

TERÄSBETONIPILARIN TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Olli Immonen

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 19
Nro 4 1986, s. 3...14

YHTEENVETO: Artikkelissa käsitellään kaksisuuntaisen sivukuorman ja normaalivoiman kuormittaman monikerroksisen teräsbetonipilarin mitoitus. Päähuomio on keskitetty vinon taivutuksen tapauksessa suoritettavaan mitoituspaakeskisyiden laskemiseen sekä pilarin eri kerrosten jäykkyyden määrittämiseen elementtimenetelmään perustuvan tietokoneohjelman avulla.

JOHDANTO

Tämä esitys käsittelee Imatran Voima Oy:ssä, rakennussuunnitteluosastolla tehdyn teräsbetonisen elementtipilarin suunnitteluohjelmistoa. Ohjelmiston ATK-tekniistä toteutusta ei esitetä yksityiskohdallisesti, vaan keskitytään lähinnä mitoitus- ja analyysipuolen toteutukseen.

Järjestelmällä voidaan suorittaa pilarin mitoitus, tulostaa työpiirustus sekä erilaisia massaluettoja (teräs, betoni jne.). Ohjelma on parametrioitunut ja sen mitoitusosaa voidaan käyttää tavalliselta alfanumeeriselta päätteeltä. Tietyt apuohjelmistot mahdollistavat ohjelmiston grafiikkaosan käytön Tektronix- ja Tektronix-yhteensopivilla päätteillä (VT100, VT240 jne.).

Ohjelmisto on ohjelmoitu pääosin FORTRAN-77-kielellä. Käyttöympäristön muodostaa kuitenkin VAX/VMS-käyttöjärjestelmä eli käyttäjä operoi em. käyttöjärjestelmän komentokielisen pääohjelman alaisuudessa. Ohjelmiston grafiikka on toteutettu INTERGRAPHin CAD-järjestelmän aliohjelmakirjastolla (IGDS). Tällöin graafinen tuloste (piirustus) ohjataan Intergraphin kuvatiedostoon, jonka editointi voidaan suorittaa Intergraphin perusohjelmistolla.

Ohjelma on pyritty tekemään voimalaitossuunnittelussa tavanomaisien, järeiden pilaritakenteiden suunnitteluun. Ei ole siis pyritty äärimmäiseen "minimimitoitukseen" vaan järkevän ja kohtuullisen raudoituksen etsimiseen.

OHJELMAN PERUSOLETTAMUKSET

Tarpeelliset teräspinta-alat lasketaan Suomen betoninormien /2/ mukaisesti (puristettu ja taivutettu poikkileikkaus) erikseen x- ja y-akselien suuntaisille kuormituksille. Kuormitusten vaikuttaessa samanaikaisesti x- ja y-suunnissa kasvatetaan mitoitusmomenttia betoninormeissa esitetyllä tavalla.

Betoninormien mukaan voidaan poikkileikkaus mitoittaa erikseen x- ja y-suuntiin, jos jokin epäyhtälöistä (1) on voimassa.

$$5.0 < \frac{M_x * H_y}{M_y * H_x} \quad \text{tai} \quad \frac{M_x * H_y}{M_y * H_x} < 0.2 \quad (1)$$

missä M_x = y-akselin ympäri kiertävä momentti, M_y = x-akselin ympäri kiertävä momentti, H_x = poikkileikkauksen x-akselin suuntainen sivumitta, H_y = poikkileikkauksen y-akselin suuntainen sivumitta.

Mikäli epäyhtälö (1) ei ole voimassa on poikkileikkaus analysoitava vinona taivutustehtävänä. Tällöin kasvatetaan rasitetumman suunnan momenttia yhtälön (2) edellyttämällä tavalla. Lasketaan raudoitus tälle kasvatetulle momentille ja normaalivoimalle sekä valitaan poikkileikkauksen viereisille sivuille vastaava raudoitus sivun pituusyksikköä kohden (ks. kuva 1).

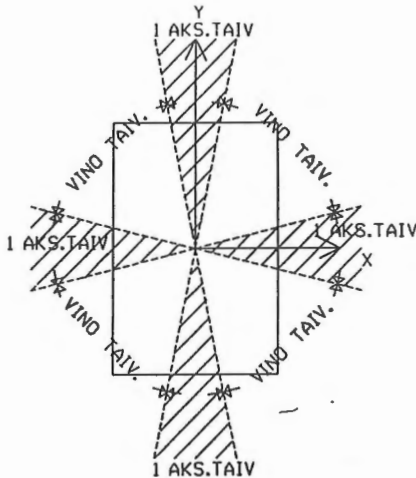
$$\begin{aligned} M_{ar} &= \left(1. + \frac{H_{max} * M_{amin}}{H_{min} * M_{amax}} \right) * M_{amax} \\ M_{yr} &= \left(1. + \frac{H_{max} * M_{ymin}}{H_{min} * M_{ymax}} \right) * M_{ymax} \end{aligned} \quad (2)$$

$$M_{1r} = \max(M_{ar}, M_{yr}) \quad ==> \quad e_{01r} = M_{1r}/N_d$$

$$M_{2r} = \min(M_{ar}, M_{yr}) \quad ==> \quad e_{02r} = M_{2r}/N_d$$

missä M_{amax} = kerroksen (ks. kuva 3) alapäässä kahdessa kohtisuorassa suunnassa vaikuttavista momenteista suurin, M_{amin} = kerroksen alapäässä kahdessa kohtisuorassa suunnassa vaikuttavista momenteista pienin, M_{ymax} = kerroksen yläpäässä kahdessa kohtisuorassa suunnassa vaikuttavista momenteista suurin, M_{ymin} = kerroksen yläpäässä kahdessa kohtisuorassa suunnassa vaikuttavista momenteista pienin, H_{max} = poikkileikkauksen korkeus rasitetummassa suunnassa, H_{min} =

poikkileikkauksen korkeus vähemmän rasitetussa suunnassa, M_{1r} = redusoiduista momenteista suurin, M_{2r} = redusoiduista momenteista pienin, e_{01r} = suurin redusoiduista alkuperäisistä epäkeskisyyksistä, e_{02r} = pienin redusoiduista alkuperäisistä epäkeskisyyksistä ja N_d = kerroksen mitoittava normaalivoima.



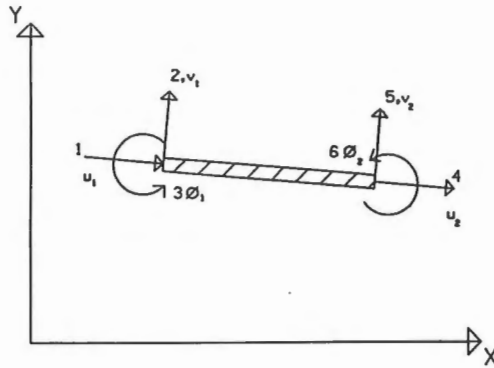
Kuva 1. Kuormituksen jako 1- ja 2-aksiaaliseen taivutukseen.

Mitoitusmomentti saadaan lisäämällä siirtymäanalyysin tulosten perusteella laskettua momenttia (1. kertaluku + 2. kertaluku) vastaavan epäkeskisyyteen ainoastaan perusepäkeskisyyden (e_a) aiheuttama lisä. Siis normien "alkuperäiseen" epäkeskisyyteen on jo sisällytetty ns. lisäepäkeskisyyttä. Näin vältetään nurjahduspituuden "arvaamisen" kohtuuttoman suuri vaikutus lisäepäkeskisyyden arvoon. Käyttäjän on kuitenkin annettava eri kerrosten (ks. kuva 3) nurjahduspituudet perusepäkeskisyyden (e_a) laskentaa varten. Tämän epäkeskisyyden arvoon nurjahduspituudella ei ole kuitenkaan niin dramaattista vaikutusta kuin lisäepäkeskisyyden arvoon.

Ohjelma valitsee teoreettista teräspinta-alaa vastaavan tankoyhdistelmän, laskee tankojen paikat poikkileikkauksessa sekä poikkileikkauksen tehokkaan korkeuden (d). Tämän jälkeen lasketaan teoreettinen teräspinta-ala uudestaan ko. tehokkaalla korkeudella. Ko. iterointia jatketaan kunnes tehokas korkeus ei enää muutu (käytännössä 2-3 iterointikierrosta).

TASOPALKKIELEMENTTI

Pilarin siirtymätila lasketaan elementtimenetelmällä käyttäen 6-vapausasteista puristettua ja taivutettua palkkielementtiä. Kuvassa 2 on esitetty ko. palkki ja sen paikalliset vapausasteet.



Kuva 2. Puristettu ja taivutettu palkkielementti /1/.

Palkin jäykkyyismatriisi kootaan kahdesta osasta, joista ensimmäinen on tavanomainen kaavan (3) mukainen ns. ensimmäisen kertaluokan jäykkyyismatriisi ja toinen kaavan (4) mukainen nk. toisen kertaluokan jäykkyyismatriisi.

Tasopalkin tavanomainen jäykkyyismatriisi:

$$[K1] = \frac{E \cdot I}{L^3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & \frac{-A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6 \cdot L & 0 & -12 & 6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 4 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 2 \cdot L^2 \\ \frac{-A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 & \frac{A \cdot L^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6 \cdot L & 0 & 12 & -6 \cdot L \\ 0 & 6 \cdot L & 2 \cdot L^2 & 0 & -6 \cdot L & 4 \cdot L^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Tasopalkin geometrinen eli ns. toisen kertaluokan jäykkymatriisi:

$$[K2] = \frac{F}{L} * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} & 0 & \frac{-6}{5} & \frac{L}{10} \\ 0 & \frac{L}{10} & \frac{2*L^2}{15} & 0 & \frac{-L}{10} & \frac{-L}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-6}{5} & \frac{-L}{10} & 0 & \frac{6}{5} & \frac{-L}{10} \\ 0 & \frac{L}{10} & \frac{-L^2}{30} & 0 & \frac{-L}{10} & \frac{2*L^2}{15} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Kaavoissa (3) ja (4) tarkoittaa A poikkileikakuksen pinta-alaa, E kimmokerrointa, L palkkielementin pituutta, I taivutusjäykkyyshmomenttia ja F elementissä vallitsevaa normaalivoimaa.

Siirtymätilan laskennassa käytetään siis elementin jäykkymatriisina lausekkeiden (3) ja (4) summaa:

$$\begin{bmatrix} [K] \\ 6*6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [K1] \\ 6*6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K2] \\ 6*6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

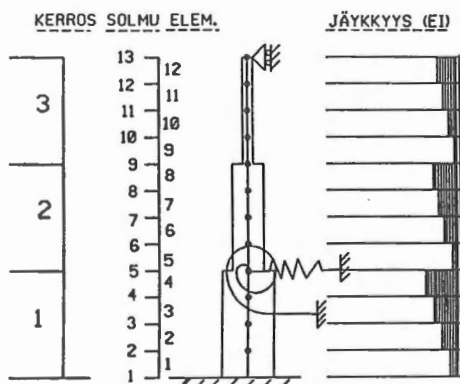
Koska K2:n määrittäminen edellyttää elementin aksiaalivoiman tuntemista, joudutaan ratkaisu suorittamaan iteratiivisesti (myös materiaali/poikkileikkausominaisuuksien epälineaariset ominaisuudet johtavat iteratiiviseen ratkaisuun).

PILARIN JÄYKKYYDEN LASKENTA

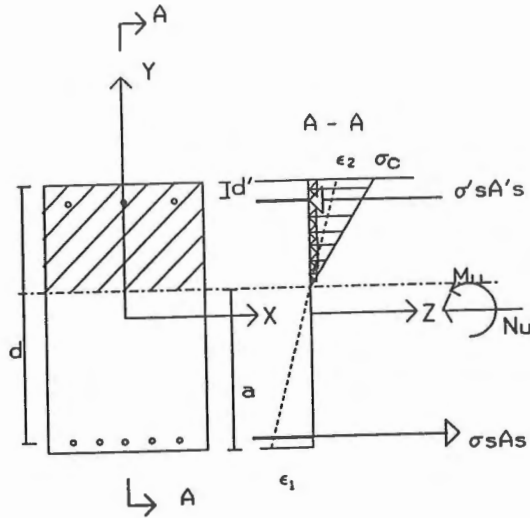
Ohjelman käyttäjä ilmoittaa laskennan lähtötiedoissa pilarin kerrosten lukumäärän (≤ 10 kpl). Kerrosrajat käyttäjä voi valita täysin vapaasti ottaen huomioon kuitenkin, että ainoastaan kerroksen

päätesolmuihin voidaan määrittää reunaehtoja (siirtymä, jousi). Ohjelma jakaa jokaisen kerroksen neljään palkkielementtiin, joiden alueella taivutusjäykkyys on vakio. Täten kunkin kerroksen jäykkyys voi muuttua kerroksen 1/4-pisteissä. Kuvassa 3 on esitetty pilari-mallin solmu- ja elementtijako sekä jäykkyyden muuttumisperiaate.

Siirtymäanalyysin jäykkyydsmatriisin kokoamisvaiheessa lasketaan kullekin elementille taivutusjäykkyys (EI) lähtien edellisen laskentakierroksen (iterointikeirros) voimasuureista sekä raudoituksesta. Taivutusjäykkyys lasketaan etsimällä poikkileikkauksen neutraaliakselin asema ja käyristymä siten, että poikkileikkauksen sisäiset voimasuureet vastaavat ulkoisia kuormia (momentti, normaali-voima). Tässä vaiheessa ohjelma käyttää lineaarista puristusjännitysjakaumaa (teräspinta-aloja laskettaessa käytetään suorakaidekuviolla korvattua paraabelijakaumaa).



Kuva 3. Pilarin kerros- ja elementtijako sekä jäykkyyden muuttuminen poikkileikkauksen halkeilun johdosta.



Kuva 4. Poikkileikkauksen jännitys jakauma.

Kuvan (4) mukaan voidaan kirjoittaa jäännösresultantit

$$R_m = M_u + \int_{A_C} y \sigma_C(y) dA + \sum_{i=1}^{K'} \sigma_i' A_i' y_i' + \sum_{i=1}^K \sigma_i A_i y_i \quad (6)$$

ja

$$R_n = N_u + \int_{A_C} \sigma_C(y) dA + \sum_{i=1}^{K'} \sigma_i' A_i' + \sum_{i=1}^K \sigma_i A_i \quad (7)$$

Neutraaliakselin asema ja käyristymä etsitään valitsemalla kuvan 4 suureet a ja ϵ_2 siten, että epäyhtälö (8) toteutuu.

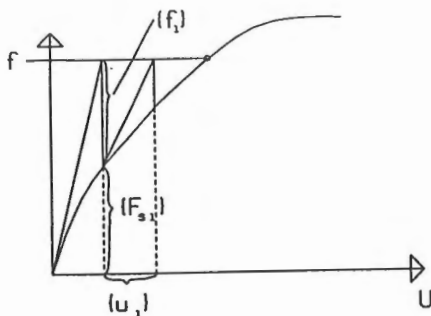
$$R_m + R_n < \delta, \quad (8)$$

missä δ on iteroinnin lopetusnormi.

Ohjelma etsii suureet a ja ϵ_2 Newtonin iteroinnilla.

SIIRTYMÄTILAN LASKENTA

Kuvan 6 vaiheessa RATK lasketaan pilarin siirtymätila ottamalla huomioon geometrinen epälineaarisuus. Tällöin ei pilarin jäykkyyttä muuteta. Kuvassa 5 on esitetty siirtymätilan laskennan periaate.



$$\begin{aligned}
 1^* \quad [K] \cdot \{u_1\} &= \{f_1\} \\
 2^* \quad \{U\} &= \{U\} + \{u_1\} \\
 3^* \quad \{f_{se}\} &= [K_{el}] \cdot \{u_{el}\} \\
 4^* \quad \{F_s\} &= \{F_s\} + \sum_{i=1}^n \{f_{s_{se}}\} \\
 5^* \quad \{f_2\} &= \{F_s\} - \{F_s\}
 \end{aligned}$$

Kuva 5. Siirtymätilan laskenta.

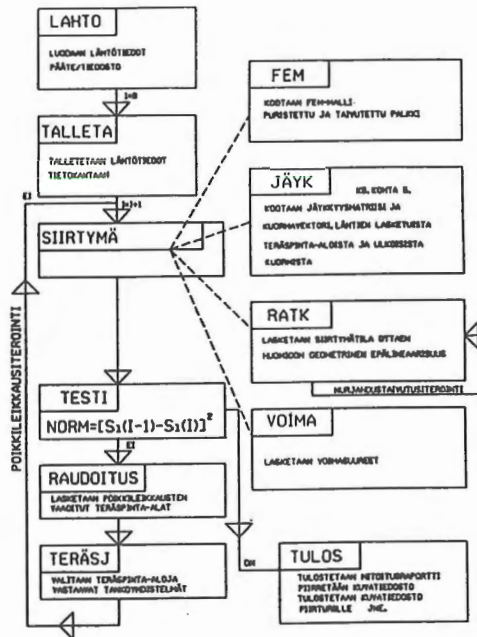
Kuvan 5 laskentavaiheet jakautuvat seuraavasti:

- 1* Lasketaan kuormituslisäyksestä $\{f_i\}$ aiheutuva siirtymälisä $\{u_i\}$. Ensimmäisellä iterointikierroksella $\{f_i\}$ on ulkoisia kuormia vastaava solmuvoimavektori.
- 2* Summataan siirtymälisäys kokonaissiirtymävektoriin $\{U\}$.
- 3* Päivitetään elementtien jäykkyysmatriisit $[K_{el}]$ ja lasketaan siirtymätilasta $\{u_i\}$ kunkin elementin sisäisiä jännityksiä vastaava solmuvoimavektori $\{f_{se}\}$.
- 4* Summataan elementin sisäisiä jännityksiä vastaavat solmuvoimavektorit $\{f_{se}\}$ globaaliin solmuvoimavektoriin $\{F_s\}$.
- 5 * Lasketaan ulkoisia kuormia vastaavan solmuvoimavektorin $\{F_u\}$ ja kohdassa 4 lasketun solmuvoimavektorin $\{F_s\}$ erotus ns. epätasapainokuorma $\{f_i\}$ ja asetetaan tämä kuormaksi uudelle iterointikierrokselle.

OHJELMAN TOIMINTAKAAVIO

Kuvassa 6 on esitetty ohjelman yksinkertaistettu toimintakaavio.

Kuvan 6 SIIRTYMÄ/RATK-osassa suoritetaan pilarin siirtymätilan laskenta. Tällöin otetaan huomioon geometrinen epälineaarisuus (nor-



Kuva 6. Ohjelman yksinkertaistettu toimintakaavio.

maalivoiman vaikutus taivutusmomenttiin), mutta ei materiaalin epälinearisuutta (poikkileikkauksen halkeilu). Siis etsitään ulkoisten ja sisäisten voimien tasapainotilaa vakiojäykkyydellä. SIIRTYMÄ-/VOIMA-osassa suoritetaan voimasuureiden laskenta lähtien SIIRTYMÄ-/RATK-osassa lasketusta siirtymätilasta. Pilarin eri kerrosten jäykkyys määräytyy RAUDOITUS-osassa lasketun teräspinta-alan ja SIIRTYMÄ/VOIMA-osassa lasketujen voimasuureiden perusteella (ks. kohta 4). Ensimmäisellä poikkileikkausiterointikierroksella jolloin pilarin raudoitusta ei ole vielä kertaakaan laskettu, käytetään kimmoteorian mukaista jäykkyyttä.

Poikkileikkausiterointikierroksen muodostavat vaiheet: SIIRTYMÄ, TESTI, RAUDOITUS ja TERÄSJAKO.

Poikkileikkausiterointi lopetetaan, kun peräkkäisillä iterointikierroksilla (I) ja (I-1) laskettujen solmusiirtymien erotusten neliöiden summa (normi) on riittävän pieni. Normin ollessa riittävän pieni ovat eri kerrosten teräspinta-alat ja lasketut voimasuureet sopusoinnussa voimasuureiden laskennassa käytettyjen jäykkyyksien kanssa.

SUUNNITTELUN KULKU

Komentovalikoima

Käyttäjän käynnistettyä ohjelmiston pääohjelman on hänellä VMS-käyttöjärjestelmän komentojen lisäksi käytössään ohjelmiston erikoiskomentoja. Kuvassa 7 on esitetty tavallisimmat komennot.

-APUA	= saat tarkempia ohjeita
-ASETUS	= elementin piirt/lask.asetukset
-ELTY	= määritetään elementin tyyppi palkki, pilari jne.
-GRAF	= siirytään graafiseen moodiin
-LISTP	= elementin mitoitusraportin tulostus
-MASSAT	= määrä- ym. listaukset
-OHJ	= listaus normaalikomennoista
-OHJ2	= listaus erikoiskomennoista
-PALKKI	= elementtipalkin mitoitus ja piirto tiedostoon
-PIIR	= aktiivisen elementin piirto tiedostoon
-PIIR2	= useamman elementin piirto tiedostoon
-PIPO	= kuvien piirto ja piirturikuvan tulostus
-PLOT	= piirturikuvan tulostus
-PLOTL	= tulostetaan plot-kirjanpito
-SUOJ	= kielletään/sallitaan kuvan tuhoaminen
-SIIRH	= siirrytään hakemistosta toiseen
-STOP	= lopetetaan istunto
-TILAKU	= listaus valmiista kuvatiedostoista
-TILAPA	= listaus lasketuista palkeista
-TILAPI	= listaus lasketuista pilareista
-UUSI	= uusi elementti
-UUSIR	= uusi rakennuskohde
-ALKU	= aloitetaan uusi rakennuskohde eli perustetaan uusi tietokanta
-TIIV	= kuvatiedostojen tiivistys
-OSOITE	= määritetään tämän kohteen piirustusten postitusosoite
-POIS	= elementin tuhoaminen tiedostosta
-PRINT*	= mitoitusrap. tulostus halutulle printterille
-JON	= listaus piirtojonon töistä
-JONP	= listaus plot-jonojen töistä
-SEUR	= prosessien seuranta
-ERATUL	= tulostetaan haluttu eräajoraportti
jne.	

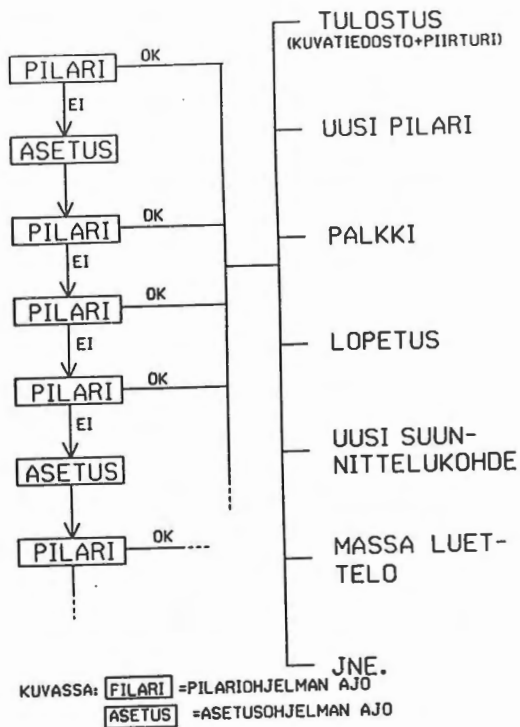
Kuva 7. Tavallisimmat komennot.

Mitoitus/parametrit

Pilarin suunnittelun kannalta tärkeimmät komennot ovat seuraavat:

- PILARI = pilarin mitoitusohjelman käynnistys
- ASETUS = raudoitus- ja piirtoasetusten muutos

Karkeasti kuvattuna suunnitteluprosessi on kuvan 8 mukainen.



Kuva 8. Pilarin suunnitteluprosessi.

TULOSTUKSESTA

Ohjelman tuloksista talletetaan tiedostoon ainoastaan käytetyt tankotyypit ja niiden lukumäärät, betonitilavuus sekä arkistotietoa laskennan ajankohdasta. Kaikki lähtötiedot talletetaan tiedostoon.

Varsinaisen mitoituksen jälkeen suunnittelija voi käynnistää ko. elementin piirtämisen joko osituskäytössä tai eräajona. Piirustuksen lisäksi ohjelma tulostaa jokaisesta mitoitusajosta ns. mitoitusraportin, joka sisältää tiedot elementin geometriasta, materiaaleista ja kuormista sekä tulokset.

JATKOKEHITYKSESTÄ

Ohjelmaan on jatkossa tarkoitus lisätä raudoituksen valinnan jälkeen suoritettava poikkileikkauksen kapasiteetin tarkistus (vino taivutus) sekä parabolinen puristusjännitys jakauma.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] Przemieniecki, J.S., Theory of matrix structural analysis. McGraw-Hill, 1968, s. 388 - 389.
- [2] Suomen rakennusinsinöörien Liitto, RIL 131-1984, Betoninormit 1981.

Olli Immonen, dipl.ins., Imatran Voima Oy, Rakennussuunnitteluosasto