

ELEMENTTIMENETELMÄÄN PERUSTUVAN OHJELMASYSTEEMIN IVOFEM ESITTELY

Rakenteiden Mekaniikka
8 (1975) 3-4, s. 188...210
Rakenteiden Mekaniikan
Seura, Helsinki

SEPPO ORIVUORI

YHTEENVETO

IVOFEM on yleinen elementtimenetelmään perustuva ohjelma. Se koostuu tällä hetkellä noin 40 FORTRAN-kielisestä aliohjelmasta. IVOFEM soveltuu nykyisellään kvasiharmonisen yhtälön ratkaisemiseen tasoalueessa, pyörähdyssymmetristen kappaleiden jännitysanalyysiin sekä laattatehtäviin. Ohjelmakokonaisuus voidaan jakaa seuraaviin erillisiin osiin: lähtöarvojen sisäänluku, elementtien jäykkyys- ja jännitysmatriisien sekä kuormitusvektoreiden muodostus, lineaarisen yhtälöryhmän ratkaisun valmistelu, yhtälöryhmän ratkaisu aaltorintamamenetelmällä, ratkaisusta johdettujen suureiden (esim. jännitykset) laskeminen. Kunkin edellä mainitun osan rakennetta kuvataan lohkokaavioidin. Ohjelman tiedostotoiminnan esittely on liitetty edellisiin lohkokaavioidiin. Esimerkkinä esitetään ohjelmalla suoritettu pyörähdyssymmetrisen kappaleen jännitysanalyysi liitettynä osalla datakorttien kuvia sekä jännitystulostusta. Lopuksi puututaan ohjelman laajentamismahdollisuuksiin ja tulevaisuuden suunnitelmiin.

1. YLEISTÄ

Elementtimenetelmään perustuvia ohjelmajärjestelmiä on nykyisin olemassa jo lukuisia. Suurin osa ohjelmista ([1], sivut 389...454) on tehty kimmoteoreettisten tehtävien ratkaisemiseen.

Suuren ohjelmakokonaisuuden tekeminen vaatii paljon aikaa ja rahaa. Tällaisten laadintaan Suomessa ei yleensä ole syytä ryhtyä, mikäli jo valmis ulkomainen vastaava järjestelmä on käytettävissä kohtuulliseen hintaan. Suomen oloissa isohkon ohjelman kehittelyä haittaa resurssien sekä taloudellisten että inhimillisten, niukkuus. Mikäli kaikista huolimatta onnistutaan muodostamaan jonkinlainen ohjelmakokonaisuus, jää sen luotettavuus kyseenalaiseksi verrattuna äärimilleen testattuihin ja ympäri maailmaa päivittäin käytettäviin ulkomaisiin ohjelmiin.

Edellä mainituista seikoista hyvin tietoisena ryhdyttiin Imatran Voima Osakeyhtiön rakennusosastolla kuitenkin keväällä 1972 rakentelemaan omaa elementtimenetelmään perustuvaa ohjelmaa IVOFEM.

2. IVOFEM-OHJELMAN LAATIMISMOTIIIVI JA TAVOITTEET

Ohjelman tekemistä voidaan perustella seuraavalla:

- a) tarve kenttäprobleemoiden ratkaisemiseen,
- b) valmiiden, yleisessä käytössä olevien ohjelmien puute mainitulla sektorilla,
- c) myöhempi mahdollinen tehtäväkentän laajentaminen

IVOFEM-ohjelman tavoitteet:

- a) kenttäprobleemoiden ratkaiseminen,
- b) käyttäjäystävällisyys eli lähtöarvojen antamisen selkeys ja loogisuus,

- c) lähtöarvojen runsas generointimahdollisuus,
- d) muutosten ja lisäysten helppo toteuttaminen.

3. SOVELTUVUUS

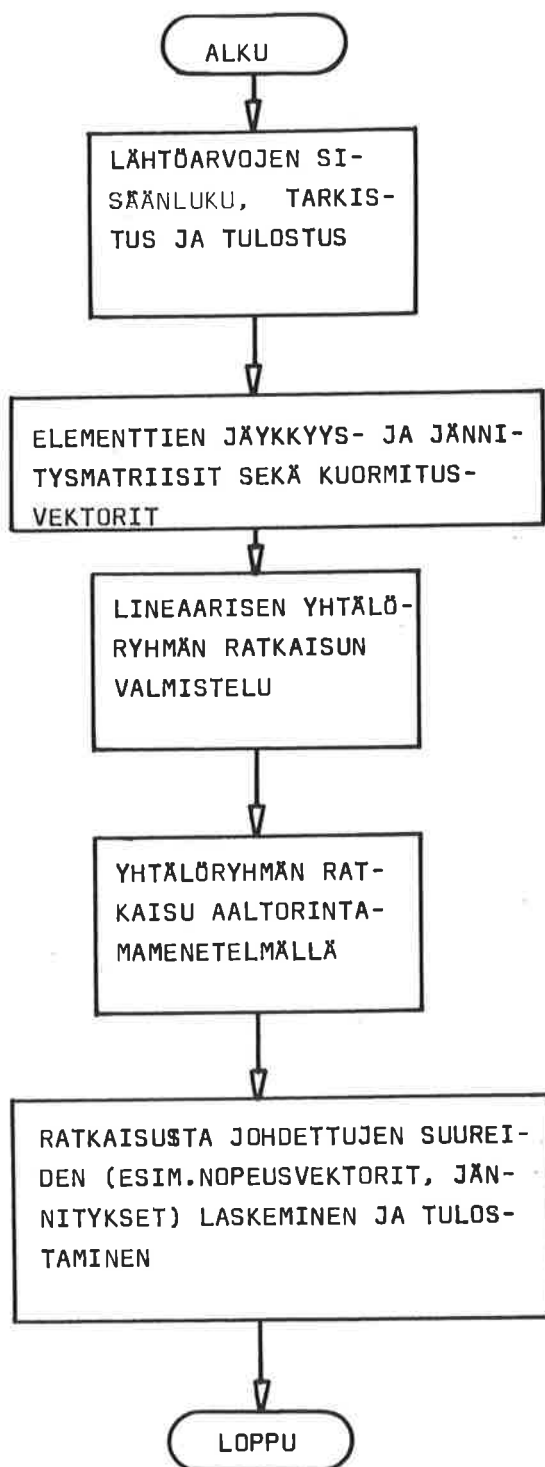
IVOFEM soveltuu nykyisellään

- a) stationaaristen kenttäprobleemoiden ratkaisemiseen, ts. niiden ilmiöiden tutkimiseen, jotka noudattavat kvasiharmonista yhtälöä [2],
- b) pyörähdysyymmetristen kappaleiden jännitysanalyysiin.

4. OHJELMAN RAKENNE

Ohjelma on luonnollisesti modulaarinen koostuen tällä hetkellä pääohjelmasta sekä yli 30 aliohjelmasta. Ohjelmaa käytetään linkitettyinä. Ohjelmointikielenä on käytetty Honeywell 6000 Series Fortrania, joka edustaa kehittyneimpiä Fortran versioita. Tietokoneena on Nokian GE-635. Ohjelmassa käytetään lukuisia tiedostoja, jotka mahdollistavat selväpiirteisen tietojen kulun ja joita käyttämällä ovat tarvittavat tiedot milloin hyvänsä käytettävissä. Tiedostot ovat nykyisellään kaikki peräkkäistiedostoja ja niissä on vaihtelevan mittainen tietueen pituus. Tiedostojen käyttöä ei ole pyritty mitenkään optimoimaan. Tällä hetkellä on ohjelmassa lähes 20 tiedostoa, jotka varataan levyköiltä.

Ohjelman rakennetta hyvin karkealla tasolla kuvaa seuraava lohko-
kaavio:



5. LÄHTÖARVOJEN SISÄÄNLUKU JA TARKISTUS

Lähtöarvojen antamisessa käytetään datojen taulukointiperi-
periaatetta. Kaikki samaa tyyppiä olevat datat kerätään yhteen ja
näin syntynyt tietous, datataulukko, varustetaan otsikko- ja loppu-
kortilla.

TAULUKON OTSIKKOKORTTI

Taulukon muodostavat
datakortit

TAULUKON LOPPUKORTTI

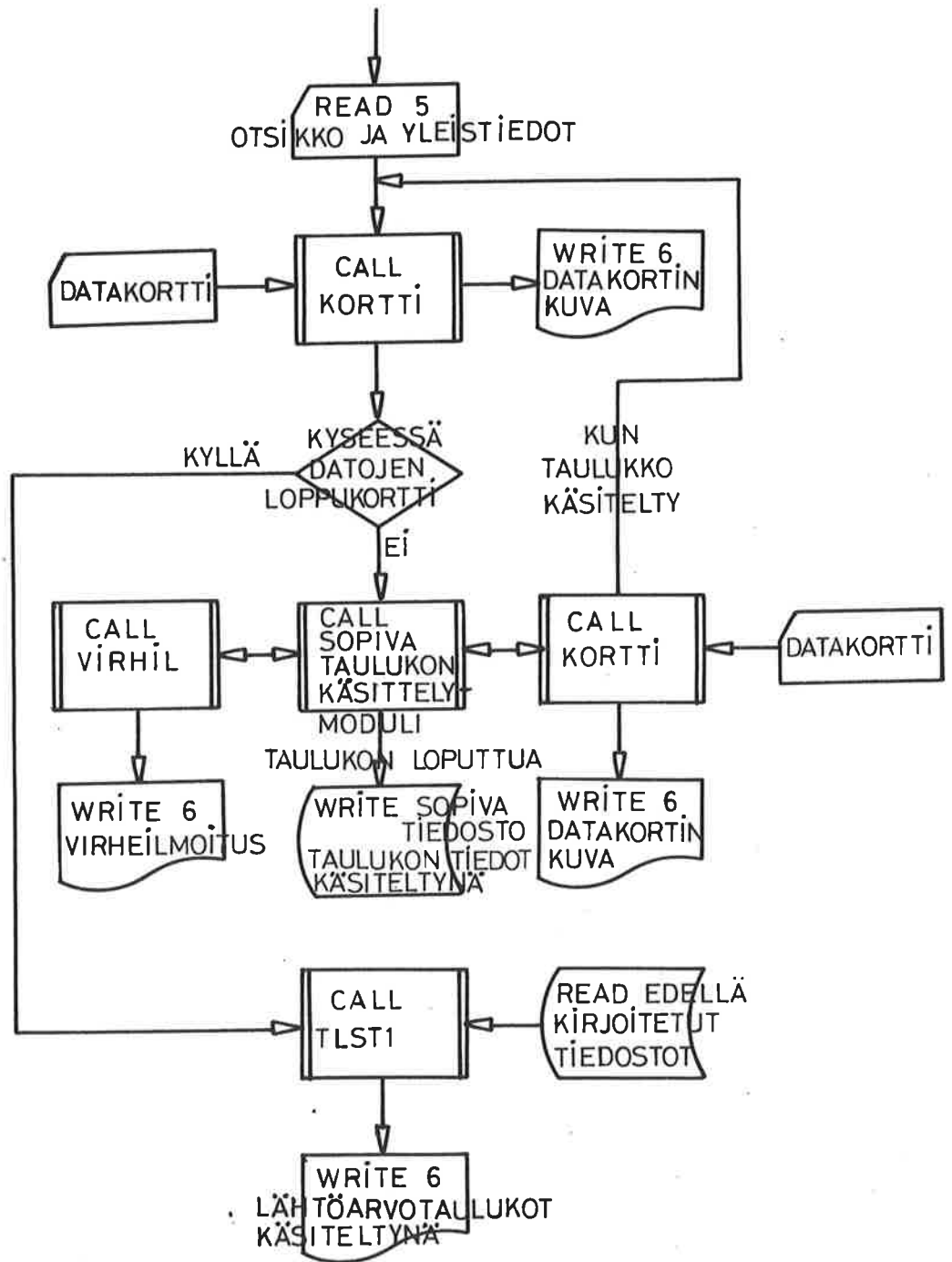
Taulukon sisällä voivat datakortit olla varsin vapaassa jär-
jestyksessä.

IVOFEM sisältää nykyisellään seuraavia taulukoita:

- materiaalit
- koordinaatit
- elementit
- reunaehtopisteet
- poistetut vapausasteet
- kuormitukset, jotka jakaantuvat seuraaviin alitaulukoihin:
 - kvasiharmonisen yhtälön reunaehdot
 - lineaarisesti jakautunut paine
 - nurkkapistevoimat
 - lämpökuormat
 - annetut vapausasteet

Lohkokaaviossa esiintyneiden moduleiden tehtävät ovat:

- KORTTI lukee seuraavan datakortin merkkimuodossa tiedostosta 05,
laskee datakortit, tulostaa kortin kuvan tiedostoon 06
(haluttaessa) sekä taltioi kortilla olevan taulukkonimen,
- VIRHIL tulostaa virheilmoituksen tiedostoon 06 sekä keskeyttää



- ajon mikäli virhe on riittävän vakava (lähtöarvot pyritään kuitenkin aina tarkistamaan loppuun saakka),
- TLST1 tulostaa lähtöarvot muokattuna tiedostoon 06 (generointi suoritettuna jne.), geometria tulostetaan haluttaessa ja kuormat aina,
 - KOORDI käsittelee nurkkapisteiden koordinaattikortit (generointimahdollisuus yhdessä tai kahdessa dimensiossa),
 - LMATER käsittelee materiaalitietokortit,
 - SUORAK käsittelee nelikulmioelementtien määrittelykortit (nurkkapistenumerot, materiaalinumero, tyyppitunnus) (generointimahdollisuus yhdessä tai kahdessa suunnassa),
 - KOLMIO kuten edellinen, mutta kyseessä kolmiot,
 - REUNAE käsittelee vapausasteiden poistokoodikortit sekä annettuja vapausasteita koskevat koodikortit (generointi mahdollinen),
 - KUORMA käsittelee kuormituskortit (useita generointimahdollisuuksia)
 - VAPAST käsittelee annettujen vapausasteiden antokortit (voidaan myös generoida).

Modulit KOORDI, LMATER, SUORAK, KOLMIO, REUNAE ja KUORMA esiintyvät lohkokaaviossa maininnalla "sopiva taulukon käsittelymoduli". Moduli KUORMA kutsuu modulia VAPAST tarvittaessa.

6. KÄYTETYT TIEDOSTOT

LOOGINEN TIEDOSTO- KOODI	MUODOSTAJA	SISÄLTÖ
01	ELMJRS	yhtälöryhmän ratkaisijan tarvitsema tiedosto

02	KOJAEI	yhtälöryhmän ratkaisijan tarvitsema tiedosto
03	SUORAK, KOLMIO	elementtitiedot (nurkkapistenumerot jne.)
05		datakorttitiedosto
06		rivikirjoitintiedosto
07	VAPAST	annettujen vapausasteiden suuruudet kuormitustapauksittain
08	KOLMO1, KOLMO2, SUORO1, SUORO2	elementtien jäykkymatriisit
09	JKVEKT	elementtien kuormitusvektorit kuormitustapauksittain poistettujen vapausasteiden huomioon ottamisen jälkeen
10	-KOORDI -KOLMO1, KOLMO2, SUORO1, SUORO2	- nurkkapisteen globaalit koordinaatit - kuormitusvektorit elementteittäin kutakin kuormitustapausta kohden
11	KOLMO1, KOLMO2, SUORO1, SUORO2	elementtien jännitysmatriisit
12	TAKPAL	yhtälöryhmän ratkaisijan tulostamat siirtymät elementteittäin kutakin kuormitustapausta kohden (poistetut vapausasteet puuttuvat)
13	REUNAE	annettujen vapausasteiden koodit, esim. 010001:ko. nurkan 2. ja 6. vapausasteelle annetaan kuormitusten yhteydessä arvo
14	REUNAE	poistettujen vapausasteiden koodit, esim. 10010:ko. nurkan 1. ja 4. vapausaste poistetaan mallista
15	KUORMA	kuormitustapausten nimet ja ohjausluvut

16	DISPL	siirtymät nurkkapisteittäin kutakin kuormitustapausta kohden (poistettujen vapausasteiden arvot nolliä)
21	KUORMA	- kenttäprobleemoita ratkaistaessa q-reunaehdot elementeittäin - pyörähdyssymmetristä kappaletta ratkaistaessa lineaariset painetiedot elementeittäin
22	KUORMA	nurkkapistekuormat elementeittäin
23	KUORMA	- kenttäprobleemoita ratkaistaessa lähde-termit Q elementeittäin - pyörähdyssymmetristä kappaletta ratkaistaessa lämpötilat elementeittäin

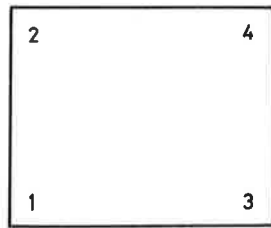
Edellä esiintyneisiin aliohjelmiin ELMJRS, KOJAEL, KOLM01, KOLM02, SUOR01, SUOR02, JKVEKT, TAKPAL, sekä DISPL toimintaan palataan myöhemmin.

7. ELEMENTTIEN JÄYKKYYS- JA JÄNNITYSMATRIISIT SEKÄ KUORMITUSVEKTORIT

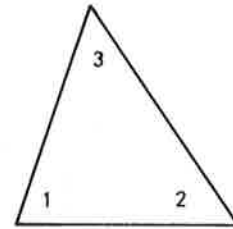
Elementtien jäykkyys- ja jännitysmatriisit muodostetaan ainoastaan ensimmäisen kuormitustapauksen yhteydessä sen sijaan kuormitusvektorit jokaisessa kuormitustapauksessa. Jäykkyysmatriiseista tarvitaan vain yläkolmiota.

Ohjelmassa on käytettävissä tällä hetkellä neljä elementtityyppiä (kts. oheinen taulukko ja kuva 1):

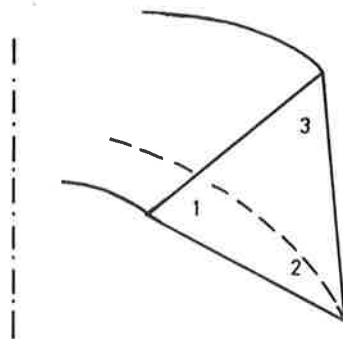
Elementin tyyppi nro	Elementin käsittelymoduli	Elementti
1	SUOR01	4-vapausasteen suorakaide kenttäprobleemoihin
2	KOLM01	3-vapausasteen kolmio kenttäprobleemoihin
3	KOLM02	6-vapausasteen toruselementti pyörähdys-symmetristen kappaleiden tutkimiseen
4	SUOR02	8-vapausasteen toruselementti, joka muodostetaan kahden tyyppiä 3 olevan summana



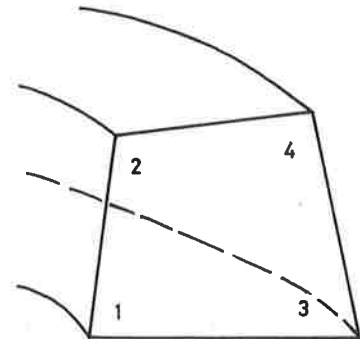
TYYPPI 1



TYYPPI 2



TYYPPI 3

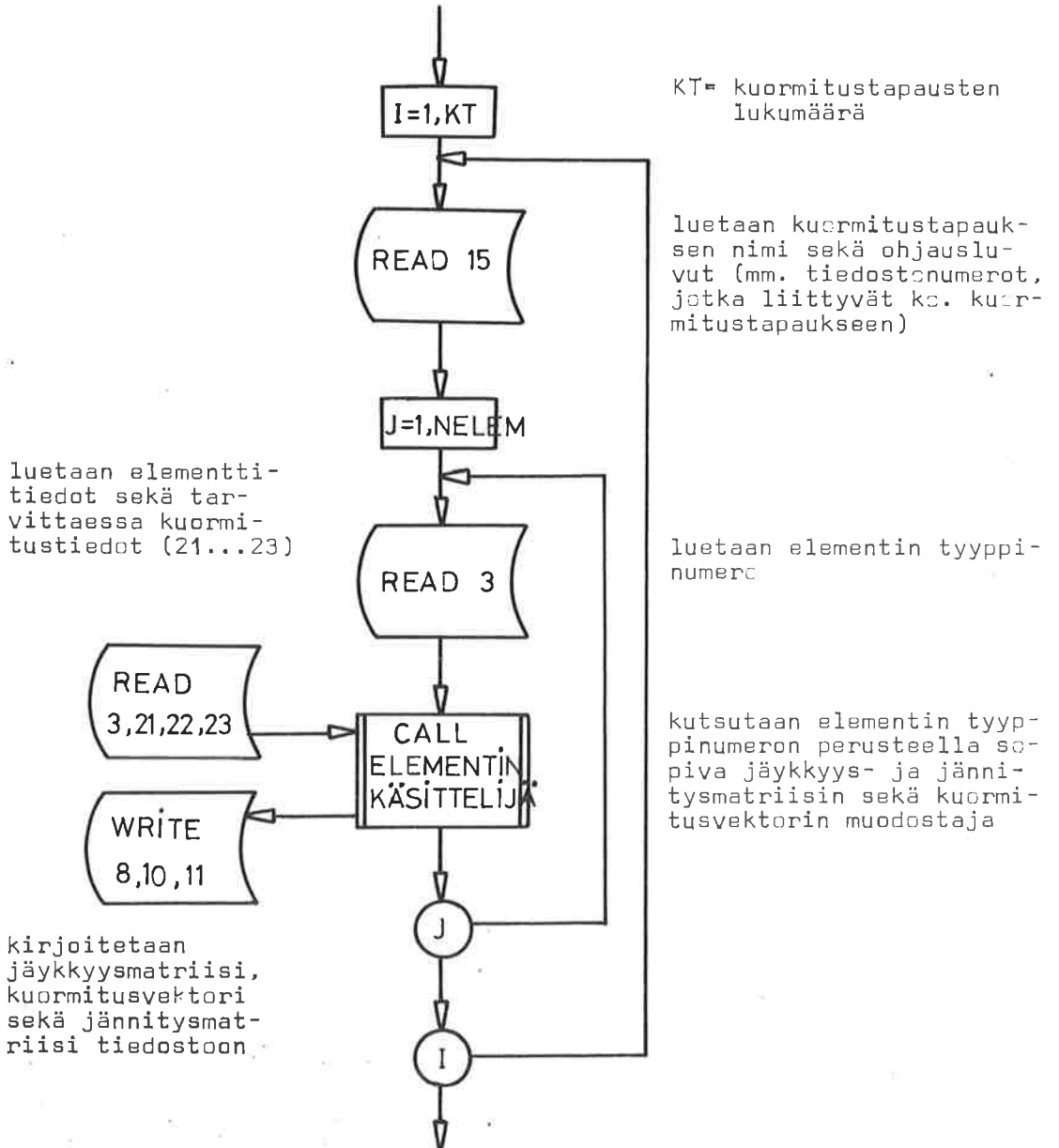


TYYPPI 4

Kuva 1.

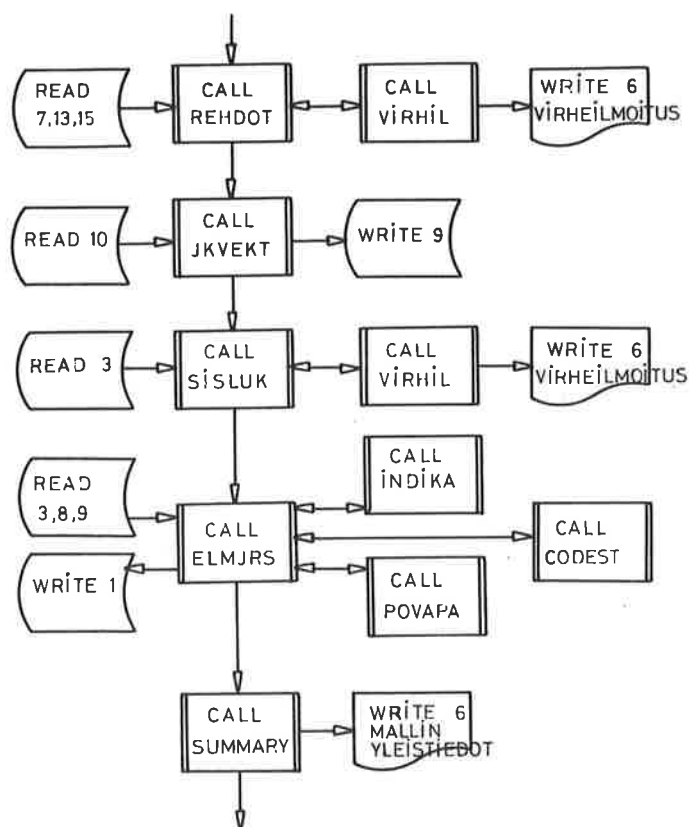
Elementin 3 jäykkymatriisin muodostamisessa käytetään numeerista integrointia ([3], sivut 144-153). Matriisioperaatioissa (transponointi, kertolasku jne) käytetään HONEYWELLTSS-kirjasto-ohjelmaa MTMPY.

Lohkokaaviollisesti esitettynä on jäykkyyss- ja jännitysmatriisien sekä kuormitusvektoreiden muodostamislogiikka seuraava:



8. LINEAARISEN YHTÄLÖRYHMÄN RATKAISUN VALMISTELU

Elementtien jäykkyys- ja jännitysmatriisien sekä kuormitusvektoreiden muodostamisen jälkeen aloitetaan tehtävän yhtälöryhmän ratkaisun valmistelu. IVOFEM käyttää ratkaisuun aaltorintamamenetelmää [4]. Tämän menetelmän käyttöön liittyy oleellisesti huolellinen ratkaisun valmistelu, jonka aikana tutkitaan mm. missä elementissä kukin nurkkapiste esiintyy ensimmäisen kerran sekä missä viimeisen kerran. Koska aaltorintamamenetelmässä kootaan rakenteen jäykkyysmatriisia elementteittäin, voidaan edellisten tietojen avulla eliminoida kunkin nurkan vapausasteet pois yhtälöryhmästä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Tähän yhtälöryhmän ratkaisuun ja sen valmisteluun palataan myöhemmässä artikkelissa. Yhtälöryhmän ratkaisun valmistelun vaiheita voidaan kuvata seuraavalla lohkokaaviolla:



Lohkokaaviossa esiintyneiden moduliin tehtävät ovat:

- REHDOT siirtää kuormitustapaukseen liittyvät annettujen vapausasteiden suuruudet (siirtymäreunaehdot) tiedostosta 7 pikamuistin taulukkoon kasvavassa vapausastenumerojärjestyksessä (tieto ko. kuormitustapaukseen mahdollisesti liittyvistä annetuista vapausasteista saadaan tiedostosta 15),
- JKVEKT muodostaa elementteittäisen kuormitusvektoritiedoston, ensimmäisessä kuormitustapauksessa ovat vektorit elementteittäin kasvavassa järjestyksessä, seuraavissa tapauksissa ovat vektorit elementteittäin alenevassa järjestyksessä,
- SISLUK siirtää kunkin elementin nurkkapistenumerot työtilaan (ainoastaan ne nurkkanumerot, joita ei ole täysin poistettu mallista),
- ELMJRS tutkii kunkin nurkkapisteen esiintymisiä; etsii mm. sen elementin, jossa kukin nurkkapiste esiintyy ensimmäisen kerran sekä viimeisen kerran samalla laskien monessako elementissä kaiken kaikkiaan kyseinen nurkka esiintyy; varaa pikamuistissa olevasta yhtälöryhmän ratkaisutaulukosta kullekin vapausasteelle vapaana olevan vaakarivin; muodostaa yhtälöryhmän ratkaisun perustiedoston 1, joka sisältää elementtiä kohden tiedot: elementin vapausastenumerot, niiden paikat (vaakarivit) ratkaisutaulukossa koodatussa muodossa sekä jäykkyysmatriisin ja kuormitusvektorin (poistettuja vapausasteita vastaavat vaaka- ja pystyrivit poistettu),
- INDIKA muodostaa elementille poistettujen vapausasteiden indikaattoritaulukon IND; $IND(i)=1$, jos elementin i :s va-

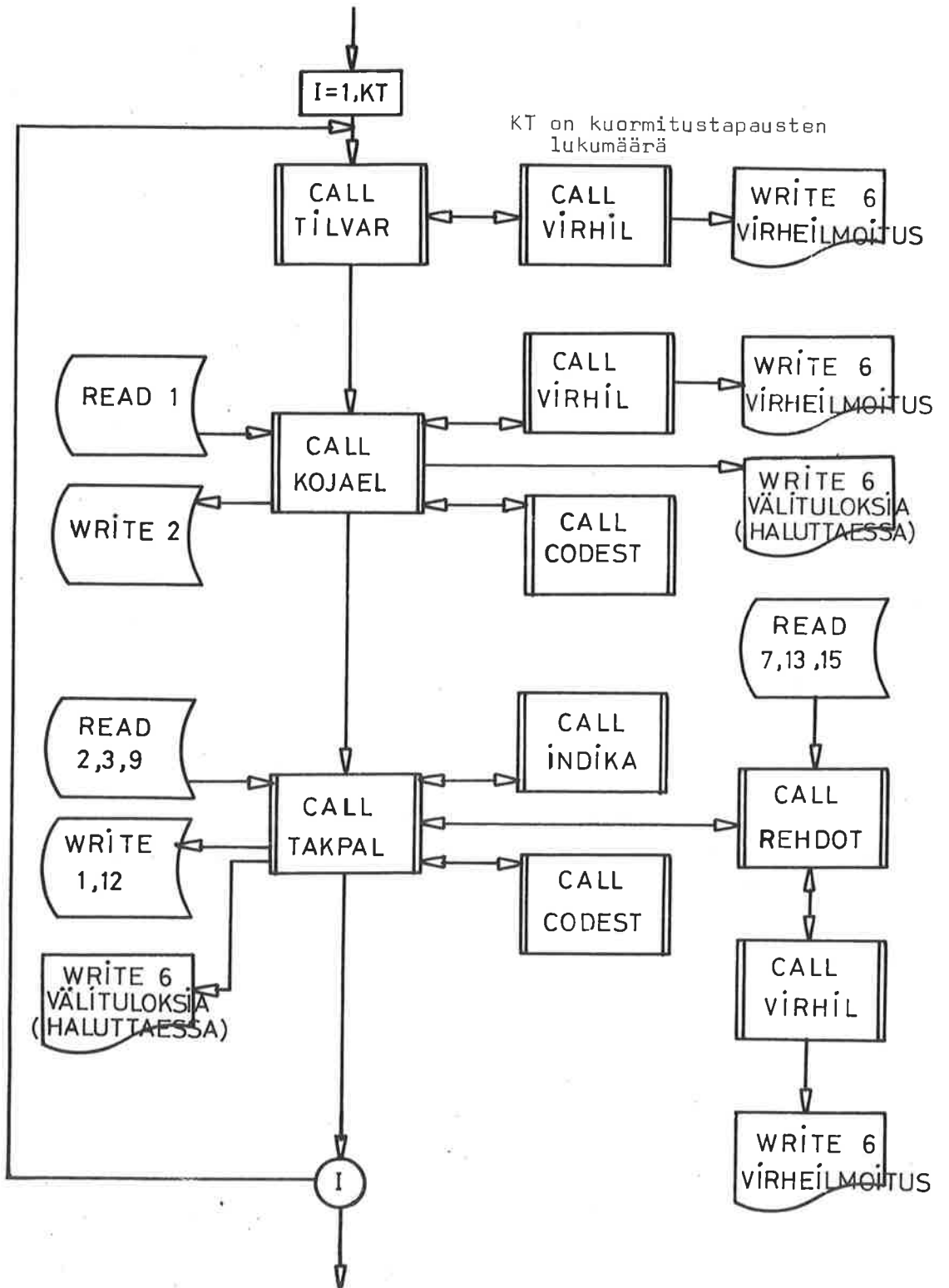
- pausaste poistettu mallista, muutoin $IND(i)=0$,
- POVAPA poistaa poistettuja vapausasteita vastaavat vaaka- ja pystyrivit elementin jäykkyyssmatriisista sekä kuormitusvektorista,
 - CODEST purkaa vapausasteelle muodostetun koodatun osoitteen saaden tulokseksi vapausasteelle kuuluvan vaakarivin järjestysnumeron pikamuistin ratkaisutaulukosta sekä tiedon vapausasteen mahdollisesta eliminoimisesta,
 - SUMMARY tulostaa rivikirjoitintiedostoon mallia kuvaavat tärkeimmät tiedot (mm. elementtien lukumäärä, maksimi puolinauhaleveys, jne.).

9. LINEAARISEN YHTÄLÖRYHMÄN RATKAISU AALTORINTAMAMENETELMÄLLÄ

Koska aihepiiriä käsitellään myöhemmässä artikkelissa, tyydytään tässä yhteydessä ainoastaan karkeahkoon lohkokaavioesitykseen ja lyhyeen moduliakohtaiseen kuvaukseen.

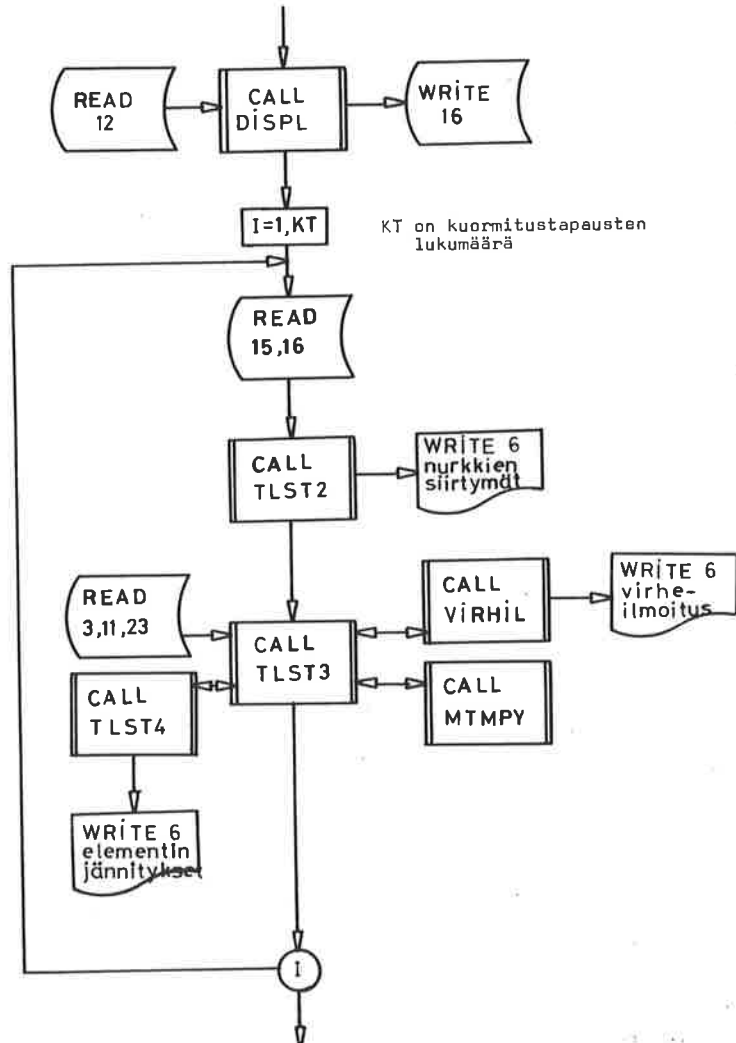
Modulien tehtäviä voidaan luonnehtia seuraavasti:

- TILVAR tutkii varatun pikamuistitilan riittävyttä ratkaisuvalle tehtävälle,
- KOJAEL suorittaa yhtälöryhmän kokoamista elementtien osuuksista; muokkaa kuormitusvektoria eliminoinnin edellyttämällä tavalla; eliminoi vapausasteita; tarkkailee kerroinmatriisin singulaarisuutta,
- TAKPAL ratkaisee tuntemattomia takaisinpalautuksella; kirjoittaa ratkaisun tiedostoon; lukee mahdollisen seuraavan kuormitustapauksen pikamuistiin.



10. SIIRTYMIEN TULOSTAMINEN SEKÄ JÄNNITYSTEN LASKEMINEN JA TULOSTAMINEN

Siirtymät voidaan haluttaessa tulostaa. Siirtymistä voidaan haluttaessa laskea jännityksiä (nopeusvektorin komponentteja) ja pääjännityksiä sekä tulostaa ne. Tätä vaihetta kuvaa seuraava lohko-kaavioesitys:



Modulien tehtävät ovat:

- DISPL muuntaa ratkaisuna saadun siirtymätiedoston 12, jossa vapausasteet elementteittäin, nurkkapisteittäiseen järjestykseen samalla asettaen poistetuille vapausasteille nolla-arvot,
- TLST2 tulostaa kutakin kuormitustapausta kohden ratkaisuna saadun siirtymätilan,
- TLST3 laskee siirtymistä aiheutuvat jännitykset,
- TLST4 tulostaa elementin kuvan elementtinumeroineen ja nurkkapistenumeroineen sekä tulostaa jännitykset ja pääjännitykset (nopeusvektorin komponentit ja itseisarvon).

11. UUSIEN ELEMENTTIEN LISÄÄMISESTÄ SYSTEEMIIN

Mikäli ohjelmaan halutaan liittää uusia elementtejä, on siihen tehtävä ainoastaan seuraavat lisäykset (ei mitään korjauksia tai poistoja):

- pääohjelmaan uuden elementin jäykkyys-, jännitysmatriisin ja kuormitusvektorin muodostamisaliohjelmakutsu,
- tarvittaessa uuden kuormitustaulukon käsittelyn ohjelmointi, mikäli jo olevat eivät sovellu (KUORMA),
- uuden elementin jäykkyys-, jännitysmatriisin ja kuormitusvektorin muodostamisohjelma (esim. SUORO3 = suorakaidelaattaelementti),
- uuden elementin tulostamisformaattit aliohjelmaan TLST4.

Uuden elementin lisääminen on suoritettu käytännössäkin muutamana kerran, IVOFEM-ohjelmalla voidaan nimittäin nykyisellään ratkaista suorakaide-elementeillä approksimoitavissa olevia laattatehtäviä. Kuormituksen sallitaan tasaisesti jakautunut kuorma ja/tai

lämpögradientti elementillä, nurkkapistevoimat sekä omapaino.

12. MUIDEN UUSIEN OMINAISUUKSIEN LISÄÄMISESTÄ

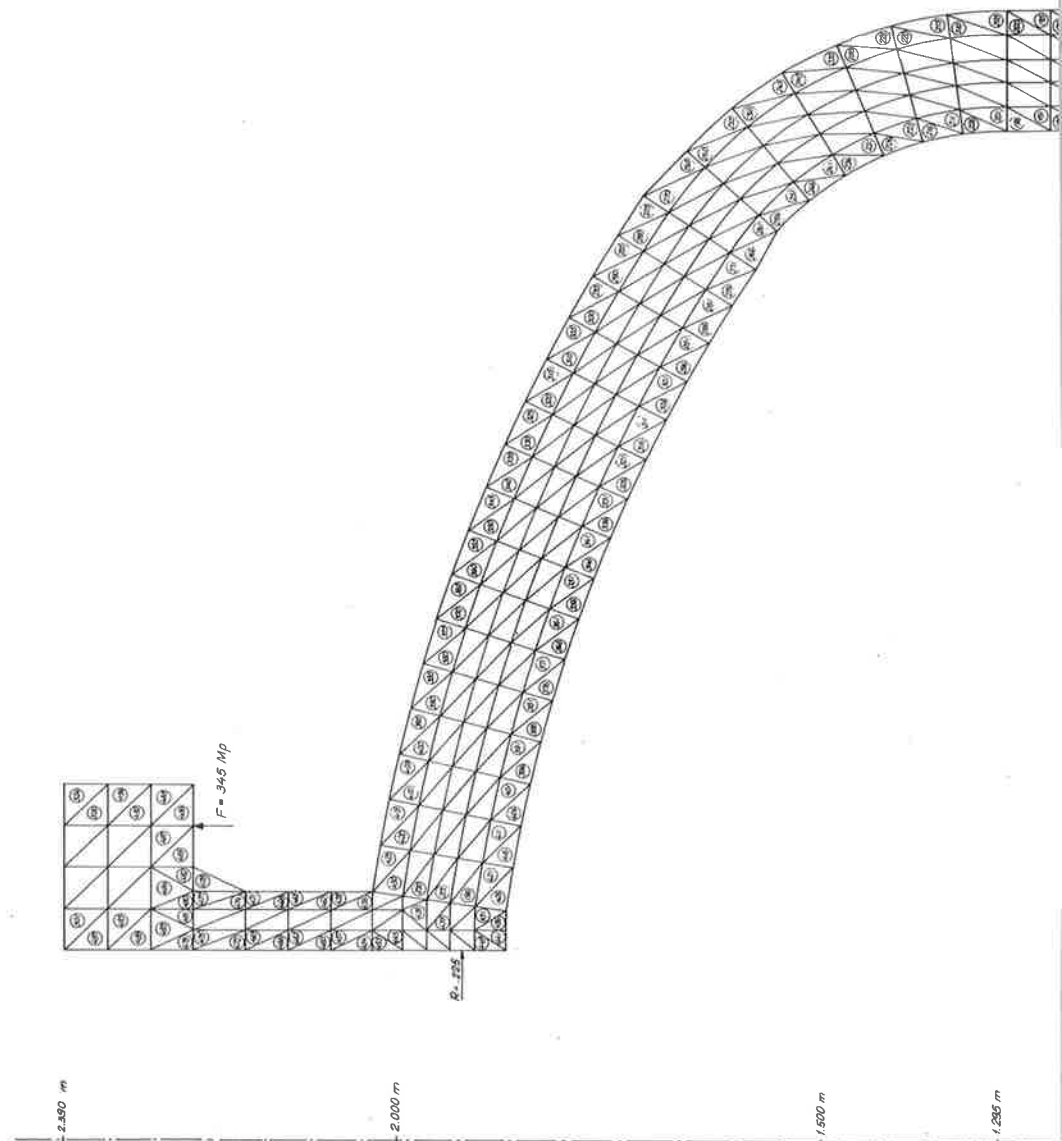
Ohjelman modulaarisuus mahdollistaa helposti tehtävissä olevat lisäykset ja muutokset. Viimeisimpään IVOFEM-versioon onkin sisällytetty mm. päivämäärän ja kellonajan tulostus jokaisen tulostuksen alkuun, eri ratkaisuvaiheisiin käytettyjen keskusyksikköaikojen tulostaminen, tukireaktioiden laskeminen ja tulostaminen.

13. ESIMERKKEJÄ OHJELMALLA RATKAISTUISTA TEHTÄVISTÄ

Kenttäprobleemaesimerkkinä viitataan artikkeliin [2]. Toisena esimerkkinä on pyörähdysymmetrisen kappaleen käsittely. Esimerkissä on suoritettu Loviisan ydinvoimalaitokseen tulevan paineistimen jännitysanalyysi. Kuvassa 2 on esitettyä laskennassa käytetty elementtijako. Kuvassa 3 on malliksi osa lähtöarvokorttien kuvista. Kuvassa 4 on näyte jännitystuloksista.

14. TULEVAISUUDEN SUUNNITELMIA

Lähitulevaisuudessa on tarkoitus liittää systeemiin isoparametrinen levyelementti, pyörähdysymmetristen kenttäprobleemoiden ratkaisemiseen tarvittavia elementtejä sekä mahdollisesti transienttien kenttäprobleemoiden ratkaisumahdollisuus.



Kuva 2. Loviisan paineistimen jännitysanalysissä käytetty elementti-
verkko.

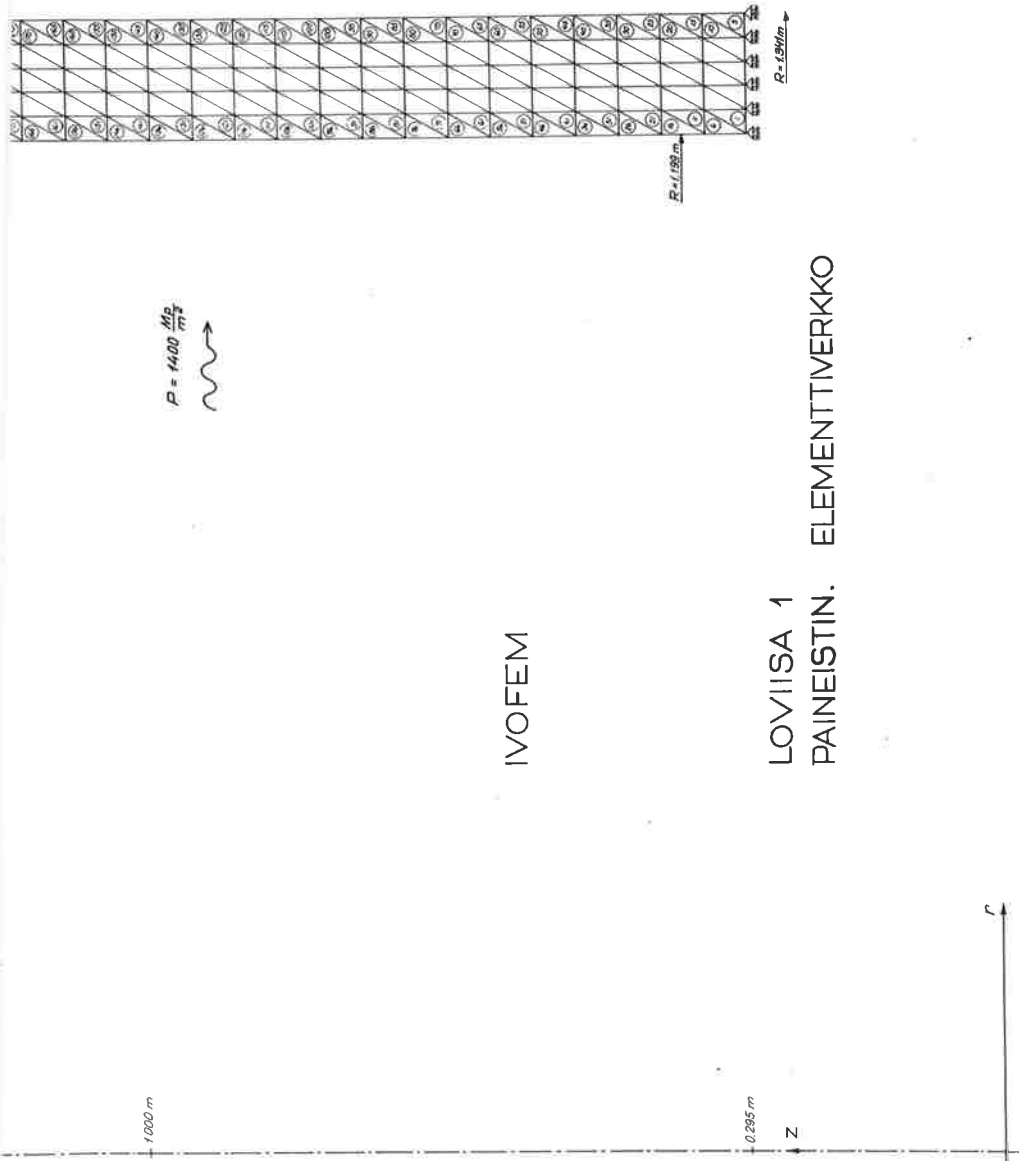


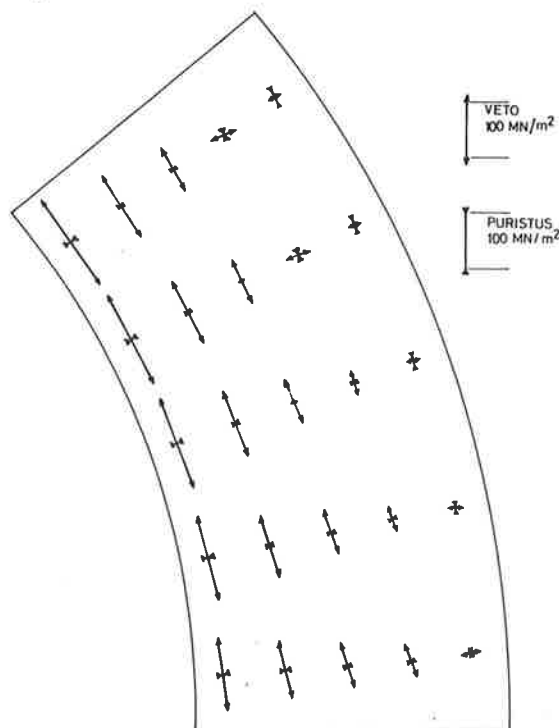
Fig. 2. Finite element mesh of the pressurizer of Loviisa nuclear power station.

```

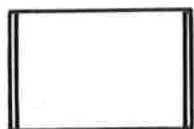
*****
* IVO-ELEMENTTI-OHJELMAN-INPUT (1) *
*****
<-----KORTTI N K U V A T----->
  1   5  10  15  20  25  30  35  40  45  50  55  60  65  70  75  80
  ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑   ↑
KORTTI NO
1 GEOMETRIA 1 0 2
2 LOVIISA, PAINESTIN
3 KOORDIINI 1 1,179 1,295 5 20 1,341 1,295
4 1 1,179 1,295
5 127 1,1794 1,3459 5 1,3359 1,3660
6 133 1,1746 1,3957 5 1,3209 1,4356
7 139 1,1668 1,4435 5 1,2961 1,5023
8 145 1,1425 1,4884 5 1,2621 1,5648
9 151 1,1120 1,5293 5 1,2196 1,6219
10 157 1,0761 1,5658 5 1,1695 1,6724
11 163 1,0375 1,59306 5 14 1 2,0525 1,6724
12 1 1,0375 1,59306 81,73642
13 265 1,225 1,8778 1 5 1,248333 1,8778
14 1 1,225 1,225 2,0312
15 277 1,271667 2,00052 1 1,271667 2,0312
16 279 1,225 2,0801 3 2 1,295 2,0801
17 1 1,225 2,1801
18 291 1,225 2,2401 3 1,295 2,2401
19 293 1,3225 2,2401 2 1,42 2,2401
20 294 1,225 2,2901 4 2 1,42 2,2901
21 1 1,225 2,3901
22 END
23 MATERIA 1 21000000, 3
24 END
25 KOLMIOT 3 1 22 23 1 21 21 21 4
26 3 1 23 2 1 21 21 21 4

```

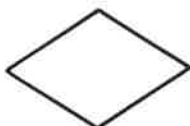
Kuva 3. IVOFEM ohjelman lähtöarvokorttien kuvia.
 Fig. 3. Inputcards of the program IVOFEM.



Kuva 4. Loviisan painestimen jännitysanalyysin tuloksena saatuja pääjännityksiä.
 Fig. 4. Principal stresses obtained from the calculation of the pressurizer of Loviisa nuclear power station.

LOHKOKAAVIOSYMBOLIEN MERKITYKSET

ohjelmoitu kokonaisuus, aliohjelma



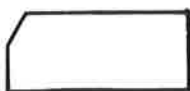
ehdollinen haaraantuminen



tulostus



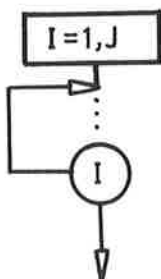
tiedostokäsittely



datakortti



alku tai loppu

ohjelmasilmukka suoritetaan
i:n arvoilla 1, 2, ..., J

vuorovaikutus

laskennan etenemissuunta (paitsi tulostusta
ja tiedostoja käsitellessä tiedon kulun
suunta)

KIRJALLISUUTTA

- 1 K.E. Buck, D.W. Scharpf, E. Stein und W. Wunderlich, Finite Elemente in der Statik, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München-Düsseldorf, 1973, s. 389...454.
- 2 S. Orivuori ja H. Laine, Elementtimenetelmän soveltamisesta kvasiharmonisen yhtälön ratkaisemiseen. Rakenteiden Mekaniikka 6 (1973) 2, s. 99...113.
- 3 O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method in Engineering Science, 1971, McGraw-Hill, New York.
- 4 B. Irons, A Frontal Solution Program for Finite Element Analyses, Int. J. for Num. Meth. in Eng. 2 (1970), s. 5...32.

Seppo Orivuori, dipl.ins., Imatran Voima Oy, Helsinki