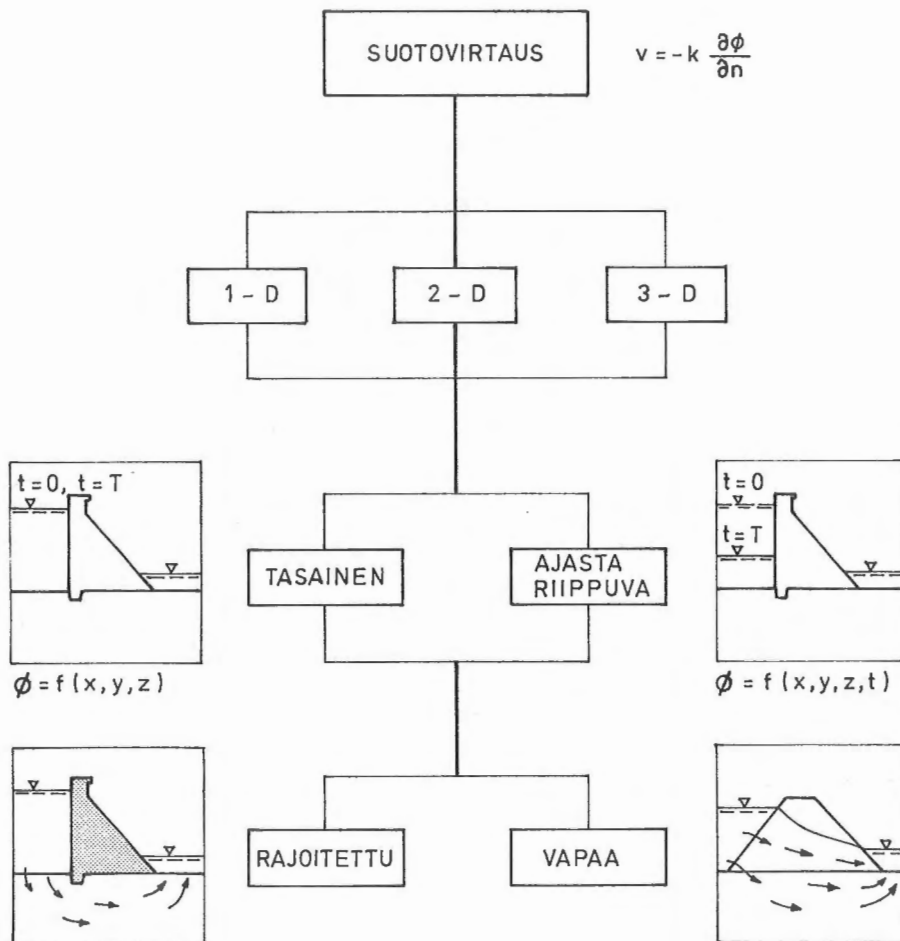
Darcyn lakiin

$$q_n = - k_n \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (1)$$

pohjautuva kallioperässä tapahtuva suotovirtaus noudattaa differentiaaliyhtälöä

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

Kaavoissa (1) ja (2) tarkoittaa  $k_n$  vedenläpäisevyyttä (m/s) suunnassa  $n$ ,  $\phi$  on ns. kokonaispainekorkeus (m) koostuen paine- ja asemaenergian summasta  $p/\gamma + y$   $p$ :n ollessa pietsometrinen paine ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\gamma$ :n ollessa veden tilavuuspaino ( $\text{kN/m}^3$ ) sekä  $y$ :n ollessa korkeus perustasosta (m).  $q_n$ :llä ymmärretään laskennallista nopeutta (m/s). Todellinen veden virtausnopeus saadaan jakamalla edellinen materiaalin huokoisuudella.



Kuva 3. Suotovirtaustapausten jaottelu.

Stationaaritilanteessa  $\phi$  on ajasta riippumaton, jolloin yhtälön (2) oikea puoli on identtisesti nolla supistuen näin kvasiharmoniseksi yhtälöksi. Tämä typistyy edelleen Laplacen yhtälöksi kaikkien  $k$ -arvojen ollessa yhtäsuuria.

#### ELEMENTTIMENETELMÄN SOVELTAMISESTA

Laplacen yhtälön ratkaisu suljetussa muodossa on mahdollinen vain yksinkertaisille virtaustapauksille. Mutkikkaampien virtausmallien ratkaisuun onkin kehitetty useita likimääräismenetelmiä, kuten esimerkiksi sähköanalogiamallit /13/, pienimittakaavaiset mallikokeet, virtausverkoston piirtäminen iteratiivisesti /1/, tietokonepohjaiset differenssi- tai elementtimenetelmään perustuvat virtausmallit. Tässä artikkelissa käsitellään vain viimeksi mainittua. Elementtimenetelmässä otaksutaan kokonaispaineekorkeudelle tietty yksinkertainen jakauma kunkin elementin alueella. Tämä lausutaan elementin solmupisteiden kokonaispainekorkeuksien  $\{\phi\}^o$  avulla.

$$\phi = [N] \{\phi\}^o . \quad (3)$$

Kaavan (3)  $\{\phi\}$ :t ovat tehtävän perustuntemattomia ja siinä esiintyvät muotofunktiot  $N$  juuri kuvaavat  $\phi$ :n jakaumaa elementin alueella. Sijoittamalla otaksutun yhtälön (2) ja soveltamalla painotettujen jäännösten perheeseen kuuluvaa Galerkinin menetelmää muuntuu yhtälö ajan suhteen 1. kertalukua olevaksi differentiaaliyhtälöryhmäksi

$$[k]^o \{\phi\}^o + [S]^o \frac{d}{dt} \{\phi\}^o = \{F\}^o , \quad (4)$$

jossa yläindeksi e korostaa elementtitasoisuutta,  $[k]^e$  on johtavuusmatriisi,  $[S]^e$  on vedenvarastoitumismatriisi,  $\{F\}^e$  koostuu ulkoisten 'kuormien', kuten reunavuo, solmuarvo-  
vastikkeista sekä  $t$  on aika. Aikamuuttujan diskretointi tapahtuu esimerkiksi korvaamalla aikaderivaatta erotusosamäärällä  $(\{\phi\}_{t+\Delta t}^e - \{\phi\}_t^e) / \Delta t$ , jolloin saadaan lopulliseksi elementti-  
tasoiseksi virtaustasapainoyhtälösystemiksi

$$[k]_{\text{eff}}^e \{\phi\}_{t+\Delta t}^e = \{F\}_{\text{eff},t}^e, \quad (5)$$

jossa  $[k]_{\text{eff}}^e = [k]^e + \frac{1}{\Delta t} [S]^e$  on elementin e ns. tehollinen johtavuusmatriisi,  $\{F\}_{\text{eff},t}^e = \{F\}^e + \frac{1}{\Delta t} [S]^e \{\phi\}_t^e$  on tehollinen kuormitusvektori,  $\Delta t$  on aika-askeleen suuruus sekä  $\{\phi\}_t^e$  tarkoittaa elementin solmujen kokonaispaine korkeuden arvoista ajanhetkellä  $t$  koottua pystyvektoria.  $[k]^e$  ja  $[S]^e$  ovat analogisia lämmönjohtumistehtävien lämmönjohtavuus- ja lämpökapasiteettimatriisien kanssa. Tällä analogialla löytyy yhtälön (5) johto sekä em. matriisien yksityiskohtaiset laskentakaavat mm. lähteestä /8/ (tosin aikadiskretoinnissa on lähteessä käytetty modifioitua Crank-Nicolson-menetelmää). Summaamalla elementteittäiset yhtälöt (5) sopivasti saadaan koko ratkaisualuetta koskevat yhtälöt

$$[K]_{\text{eff}} \{\phi\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{\text{eff},t}. \quad (6)$$

Stationaaritilanteissa supistuu yhtälösystemi (6) tasapainoyhtälöiksi

$$[K] \{\phi\} = \{F\}, \quad (7)$$

jossa  $[K] = \sum [k]^e$  ja  $\{F\} = \sum \{F\}^e$ .

Yhtälöryhmän (7) ratkaisu tietyin reunaehdoin antaa tulokseksi mallin solmujen kokonaispaine korkeuksien  $\{\phi\}$  arvot. Nosteen suuruudet halutuissa pisteissä saadaan tästä ratkaisusta vähentämällä kyseisten pisteiden vertikaalikoordinaatit /9, 10/.

## LASKETTUJA ESIMERKKEJÄ

Imatran Voima Oy:ssä kehitetyillä, elementtimenetelmään perustuvilla IVOFEM-, IVOHEAT- /8/ ja IVOSEEP-tietokoneohjelmilla /9/ tutkittiin kallion rikkonaisuuden, eri rakenneratkaisujen (tiivistyskynnys, injektointiverho, vaakasuuntainen tiivistyspatja ja tarkastuskäytävä), aikatekijän ja kolmiulotteisuuden huomioonottamisen vaikutusta betonipadon nosteeseen.

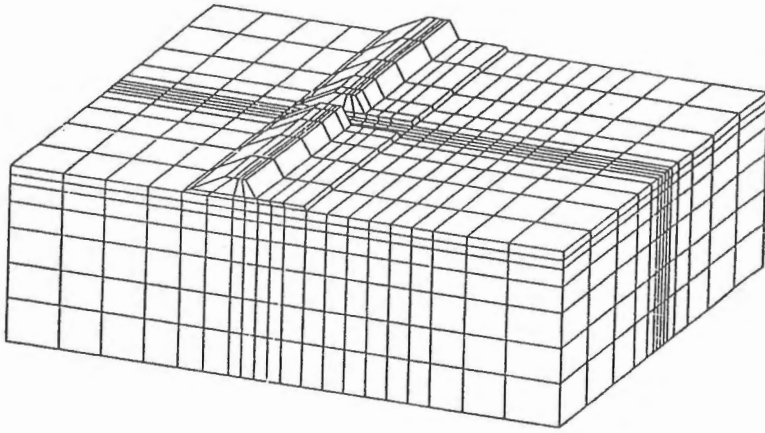
### ESIMERKKI 1

Tavallisesti nostelaskelmat tehdään kaksidimensionaalisena padon stabiliteettia määrättäessä. Virtaustilan ei oleteta tällöin muuttuvan patolinjan suunnassa. Kuitenkin betoniset tulva-aukkomonoliitit ovat usein kapeita. Näin ollen noste pääsee purkautumaan myös rakenteen sivulle, jolloin virtaustila on todellisuudessa kolmidimensioista.

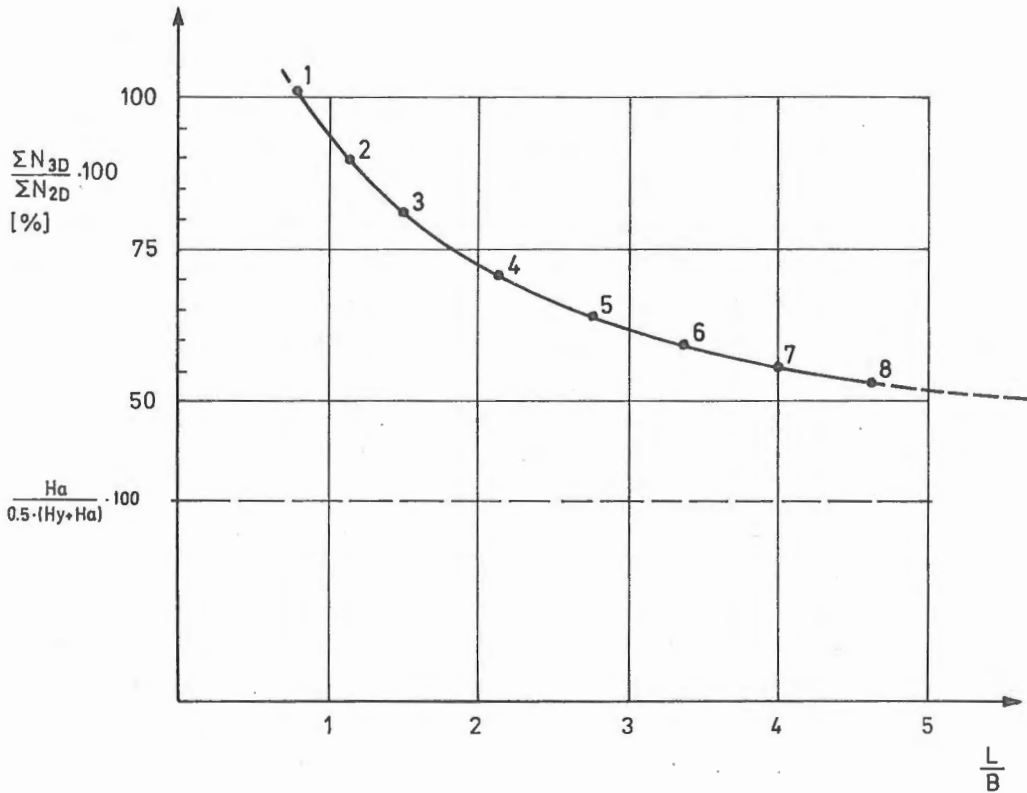
Esimerkissä 1 tarkasteltiin 2D- ja 3D-laskennassa syntyviä eroja tulva-aukon muodon (=pituus/leveys) funktiona. Kolmidimensioinen 2069 kuutiomaisesta 8-solmuisesta 3D-elementistä koostuva elementtimalli on esitetty kuvassa 4. Malli sisältää kallioperän ja maapadon eli varsinaisen virtausalueen. Betoni oletettiin läpäisemättömäksi, joten tulva-aukon betonirakenteet jäivät suotovirtauksen ulkopuolelle. Tämä huomioitiin mallissa yksinkertaisesti jättämällä siihen aukko tulva-aukkojen kohdalle.

Tulva-aukkomonoliitin pituutta vaihdeltiin mallissa reunaehtoja muuttamalla. Kaksidimensioiset laskelmat tehtiin 3D-mallista otetulla pystysiivulla, joka koostui 180 nelikulmioelementistä.

Vertailu suoritettiin laskemalla suotovirtaustila kahdeksalla eri tulva-aukon pituudella sekä kaksi- että kolmedimensioisesti. Kustakin laskentaparista saatiin kerroin  $n$ , joka kuvaa 3D- ja 2D-laskennasta saatujen kokonaisnostevoimien suhdetta. Kuvasta 5



Kuva 4. Esimerkin 1 elementtimalli.



Kuva 5. 3D- ja 2D-laskelmien kokonaisnostevoimien suhde tulva-aukon sivusuhteen  $L/B$  (ks. kuva 6) funktiona.



nähdään, että tulva-aukon ollessa neliömäinen ( $L/B=1$ ) eivät 2D- ja 3D-mallin tulokset eroa paljon toisistaan. Sen sijaan sivusuhteen ollessa 5 antaa 3D-laskenta vain puolet 2D-laskennan kokonaisnostevoimasta.

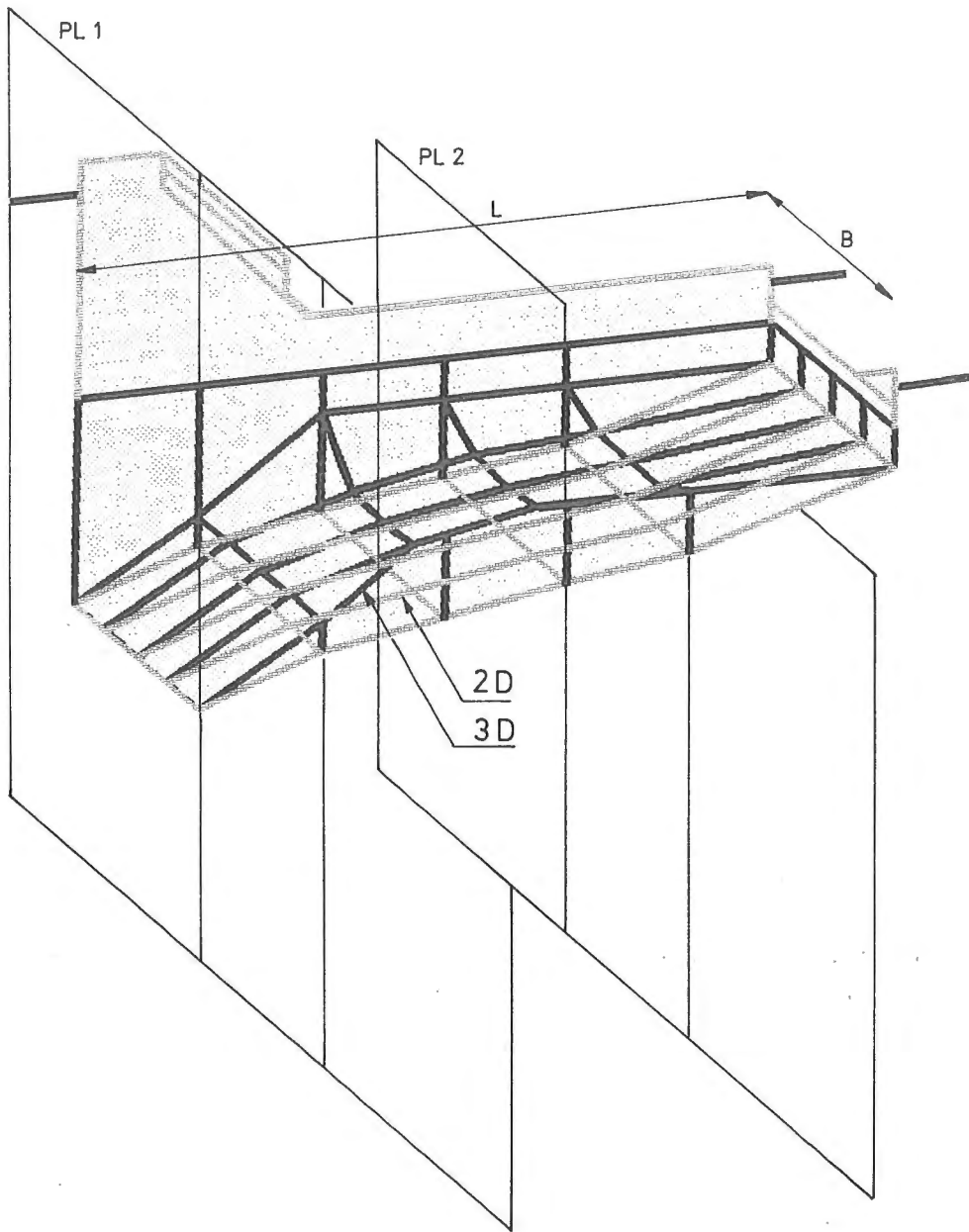
Sivusuhteen ollessa pienempi kuin 0.8 on n tässä esimerkissä jopa suurempi kuin 1. Tämä johtuu siitä, että 2D-mallissa reunaehdot annetaan vain tulva-aukon ylä- ja alavedenpuoleisiin päätyihin. 3D-mallissa sen sijaan annetaan reunaehdot myös sivuille. Tässä esimerkissä oletettu maapadon märkäviiva kulkee täydellä ylävedenpaine arvolla tulva-aukon etuseinätason alaveden puolelle, jolloin tulva-aukon alla oleva paine ei pääse heti etureunan jälkeen vielä pienemään siinä suhteessa kuin 2D-mallissa.

Kuvassa 6 on nostepinnoista graafinen esitys tulva-aukon sivusuhteella 2. Tulva-aukkoa katsotaan alaviistosta, kallion sisältä käsin. Kuviosta näkyy, kuinka paine purkautuu tulva-aukon sivuille. Sama asia voidaan todeta myös kuvasta 7, jossa on kahdessa poikkileikkauksessa esitetty kokonaispaineen sama-arvokäyrät.

#### Esimerkki 2

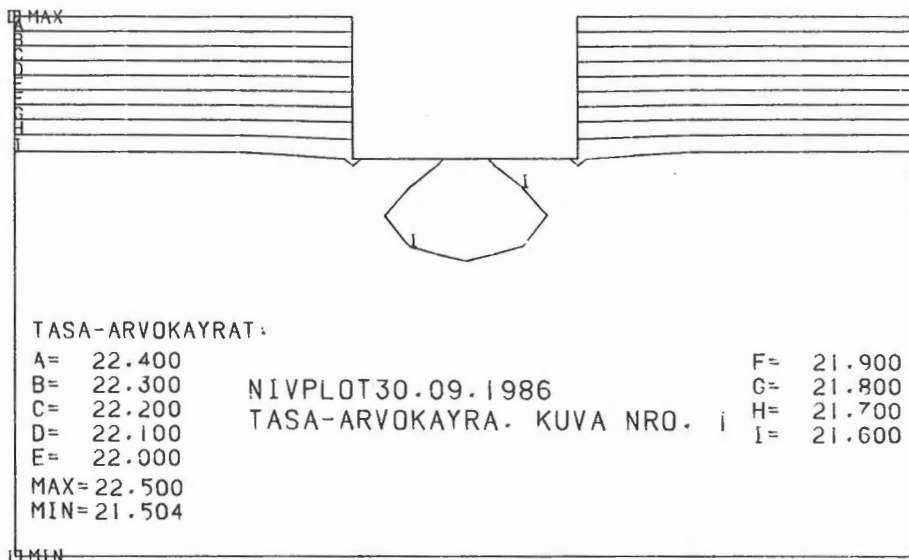
Kemijoella sijaitsevaan Vajukosken vesivoimalaitokseen asennettiin rakennusvaiheessa painemittareita koneaseman kohdalle kallioperään. Painemittausten tulokset osoittivat, että noste koneaseman alla kehittyy nopeasti patoaltaan vedennoston mukaisesti. Mittaustuloksia verrattiin tässä esimerkissä transientin elementtimallin antamiin tuloksiin.

Voimalaitoksen kohdalta tehtiin 3D-elementtimalli, joka koostui 3172 kuutiomaisesta 8-solmuisesta elementistä, kuva 8. Mallissa kuvattiin kallioperä koneaseman, tulva-aukkojen, uittomonoliitin ja osittain maapatojen kohdalta alueena, jonka pinta-ala luonnossa on 140 m x 115 m ja korkeus tasosta +140 ylöspäin n. 50 m.

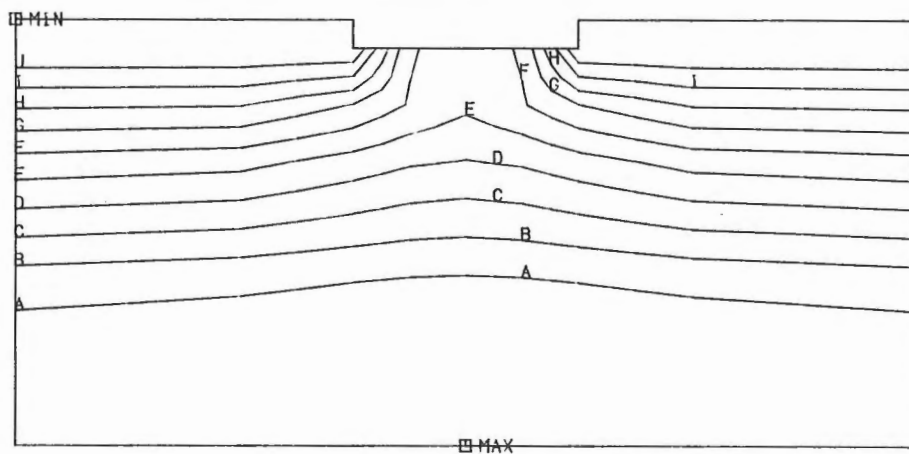


Kuva 6. Nostepinnat 2D- ja 3D-laskennalla.

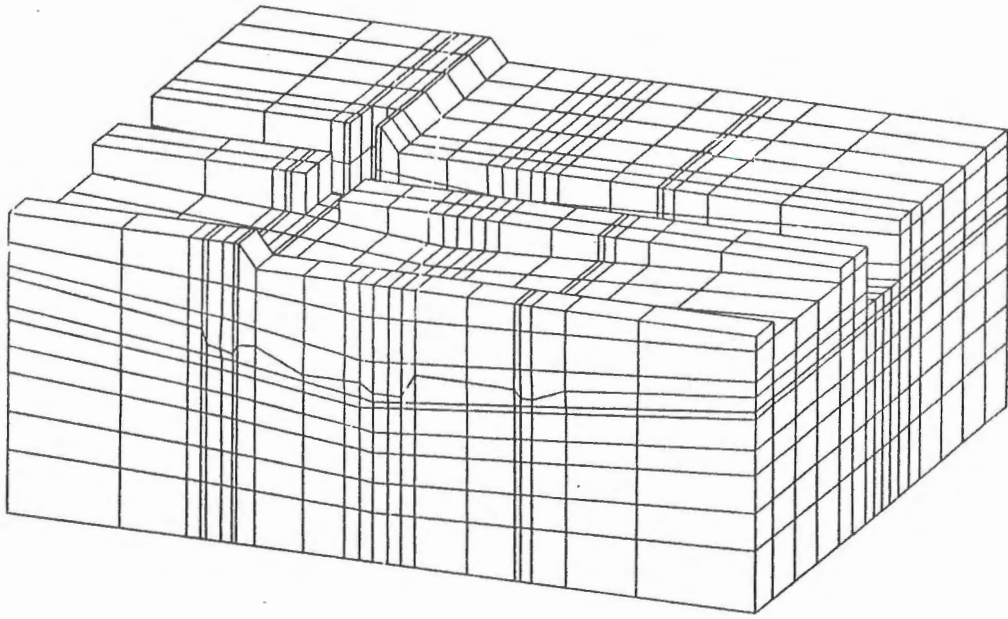
EKVIPOSENTIAALIKAYRAT 3D-MALLISTA PL 1



EKVIPOSENTIAALIKAYRAT 3D-MALLISTA PL 2



Kuva 7. Ekvipotentialikäyrät 3D-mallin poikkileikkauksista 1 ja 2 (ks. kuva 6)



Kuva 8. Vajukosken kallioperän elementtimalli.

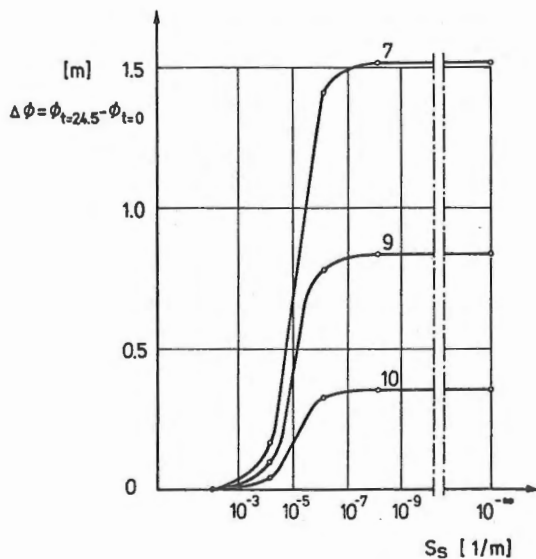
Kallion  $k$ -arvot laskettiin luonnossa tehdyistä vesimenekkimittauksista käyttämällä kaavaa

$$k = \frac{Q}{l H_0} \frac{1}{2\pi} \left( 1 + \ln\left(\frac{1}{2r_0}\right) \right), \quad (8)$$

jossa  $k$  on vedenläpäisevyys (m/s),  $Q$  on virtaama (m<sup>3</sup>/s),  $H_0$  on painekorkeus tutkittavan vyöhykkeen keskellä (m),  $l$  on tutkittavan vyöhykkeen pituus (m) sekä  $r_0$  on porausreiän säde (m).

Kallion rakoilusuunnat huomioon ottaen saaduista arvoista käytettiin vedenläpäisevyyden laskemisessa vyöhykkeittäisiä keskiarvoja, jotka vaihtelevat 10<sup>-6</sup>:n ja 10<sup>-9</sup> m/s välillä.

Koska kyseessä oli ajasta riippuva laskenta, sisällytettiin laskelmiin myös kallion vedenvarastoitumiskyky  $S_s$  (ks. yhtälö (2)). Sen suuruudesta ei ollut käytettävissä mittaustuloksia, ja kirjallisuudessa olleet tiedot olivat ristiriitaisia. Li ja Desai ovat käyttäneet analyysissään  $S_s$ :lle arvoja  $1.64 \cdot 10^{-7}$  1/m ja maapadon tiiviille osalle sekä  $1.64 \cdot 10^{-5}$  1/m suodattimelle  $k$ -arvojen ollessa vastaavasti  $6.1 \cdot 10^{-9}$  m/s ja  $1.1 \cdot 10^{-5}$  m/s /4/. Samat tutkijat ovat artikkelissaan /2/ käyttäneet maapadon  $S_s$ :lle arvoa 0.5 1/m  $k$ -arvon ollessa  $5.33 \cdot 10^{-5}$  m/s. Mustafa on Wallace-padon tutkimuksissaan /5/ käyttänyt säännöllisesti  $S_s$ :lle arvoa  $3.28 \cdot 10^5$  1/m  $k$ -arvojen vaihdeltaessa maalajista riippuen  $5.65 \cdot 10^{-6}$ :n ja  $1.0 \cdot 10^{-8}$ :n välillä.  $S_s$ :n eksponentin etumerkin täytyy olla painovirhe hänen artikkelissaan. Sen sijaan hänen tapansa pitää  $S_s$  vakiona riippumatta  $k$ -arvosta on perusteltua, koska vedenvarastoitumiskyvyllä ja vedenläpäisevyydellä ei välttämättä ole riippuvuutta toisistaan. Rushton & Redshaw ovat kirjassaan /13/ todenneet vedenvarastoitumiskyvyn suuruuden vaihtelevan tavallisesti  $10^{-5}$  ja  $10^{-7}$  1/m:n välillä, mikä Vajukosken vertailulaskelmien perusteella tuntuu todenmukaiselta.



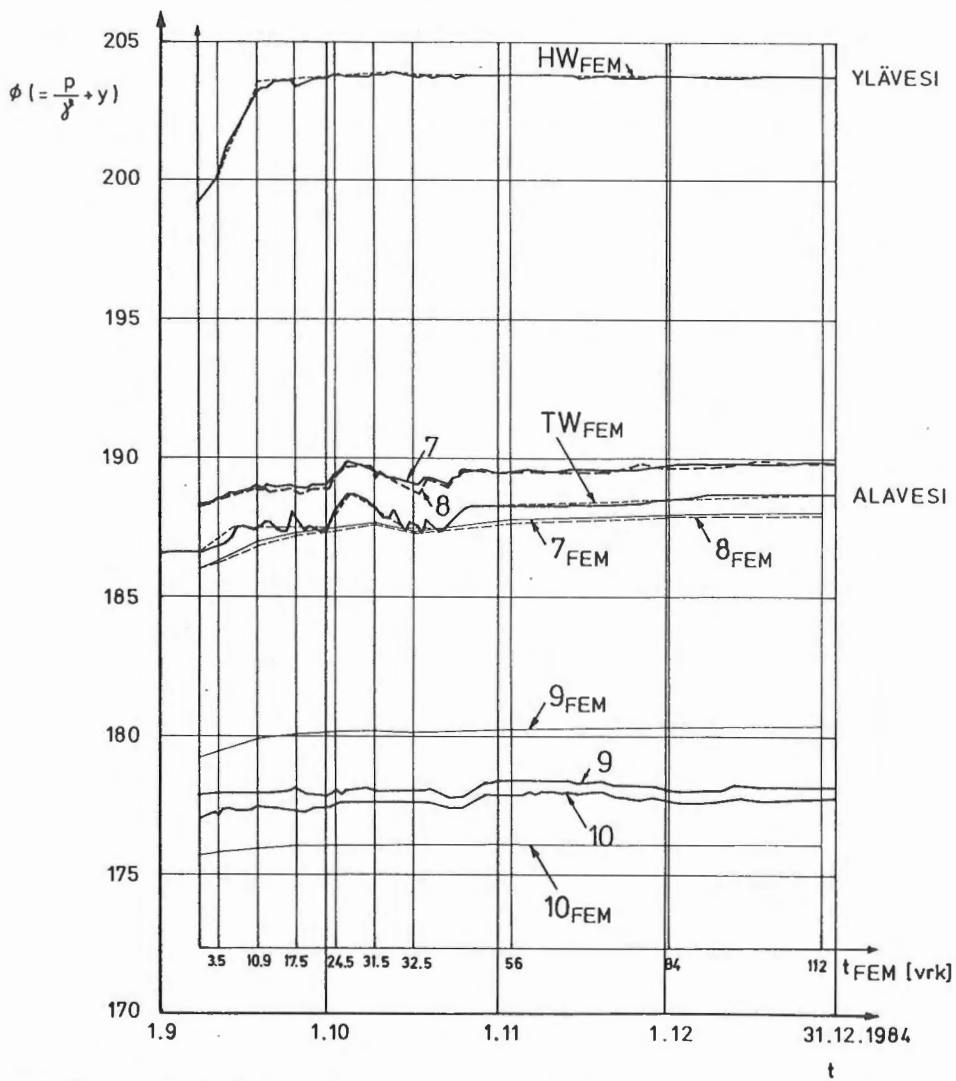
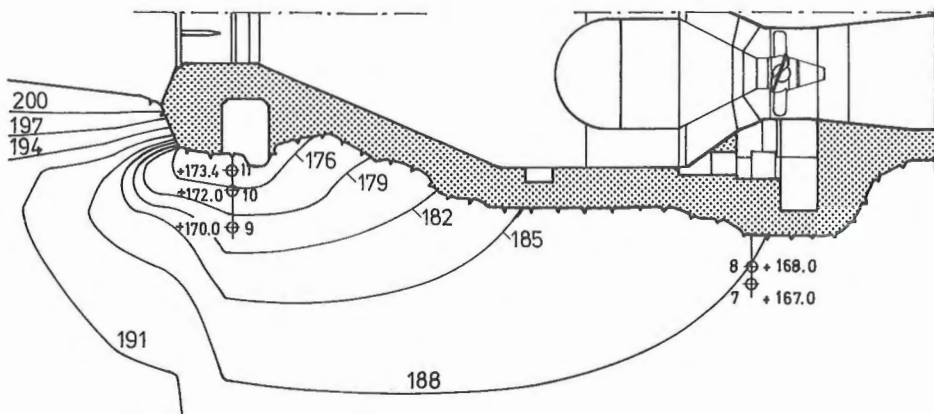
Kuva 9. Vedenvarastoitumiskyvyn ( $S_s$ ) vaikutus paineviiveeseen.

Kuvassa 9 on esitetty  $S_e$ :n suuruuden vaikutus paineviiveeseen mittauspisteissä 7, 9 ja 10 (kuva 10). Paineviiveellä tarkoitetaan tässä sitä viivettä mikä syntyy paineen kehittymiselle mittauspisteissä verrattuna vedenpintojen nousuvauhtiin. Paineviive on olematon, jos transientin laskennan mittauspisteen paine vastaa kullakin ajanhetkellä vastaavilla vedenkorkeuksilla lasketun stationääritilan antamia paineita, kuten tässä esimerkissä silloin, kun  $S_e < 10^{-9}$  l/m. Paineviive on taasen suuri, jos veden nostosta huolimatta paine ei juurikaan kasva mittauspisteissä tarkastelujakson aikana eli tässä silloin, kun  $S_e > 10^{-3}$  l/m. Käyrästöön laskettiin paineen kasvu aikavälillä  $t = 0 \dots 24.5$  vrk.

Transientin laskelman,  $S_e$ :n arvolla  $10^{-7}$  l/m, tulosten voidaan todeta vastaavan varsin hyvin mittaustuloksia. Sekä laskelmissa että mittauksissa on pisteille 7 ja 8 saatu keskenään lähes yhtäsuuret kokonaispaine korkeudet, eli ekvipotentiaalikäyrät ovat melkein pystysuorassa siinä kohdassa, kuva 10. Laskelmissa on näiden pisteiden kokonaispaine korkeus pienempi kuin alaveden korkeus. Tämä johtuu tarkastuskäytävän imusta, mikä näkyy ekvipotentiaalikäyrästä. Kallion epähomogeenisuudet ovat tässä tapauksessa sen suuntaisia, että luonnossa tarkastuskäytävän vaikutus on hieman pienempi kuin mallissa.

Pisteiden 9 ja 10 tulokset osoittavat, että saman reiän mittauskärkien välissä oleva betoniitti ei eristä riittävästi, jotta kärjet toimisivat täysin erillään. Toinen mahdollisuus eroavaisuuksiin laskemiin nähden on se, että kallio mittauspisteiden lähellä on paikallisesti keskimääräistä läpäisevämpää.

Mallissa mittauspisteiden painevaihtelut eivät ole yhtä teräviä kuin luonnossa, mikä johtuu aika-askelen suuruudesta (= 7 vrk). Kovin pientä aika-askelta ei kuitenkaan ollut mahdollista käyttää, koska elementin k-arvon ollessa pieni ei suotoilmiö ehdi



Kuva 10. Vajukosken painemittausten ja transientin 3D-laskennan vertailu.

yhden aika-askeleen aikana läpäistä elementtiä. Tämä saattaa aiheuttaa elementin toisen reunan arvoille jopa vääräsuuntaisia muutoksia. Myös tietokoneaikaa kuluu kohtuuttomasti, jos turhan pieni aika-askel valittaisiin.

Lisää laskuesimerkkejä, ulkomaisten normien tarkastelu, nosteen suuruuden vaikutus padon rakennuskustannuksiin sekä graafisen menetelmän esittely nosteen laskemiseksi monimuotoisille perustuksille löytyy lähteestä /7/, jossa tutkimus on esitetty kokonaisuudessaan.

#### LOPPUPÄÄTELMÄT

Tässä esitetyt esimerkit ja lähteessä /7/ esitetty ulkomaisten normien tarkastelu osoittivat, ettei nosteen suuruus ole niin selväpiirteinen ja yksikäsitteinen asia kuin suomalaiset normit antavat olettaa. Useiden maiden kuormitusnormeissa nostekuvioita ei esitetä, vaan kehoitetaan käyttämään tarkkoja laskumenetelmiä.

Tietokoneelle sovitetuilla, elementtimenetelmää hyväksi käyttävillä suotovirtausmalleilla voidaan kuvata monimutkaisia rakenteita, kallion vedenläpäisevyyden ja vedenvarastoitumiskyvyn vaihtelua ja aikariippuvuuksia. Menetelmän avulla padot voidaan mitoitaa luotettavasti, ja useimmissa tapauksissa saadaan huomattavaa säästöä pienemmän poikkileikkauksen myötä ilman ylimääräistä riskin kasvua. Useiden kuormitustapausten laskenta on vaivatonta ja laskelmien suorittaminen kolmedimensionaalisesti on myös mahdollista. Tulokset vastaavat hyvin totuutta mittausten ja kirjallisuusvertailujen perusteella.



#### KIRJALLISUUTTA

- /1/ Cedergren, H.R., Seepage, drainage and flow nets, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., 1977.
- /2/ Desai, C.S., Li, G.C., Transient free surface flow through porous media using a residual procedure, Proceedings, 4 th International Conference on Finite Elements in Fluids, Tokyo, Japan, July, 1982.
- /3/ Holopainen, P., Kallion tiivistäminen injektoimalla. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 31, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, 1977.
- /4/ Li, G.C., Desai, C.S., Stress and seepage analysis of earth dams, Schnabel Engng. Arizona Univ. J Geotech. Engng. (ASCE), Vol. 109, No. 7, Jul. 1983, p. 946-960.
- /5/ Mustafa, M.M., M.L., Unsteady seepage analysis of Wallace dam, Georgia Inst. Technol. U.S. Geol. Surv., Doraville J. Hydraul. Engng. (ASCE), Vol. 109, No. 6, Jun. 1983, p. 809-826.
- /6/ Nurminen, J., Betonipadon alla vaikuttava noste. Rakennustekniikka 1/1988, s. 37-42.
- /7/ Nurminen, J., Betonipadon nosteen määrittäminen elementtimenetelmällä. Lisensiaattityö. TKK, Otaniemi, 1987.
- /8/ Orivuori, S., Elementtimenetelmän soveltamisesta epälineaarisen transientin lämmönjohtumistehtävän ratkaisemiseen. Lisensiaattityö. TKK, Otaniemi, 1977.
- /9/ Orivuori, S., IVOFEM, IVOHEAT JA IVOSEEP -ohjelmien käyttäjän käsikirjat. Imatran Voima Oy, 1987.
- /10/ Orivuori, S., Rakenteiden mekaniikan numeeriset menetelmät, Luentomoniste, TKK, 1985.
- /11/ RIL 59e, 79b, Rakenteiden kuormitusnormit (1969, 1970, 1971, 1974) 1975, Rakenteiden kuormitusnormien selityksiä (1970) 1975. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, 1975.
- /12/ RIL 144-1982, Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, 1982.
- /13/ Rushton, K.R. and Reshaw, S.C., Seepage and groundwater flow, John Wiley & Sons, New York, 1979.

Jouko Nurminen, dipl.ins, Harjukatu 13, Lahti,  
Seppo Orivuori, tekn.lis, Imatran Voima Oy, rakennusosasto.