

Peatükk 7

Telgsümmeetrilised pinged ja deformatsioonid pöördkehades

7.1. Üldvõrrandid

7 - 2

Mõningaid selliseid ülesandeid oleme juba eespool vaadelnud (näiteks alajaotused 5.11 ja 5.12). Käesoleva peatüki kahes esimeses paragrahvis vaadeldakse telgsümmeetriliste ülesannete lahendamist Love'i pingefunktsiooni ja Legendre'i polünoomide abil vabalt toetatud ümarplaadi paindeülesande näitel. Saadud lahendid on lineaarse elastsusteooria mõttes täpsed lahendid, st. lahendamisel lähtutakse elastsusteooria põhivõrranditest. Sellisele lähenemisiisile «vastandub» nn. 0-järku teooria, mille korral lähtutakse tala elastse joone või plaadi elastse pinnavaatamisest. Sellist lähenemist ümarplaadi paindeülesande lahendamisele vaatleme kolmandas paragrahvis.

7.1 Üldvõrrandid

Käesolevas alajaotuses leiavad käsitlemist ülesanded, kus ei esine vääned. Siinlindriliste koordinaatide (r, ϑ, z) puhul tähendab see seda, et vastavatest siirdekompontidest $v = 0$ ja komponendid u ja w ei sõltu koordinaadist ϑ . Seega ka pingekomponendid ei sõltu koordinaadist ϑ ja kaks neist $\tau_{r\vartheta} = \tau_{\vartheta z} = 0$.

Nullist erinevad deformatsioonikomponendid avalduvad kujul

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\vartheta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}. \quad (7.1)$$

Tasakaaluvõrrandid saavad aga kuju

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\vartheta}{r} + R = 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + Z = 0, \end{cases} \quad (7.2)$$

kus R ja Z on koordinaatide r ja z sihiliste mahujõudude intensiivsus (dimensioon N/m^3). Paljudel juhtudel on jällegi otstarbekas tuua sisse pingefunktsioon φ , mida siin nimetatakse Love'i pingefunktsiooniks.

Tasakaaluvõrrandid on rahuldatud kui valida

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right), & \sigma_\vartheta = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right), \\ \sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right], & \tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right]. \end{cases} \quad (7.3)$$

7.1. Üldvõrrandid

Siinjuures peab φ rahuldama biharmoonilist võrrandit

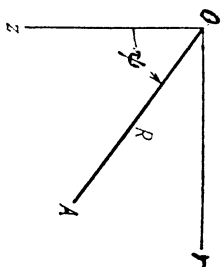
$$\nabla^4 \varphi = 0, \quad (7.4)$$

kus

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (7.5)$$

on Laplace'i operaator silindrilistes koordinaatides. Kuna antud juhul ei sõltu φ koordinaadist ϑ , siis langeb Laplace'i operaatoris (7.5) kolmas liige välja. Siirdekomponeendid u ja w määratakse avaldistega

$$2Gu = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z}, \quad v = 0, \quad 2Gw = 2(1 - \nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}. \quad (7.6)$$



Joonis 7.1: Sfäärilised koordinaadid.

Mõnel juhul on silindriliste koordinaatide asemel mõistlik kasutada sfäärilisi koordinaate, st., r ja z asemel kasutatakse koordinaate R ja ψ . Nüüd on vaja (7.5)-s asendada osatuletised r ja z järgi. See üleminek on omakorda analoogne DRK x ja y ja polaarkoordinaatide r ja ϑ vahelisele seosele. Saame

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \psi^2}, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{R \sin \psi} \left(\frac{\partial}{\partial R} \sin \psi + \frac{\cos \psi}{R} \frac{\partial}{\partial \psi} \right) = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\cot \psi}{R^2} \frac{\partial}{\partial \psi}. \end{cases} \quad (7.7)$$

7.1. Üldvõrrandid

7 - 6

Seega omab biharmooniline võrrand (7.4) silindriliste koordinaatide puhul kuju

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)^2 \varphi = 0 \quad (7.8)$$

ja sfääriliste puhul

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\cot \psi}{R^2} \frac{\partial}{\partial \psi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \psi^2} \right)^2 \varphi = 0. \quad (7.9)$$

Võrrandi (7.9) lahend peab samal ajal rahuldama ka Laplace'i võrrandit, st,

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial R} + \frac{\cot \psi}{R^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \psi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \psi^2} = 0. \quad (7.10)$$

Viimase erilahendit võib otsida kujul

$$\varphi_n = R^n \Psi_n, \quad (7.11)$$

kus Ψ_n on vaid muutuja φ funktsioon. Kokku saame viimasest kahest harilikku diferentsiaalvõrrandi

$$\frac{1}{\sin \psi} \frac{d}{d\psi} \left(\sin \psi \frac{d\Psi_n}{d\psi} \right) + n(n+1) \Psi_n = 0. \quad (7.12)$$

Kui tähistame $x = \cos \psi$ ja valime x uueks sõltumatuks muutujaks, siis saame (7.12)-st Legendre'i võrrandi

$$(1 - x^2) \frac{d^2 \Psi_n}{dx^2} - 2x \frac{d\Psi_n}{dx} + n(n+1) \Psi_n = 0. \quad (7.13)$$

Selle võrrandi lahendid on esitatavad Legendre'i polünoomide $P_n(x)$ kaudu:

$$\begin{cases} P_0(x) = 1, & P_1(x) = x, & P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1), \\ P_3(x) = \frac{1}{2}(5x^3 - 3x), & P_4(x) = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3), \\ P_5(x) = \frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x), \dots, \\ P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n. \end{cases} \quad (7.14)$$

Neid polünoome võib kasutada funktsioonidena Ψ_n avaldises (7.11) kusjuures igit neist võib veel korrutada konstandiga A_n .

7.1. Üldvõrrandid

Kasutades valemeid

$$x = \cos \psi, \quad Rx = z \quad \text{ja} \quad R = \sqrt{r^2 + z^2} \quad (7.15)$$

saab minna tagasi muutujatele r ja z . Seejuures saab võrrandi (7.9) lahend kuju

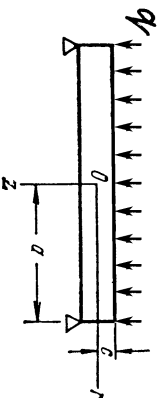
$$\begin{cases} \varphi_0 = A_0, & \varphi_1 = A_1 z, \\ \varphi_2 = A_2 \left[z^2 - \frac{1}{3}(r^2 + z^2) \right], \\ \varphi_3 = A_3 \left[z^3 - \frac{3}{5}z(r^2 + z^2) \right], \\ \varphi_4 = A_4 \left[z^4 - \frac{6}{7}z^2(r^2 + z^2) + \frac{3}{35}(r^2 + z^2)^2 \right], \\ \varphi_5 = A_5 \left[z^5 - \frac{10}{9}z^3(r^2 + z^2) + \frac{5}{21}(r^2 + z^2)^2 \right], \\ \dots \end{cases} \quad (7.16)$$

Toodud polünoomid on ka biharmoonilise võrrandi (7.4) lahendiks.

Saab näidata, et kui $R^n \Psi_n$ osutub harmoonilise võrrandi (7.10) lahendiks, siis $R^{n+2} \Psi_n$ rahuldab biharmoonilist võrrandit (7.4) (kuid ei rahulda (7.10)) Korrutades (7.16) $R^2 = r^2 + z^2$, saame uued lahendid

$$\begin{cases} \varphi_2 = B_2(r^2 + z^2), \\ \varphi_3 = B_3z(r^2 + z^2), \\ \varphi_4 = B_4(2z^2 - r^2)(r^2 + z^2), \\ \varphi_5 = B_5(2z^3 - 3r^2z)(r^2 + z^2), \\ \dots \end{cases} \quad (7.17)$$

7.2. Ümarplaadi paine



Joonis 7.2: Sümmetriliselt jaotatud põikkooormusega koormatud ja servadest vabalt toetatud ümarplaat.

Vaatleme sümmetriliselt koormatud ümarplaati (joonis 7.2). Valides avaldistest (7.16) ja (7.17) kolmandat järku polünoomid, saame pingefunktsiooni esitada kujul

$$\varphi = A_3(2z^3 - 3r^2z) + B_3(r^2z + z^3). \quad (7.18)$$

Avaldiste (7.3) põhjal saame seejärel pingekomponendid kujul

$$\begin{cases} \sigma_r = -6A_3 + (10\nu - 2)B_3, \\ \sigma_\theta = -6A_3 + (10\nu - 2)B_3, \\ \sigma_z = -12A_3 + (14 - 10\nu)B_3, \\ \tau_{rz} = 0. \end{cases} \quad (7.19)$$

Seega osutuvad pingekomponendid kogu plaadi ulatuses konstantseteks. Valimites (7.19) olevate konstantide A_3 ja B_3 määramiseks tuleb kasutada rajatingimusi σ_r ja σ_z jaoks. Kokkuvõttes: kolmandat järku polünoomide abil saab esitada lahendi, mis vastab olukorrale, kus plaadi pinnale on rakendatud telgsümmeetrilised konstantsed koormused.

Valides (7.16) ja (7.17) neljandat järku polünoomid, saame pingekomponentide jaoks avaldised

$$\begin{cases} \sigma_r = 96A_4z + 4B_4(14\nu - 1)z, \\ \sigma_z = -192A_4z + 4B_4(16 - 14\nu)z, \\ \tau_{rz} = 96A_4r - 2B_4(16 - 14\nu)r. \end{cases} \quad (7.20)$$

Kui võtta $96A_4 - 2B_4(16 - 14\nu) = 0$, saame

$$\sigma_z = \tau_{rz} = 0 \quad \text{ja} \quad \sigma_r = 28(1 + \nu)B_4z, \quad (7.21)$$

mis esitab plaadi puhast painet juhul kui ta servadesse on rakendatud ühtlaselt jaotatud momendid.

7.2. Ümarplaadi paine

7 - 12

Ühtlaselt jaotatud koormusele allutatud plaadi lahendi saamiseks lähtutakse kuuendat järku polünoomidest. Vastavatele pingetele (mida siin ei esita, kuid mis sisaldavad konstante A_6 ja B_6) lisatakse lahend (7.20) juhul $B_4 = 0$ ja z -telje sihiline ühtlane tõmme $\sigma_z = b$ lahendist (7.19). Seega tuleb rajatingimustest

$$\begin{cases} \sigma_z = 0, & z = c; & \sigma_z = -q, & z = -c; \\ \tau_{rz} = 0, & z = \pm c; \end{cases} \quad (7.22)$$

määrata neli konstanti A_6, B_6, A_4 ja b .

Kokku saame

$$\begin{cases} \sigma_r = q \left[\frac{2 + \nu z^3}{8 c^3} - \frac{3(3 + \nu)r^2 z}{32 c^3} - \frac{3z}{8c} \right], \\ \sigma_z = q \left[-\frac{z^3}{4c^3} + \frac{3z}{4c} - \frac{1}{2} \right], \\ \tau_{rz} = -\frac{3qr}{8c^3}(c^2 - z^2). \end{cases} \quad (7.23)$$

Valemite (7.23) puhul on huvitav see, et esitatav pingeaotus on analoogiline pingete σ_y ja τ_{xy} jaotusega kitsa ristkülikulise tala puhul (võrdle valem (5.66) lk. 5-47). Tala valemite puhul tuleb arvestada, et sisse on toodud inertsimoment $I = 2c^3/3$. Radiaalsed pinged on esitatud paaritu funktsioonina koordinaadist z ja annavad servas tihthlaselt jaotatud paindemomendi.

Et saada lahendit servast vabalt toetatud plaadi jaoks, lisame pingevaldistele (7.23) lahendi (7.21) ja määrame konstandi B_4 rajatingimusest

$$\int_{-c}^c \sigma_r z dz = 0, \quad r = a. \quad (7.24)$$

Seega saab vaba toetuse puhul radiaalse normaalpinge σ_r avaldis kuju

$$\sigma_r = q \left[\frac{2 + \nu z^3}{8 c^3} - \frac{3(3 + \nu) r^2 z}{32 c^3} - \frac{3(2 + \nu) z}{8 c} + \frac{3(3 + \nu) a^2 z}{32 c^3} \right]. \quad (7.25)$$

Kui võtta $r = 0$, saame pinge σ_r , mis mõjub plaadi tsentris. Elementaarteooria puhul esitab pinget plaadi tsentris valem

$$\sigma_r = \frac{3(3 + \nu) a^2 z}{32 c^3}, \quad (7.26)$$

7.2. Ümarplaadi paine

7 - 14

s.o. (7.25) viimane liige. Kui plaadi paksus $2c$ on väike võrreldes raadiusega a , siis osutuvad ka «parandusliikmed» väikesteks.

Puhata painde lisamisega ja rajatingimuse (7.24) rakendamisega kõrvaldasime me küll paindemomendid vabas servas $r = a$, kuid ei vabanenud pingetest

$$\sigma_r|_{r=a} = q \left[\frac{2 + \nu z^3}{8 c^3} - \frac{3(2 + \nu) z}{5 c} \right]. \quad (7.27)$$

Nende pingete peavektor ja peamoment plaadi servas on nullid, seega tuleb lahendi täpsuse ja «kehitivuse» hindamisel rakendada Saint-Venant'i printsiipi.

Kui kasutada kuuendast kõrgemat järku polünoome, saab leida lahendeid juhtude jaoks, kus $q = q(r)$. Teist liiki Legendre'i polünoome ($Q_0(x) = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x}$, $Q_1(x) = \frac{x}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} - 1, \dots$) kasutades saab leida lahendeid rõngasplaadi jaoks. Kõik need lahendid kehitivad juhul kui läbipainded on väikesed võrreldes paksusega $2c$. Suurte läbipainete puhul tuleb arvestada plaadi kesktasandi pikenenemisega.

7.3 Telgsümmeetrilise plaadi elastse pinnaga diferentsiaalvõrrand.

Siin alajaotuses rakendame ristkülikplaatidega analoogilist lähenemist: paragrahvis 6.1 toodud plaatide paindeteooria hüpoteesid saavad telgsümmeetrilisel juhul kuju

$$\begin{cases} w(r, z) = w(r), & u(r, z) = -z \frac{dw(r)}{dr}, & \sigma_z = 0, \\ R(r, z) = 0, & Z(r, z) = \frac{3}{2h} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) p(r). \end{cases} \quad (7.28)$$

Seejärel saame tasakaaluvõrranditele (7.2) kuju

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_r)}{\partial r} - \frac{\sigma_\vartheta}{r} + \frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} = \frac{3}{2h} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2}\right) p(r). \end{cases} \quad (7.29)$$

7.3. Telgsümmeetrilise plaadi elastse pinnaga diferentsiaalvõrrand.

Viimasest kahest võrrandist saab elimineerida pinge τ_{rz} :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_\vartheta)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2(r\sigma_r)}{\partial r^2} = \frac{zp}{i}, \quad i = \frac{h^3}{12} \quad (7.30)$$

kus i on inertsimomendi intensiivsus. Elastse pinnaga diferentsiaalvõrrandi saamiseks tuleb nüüd deformatsioonid avaldada läbi siirete Cauchy seoste abil ning seejärel pinged deformatsioonide kaudu üldistatud Hooke'i seaduse abil. Tulemuseks on neljandat järku diferentsiaalvõrrand

$$\frac{d^4 w}{dr^4} + \frac{2d^3 w}{r dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{dw}{dr} = \frac{p}{D}, \quad D = \frac{Ei}{1-\nu^2} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (7.31)$$

Peale võrrandi (7.31) lahendamist saab leida normaalpinged

$$\begin{cases} \sigma_r = -D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right) \frac{z}{i}, \\ \sigma_\vartheta = -D \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2 w}{dr^2} \right) \frac{z}{i}. \end{cases} \quad (7.32)$$

Nihkepinge τ_{rz} saame leida võrrandi (7.29)₁ integreerimisel z järgi:

$$\tau_{rz} = \int \left[\frac{\sigma_{\theta}}{r} - \frac{1}{r} (r\sigma_r) \right] dz = \dots, \quad (7.33)$$

kust peale rajatingimuste $\tau_{rz}|_{z=\pm h/2} = 0$ rahuldamist saame

$$\tau_{rz} = -D \left(\frac{d^3w}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2w}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} \right) \frac{3}{2h} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right). \quad (7.34)$$

Analoogiliselt valemitele (6.15) on pingete ja sisejõudude vahelised seosed kujul

$$\sigma_r = \frac{M_r z}{i}, \quad \sigma_{\theta} = \frac{M_{\theta} z}{i}, \quad \tau_{rz} = \frac{3Q_r}{2h} \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right), \quad (7.35)$$

kust saame

$$\begin{cases} M_r = -D \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right), \\ M_{\theta} = -D \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2w}{dr^2} \right), \\ Q_r = -D \left(\frac{d^3w}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2w}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} \right). \end{cases} \quad (7.36)$$

7.3. Telgsümmeetrilise plaadi elastse pinnu diferentsiaalvõrrand.

7 - 18

Diferentsiaalvõrrandi (7.31) saab kirjutada lahendamiseks sobivamale kujule:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{p}{D}. \quad (7.37)$$

Juhul kui $p(r) = p_0 = \text{const}$ saame viimasest

$$w(r) = C_1 r^2 \ln r + C_2 r^2 + C_3 \ln r + C_4 + \frac{p_0 r^4}{64D}. \quad (7.38)$$

Konstantide C_1, \dots, C_4 määramiseks tuleb kasutada rajatingimusi $w(r)$, $dw(r)/dr$, $M_r(r)$, $M_{\theta}(r)$ või $Q_r(r)$ jaoks. Vastavad avaldised omavad kuju

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dw(r)}{dr} &= 2C_1 r \ln r + C_1 r + 2C_2 r + \frac{C_3}{r} + \frac{p_o r^3}{16D}, \\ M_r(r) &= -D \left[2C_1(1+\nu) \ln r + C_1(3+\nu) + 2C_2(1+\nu) - \frac{C_3(1-\nu)}{r^2} \right] - \\ &\quad - (3+\nu) \frac{p_o r^2}{16}, \\ M_\theta(r) &= -D \left[2C_1(1+\nu) \ln r + C_1(1+3\nu) + 2C_2(1+\nu) + \frac{C_3(1-\nu)}{r^2} \right] - \\ &\quad - (1+3\nu) \frac{p_o r^2}{16}, \\ Q_r(r) &= -\frac{4DC_1}{r} - \frac{p_o r}{2}. \end{aligned} \right. \quad (7.39)$$

Suurstest (7.38) ja (7.39) on väliserval teada tavaliselt kaks. Rõngasplaadi puhul lisandub siseservas veel kaks tingimust, mis kokku võimaldavad määrata neli konstanti. Ümar- ehk ringplaatide korral peab konstant $C_3 = 0$ — vastasel korral poleks siirded plaadi keskel lõplikud suurused, sest $\ln r \rightarrow -\infty$ kui $r \rightarrow 0$. Samas, $r^2 \ln r \rightarrow 0$, kui $r \rightarrow 0$.

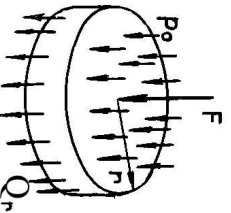
7.3. Telgsümmeetrilise plaadi elastse pinnu diferentsiaalvõrrand.

Konstandi C_1 määramiseks kasutame tingimust, et mööda suvalist kontsentri- list ringjoont mõjuv põikjõud peab tasakaalustama selle ringjoone sees mõjuva koormuse.

- **Ühtlane koormus p_o .** Eldades nii p kui Q_r jaoks positiivsed suunad (vt. joonis), saame

$$2\pi r Q_r + \pi r^2 p_o = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_r = -\frac{p_o r}{2}. \quad (7.40)$$

Seega (7.39)₄ põhjal peab $C_1 = 0$.



- **Tsentris mõjuv koondatud jõud F .** Nüüd

$$2\pi r Q_r + F = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_r = -\frac{F}{2\pi r}. \quad (7.41)$$

Võttes avaldised (7.39)₄ koormuse $p_0 = 0$ saame

$$Q_r = -\frac{4DC_1}{r} = -\frac{F}{2\pi r} \Rightarrow C_1 = \frac{F}{8D\pi}. \quad (7.42)$$

7.4 Ümar- ja rõngasplaatide käitumine erinevate koormusskeemide ja toetusviiside korral.

7.4.1 Rajatingimused

- jäik kinnitus

$$w = 0, \quad \frac{dw}{dr} = 0; \quad (7.43)$$
- vaba toetus

$$w = 0, \quad M_r = 0; \quad (7.44)$$
- vaba serv

$$M_r = 0, \quad Q_r = 0. \quad (7.45)$$

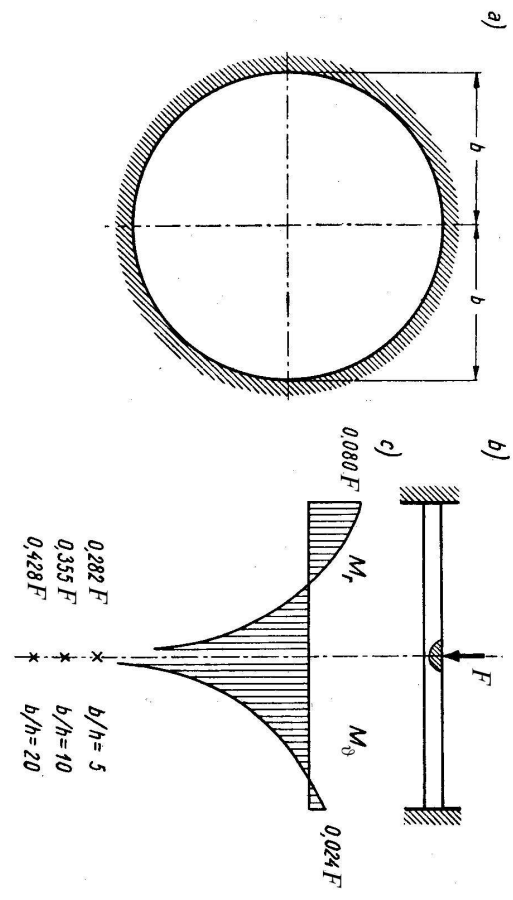
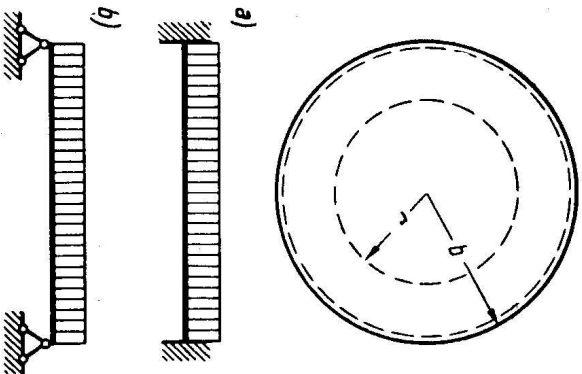
7.4.2. Ühtlaselt jaotatud koormusega ümarplaat

7 - 22

7.4.2 Ühtlaselt jaotatud koormusega ümarplaat (vt. joonis 7.3).

Konstandid $C_1 = C_3 = 0$ ja avaldised (7.38) ja (7.39) saavad kuju

$$\begin{cases} w(r) = C_2 r^2 + C_4 + \frac{p_0 r^4}{64D}. \\ \frac{dw(r)}{dr} = 2C_2 r + \frac{p_0 r^3}{16D}, \\ M_r(r) = -2DC_2(1+\nu) - (3+\nu)\frac{p_0 r^2}{16}, \\ M_\theta(r) = -2DC_2(1+\nu) - (1+3\nu)\frac{p_0 r^2}{16}, \\ Q_r(r) = -\frac{p_0 r}{2}. \end{cases} \quad (7.46)$$



Joonis 7.3: Ühtlaselt koormatud ümarplaadi paine.

Joonis 7.4: Koondatud jõuga koormatud ümarplaadi paine.

7.4.2. Ühtlaselt jaotatud koormusega ümarplaat

a) Jäik kinnitus (vt. joonis 7.3 a))

Rajatingimused plaadi välisservas $r = b$ on antud kujul $w = 0$ ja $dw/dr = 0$. Kasutades viimaseid, saame määrata konstandid C_2 ja C_4 :

$$C_2 = -\frac{p_0 b^2}{32D}; \quad C_4 = \frac{p_0 b^4}{64D}. \quad (7.47)$$

Seega saavad siirete ja paindemomentide avaldised (7.46) lõpuks kuju

$$\begin{cases} w(r) = \frac{p_0}{64D} (b^2 - r^2)^2, \\ M_r(r) = \frac{p_0}{16} [b^2(1 + \nu) - r^2(3 + \nu)], \\ M_\theta(r) = \frac{p_0}{16} [b^2(1 + \nu) - r^2(1 + 3\nu)]. \end{cases} \quad (7.48)$$

Vastavad ekstremaalsed väärtused

$$\begin{cases} r = 0: & w = \frac{p_0}{64D} b^4, & M_r = M_\theta = \frac{p_0 b^2}{16} (1 + \nu), \\ r = b: & M_r = -\frac{p_0}{8} b^2, & M_\theta = -\frac{p_0 \nu}{8} b^2. \end{cases} \quad (7.49)$$

Pinged. Vastavalt valemitele (7.49) ja (7.48) *paindepinged*¹ *plaadi keskel*

$$\sigma_r|_{r=0} = \sigma_\theta|_{r=0} = \frac{3}{8}(1+\nu)p_0 \left(\frac{b}{2c}\right)^2 \quad (7.50)$$

ja *plaadi servas*

$$\sigma_r|_{r=b} = -\frac{3}{4}p_0 \left(\frac{b}{2c}\right)^2, \quad \sigma_\theta|_{r=b} = \nu \sigma_r|_{r=b}. \quad (7.51)$$

Pingete suhe servas ja keskel Poisson'i teguri $\nu = 1/3$ korral

$$\left| \frac{\sigma_r|_{r=b}}{\sigma_r|_{r=0}} \right| = 1,5. \quad (7.52)$$

¹Pingete-momentide vaheline seos: $\sigma = 12Mz/(2c)^3$, $\sigma_{\max} = 6M/(2c)^2$, $2c$ on plaadi paksus.

Vt. ka A. C. Ugural, Stresses in Plates and Shells, Boston, McGraw-Hill, 1999

7.4.2. Ühtlaselt jaotatud koormusega ümarplaat

b) Vaba toetus (vt. joonis 7.3 b))

Kasutades rajatingimusi plaadi välisservas $r = b$ kujul $w = 0$ ja $M_r = 0$ saame määrata konstandid

$$C_2 = -\frac{3+\nu}{1+\nu} \cdot \frac{p_0 b^2}{32D}, \quad C_4 = \frac{3+\nu}{1+\nu} \cdot \frac{p_0 b^4}{32D} - \frac{p_0 b^4}{64D}. \quad (7.53)$$

Pannes need väärtused avaldistesse (7.46) saame

$$\begin{cases} w(r) = \frac{p_0(b^2 - r^2)}{64D} \left(b^2 \frac{5+\nu}{1+\nu} - r^2 \right), \\ M_r(r) = \frac{p_0(3+\nu)}{16} (b^2 - r^2), \\ M_\theta(r) = \frac{p_0}{16} [b^2(3+\nu) - r^2(1+3\nu)]. \end{cases} \quad (7.54)$$

Ekstremaalsed väärtused on plaadi keskel, st.,

$$r = 0: \quad w = \frac{5+\nu}{1+\nu} \cdot \frac{p_0 b^4}{64D}, \quad M_r = M_\theta = \frac{p_0(3+\nu)}{16} b^2. \quad (7.55)$$

Pinged. Järgnevate avaldiste tuletuskäike vaata A. C. Ugural, Stresses in Plates and Shells, Boston, McGraw-Hill, 1999

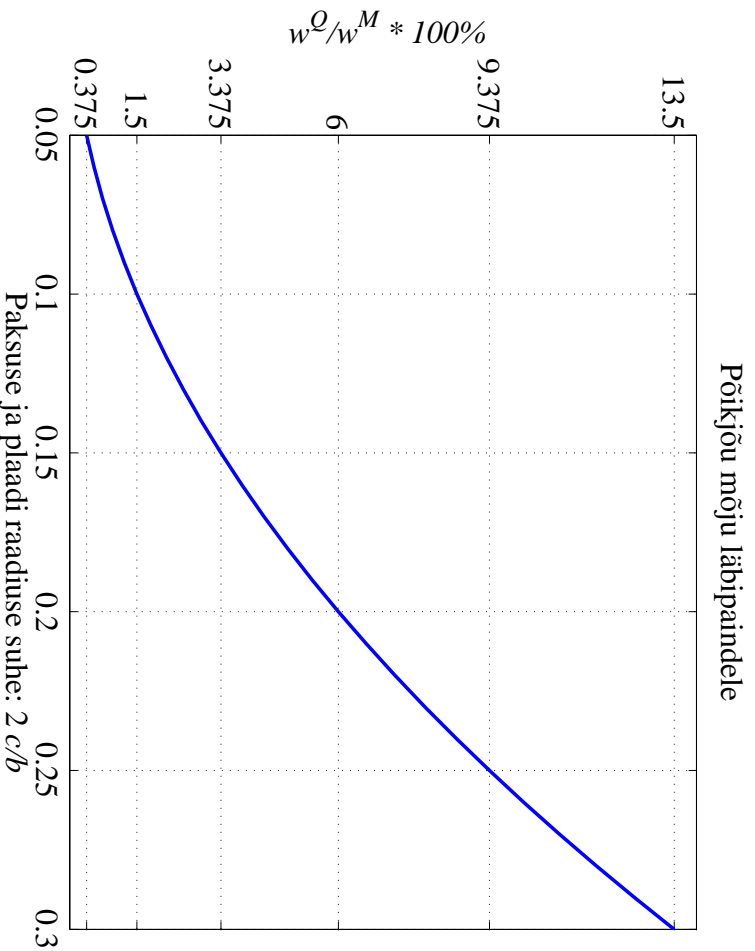
- **Maksimaalne pinge plaadi keskel**

$$\sigma_r|_{r=0} = \sigma_\theta|_{r=0} = \frac{3}{8}(3 + \nu)p_0 \left(\frac{b}{2c}\right)^2. \quad (7.56)$$

- **Põikjõu mõju läbipaindele.** Põikjõust põhjustatud läbipainde w^Q ja paindemomendist põhjustatud läbipainde w^M suhe

$$\frac{w^Q}{w^M} = 1,5 \left(\frac{2c}{b}\right)^2. \quad (7.57)$$

Seega, mida suurem on plaadi paksuse suhe raadiusse, seda suuremat osatähtsust omab põikjõust põhjustatud läbipaine. Näiteks $2c/b = 0,1$ korral $w^Q/w^M = 0,015 = 1,5\%$, kuid $2c/b = 0,2$ korral juba $w^Q/w^M = 0,06 = 6\%$ (vt. joon. 7.5).



Joonis 7.5: Põikjõust põhjustatud läbipainde w^Q ja paindemomendist põhjustatud läbipainde w^M suhe (protsentides) sõltuvana plaadi paksuse ja raadiuse suhtest.

Kahe toetusviisi maksimaalsete pingete võrdlus. Poissoni tegur $\nu = 1/3$, ülemine indeks «j» tähistab jäika kinnitust ja «vt» vaba toetust.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_r^{vt}|_{r=0}}{\sigma_j^i|_{r=0}} &= 2, 5; & \frac{|\sigma_r^{vt}|_{r=0}|}{\sigma_j^i|_{r=b}} &= 1, 667. \end{aligned} \right\} \quad (7.58)$$

7.4.3. Keskel koondatud jõuga koormatud ümarplaat

7.4.3 Keskel koondatud jõuga koormatud ümarplaat (vt. joonis 7.4).

Konstandid $C_1 = F/(8D\pi)$ ning $C_3 = 0$ ja avaldised (7.38) ja (7.39) saavad kuju

$$\left\{ \begin{aligned} w(r) &= \frac{F}{8D\pi} r^2 \ln r + C_2 r^2 + C_4, \\ \frac{dw(r)}{dr} &= \frac{F}{8D\pi} r (2 \ln r + 1) + 2C_2 r, \\ M_r(r) &= -D \left\{ \frac{F}{8D\pi} [2(1 + \nu) \ln r + (3 + \nu)] + C_2(1 + \nu) \right\}, \\ M_\theta(r) &= -D \left\{ \frac{F}{8D\pi} [2(1 + \nu) \ln r + (1 + 3\nu)] + C_2(1 + \nu) \right\}, \\ Q_r(r) &= -\frac{F}{2\pi r}. \end{aligned} \right\} \quad (7.59)$$

a) Jäik kinnitus (vt. joonis 7.4)

Konstandid C_2 ja C_4 määratakse rajatingimustest $w = 0$ ja $dw/dr = 0$ plaadi välisservas $r = b$. Tulemus on

$$C_2 = -\frac{F(2\ln b + 1)}{16D\pi}, \quad C_4 = \frac{Fb^2}{16D\pi}. \quad (7.60)$$

Siirded ja paindemomendid (7.59) saavad seejärel kuju

$$\begin{cases} w(r) = \frac{F}{16D\pi} \left(2r^2 \ln \frac{r}{b} - r^2 + b^2 \right), \\ M_r(r) = -\frac{F}{4\pi} \left[1 + (1 + \nu) \ln \frac{r}{b} \right], \\ M_\theta(r) = -\frac{F}{4\pi} \left[\nu + (1 + \nu) \ln \frac{r}{b} \right]. \end{cases} \quad (7.61)$$

Plaadi servas $r = b$ paindemomendid

$$M_r = -\frac{F}{4\pi}, \quad M_\theta = -\frac{F\nu}{4\pi}. \quad (7.62)$$

Läbipaine plaadi keskel on lõplik, st.

$$w = \frac{Fb^2}{16D\pi}, \quad \text{sest} \quad \lim_{r \rightarrow 0} r^2 \ln \frac{r}{b} = 0. \quad (7.63)$$

7.4.3. Keskel koondatud jõuga koormatud ümmarplaat

Paindemomendid ei oma aga keskel lõplikke väärtusi: kui $r \rightarrow 0$ siis $\ln \rightarrow -\infty$ ning $M_r \rightarrow \infty$ ja $M_\theta \rightarrow \infty$. Täpsemad arvutusel koormuse rakenduspunkti ümbruses (3 – 4 plaadi paksust) paksude plaatide teooria põhjal näitavad, et pinged ületavad voolavuspiiri vaid plaadi surutud osas — koormuse rakenduspunkti ümbruses tekib lokaalne voolamine. Plaadi tõmmatud kihtides omavad pinged lõplikku väärtust

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{F}{h^2} (1 + \nu) \left(0, 485 \ln \frac{b}{h} + 0, 52 \right) \quad (7.64)$$

ning neile saab vastavusse seada nn. fiktiivsed paindemomendid

$$M_r = M_\theta = \frac{F}{6} (1 + \nu) \left(0, 485 \ln \frac{b}{h} + 0, 52 \right). \quad (7.65)$$

Vt. joonis 7.4, kus on toodud paindemomentide epüürid juhul $\nu = 0, 3$. Riskitekttega on tähistatud fiktiivsete paindemomentide väärtused kolme erineva raadiuse–paksuse suhte b/h jaoks. Kokkuvõttes pole olukord ohtlik kuni pinged (7.64) jäävad lubatud piiridesse.

b) Vaba toetus

Rajatingimused välisserval $r = b$ on $w = M_r = 0$, kust leiame

$$C_2 = -\frac{F}{16D\pi(1+\nu)} [2(1+\nu) \ln b + 3 + \nu], \quad C_4 = \frac{Fb^2(3+\nu)}{16D\pi(1+\nu)}. \quad (7.66)$$

Siirded ja paindemomendid (7.59) saavad seejärel kujju

$$\begin{cases} w(r) = \frac{F}{16D\pi(1+\nu)} \left[(3+\nu)(b^2-r^2) + 2(1+\nu)r^2 \ln \frac{r}{b} \right], \\ M_r(r) = -\frac{F(1+\nu)}{4\pi} \ln \frac{r}{b}, \\ M_\vartheta(r) = -\frac{F(1+\nu)}{4\pi} \left(\ln \frac{r}{b} + 1 + \nu \right). \end{cases} \quad (7.67)$$

Ekstremaalne läbipaine plaadi keskel on lõplik

$$w = \frac{Fb^2(3+\nu)}{16D\pi(1+\nu)}. \quad (7.68)$$

Paindemomendid plaadi keskel on aga avaldiste (7.67) põhjal lõpmata suured (kui $r \rightarrow 0$ siis $\ln \rightarrow -\infty$ ning $M_r \rightarrow \infty$ ja $M_\vartheta \rightarrow \infty$).

*7.4.3. Keskel koondatud jõuga koormatud ümarplaat**7 - 34*

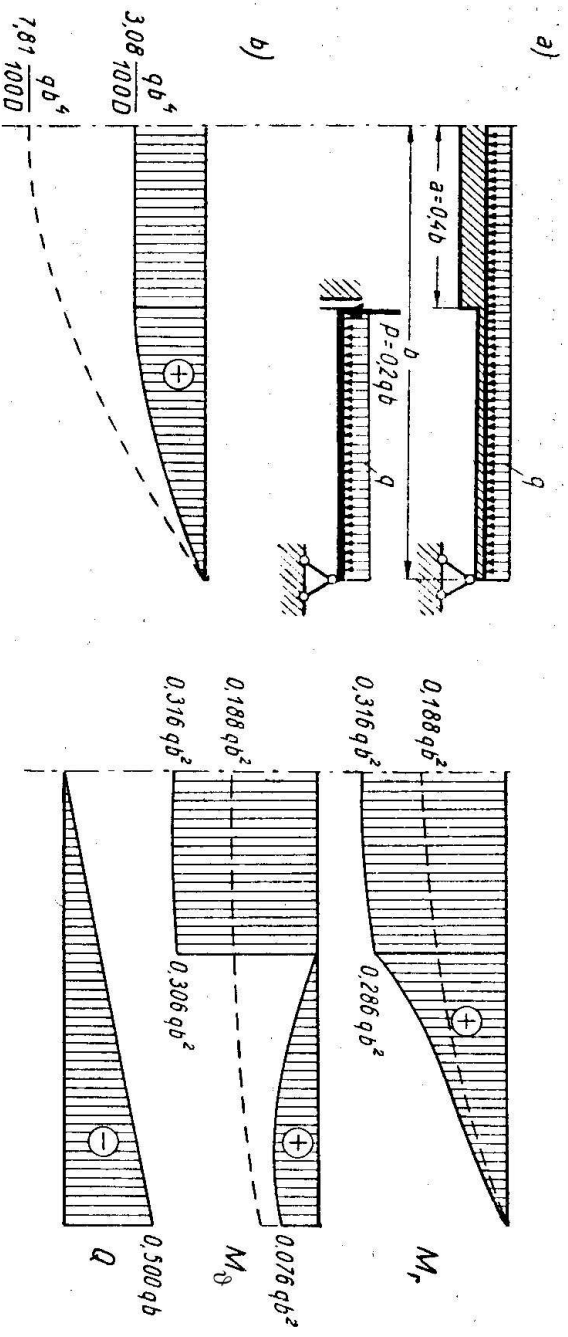
Analoogiliselt jäiga kinnitusega näitab ka siin täpsem uuring, et koormuse rakenduspunkti lähedal tekib lokaalne plastne tsoon kuid plaadi tõmmatud kihitides omavad pinged lõplikku väärtust

$$\sigma_r = \sigma_\vartheta = \frac{F}{h^2} \left[(1+\nu) \left(0,485 \ln \frac{b}{h} + 0,52 \right) + 0,48 \right]. \quad (7.69)$$

Ka sel juhul pole olukord ohtlik kuni pinged (7.69) jäävad lubatud piiridesse.

7.4.4 Rõngasplaat

a) Jäiga südamikuga ümarplaat.

Joonis 7.6: Ühtlaselt koormatud rõngasplaadi paine. NB! Joonisel q , meil p_0 !

7.4.4. Rõngasplaat

Vaatleme vabalt toetatud astmelist ümarplaati, mille keskmise osa jäikus on suur võrreldes välise osaga (vt. joonis 7.6). Seetõttu käitub väline, st. väikese jäikusega osa kui rõngasplaat. Plaadile mõjub ühtlaselt jaotatud koormus intensiivsusega p_0 . Lihtsuse mõttes eeldame, et sisemise osa raadius $a = 0, 4b$ ja $\nu = 0$. Lisaks toome sisse nn. dimensioonita raadiuse $\rho = r/b$.

Rajatingimused:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{väliserv, } \rho = 1 : \\ w = 0, \\ M_r = 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{siseserv, } \rho = 0, 4 : \\ \frac{dw}{dr} = 0, \\ Q = -0, 2bp_0, \end{array} \right. \quad \text{sest } |Q \cdot 2\pi a| = |\pi a^2 p_0|. \quad (7.70)$$

Kasutades viimaseid koos avaldistega (7.38) ja (7.39) saame määrata konstandid C_1, \dots, C_4 .

Saadud konstantide asendamisel võrrandisse (7.38) ja (7.39) saame siirete ja sisejõudude avaldised välise osa jaoks:

$$\begin{cases} w = p_0 b^4 (1, 562\rho^4 - 8, 151\rho^2 + 2, 448 \ln \rho + 6, 589,) / 100D \\ \frac{dw}{dr} = p_0 b^3 (6, 250\rho^3 - 16, 302\rho + 2, 448/\rho) / 100D, \\ M_r = p_0 b^2 (-18, 750\rho^2 + 2, 448/\rho^2 + 16, 302) / 100, \\ M_\theta = p_0 b^2 (-6, 250\rho^2 - 2, 448/\rho^2 + 16, 302) / 100, \\ Q = -0, 500p_0 b\rho. \end{cases} \quad (7.71)$$

Plaadi keskmine, st. jäigem osa, arvutatakse vastavalt ümarplaadi valemitele.

Siirete ja sisejõudude epiüürid on toodud joonisel 7.6. Vasakpoolne alumine joonis esitab läbipainde epiüüri ja parempoolsed sisejõudusid. Kriipsjoonega on esitatud ühtlase paksusega plaadi siirete ja sisejõudude epiüürid. On näha, et keskmise osa jäikuse suurendamine vähendab küll läbipaindeid, kui samas suurendab paindemomente nii jäigastatud kui jäigastamata osas. Kuna sellega kaasneb ka pingete kasv, siis ei saa sellist tüüpi konstruktsiooni lugeda heaks.

7.4.4. Rõngasplaat

7 - 38

Kui plaadi keskmise osa jäikus pole suur võrreldes äärmise osaga, siis on arvutus keerulisem, sest plaati tuleb vaadelda kui tervikut, võttes arvesse paksuse hüppelist muutust. Tuleb koostada siirete avaldised plaadi mõlema osa jaoks. Need avaldised sisaldavad 8 konstanti, millest kaks keskmisele osale vastavat on nullid. Ülejäänud 6 määratakse rajatingimustest väliserval, st. $\rho = 1$ on $w = M_r = 0$ ja pidevustingimustest siirete w ja sisejõudude Q, M_r ning M_θ jaoks kohal $r = a$.

b) Välisservervast järgalt kinnitatud ja sisservervast vaba rõngasplaat.

Järgalt kinnitatud välisservervas $r = b$ peavad $w = 0$ ja $dw/dr = 0$. Vabas siservervas $r = a$ aga $M_r = 0$ ja $Q = 0$. Kasutades selliseid rajatingimusi saame avaldistest (7.38) ja (7.39) neli võrrandit konstantide C_1, \dots, C_4 määramiseks.

Kui konstandid on leitud saame omakorda leida siirete ja sisejõudude avaldised, milledest siinkohal esitame vaid siirete oma:

$$\begin{cases} w = \frac{p_0 a^4}{64D} [-1 + 2(1 - k - 2\beta^2)(1 - \rho^2) + \rho^4 - 4k \ln \rho - 8\beta^2 \rho^2 \ln \rho], \\ \rho = \frac{r}{a}, \quad \beta = \frac{b}{a}, \\ k = \frac{(1 - \nu)\beta^2 + (1 + \nu)(1 + 4\beta^2 \ln \beta)}{(1 - \nu) + (1 + \nu)\beta^2}. \end{cases} \quad (7.72)$$

Kokkuvõte. Rõngasplaatide korral on võimalikud väga mitmed jäiga kin- nituse, vaba toetuse ja vaba serva kombinatsioonid. Kõigi nende puhul tuleb lähtudes avaldistest (7.38) ja (7.39) ning konkreetsetest rajatingimustest (7.43)–(7.45) koostada võrrandisüsteem konstantide C_1, \dots, C_4 määramiseks. Seejärel saadakse siirete ja sisejõudude avaldised.

7.4.5. Ümarplaadi paindeülesande lahendeid

7 - 40

Järgevasse tabelisse² on koondatud mitmed praktilist tähtsust omavad ümarplaadi paindeülesande lahendid. Vaatluse all on järgmised juhud:

1. Koormus: ühtlaselt mööda serva jaotunud moment M ; serv vabalt toetatud (või vaba).
2. Koormus: ühtlaselt mööda ringjoont raadiusega c jaotunud joonkoormus P_1 ; serv vabalt toetatud.
3. Koormus: tentrüst kaugusel c mõjuv koondatud jõud P . Läbipaine w on vabalt toetatud serva korral ligikaudselt sama, mis juhul 2 ja järgalt kin- nitatud serva korral ligikaudu sama, mis juhul 6.
4. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; serv vabalt toetatud.
5. Koormus: ühtlaselt üle ringi (raadiusega c) jaotunud koormus p_0 ; serv va- balt toetatud.
6. Koormus: ühtlaselt mööda ringjoont raadiusega c jaotunud joonkoormus P_1 ; serv järgalt kinnitatud.

²Tabel on pärit õpikust A. C. Ugural, Stresses in Plates and Shells, Boston, McGraw-Hill, 1999

7. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; serv jäigalt kinnitatud.
8. Koormus: ühtlaselt üle ringi (raadiusega c) jaotunud koormus p_0 ; serv jäigalt kinnitatud.

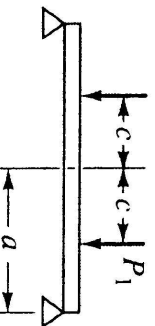
Kasutatud tähistused:

- a — plaadi raadius,
- t — plaadi paksus,
- p_0 — ühtlaselt jaotunud koormus (dim $p_0 = \text{N/m}^2$),
- P_1 — joonkoormus (dim $P_1 = \text{N/m}$), mis on ühtlaselt jaotunud mööda ringjoont raadiusega c ,
- P — koondatud jõud (dim $P = \text{N}$),
- M — ühtlaselt mööda plaadi välisserva jaotunud momentkoormus (dim $M = \text{N}$),
- σ — maksimaalne paindepinge,
- w — läbipaine plaadi keskel,
- θ — plaadi keskpinna kaldenurk plaadi servas,
- ν — Poisson'i tegur,
- E — Youngi moodul (elastsusmoodul).

7.4.5. Ümarplaadi paindeülesande lahendeid

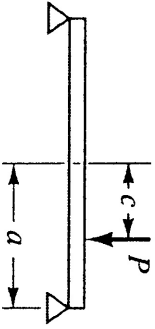
Tabel 7.1: Valenid ümarplaadi paindel ilmnevate maksimaalsete pingete, läbipainete ja kaldenurkade arvutamiseks.

Nr.	Toetusviis ja koormuse skeem	σ_{\max} , w_{\max} , θ_{\max}
1.	Edge simply supported (or no support); load uniform along edge	$\sigma = 6 \frac{M}{t^2} \quad (\text{uniform})$ $w = 6(1 - \nu) \frac{Ma^2}{Et^3}$ $\theta = 12(1 - \nu) \frac{Ma}{Et^3}$
2.	Edge simply supported; load uniform along a circle of radius c	$\sigma = \frac{3}{2} \frac{P_1 c}{t^2} \left[(1 - \nu) \left(1 - \frac{c^2}{a^2} \right) + 2(1 + \nu) \ln \frac{a}{c} \right]$ <p style="text-align: center;">(at center)</p> $w = \frac{3(1 - \nu)}{2} \frac{P_1 c}{Et^3}$ $\times \left[(3 + \nu)(a^2 - c^2) - 2(1 + \nu)c^2 \ln \frac{a}{c} \right]$ $\theta = 6(1 - \nu) \frac{P_1 a c}{Et^3} \left(1 - \frac{c^2}{a^2} \right)$

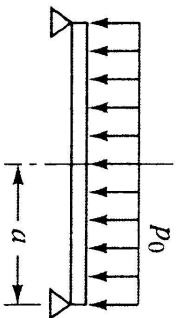


Tabel 7.1: jätkub

Nr. Toetusviis ja koormuse skeem σ_{\max} , w_{\max} , θ_{\max}

3. Concentrated load at a distance c from the center
- 
- Deflection w at center approximately same as Case 2 for edge simply supported, and same as Case 6 for edge fixed.

4. Edge simply supported; load uniform $\sigma = \frac{3(3 + \nu) p_0 a^2}{8 t^2}$ (at center)



$$w = \frac{3(1 - \nu)(5 + \nu) p_0 a^4}{16 Et^3}$$

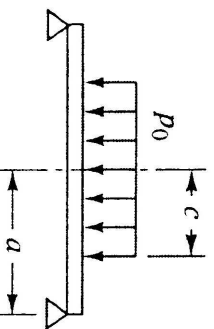
$$\theta = \frac{3(1 - \nu^2) p_0 a^3}{2 Et^3}$$

7.4.5. Ümarplaadi paindeülesande lahendeid

Tabel 7.1: jätkub

Nr. Toetusviis ja koormuse skeem σ_{\max} , w_{\max} , θ_{\max}

5. Edge simply supported; uniform load on circular area of radius c $\sigma = \frac{3 p_0 c^2}{8 t^2} \left[4 - (1 - \nu) \frac{c^2}{a^2} + 4(1 + \nu) \ln \frac{a}{c} \right]$

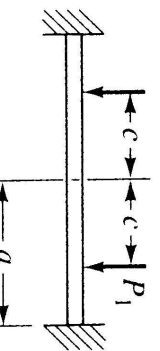


(at center)

$$w = \frac{3(1 - \nu) p_0 c^2}{16 Et^3} \times \left[4(3 + \nu)a^2 - (7 + 3\nu)c^2 - 4(1 + \nu)c^2 \ln \frac{a}{c} \right]$$

$$\theta = \frac{3(1 - \nu) p_0 a c^2}{2 Et^3} \left(2 - \frac{c^2}{a^2} \right)$$

6. Edge fixed; load uniform along a circle of radius c $\sigma = \frac{3(1 + \nu) P_1 c}{2 t^2} \left(\frac{c^2}{a^2} + 2 \ln \frac{a}{c} - 1 \right)$ (at center)



(at edge)

$$w = \frac{3(1 - \nu^2) P_1 c}{2 Et^3} \left(b^2 - c^2 - 2c^2 \ln \frac{a}{c} \right)$$

Tabel 7.1: jätkub

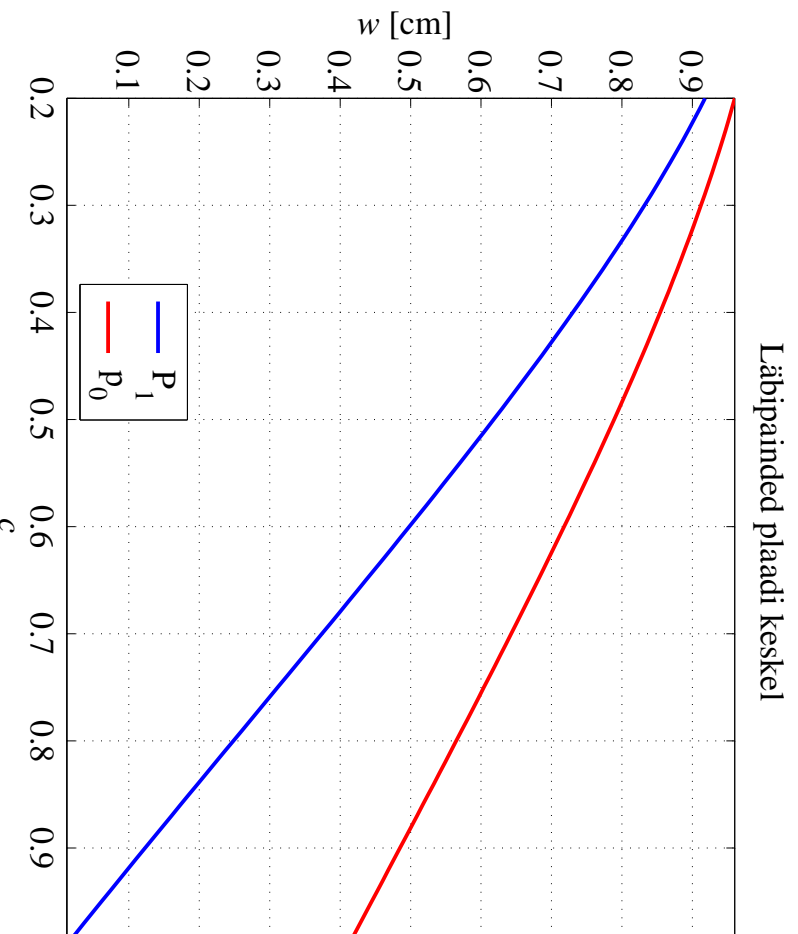
Nr.	Toetusviis ja koormuse skeem	σ_{\max} , w_{\max} , θ_{\max}
7.	Edge fixed; load uniform	
		
		$\sigma = \frac{3 p_0 a^2}{4 t^2}$ (at edge)
		$w = \frac{3(1 - \nu^2)}{16} \frac{p_0 a^4}{E t^3}$
	Juhul kui plaadi paksus $t > 0, 1a$, siis annab mn. modifitseeritud paindeteooria läbipaineks	
		$w = \frac{3\alpha(1 - \nu^2)}{16} \frac{p_0 a^4}{E t^3}$, $\alpha = 1 + 5.72 \left(\frac{t}{a}\right)^2$.
8.	Edge fixed; load uniform over a circular area of radius c	
		
		$\sigma = \frac{3(1 + \nu)}{8} \frac{p_0 c^2}{t^2} \left(\frac{c^2}{a^2} + 4 \ln \frac{a}{c} \right)$ (at center)
		$\sigma = \frac{3 p_0 c^2}{4 t^2} \left(2 - \frac{c^2}{a^2} \right)$ (at edge)
		$w = \frac{3(1 - \nu^2)}{4} \frac{p_0 c^2}{E t^3} \left(a^2 - \frac{3}{4} c^2 - c^2 \ln \frac{a}{c} \right)$

7.4.5. Ümarplaati paindeülesande lahendeid

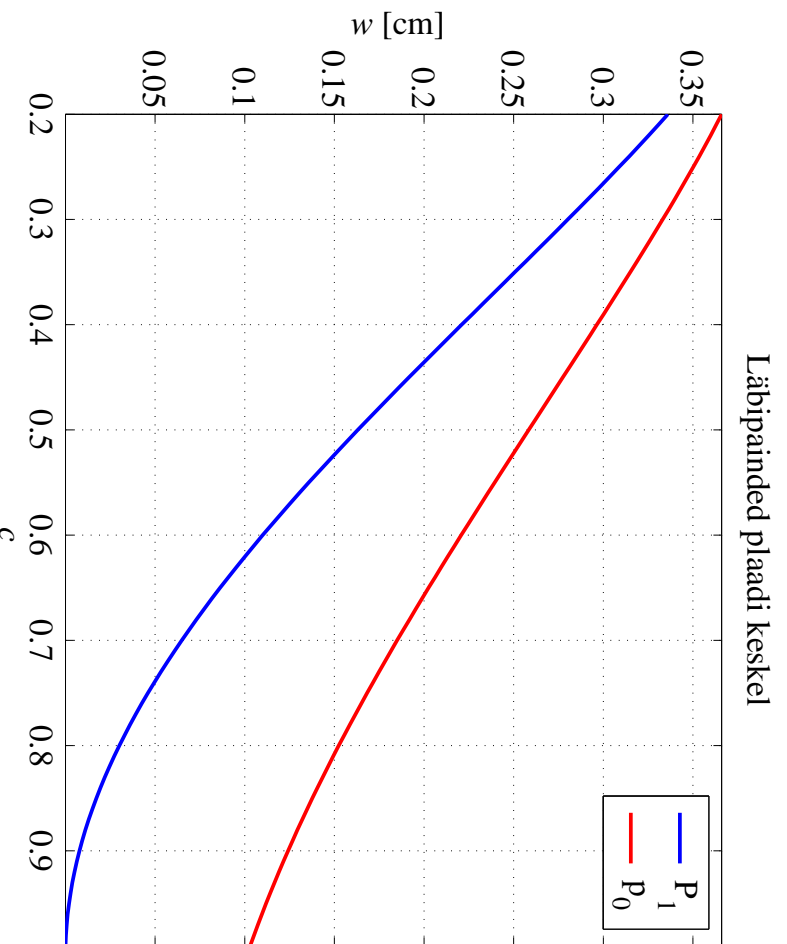
Järeldused

- Kõigil vaadeldud juhtudel on nii pinge kui läbipaine võrdeline rakendatud koormusega: suurendades (fikseeritud koormusskeemi korral) koormust 2 korda, suurenevad nii pinge kui läbipaine samuti 2 korda.
- Kõigil vaadeldud juhtudel on pinge pöördvõrdeline paksuse ruuduga: vähendades (fikseeritud koormusskeemi korral) plaadi paksust 2 korda, suureneb pinge $2^2 = 4$ korda ja vastupidi.
- Kõigil vaadeldud juhtudel on läbipaine pöördvõrdeline paksuse kuubiga: vähendades (fikseeritud koormusskeemi korral) plaadi paksust 2 korda, suureneb läbipaine $2^3 = 8$ korda ja vastupidi.
- Juhtudel 4 ja 7 on pinge võrdeline plaadi raadiuse ruuduga ja läbipaine plaadi raadiuse neljanda astmega.
- Juhtudel 2, 5, 6 ja 8 sõltub nii pinge kui läbipaine raadiusest c . Kuna vastavad sõltuvused on mittelineaarsed, siis on mõistlik esitada nad graafiliselt.

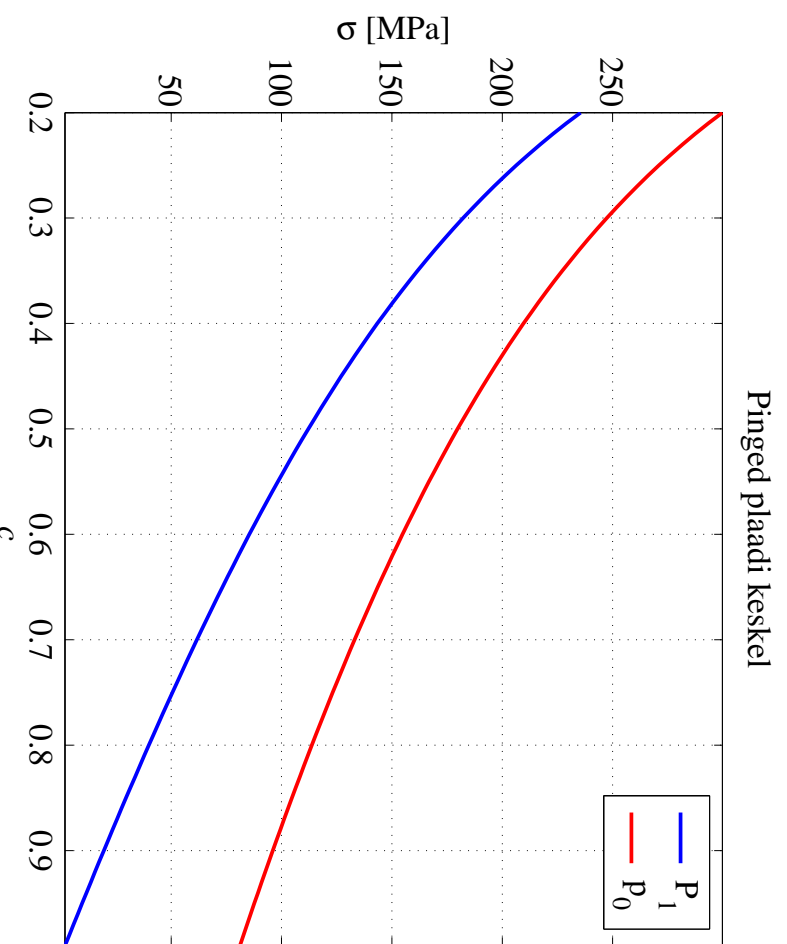
- Joonistel 7.7–7.12 esitatud graafikute koostamisel kasutati järgmisi andmeid: plaadi raadius $a = 1$; plaadi paksus $t = 0,05$; koormuse mõju määrava ringjoone raadius $0,2 \leq c \leq 0,99$; tihlaselt jaotunud koormus $p_0 = F/(\pi c^2)$; joonkoormus $P_1 = F/(2\pi c)$; summaarne koormus $F = 500\text{kN}$ oli fikseeritud; Youngi moodul $E = 210\text{GPa}$; Poisson'i tegur $\nu = 1/3$.
- Joonisel 7.7 on esitatud vabalt toetatud ja joonisel 7.8 järgalt kinnitatud ümarplaadi läbipainete graafikud.
- Joonisel 7.9 on esitatud pinged plaadi keskel vabalt toetatud ja joonisel 7.10 järgalt kinnitatud ümarplaadi jaoks.
- Joonisel 7.11 on esitatud pinged järgalt kinnitatud plaadi servas.
- Joonisel 7.12 on esitatud jaotatud koormuste P_1 ja p_0 ja raadiuse c vahelise sõltuvuse graafikud fikseeritud F jaoks.



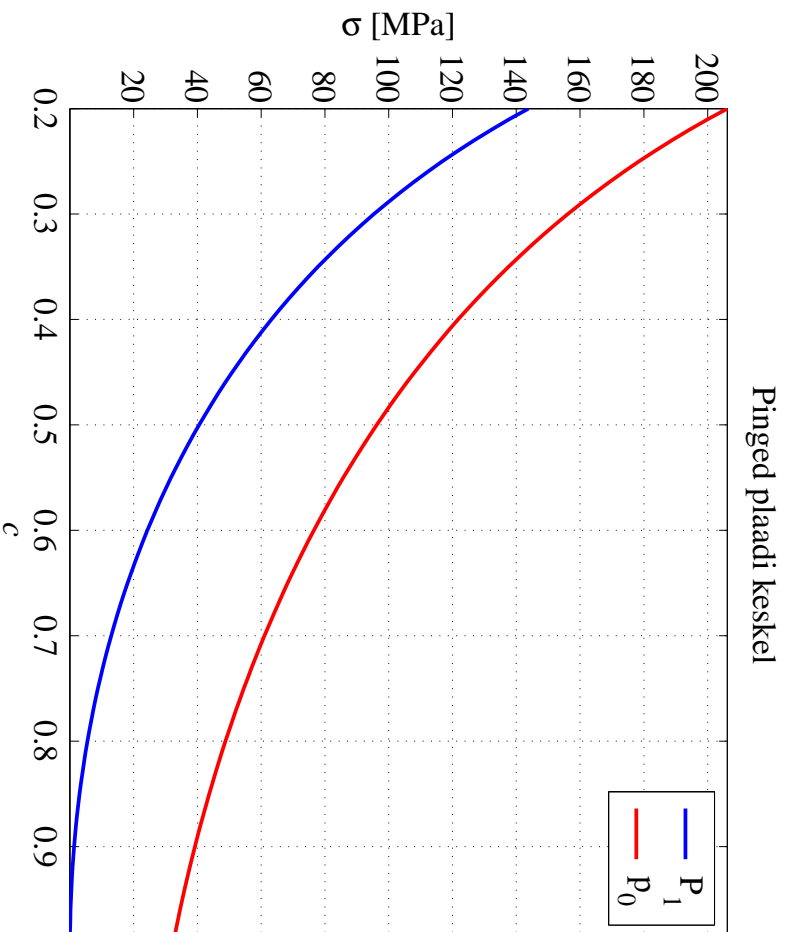
Joonis 7.7: Vabalt toetatud ümarplaadi läbipainete ja raadiuse c vaheline sõltuvus summaarse koormuse F fikseeritud väärtuse korral.



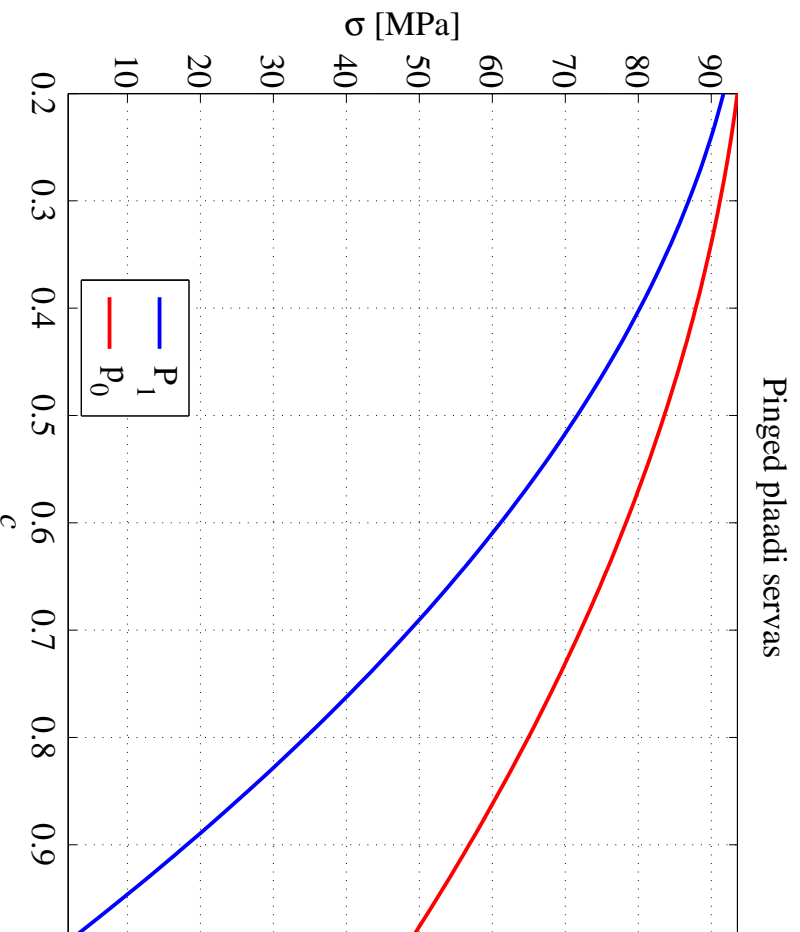
Joonis 7.8: Järgalt kinnitatud ümarplaadi lähipainete ja raadiuse c vaheline sõltuvus summaarse koormuse F fikseeritud väärtuse korral.



Joonis 7.9: Pinged vabalt toetatud ümarplaadi keskel sõltuvana raadiusest c summaarse koormuse F fikseeritud väärtuse korral.

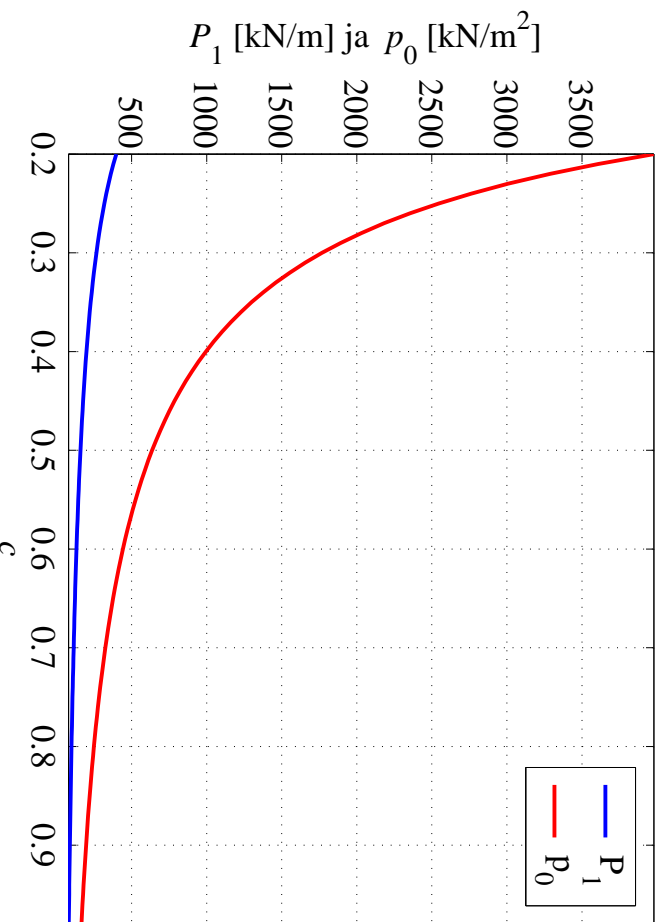


Joonis 7.10: Pinged järgalt kinnitatud ümarplaadi keskel sõltuvana raadiusest c summaarse koormuse F fikseeritud väärtuse korral.



Joonis 7.11: Pinged ümarplaadi järgalt kinnitatud servas sõltuvana raadiusest c summaarse koormuse F fikseeritud väärtuse korral.

Summaarsele koormusele $F = 500$ kN vastavad P_1 ja p_0



Joonis 7.12: Jaotatud koormused P_1 ja p_0 sõltuvana raadiusest c summaarse koormuse F fikseeritud väärtuse korral.

7.4.5. Ümarplaadi paindeülesande lahendeid

7 - 54

Märkusi koondatud jõu lokaalse mõju kohta³

- Plaadi keskel mõjuv koondatud jõud põhjustab määramatust pingete (ja momentide) avaldises.
- Koondatud jõud ei mõju tegelikult mitte kunagi tihes punktis, vaid ta on jaotunud üle mingi väikese pinnala, mille raadiuse tähistame r_c .
- Selleks, et saada lahti koondatud jõu rakenduspunktis tekkivast määramatusest pingete (ja momentide) avaldises tuleb:

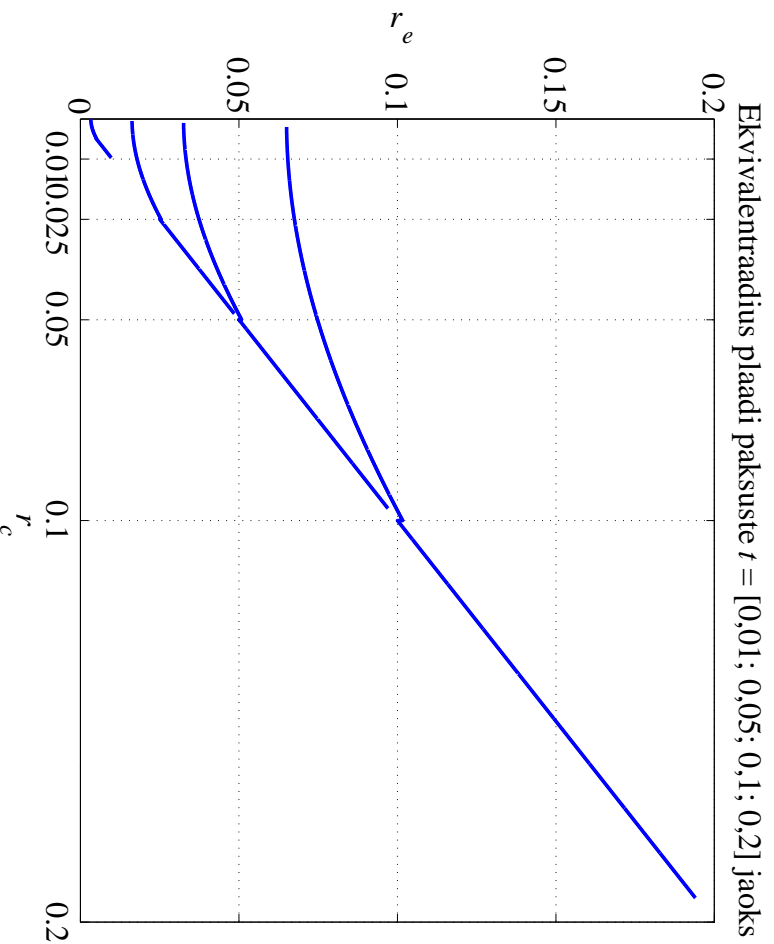
1. raadius r_c asendada nn. ekvivalentraadiusega (vt. joonis 7.13)

$$r_e = \begin{cases} \sqrt{1,6r_c^2 + t^2} - 0,675t, & r_c \leq 0,5t, \\ r_c, & r_c \geq 0,5t, \end{cases} \quad (7.73)$$

kus t on plaadi paksus (nagu eelnevates tabelites);

2. asendada koondatud jõud F ringis raadiusega $c = r_e$ mõjuva ühtlaselt jaotunud koormusega $p_0 = F/(\pi c^2)$ ning kasutada juhtudele 5 või 8 vastavaid valemeid.

³Vt. lisaks A. C. Ugural, Stresses in Plates and Shells, Boston, McGraw-Hill, 1999



Joonis 7.13: Ekvivalentraadius r_e vastavalt valemile (7.73) nelja erineva plaadi paksuse korral. Kõverad on joonistatud $0, 1t \leq r_e \leq 0, 97t$ jaoks.

7.4.6. Rõngasplaadi paindeülesande lahendeid

7 - 56

Järgnevasse tabelisse⁴ on koondatud mitmed praktilist tähtsust omavad rõngasplaadi paindeülesande lahendid. Vaatluse all on järgmised juhud:

1. Koormus: summaarne koormus P on jaotunud ühtlaselt mööda väliserva; sisesev: järgalt kinnitatud; välissev: vaba.
2. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; sisesev: järgalt kinnitatud; välissev: vaba.
3. Koormus: summaarne koormus P on jaotunud ühtlaselt mööda väliserva; sisesev: vabalt toetatud; välissev: vaba.
4. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; sisesev: vabalt toetatud; välissev: vaba.
5. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; sisesev: vaba; välissev: vabalt toetatud.
6. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; sisesev: pöörded keelatud; välissev: vabalt toetatud.

⁴Tabel on pärit õpikust A. C. Ugural, Stresses in Plates and Shells, Boston, McGraw-Hill, 1999

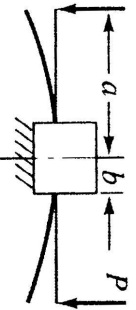
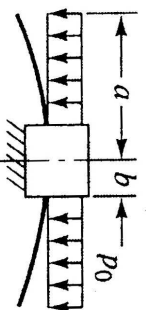
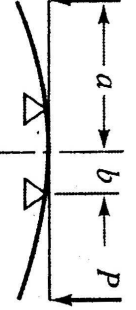
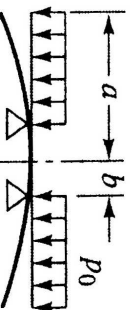
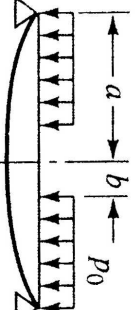
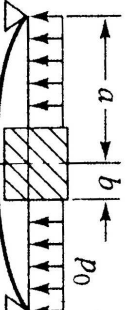
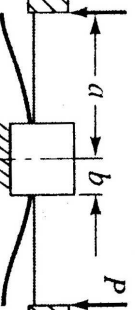
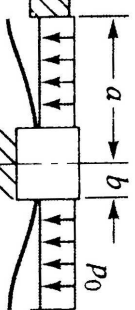
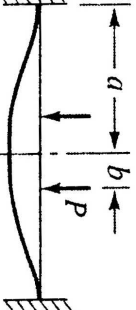
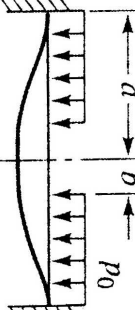
7. Koormus: summaarne koormus P on jaotunud ühtlaselt mööda välisserva; sisserv: järgalt kinnitatud; väliserv: pöörded keelatud.
8. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; sisserv: järgalt kinnitatud; väliserv: pöörded keelatud.
9. Koormus: summaarne koormus P on jaotunud ühtlaselt mööda siseserva; sisserv: vaba; väliserv: järgalt kinnitatud.
10. Koormus: ühtlaselt üle kogu plaadi pinna jaotunud koormus p_0 ; sisserv: vaba; väliserv: järgalt kinnitatud.

7.4.6. Rõngasplaadi paindeülesande lahendeid

Kasutatud tähistused (NB! joonkoormuse tähistus on siin erinev võrreldes ümarplaadiga):

- a — plaadi välisraadius,
- b — plaadi siseradius,
- t — plaadi paksus,
- P — koormus, mis on ühtlaselt jaotunud mööda sise- või väliserva (dim $P = N$),
- p_0 — ühtlaselt jaotunud koormus (dim $p_0 = N/m^2$),
- E — Youngi moodul (elastsusmoodul),
- σ_{\max} — maksimaalne pinge,
- w_{\max} — läbipaine sise- või väliservas.

Tabel 7.2: Valemid rõngasplaadi paindel ilmnevate pingete ja läbipainete arvutamiseks. Poisson'i tegur $\nu = 0,3$.

Nr.	Toetusviis	Koormuse skeem	σ_{\max}	w_{\max}
1.	Inner edge fixed		$k_1 \frac{P}{t^2}$	$h_1 \frac{Pa^2}{Et^3}$
2.	Inner edge fixed		$k_2 \frac{P\alpha a^2}{t^2}$	$h_2 \frac{P\alpha a^4}{Et^3}$
3.	Inner edge simply supported		$k_3 \frac{P}{t^2}$	$h_3 \frac{Pa^2}{Et^3}$
4.	Inner edge simply supported		$k_4 \frac{P\alpha a^2}{t^2}$	$h_4 \frac{P\alpha a^4}{Et^3}$
5.	Outer edge simply supported		$k_5 \frac{P\alpha a^2}{t^2}$	$h_5 \frac{P\alpha a^4}{Et^3}$
6.	Outer edge simply supported, inner-edge rotation prevented		$k_6 \frac{P\alpha a^2}{t^2}$	$h_6 \frac{P\alpha a^4}{Et^3}$
7.	Inner edge fixed, outer-edge rotation prevented		$k_7 \frac{P}{t^2}$	$h_7 \frac{Pa^2}{Et^3}$
8.	Inner edge fixed, outer-edge rotation prevented		$k_8 \frac{P\alpha a^2}{t^2}$	$h_8 \frac{P\alpha a^4}{Et^3}$
9.	Outer edge fixed		$k_9 \frac{P}{t^2}$	$h_9 \frac{Pa^2}{Et^3}$
10.	Outer edge fixed		$k_{10} \frac{P\alpha a^2}{t^2}$	$h_{10} \frac{P\alpha a^4}{Et^3}$

Tabel 7.2: jätkub

Tabel 7.3: Konstantide k_i ja h_i väärtused sõltuvana välis- ja siseradiuse suhtest a/b .

a/b	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00
k_1	0.227	0.428	0.753	1.205	1.514	1.745
h_1	0.0051	0.0249	0.0877	0.209	0.293	0.350
k_2	0.135	0.410	1.04	2.15	2.99	3.69
h_2	0.0023	0.0183	0.0938	0.2925	0.448	0.564
k_3	1.10	1.26	1.48	1.88	2.17	2.34
h_3	0.341	0.519	0.672	0.734	0.724	0.704
k_4	0.66	1.19	2.04	3.34	4.30	5.10
h_4	0.202	0.491	0.902	1.220	1.300	1.310
k_5	0.592	0.976	1.440	1.880	2.080	2.19
h_5	0.1841	0.4139	0.6640	0.8237	0.8296	0.813
k_6	0.122	0.336	0.74	1.21	1.45	1.59
h_6	0.0034	0.0313	0.1250	0.291	0.417	0.492
k_7	0.115	0.220	0.405	0.703	0.933	1.13
h_7	0.0013	0.0064	0.0237	0.0619	0.0923	0.114
k_8	0.090	0.273	0.71	1.54	2.23	2.80
h_8	0.0008	0.0062	0.0329	0.1096	0.1792	0.2338
k_9	0.194	0.320	0.454	0.673	1.021	1.305
h_9	0.00504	0.0242	0.0810	0.172	0.217	0.288
k_{10}	0.105	0.259	0.480	0.657	0.710	0.730
h_{10}	0.00199	0.0139	0.0575	0.130	0.162	0.175

7.4.6. Rõngasplaadi paindeülesande lahendeid

Järeldused:

- Mööda sise- või välisserva ühtlaselt jaotunud koormuse P korral on kõik avaldised kujul

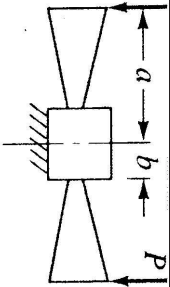
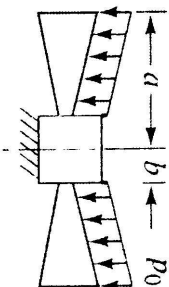
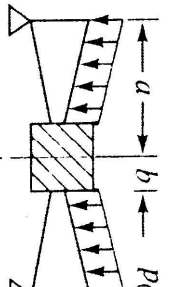
$$\sigma_{\max} = k_i \frac{P}{t^2}, \quad w_{\max} = h_i \frac{Pa^2}{Et^3}. \quad (7.74)$$

NB! dim $P = N$

- Pindkoormuse p_0 korral on kõik avaldised kujul

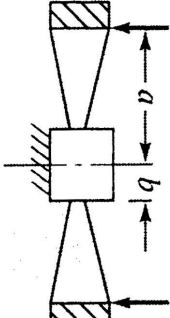
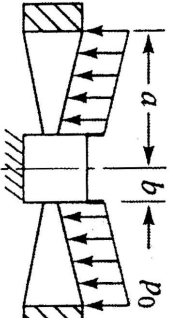
$$\sigma_{\max} = k_i \frac{p_0 a^2}{t^2}, \quad w_{\max} = h_i \frac{p_0 a^4}{Et^3}. \quad (7.75)$$

Tabel 7.4: Valenid lineaarselt muutuva ristlõikega rõngasplaadi paindel ilmnevate pingete ja läbipainete arvutamiseks. Juhtude numbrid vastavad tabelile 7.2; Poisson'i tegur $\nu = 0,3$; plaadi paksus siseservas $t_1 = bt_2/a$.

Nr.	Toetusviis	Koormuse skeem	σ_{\max}	w_{\max}
1.	Inner edge fixed		$\frac{P}{a^2} k_1$	$\frac{Pa^2}{Et_2^3} h_1$
2.	Inner edge fixed		$\frac{p_0 a^2}{t_2^2} k_2$	$\frac{p_0 a^4}{Et_2^3} h_2$
6.	Outer edge simply supported, inner-edge rotation prevented		$\frac{p_0 a^2}{t_2^2} k_6$	$\frac{p_0 a^4}{Et_2^3} h_6$

7.4.6. Rõngasplaadi paindeülesande lahendeid

Tabel 7.4: jätkub

Nr.	Toetusviis	Koormuse skeem	σ_{\max}	w_{\max}
7.	Inner edge fixed, outer-edge rotation prevented		$\frac{P}{t_2^2} k_7$	$\frac{Pa^2}{Et_2^3} h_7$
8.	Inner edge fixed, outer-edge rotation prevented		$\frac{p_0 a^2}{t_2^2} k_8$	$\frac{p_0 a^4}{Et_2^3} h_8$

Tabel 7.5: Tabelis 7.4 esinevate konstantide k_i ja h_i väärtused sõltuvana välis- ja siseradiuse suhtest a/b .

a/b	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00
k_1	0.353	0.933	2.63	6.88	11.47	16.51
h_1	0.0082	0.0583	0.345	1.358	2.39	3.27
k_2	0.249	0.638	3.96	13.64	26.0	40.6
h_2	0.0037	0.0453	0.401	2.12	4.25	6.28
k_6	0.149	0.991	2.23	5.57	7.78	9.16
h_6	0.0055	0.0564	0.412	1.673	2.79	3.57
k_7	0.159	0.396	0.091	3.31	6.55	10.78
h_7	0.0017	0.0112	0.0606	0.261	0.546	0.876
k_8	0.1275	0.515	2.05	7.97	17.35	30.0
h_8	0.0011	0.0115	0.0934	0.537	1.261	2.16