



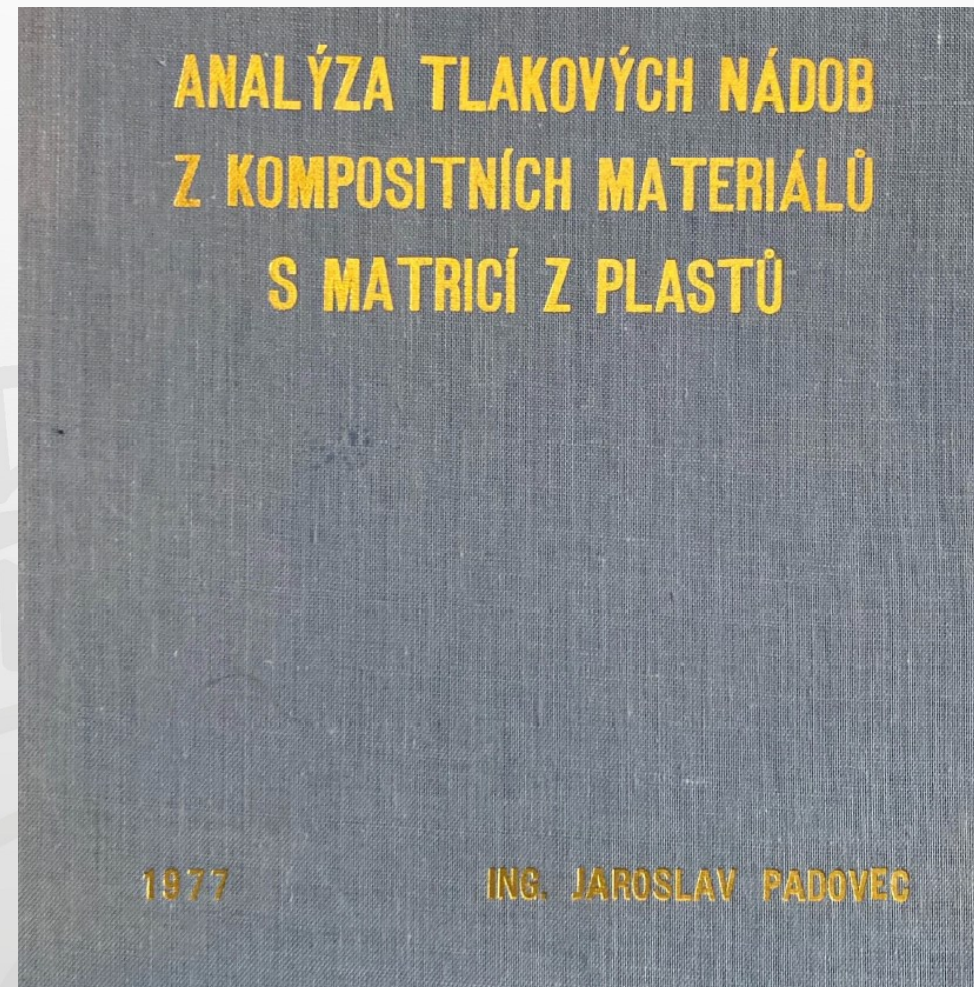
CTU
CZECH TECHNICAL
UNIVERSITY
IN PRAGUE

VÝPOČETNÍ METODY A OPTIMALIZACE NAVÍJENÝCH KOMPOZITNÍCH TLAKOVÝCH NÁDOB

Zdeněk PADOVEC, Dominik VONDRÁČEK, Tomáš MAREŠ, Nirupam CHAKRABORTI
**ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a
mechatroniky**

Obsah

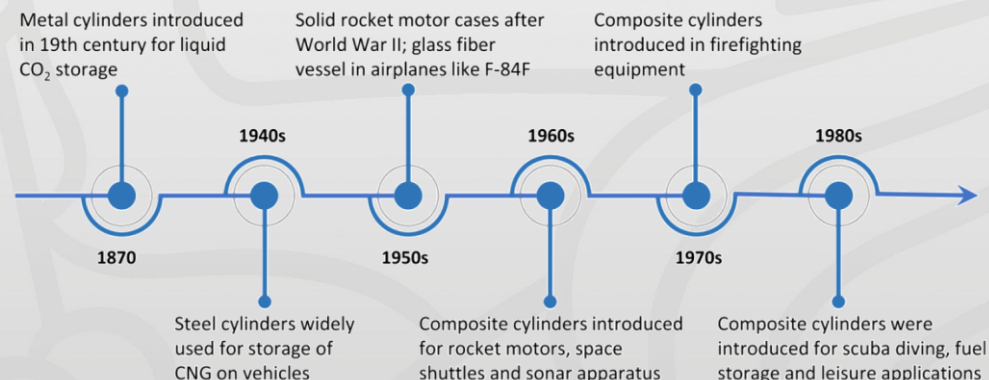
- **Rozdělení tlakových nádob a technologie výroby**
- **Analýza válcové části nádoby**
- **Analýza a představení různých tvarů den**
- **Analýza spoje válec/dno**
- **Možnosti vícekritériální optimalizace nádob**
- **Závěr**



Rozdělení tlakových nádob a technologie výroby

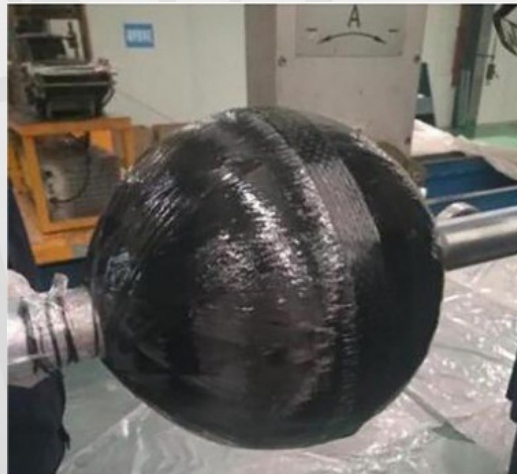
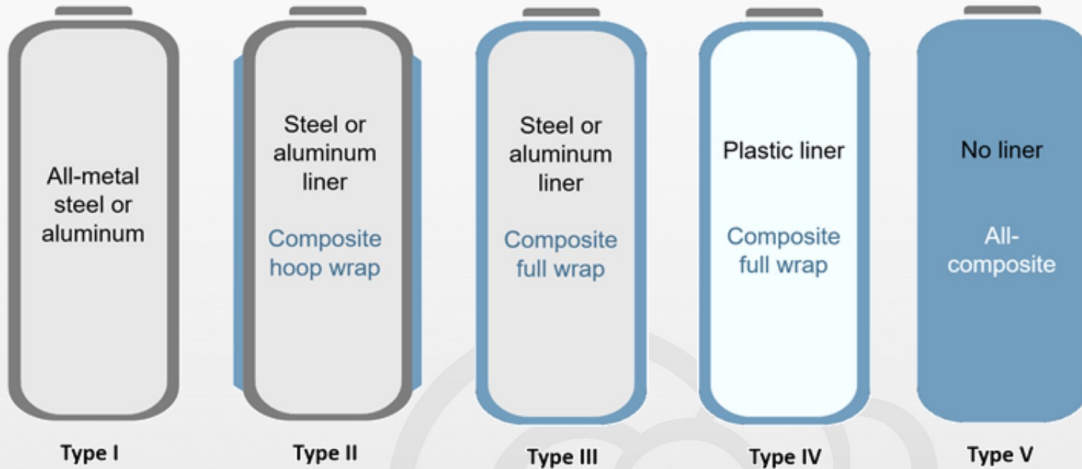
Terminologie

- **liner** zajišťuje bariéru mezi kapalným médiem a kompozitem, zabraňuje úniku media (např. přes mikrotrhliny v matrici, které nezpůsobují poruchu struktury) a chemické degradaci kompozitu
- **polární otvor** slouží k vyjmutí navíjecího trnu, vyztužuje se přírubou soužící k uchycení přívodních a vypouštěcích armatur (u velkých nádrží může sloužit jako servisní průlez)
- **rovnoběžky** protínají rotační plochu v rovinách kolmých k ose rotace
- **meridiány** protínají rotační plochu v rovinách procházejících osou rotace

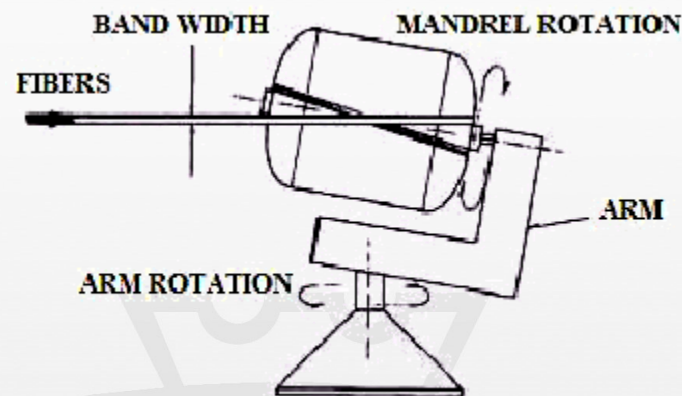
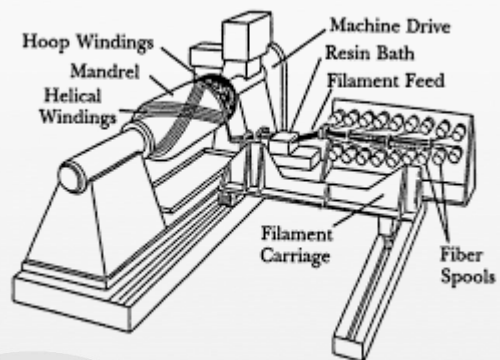


Rozdělení tlakových nádob a technologie výroby

➤ Nádob typu I, II, III, IV a V



Rozdělení tlakových nádob a technologie výroby



Šroubové + obvodové navíjení

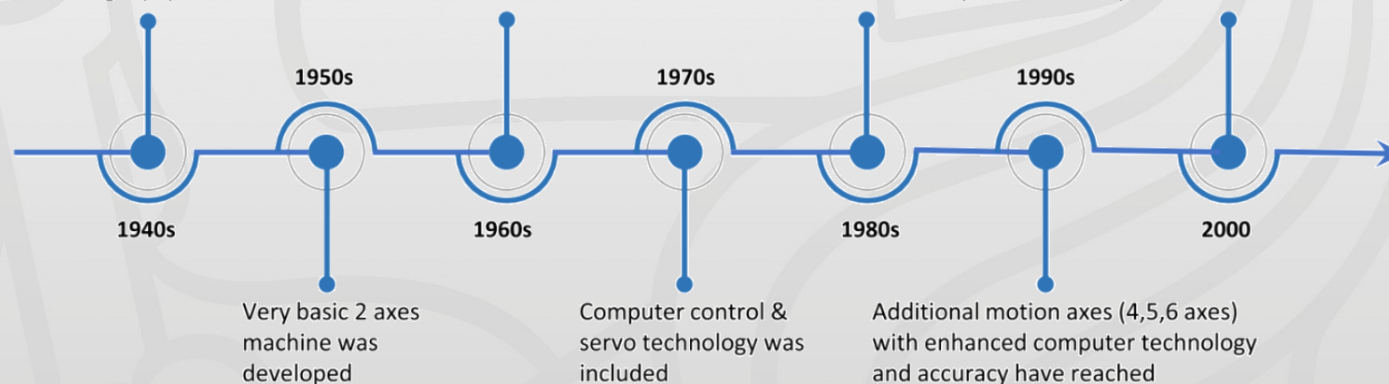
Polární navíjení

First introduction and development of filament winding equipment

Commercialized machines with mechanical gears and belts were used

Highly computerized machines with improved speed and motion controls, enhanced accuracy

Robots assisted filament winding machines were launched where all systems are robotic controlled



Rozdělení tlakových nádob a technologie výroby

Terminologie

➤ Materiálové modely

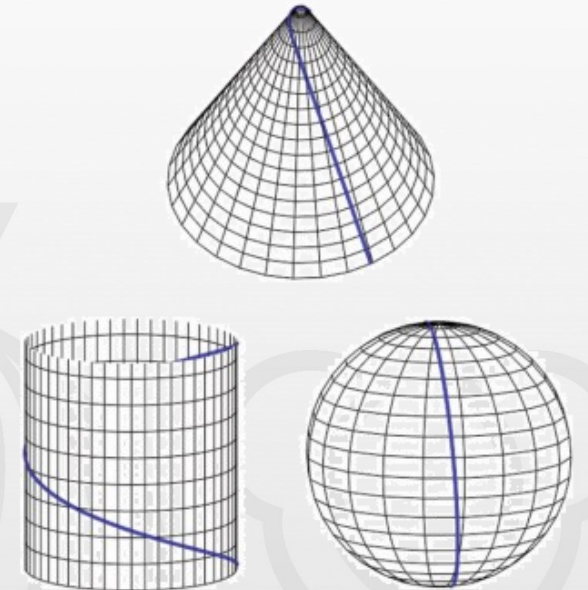
- **síťový** (zatížení přenáší jen vlákno - $E_m = \nu_m = \sigma_m = 0$)
- **monotropní** ($E_L = E_f V_f + E_m V_m$, pevnost $F_L = F_f V_f + F_m V_m$, $E_T = G_{LT} = \nu_{LT} = \tau_{LT} = \sigma_T = 0$)
- **ortotropní**

➤ Geodetické navíjení

- po geodetických čarách (nejkratší spojnice dvou bodů na zakřivené ploše)
- šroubové navíjení je geodetické, polární není (je nutno zohlednit tření)
- geodetická podmínka $r \sin \omega = \text{konst.}$

➤ Izotensoidní konstrukce

- napětí ve vláknech je ve všech místech stejné a je stanoveno s podmínky rovnováhy membránových sil v plášti konstrukce a silami ve vláknu
- zároveň je tak určen úhel geodetického vinutí na zakřivené ploše



Rozdělení tlakových nádob a technologie výroby

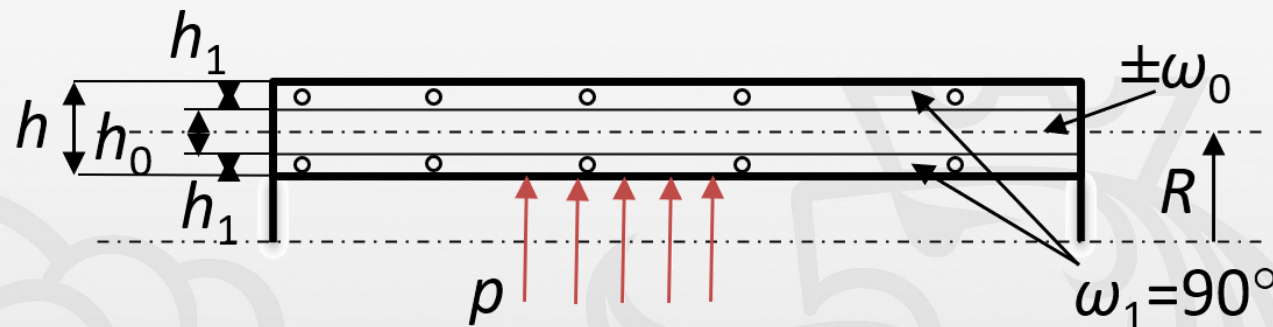
Terminologie

- **integrálně navinutá nádoba**
 - **válcová část navinuta v jedné výrobní operaci zároveň se dnem**

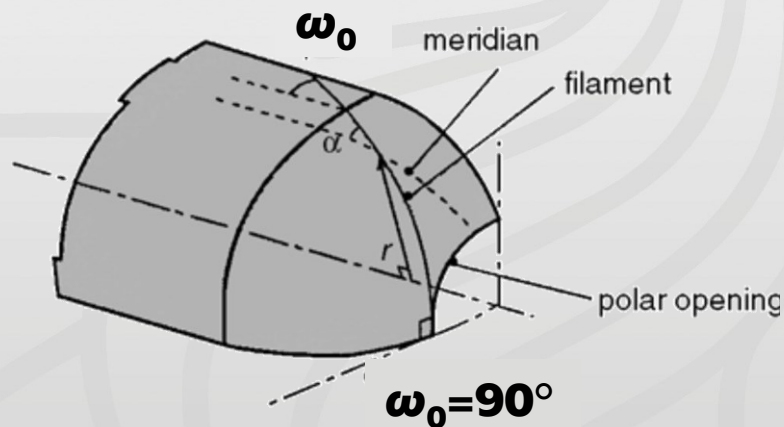
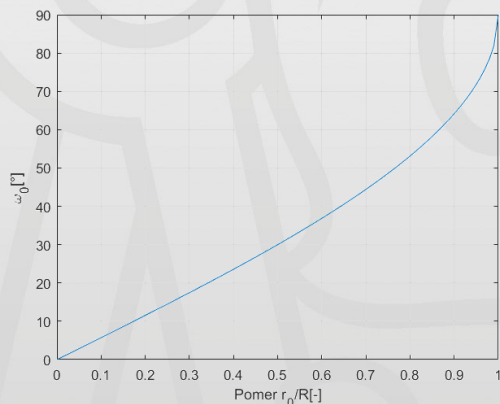


Analýza válcové části nádoby

- **kombinovaný návin ($90/\pm\omega_0/90$)**
- **aplikace pro integrální navíjení - střední rovnovážná dvojvrstva $\pm\omega_0$ vytváří dno, obvodové návinny o tloušťkách h_1 dodatečně vyztužují válcovou část**



- **geodetická podmínka navíjení $r \sin \omega = \text{konst.}$ má pak tvar $r_0 \sin 90^\circ = R \sin \omega_0 \rightarrow \omega_0 = \arcsin \frac{r_0}{R}$**



Analýza válcové části nádoby

- **kombinovaný návin ($90/\pm\omega_0/90$)**
- **pro válcovou nádobu, zatíženou vnitřním přetlakem, kde $\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 2$ musí dle síťové teorie platit $\sum_k \frac{h_k}{h} \sin^2 \omega = \frac{2}{3}$ a pro uvažovanou trojvrstvou stěnu**

$$\frac{2h_1}{h_0} = 3\cos^2 \omega_0 - 1$$

- **pro válcovou nádobu, zatíženou vnitřním přetlakem, kde $\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 2$ musí dle ortotropního materiálového modelu platit**

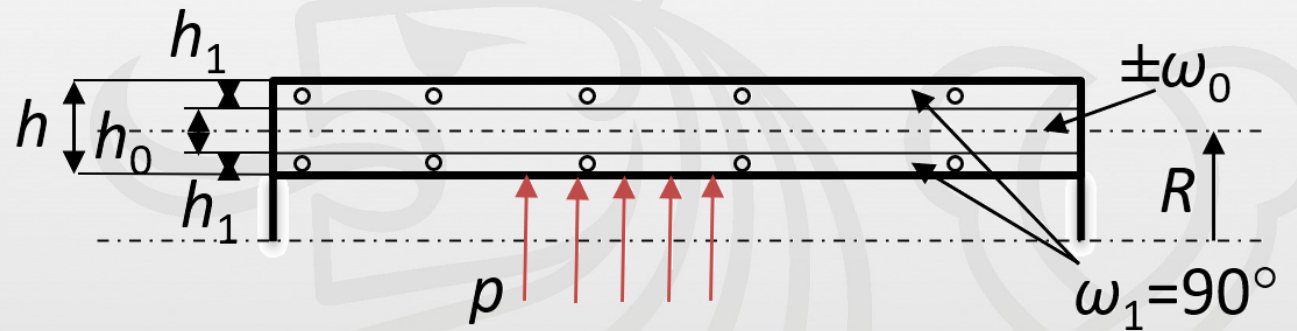
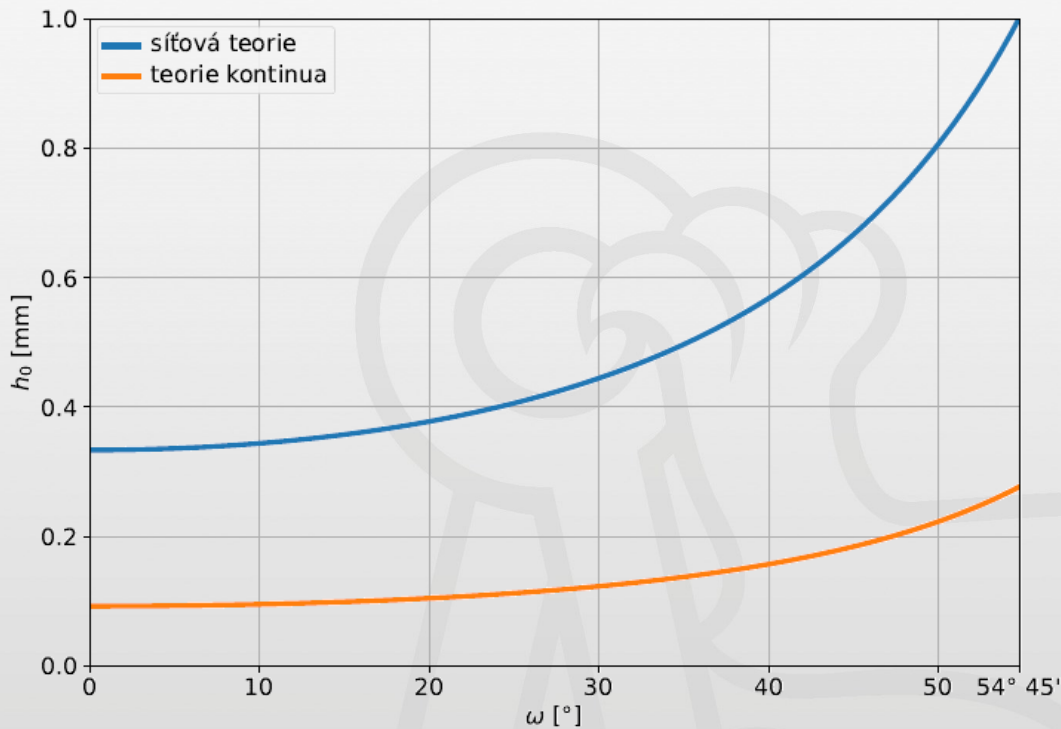
$$\sum_k \frac{h_k}{h} \sin^2 \omega_k = \frac{2 - \Omega}{3(1 - \Omega)},$$

- **kde $\frac{\sigma_T}{\sigma_L} = \frac{E_T(1+\nu_{LT})}{E_L(1+\nu_{TL})} = \Omega$**

Analýza válcové části nádoby

➤ **tloušťky stěn získané dle síťové teorie jsou větší, než tloušťky stěn získané dle ortotropního materiálového modelu**

Př.: sklolaminát, $E_L=48\,000\text{ MPa}$, $E_T=17\,600\text{ MPa}$, $G_{LT}=8\,000\text{ MPa}$, $\nu_{LT}=0,25$, $h_0 + 2h_1 = 1$



Analýza válcové části nádoby

➤ **napětí ve válcové stěně** $\sigma_\psi = \frac{pR}{2h}; \sigma_\phi = \frac{pR}{h}; \tau_{\psi\phi} = 0$

➤ ε_ψ a ε_ϕ jsou zjištěny z rozšířeného Hookeova zákona (jsou shodné pro všechny vrstvy)

$$\varepsilon_\psi = \frac{1}{E_\psi} (\sigma_\psi - \nu_{\psi\phi} \sigma_\phi), \varepsilon_\phi = \frac{1}{E_\phi} (\sigma_\phi - \nu_{\phi\psi} \sigma_\psi), \gamma_{\psi\phi} = 0$$

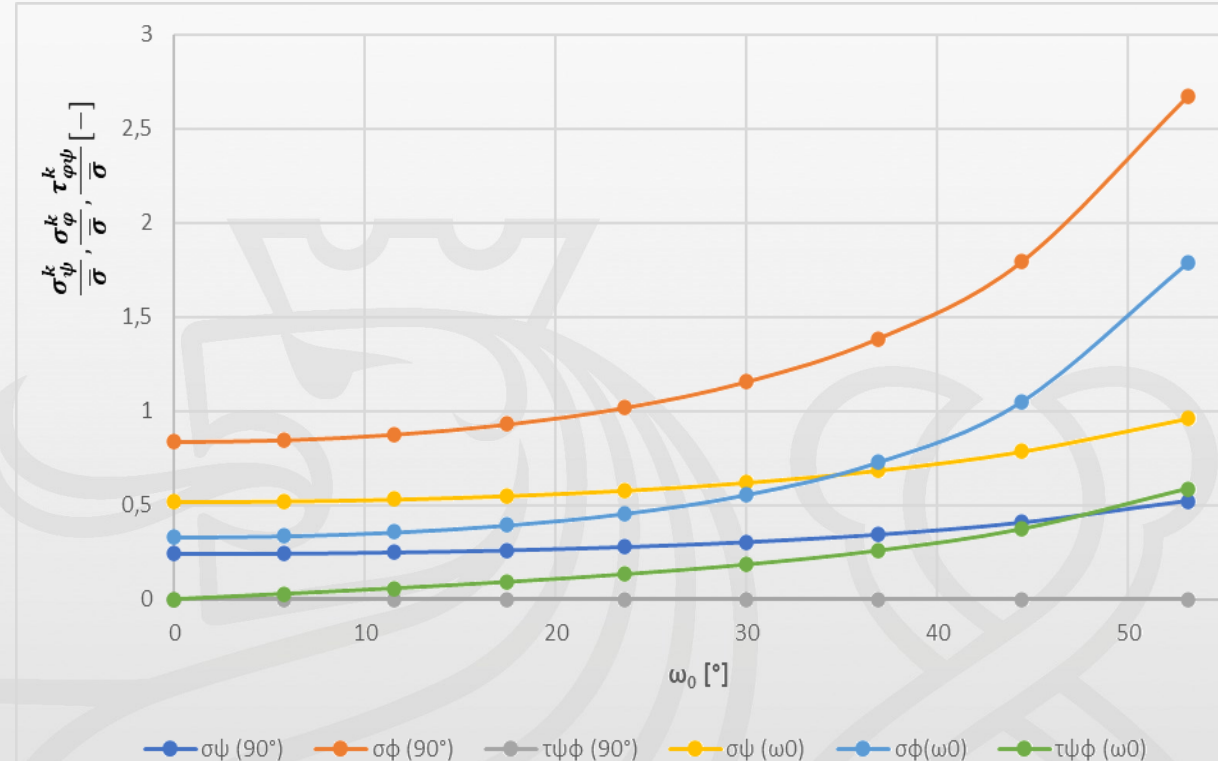
➤ **napětí v jednotlivých orientovaných jednosměrných monovrstvách je pak**

$$\begin{bmatrix} \sigma_\psi \\ \sigma_\phi \\ \tau_{\psi\phi} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_\psi \\ \varepsilon_\phi \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ **srovnávací napětí – axiální napětí v místě rovníku dna**

$$\bar{\sigma} = \frac{pR}{2h_0}$$

➤ **transformace z globálního souřadnicového systému do lokálního a aplikace pevnostních kritérií**

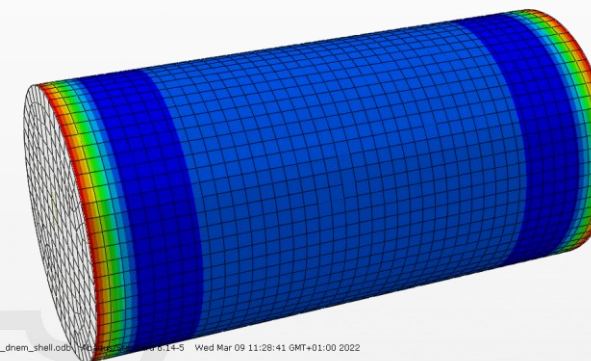
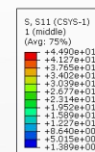


Analýza válcové části nádoby

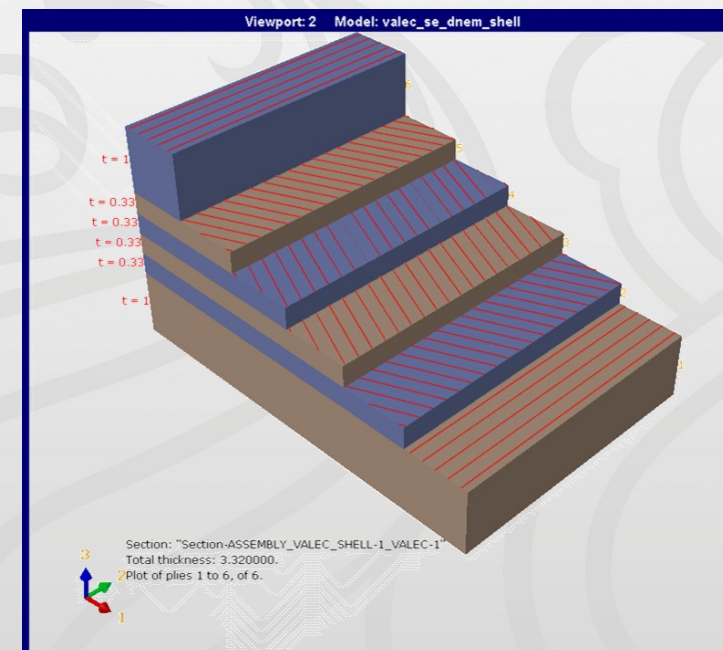
Př.: srovnání s MKP (shell, continuum shell)

- **válec zatížený vnitřním přetlakem 1 MPa, velikost polárního otvoru $r_0=20$ mm, poloměr válcové části skořepiny $R = 50$ mm**
- **kombinovaný návin $(90/(\pm 23,6)_{2S}/90)$**
- **síťovou analýzou obdržíme**

| vrstva | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------|-----|------|-------|-------|------|-----|
| úhel (°) | 90 | 23,6 | -23,6 | -23,6 | 23,6 | 90 |
| tloušťka (mm) | 1 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 1 |
| relativní tloušťka (-) | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 |

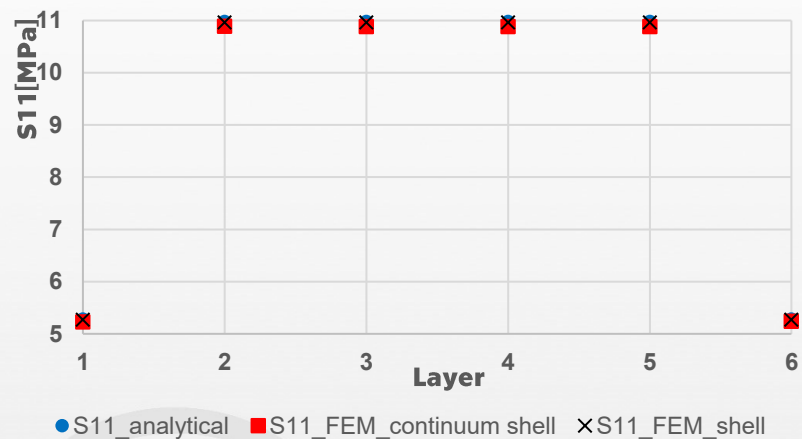


ODB: valec_se_dnem_shell.odb
Step: Step-1
Increment: 1; Step Time = 1.000
Primary Var: S, S11 (CSYS-1)
Deformed Var: not set; Deformation Scale Factor: not set

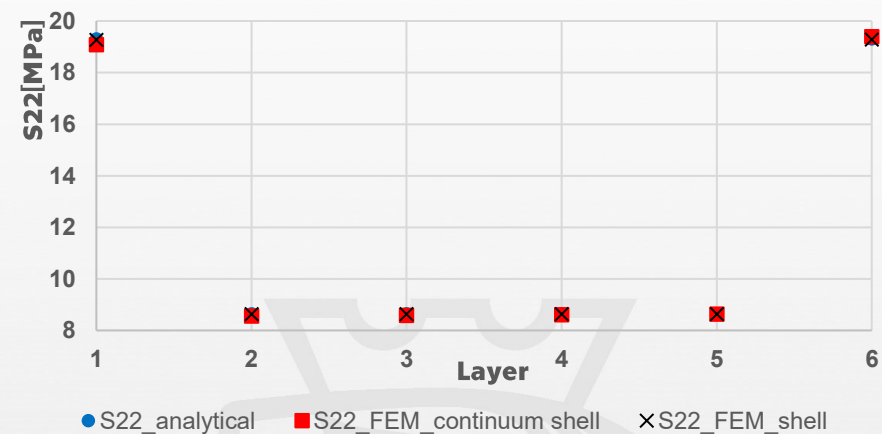


Analýza válcové části nádoby

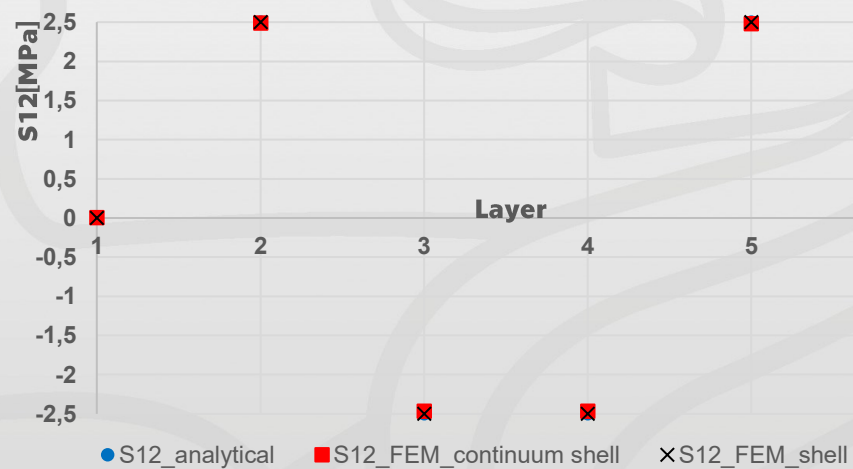
Axial stress



Hoop stress



Shear stress



Analýza a představení různých tvarů den

- **dno je skořepina s dvěma křivostmi a jedním rovníkem**
- **pro každou navíjenou rotační skořepinu o dvou křivostech je typická změna tloušťky a úhlu vinutí v meridiánovém směru (páska stálé šířky je navíjena na menší se poloměr)**
 - **minimální tloušťka je na rovníku, maximální u polárního otvoru**
 - **úhel vinutí se mění z minimální hodnoty na největším poloměru na 90° u polárního otvoru – mění se všechny tuhosti a poddajnosti podél meridiánu**
 - **jen u válce lze šroubovým vinutím docílit konstantní tloušťky stěny a úhel vinutí v celém rozsahu meridiánu**
- **při namáhání vnitřním přetlakem předpokládáme membránovou napjatost**
- **stěna skořepiny je tvořena rovnovážnou dvojvrstvou $\pm\omega$, která je tvořena dvěma monovrstvami, které jsou dokonale spojené, mají stejnou tloušťku a stejný objemový podíl vláken**

Analýza a představení různých tvarů den

Napětí ve vrstvě skořepiny

➤ **předpokládáme uzavřenou nádobu**

➤ **napětí v meridiánovém směru** $\sigma_\psi = \frac{N_\psi}{h} = \frac{pR_\varphi}{2h}$

➤ **napětí v tangenciálním směru** $\sigma_\varphi = \frac{N_\varphi}{h} = \frac{pR_\varphi}{2h} \left(2 - \frac{R_\varphi}{R_\psi} \right)$

➤ **v rovnovážné dvojvrstvě jako celku je $\tau_{\psi\varphi} = 0$, avšak v každé orientované monovrstvě vznikají smyková napětí (vrstvy si navzájem brání ve volné deformaci)**

$$\tau_{\psi\varphi} = Q_{16}\varepsilon_\psi + Q_{26}\varepsilon_\varphi$$

➤ ε_ψ a ε_φ jsou zjištěny z rozšířeného Hookeova zákona

$$\varepsilon_\psi = \frac{1}{E_\psi} (\sigma_\psi - \nu_{\psi\varphi}\sigma_\varphi)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E_\varphi} (\sigma_\varphi - \nu_{\varphi\psi}\sigma_\psi)$$

Analýza a představení různých tvarů den

Napětí ve vrstvě skořepiny

- pro hlavní poloměry křivosti skořepiny s dvojí křivostí platí

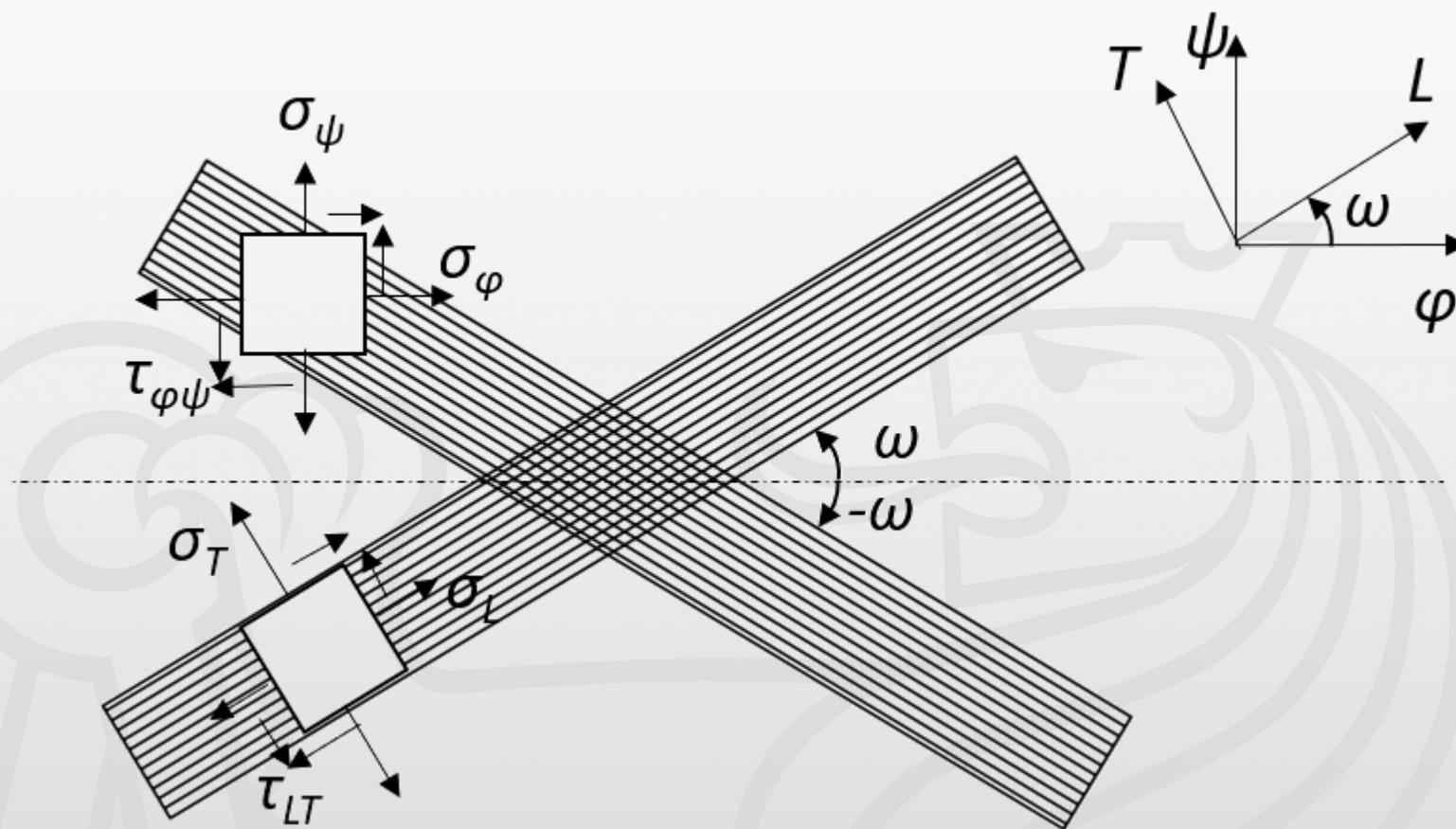
$$R_{\psi} = -\frac{[1 + (r')^2]^{3/2}}{r''}$$
$$R_{\varphi} = [1 + (r')^2]^{1/2}$$

- kombinací těchto vztahů a vztahů pro napětí v meridiánovém a tangenciálním směru obdržíme diferenciální rovnici skořepiny

$$rr'' = [1 + (r')^2] \left(\frac{N_{\varphi}}{N_{\psi}} - 2 \right)$$

- pro zadaný průběh $\frac{N_{\varphi}}{N_{\psi}}$ lze numerickou integrací stanovit meridiánový profil skořepiny a oba poloměry hlavní křivosti

Analýza a představení různých tvarů den

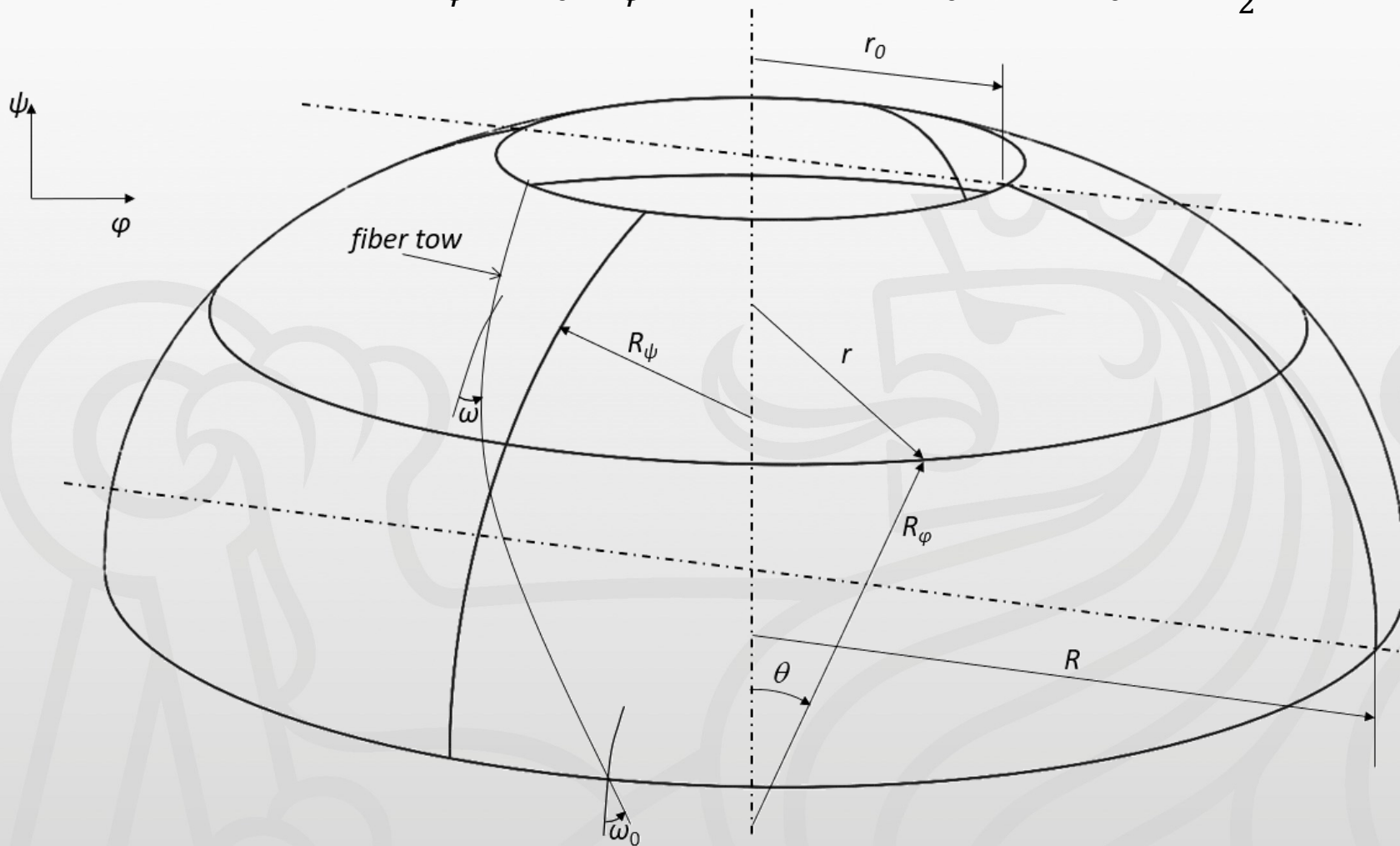


Analýza a představení různých tvarů den

- **geometrie skořepiny a elastické konstanty v libovolném bodě meridiánu jsou určeny:**
 - **úhlem vinutí, který je dán geodetickou podmínkou kladení vlákna** $\sin\omega = \frac{r_0}{r}$
 - **tloušťkou stěny** $h = h_0 \frac{R \cos \omega_0}{r \cos \omega}$
 - **úhlem normály ke střednicové ploše skořepiny** $\sin\psi = \frac{r}{R_\varphi}$
 - **poloměry hlavní křivosti**
 - **lze určit numerickou integrací při známém průběhu** $\frac{N_\varphi}{N_\psi}$
 - **rozdíl mezi kovovými a kompozitními dny**
 - **v kovovém případě jsou meridiánové křivky dna známé** (koule, elipsa, „torosphere“, ...)
 - **v kompozitním případě mohou být funkcí geometrie skořepiny** (geodetický isotensoid) **nebo i materiálových** parametrů skořepiny (moduly, pevnosti, ...)

Analýza a představení různých tvarů den

- pro rovník skořepiny platí $R_\psi = \rho_0$; $R_\varphi = r = R$; $h = h_0$; $\omega = \omega_0$; $\psi = \frac{\pi}{2}$



Analýza a představení různých tvarů dna

➤ Příklady různých tvarů dna

- Koule
- Elipsoid ($a/b = 2$)
- Geodetický isotensoid
- Dno s nulovým příčným napětím $\sigma_T=0$
- Dno s nulovým příčným prodloužením $\varepsilon_T=0$
- Dno s identickými prodlouženími $\varepsilon_L=\varepsilon_T$
- Dno které minimalizuje Tsai-Hillovo pevnostní kritérium

$$\frac{R_\varphi}{R_\psi} = 1$$

$$R_\psi = \frac{R_0}{(1+v\sin^2\psi)^{3/2}}; R_\varphi = \frac{R_0}{(1+v\sin^2\psi)^{1/2}}, \text{ kde}$$

$$R_0 = \frac{a^2}{b} \mathbf{a} \quad v = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

$$\frac{R_\varphi}{R_\psi} = \frac{2-3\frac{r_0^2}{r^2}}{1-\frac{r_0^2}{r^2}}, \text{ inflexní bod v } r = r_0 \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$\frac{R_\varphi}{R_\psi} = 2 - \frac{E_\varphi}{Q_{\varphi\psi} \tan^2 \omega} \frac{v_{LT} + \tan^2 \omega}{(v_{\varphi\psi} - v_{LT}) + v_{\varphi\psi} v_{LT} - 1} - v_{\varphi\psi}$$

$$\frac{R_\varphi}{R_\psi} = 2 - \frac{\frac{E_\varphi}{E_\psi} \tan^2 \omega}{\frac{1}{E_\varphi} \frac{v_{\psi\varphi}}{E_\psi} \tan^2 \omega}$$

$$\frac{R_\varphi}{R_\psi} = 2 - \frac{A_{12} + A_{22}}{A_{11} + A_{12}},$$

$$\text{kde } A_{ij} = [Q_{ij}(\omega) + Q_{ij}(-\omega)] \frac{h}{2}$$

$$\frac{R_\varphi}{R_\psi} = 2 - \frac{b}{c}, \text{ kde } b \text{ a } c \text{ jsou funkce materiálových parametrů a pevností}$$

Analýza a představení různých tvarů den

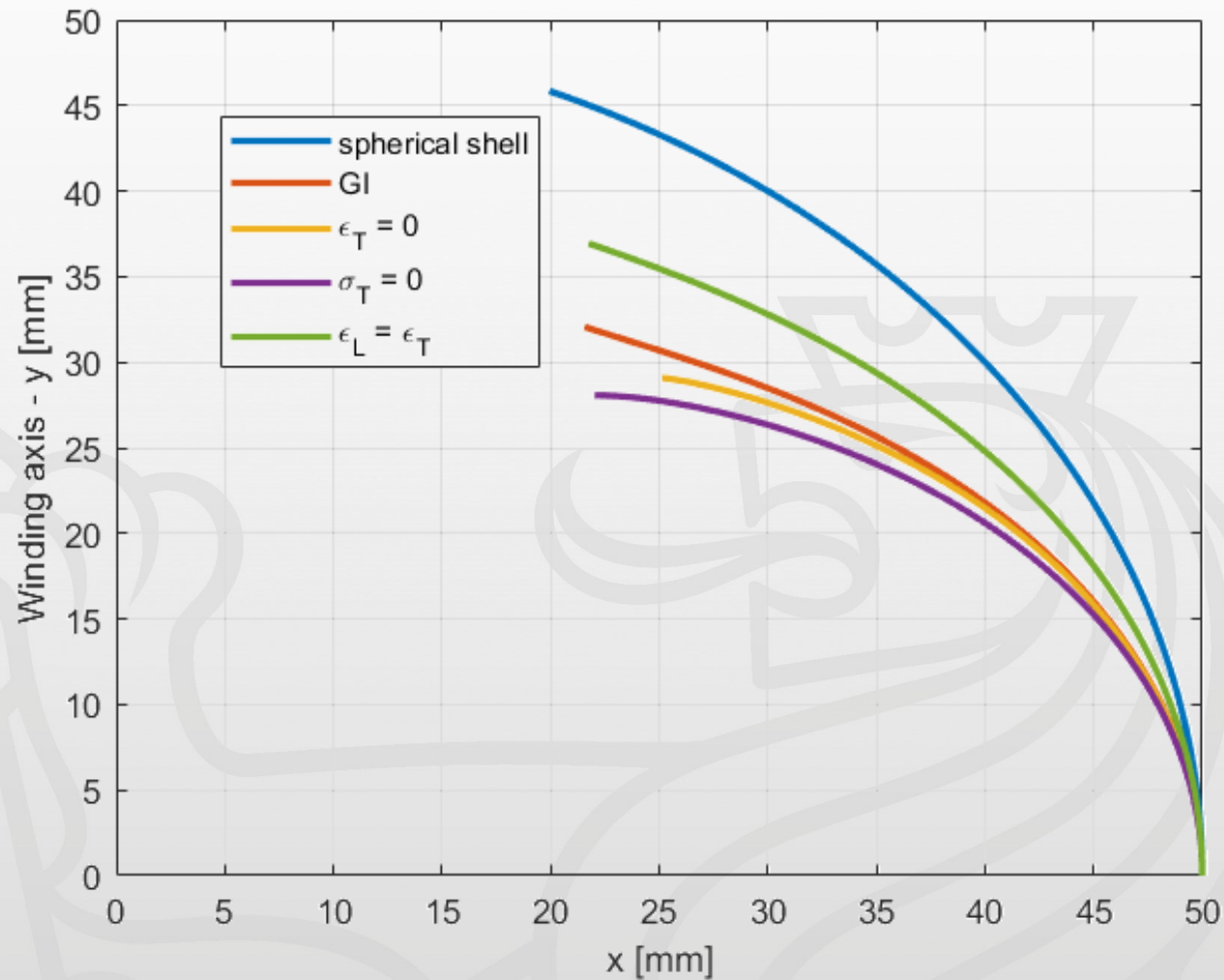
➤ **Příklad:**

➤ velikost polárního otvoru $r_0=20$ mm, poloměr válcové části skořepiny $R = 50$ mm, $h_0 = 1$ mm, $p = 1$ MPa

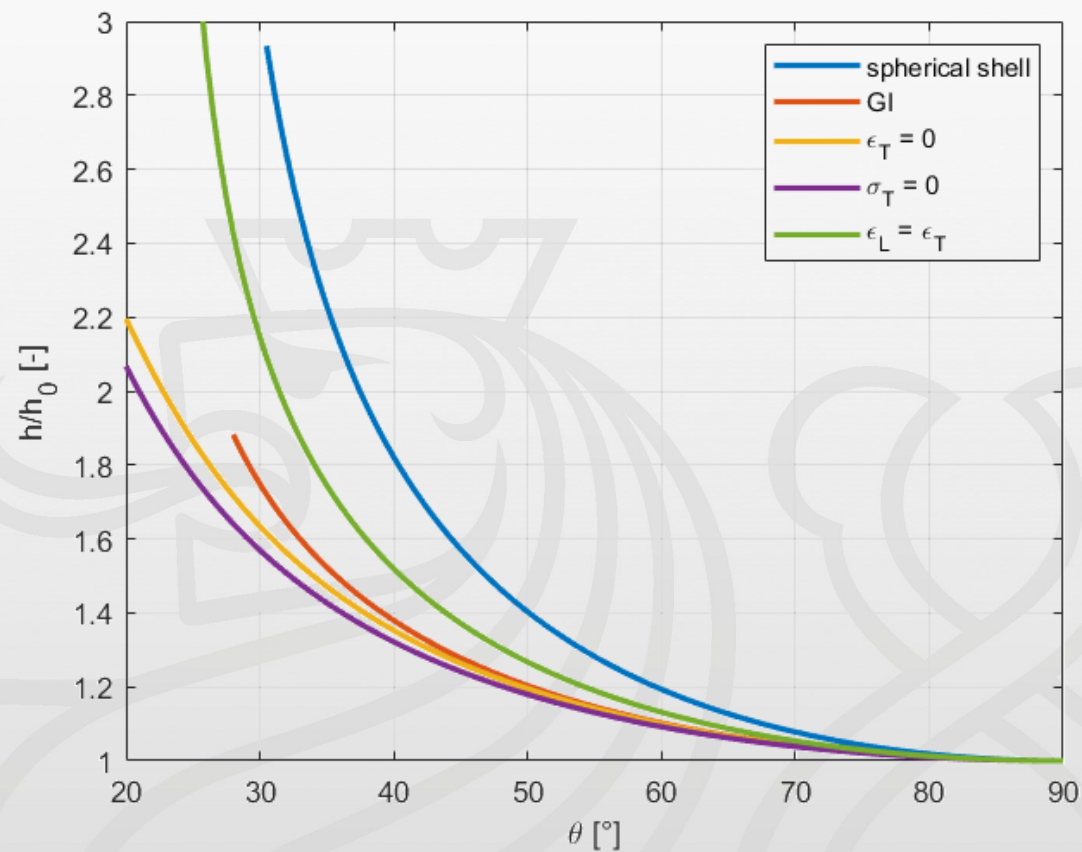
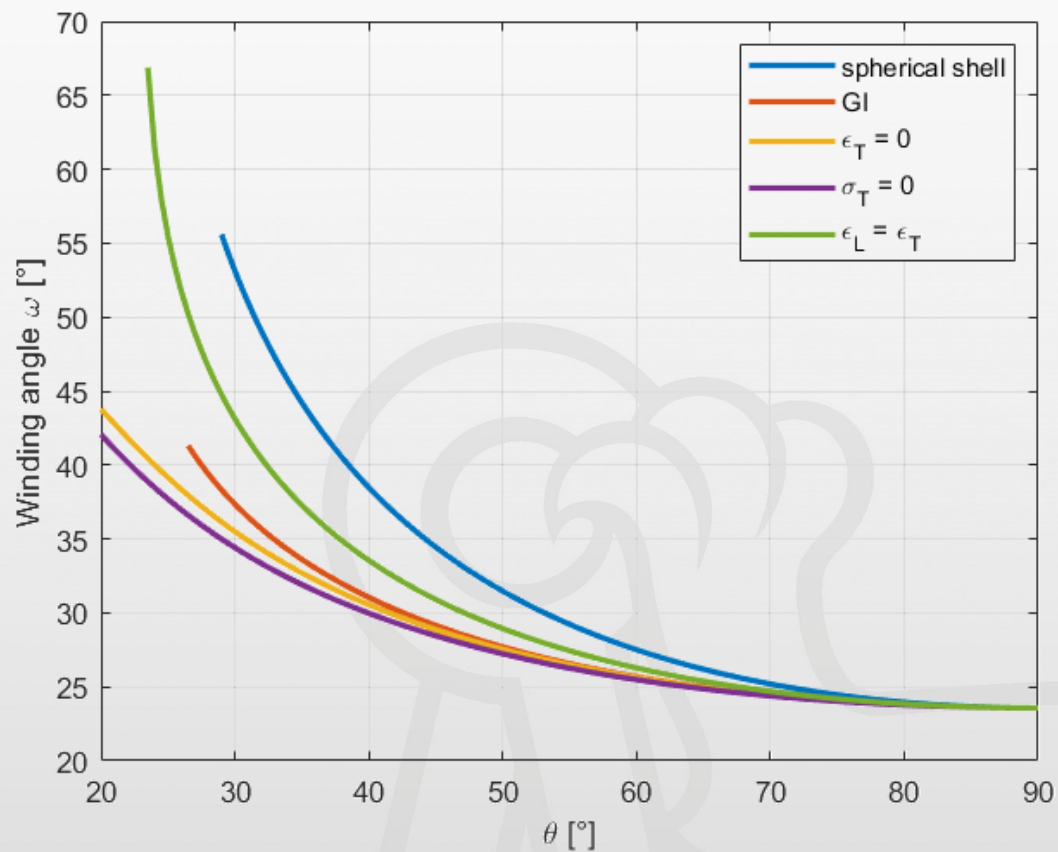
| Materiál | E_L [MPa] | E_T [MPa] | G_{LT} [MPa] | ν_{LT} [MPa] |
|-------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|
| Sklo/epoxy | 46 200 | 16 513 | 5 998 | 0.31 |

| Materiál | F_{Lt} [MPa] | F_{Lc} [MPa] | F_{Tt} [MPa] | F_{Tc} [MPa] | F_{LT} [MPa] |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sklo/epoxy | 1 200 | 600 | 45 | 145 | 65 |

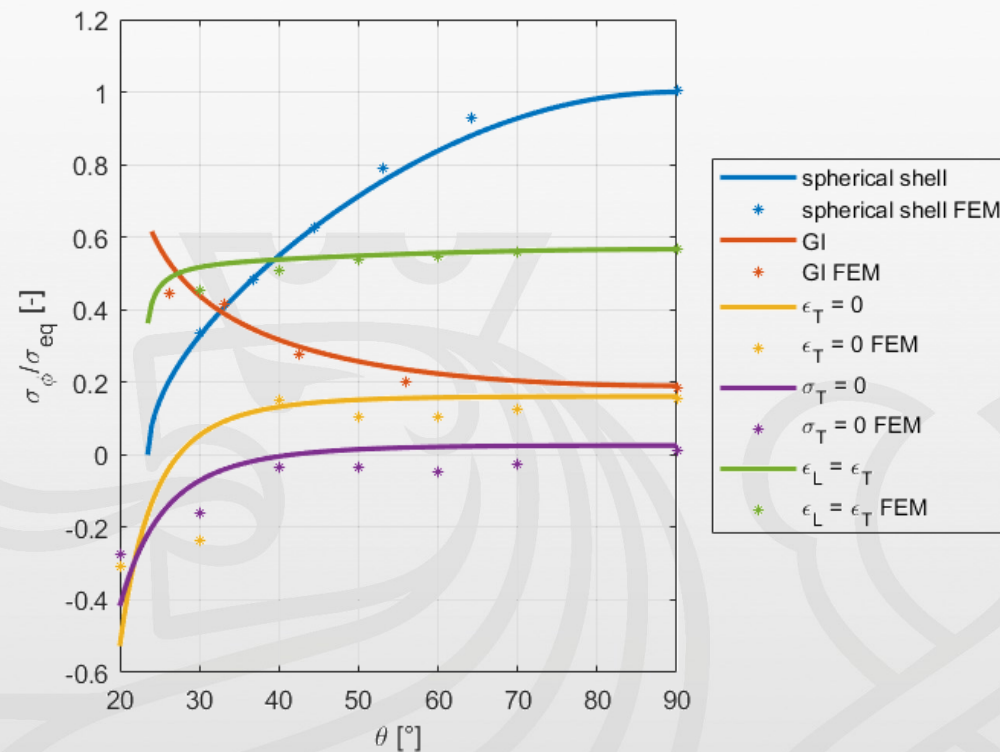
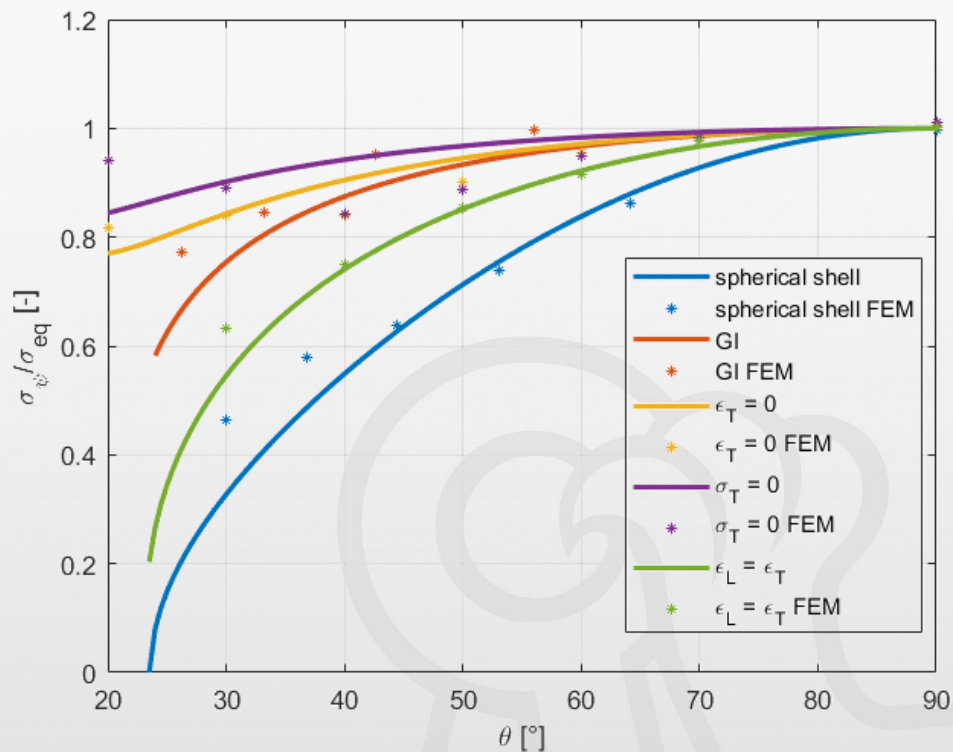
Analýza a představení různých tvarů den



Analýza a představení různých tvarů den



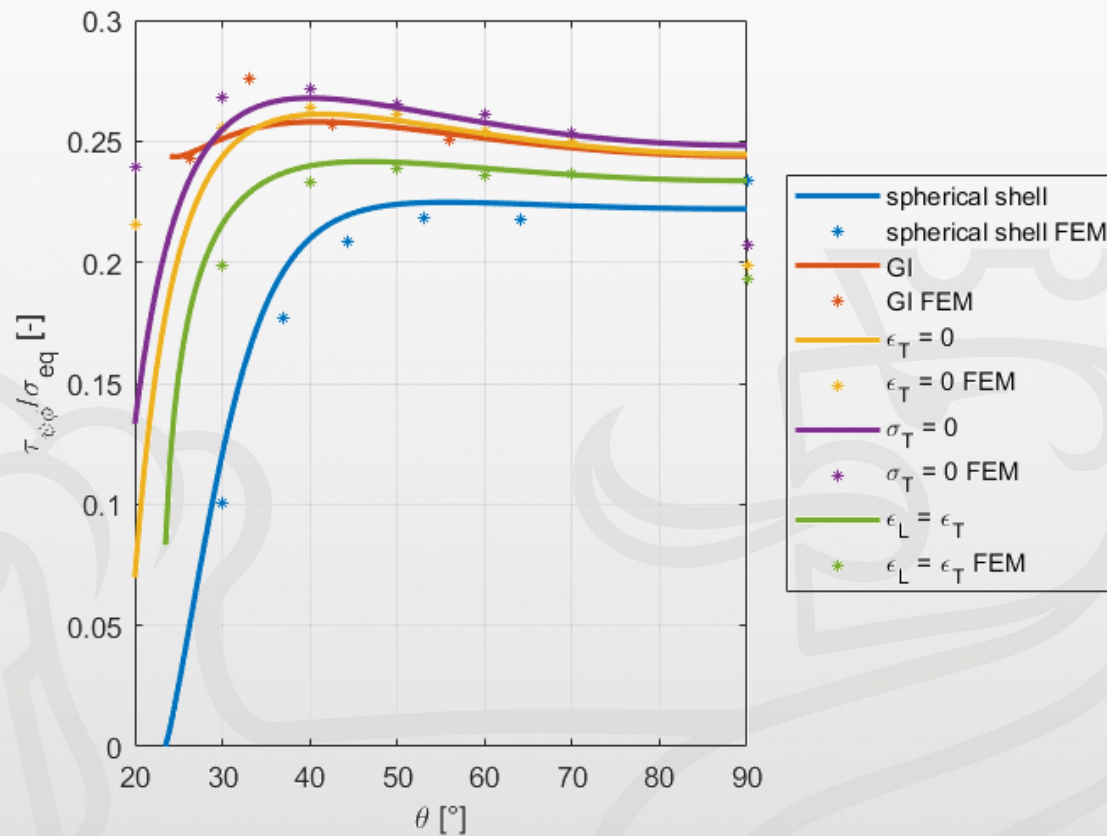
Analýza a představení různých tvarů den



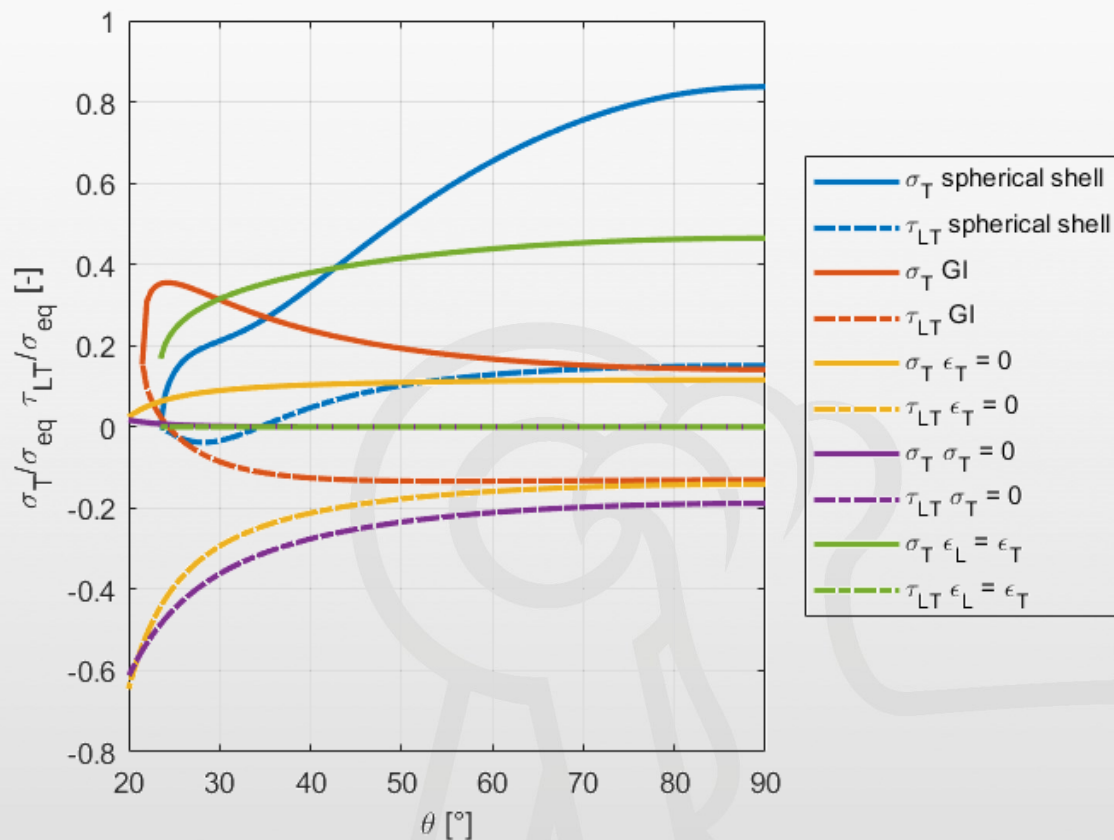
➤ **využití srovnávacího napětí – axiální napětí na rovníku dna**

$$\sigma_{eq} = \frac{pR}{2h_0}$$

Analýza a představení různých tvarů den



Analýza a představení různých tvarů den



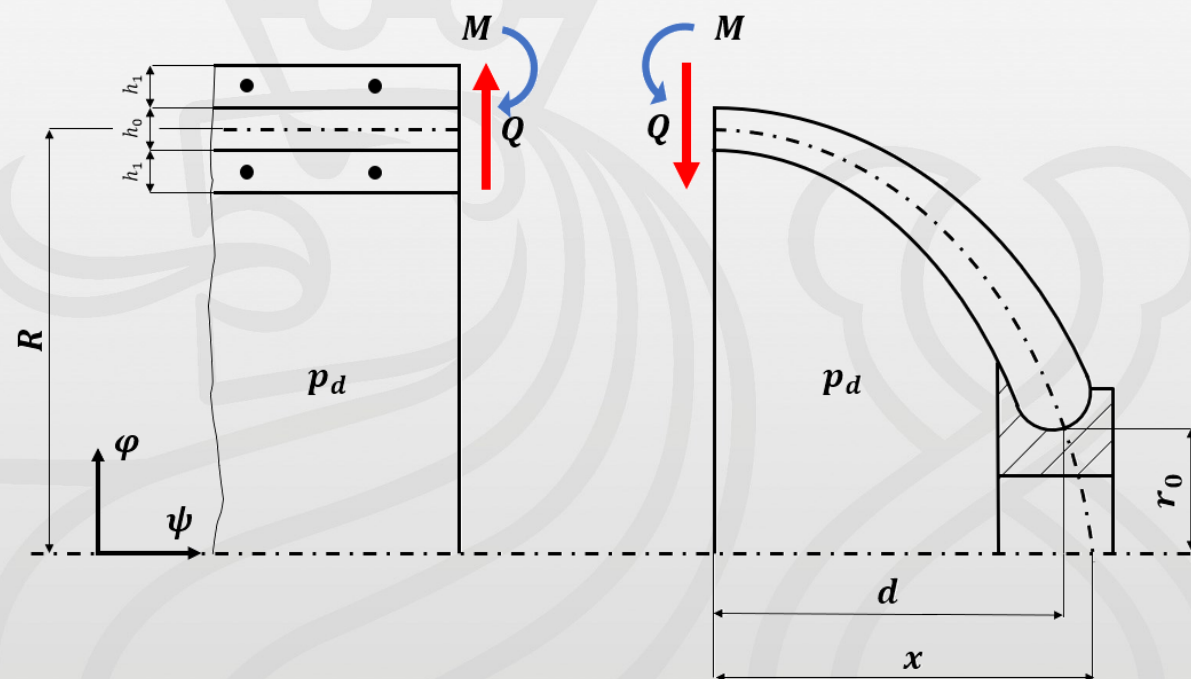
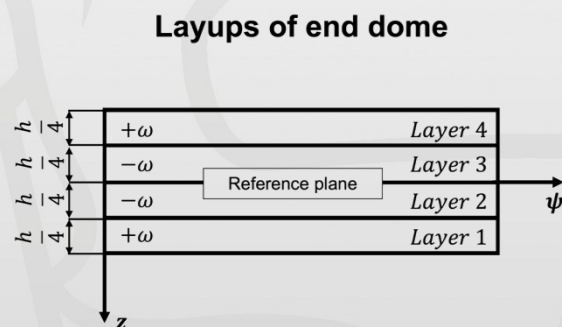
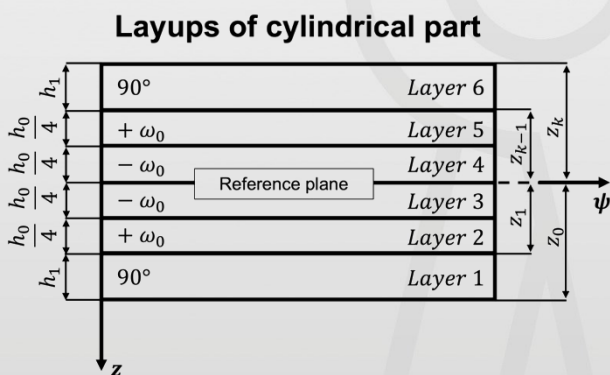
- **dva typy poruchy stěny**
 - **prosakování media přičemž zůstává neporušená výztuž (způsobuje σ_T a τ_{LT})**
 - **úplné porušení pláště a přetrhání vláken (způsobuje σ_L)**
- **kritické oblasti na jednotlivých skořepinách**
 - **koule a $\epsilon_L = \epsilon_T$ - maximální hodnoty indexu porušení na rovníku (nejmenší tloušťka stěny)**
 - **GI - maximální hodnoty indexu porušení v blízkosti inflexního bodu**
 - **$\epsilon_T = 0$ a $\sigma_T = 0$ - maximální hodnoty indexu porušení u polárního otvoru, pro dané parametry zadání mírně klesají směrem k rovníku**
- **porovnání jednotlivých tvarů**
 - **z hlediska ztráty těsnosti - nejvýhodnější $\sigma_T = 0$, pak $\epsilon_T = 0$, GI, $\epsilon_L = \epsilon_T$, koule**
 - **z hlediska úplného porušení výztuže - nejvýhodnější GI, rozdílnost meridiánových křivek od tvaru GI určuje výhodu/nevýhodu daného dna pro tento typ poruchy**

Analýza spoje válec/dno

- ve spoji vzniká staticky neurčitá posouvající síla a ohybový moment – určení ze stejného radiálního posuvu válce a dna a stejné změny úhlu natočení tečny k meridiánu
- využití příčinkových činitelů

$$M = p_d \frac{(\delta_p^C - \delta_p^D) (\vartheta_Q^D - \vartheta_Q^C)}{(\Delta_Q^C + \Delta_Q^D) (\vartheta_M^C + \vartheta_M^D) + (\Delta_M^C - \Delta_M^D) (\vartheta_Q^D - \vartheta_Q^C)}$$

$$Q = M \frac{\vartheta_M^C + \vartheta_M^D}{\vartheta_Q^D - \vartheta_Q^C},$$



Analýza spoje válec/dno

- **staticky neurčité vnitřní účinky vyvolají ve styku vnitřní síly a momenty v plášti válce i dna**
- **relativní prodloužení ve střední rovině válce/dna se dají vypočítat jako**

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{\psi}^0 \\ \varepsilon_{\varphi}^0 \end{bmatrix} = a \left(\begin{bmatrix} N_{\psi} \\ N_{\varphi} \end{bmatrix}_p + \begin{bmatrix} N_{\psi} \\ N_{\varphi} \end{bmatrix}_Q + \begin{bmatrix} N_{\psi} \\ N_{\varphi} \end{bmatrix}_M \right),$$

- **kde $a = (A_{ij}^C)^{-1}$ respektive $a = (A_{ij}^D)^{-1}$**
- **změny křivostí ve střední rovině válce/dna se dají vypočítat jako**

$$\begin{bmatrix} \kappa_{\psi} \\ \kappa_{\varphi} \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} M_{\psi} \\ M_{\varphi} \end{bmatrix}_M,$$

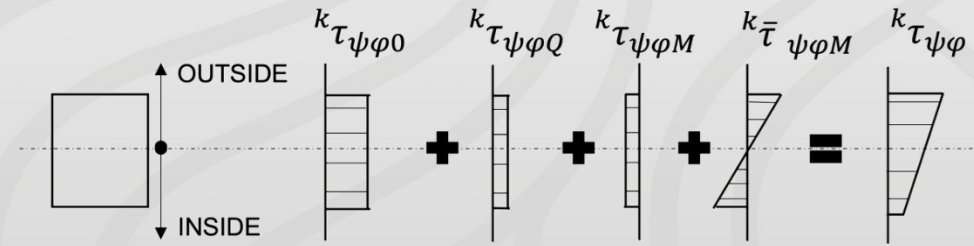
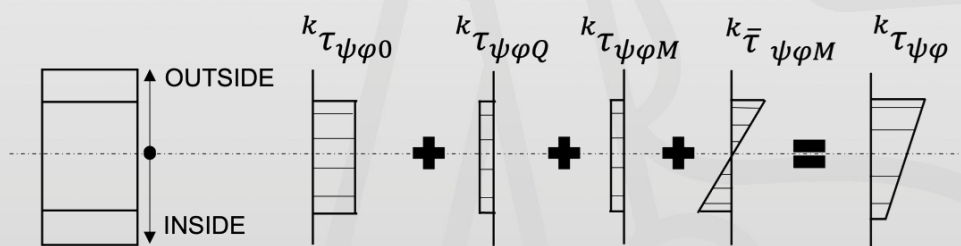
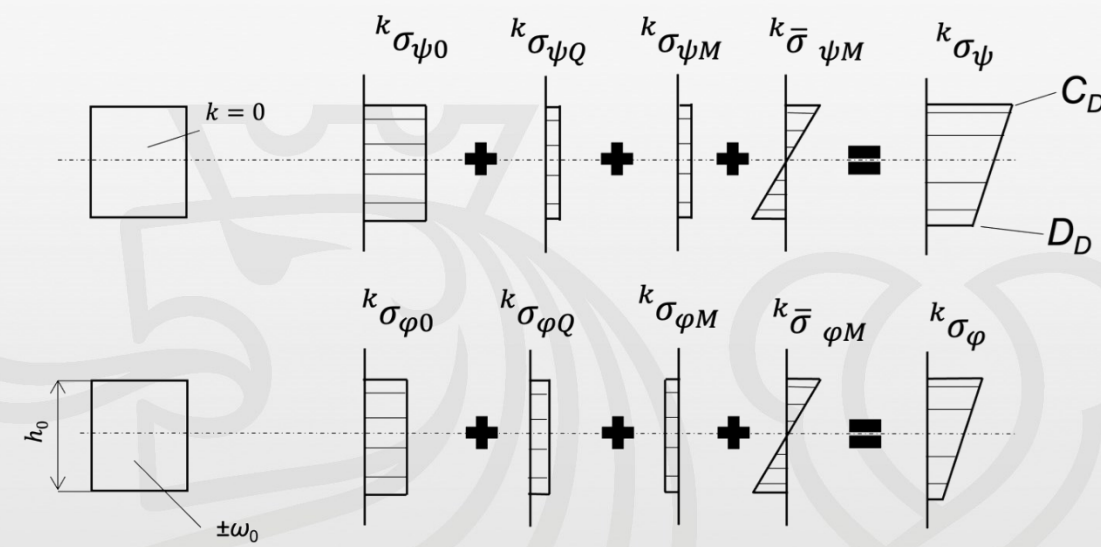
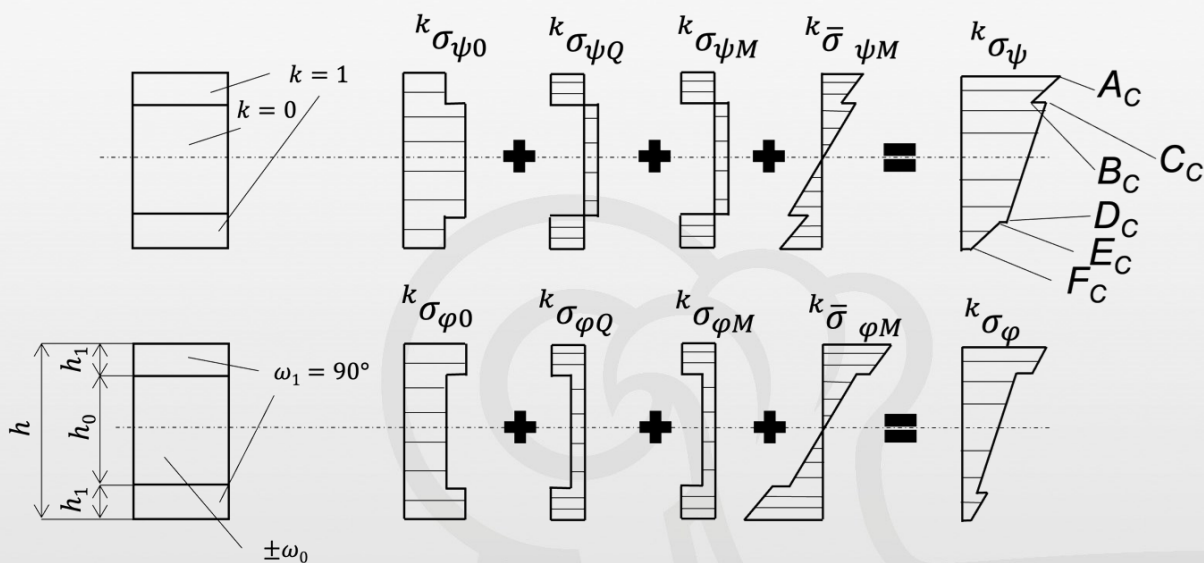
- **kde $d = (D_{ij}^C)^{-1}$ respektive $d = (D_{ij}^D)^{-1}$**
- **relativní prodloužení na okraji jednotlivých vrstev jsou potom**

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{\psi} \\ \varepsilon_{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\psi}^0 \\ \varepsilon_{\varphi}^0 \end{bmatrix} + z_k \begin{bmatrix} \kappa_{\psi} \\ \kappa_{\varphi} \end{bmatrix}$$

Analýza spoje válec/dno

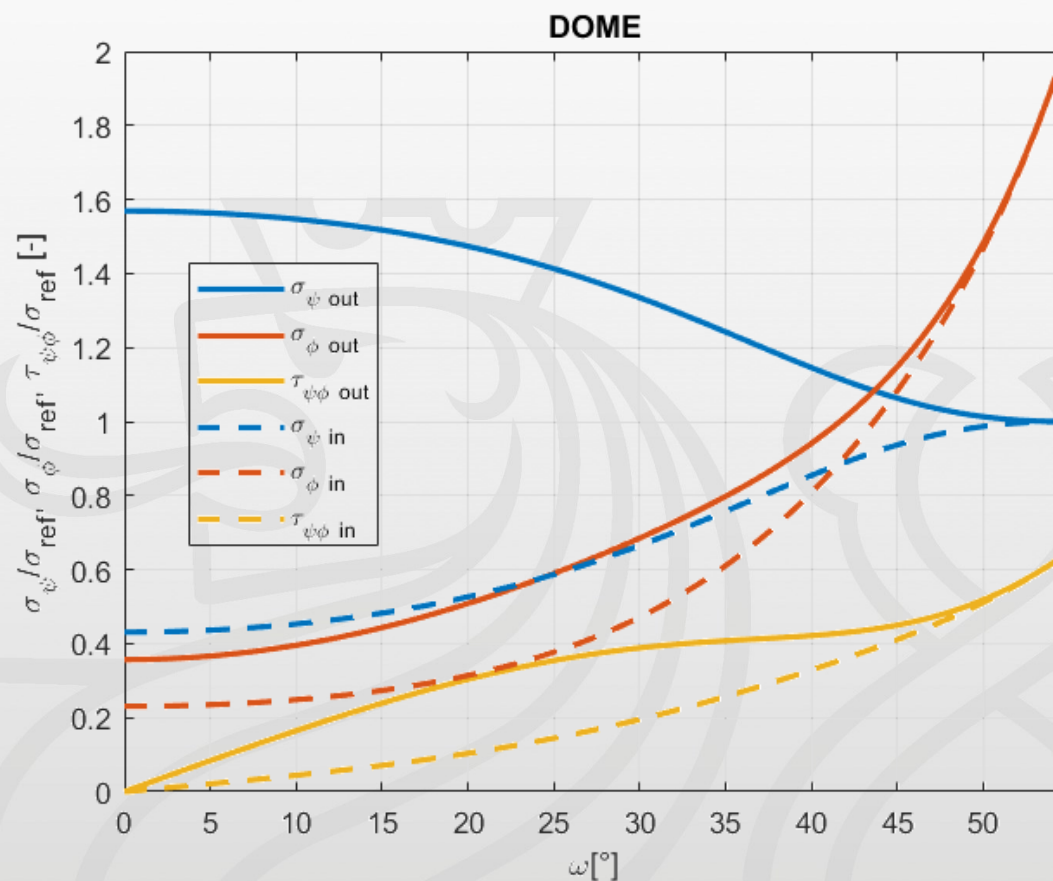
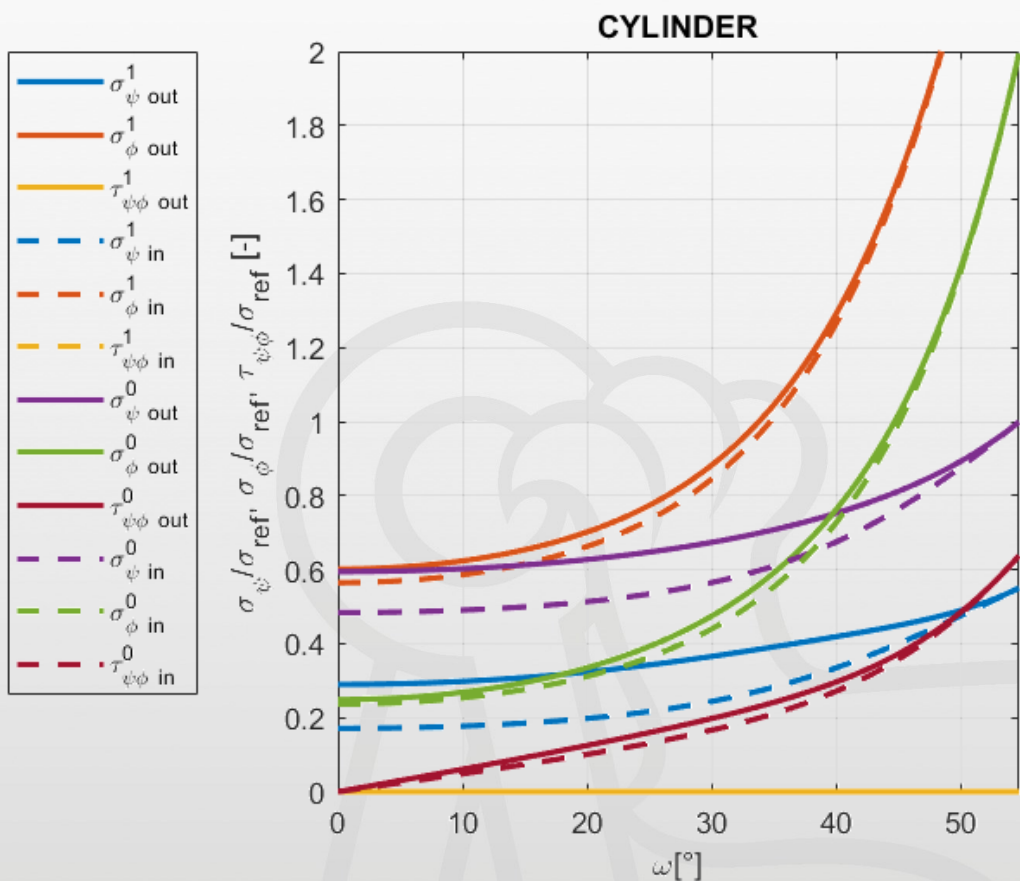
➤ napětí v jednotlivých orientovaných monovrstvách jsou pak

$$\begin{bmatrix} \sigma_\psi \\ \sigma_\varphi \\ \tau_{\psi\varphi} \end{bmatrix}^k = Q^k \begin{bmatrix} \varepsilon_\psi \\ \varepsilon_\varphi \\ 0 \end{bmatrix}^k$$



Analýza spoje válec/dno

➤ Příklad: spoj válec/geodetický isotensoid

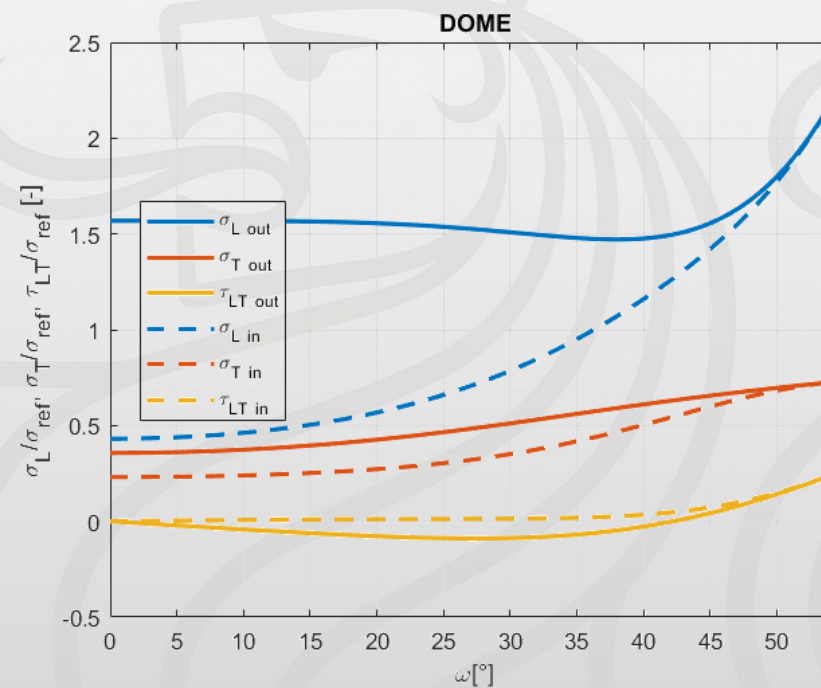
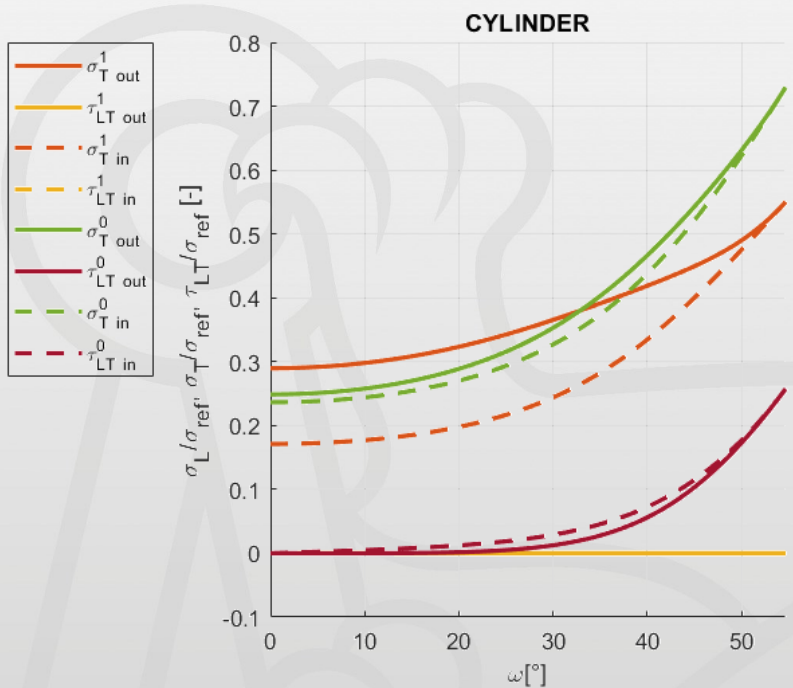


Analýza spoje válec/dno

- transformace z globálního souřadnicového systému do lokálního

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2 m n \\ n^2 & m^2 & -2 m n \\ -m n & m n & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_\psi \\ \sigma_\varphi \\ \tau_{\psi\varphi} \end{bmatrix}$$

- aplikace pevnostních kritérií

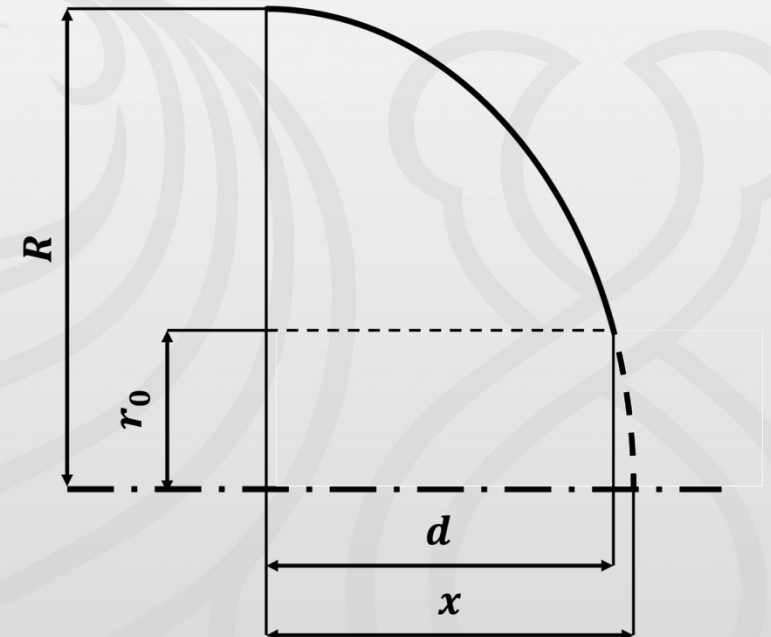


Možnosti vícekriteriální optimalizace nádob

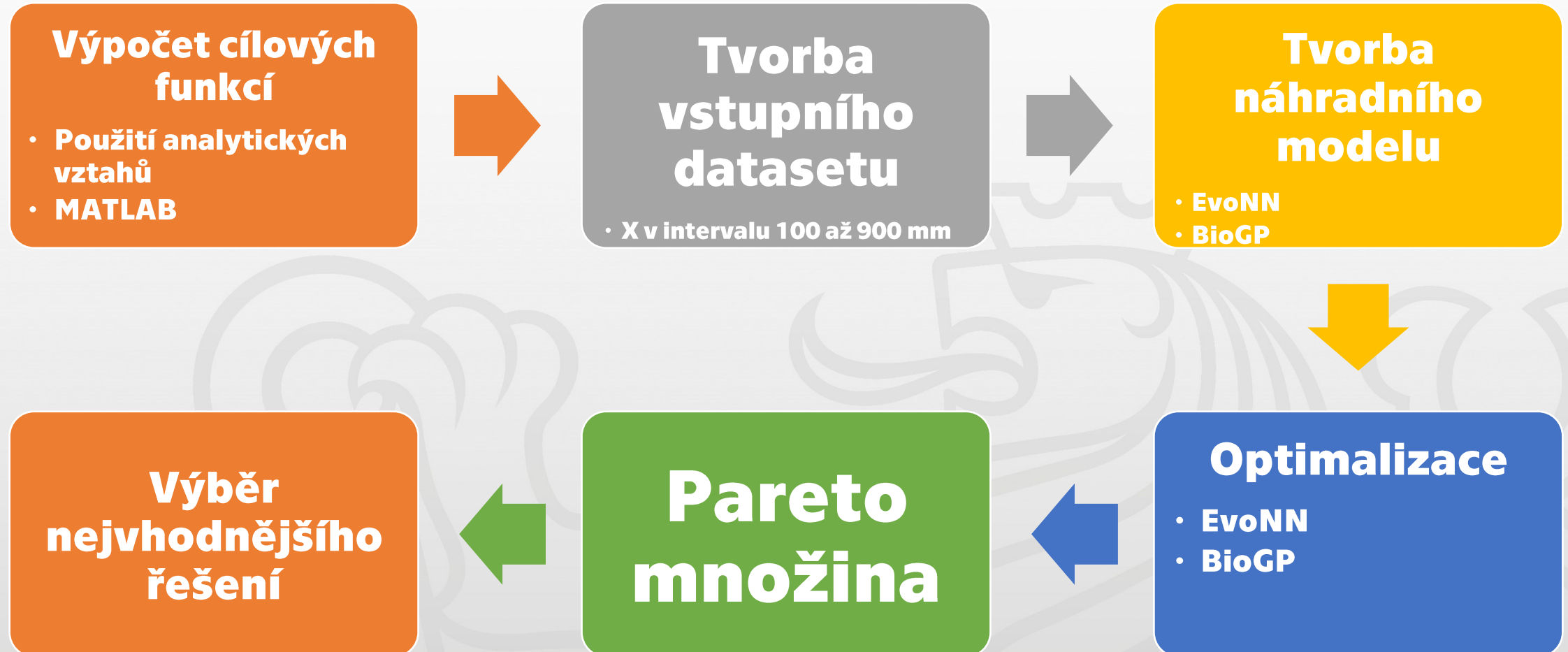
➤ aplikace Hoffmanova pevnostního kritéria

$$U = \frac{\sigma_L^2}{F_{Lt} F_{Lc}} + \frac{\sigma_T^2}{F_{Tt} F_{Tc}} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{F_{Lt} F_{Lc}} + \frac{F_{Lc} - F_{Lt}}{F_{Lt} F_{Lc}} \sigma_L + \frac{F_{Tc} - F_{Tt}}{F_{Tt} F_{Tc}} \sigma_T + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2}$$

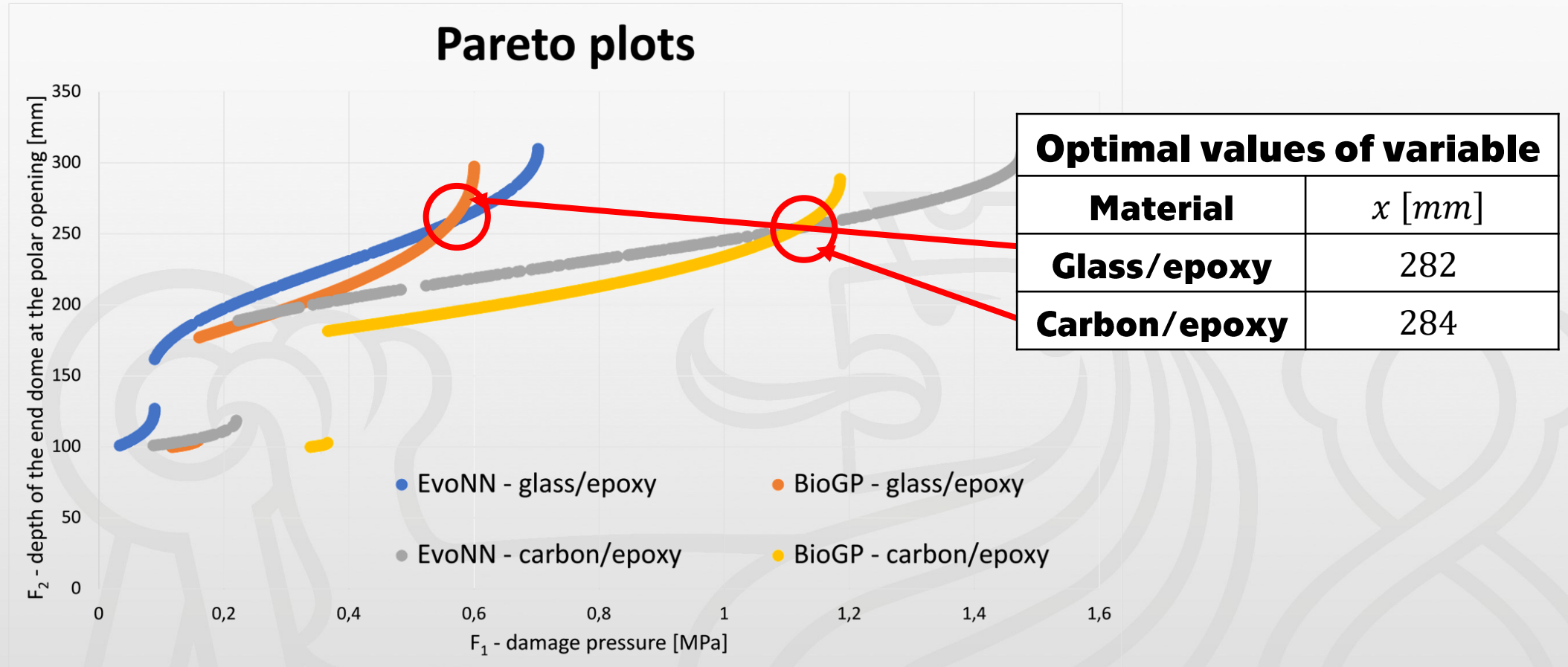
- výpočet maximálního tlaku p_D tak, aby bylo kritérium splněno (funkce F_1)
- navrhnout dno tak, aby bylo co nejmělkčí
- hloubka dna v místě polárního otvoru d (funkce F_2)
- vícekriteriální optimalizační úloha $f(x) = \begin{cases} \max F_1 \\ \min F_2 \end{cases}$
- dva „data-driven“ evoluční algoritmy
 - Evolutionary Neural Net – EvoNN
 - Bi-objective Genetic Programming – BioGP



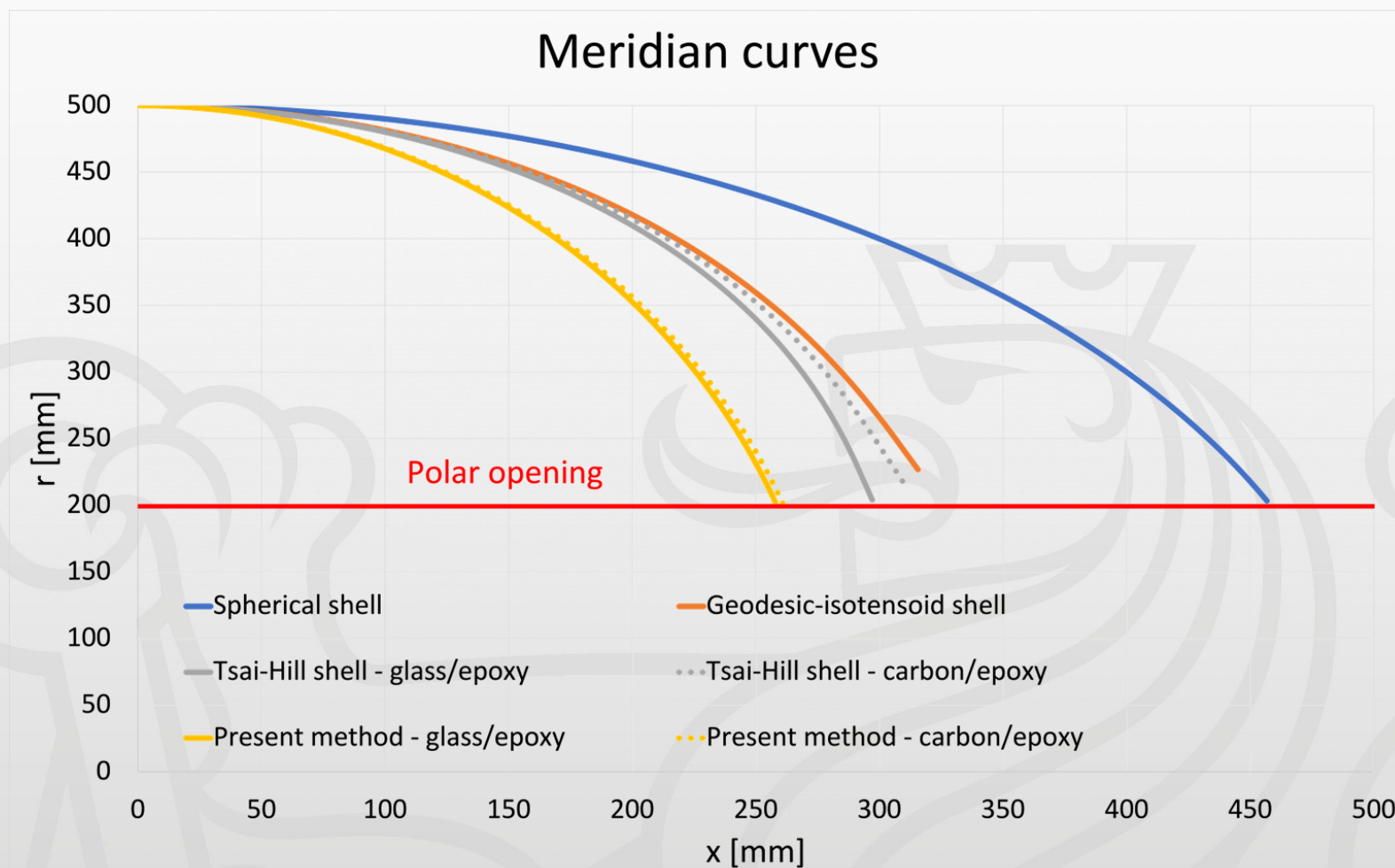
Možnosti vícekriteriální optimalizace nádob



Možnosti vícekriteriální optimalizace nádob



Možnosti vícekriteriální optimalizace nádob



Možnosti vícekriteriální optimalizace nádob

➤ aplikace Hoffmanova pevnostního kritéria

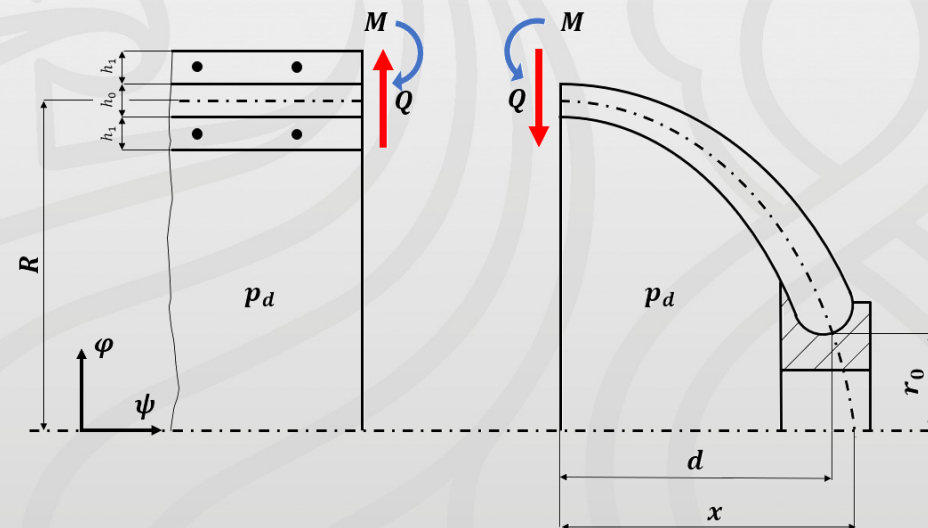
$$U = \frac{\sigma_L^2}{F_{Lt} F_{Lc}} + \frac{\sigma_T^2}{F_{Tt} F_{Tc}} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{F_{Lt} F_{Lc}} + \frac{F_{Lc} - F_{Lt}}{F_{Lt} F_{Lc}} \sigma_L + \frac{F_{Tc} - F_{Tt}}{F_{Tt} F_{Tc}} \sigma_T + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2}$$

- výpočet maximálního tlaku p_D tak, aby bylo kritérium splněno (funkce f_1)
- navrhnout dno tak, aby bylo co nejmělkčí
 - hloubka dna v místě polárního otvoru d (funkce f_2)
- navrhnout dno tak, aby vnitřní silové účinky Q a M byly co nejmenší
 - $f_3 = M^2, f_4 = Q^2$

- vícekriteriální optimalizační úloha $F(x) = \begin{cases} \max f_1 \\ \min f_2 \\ \min f_3 \\ \min f_4 \end{cases}$

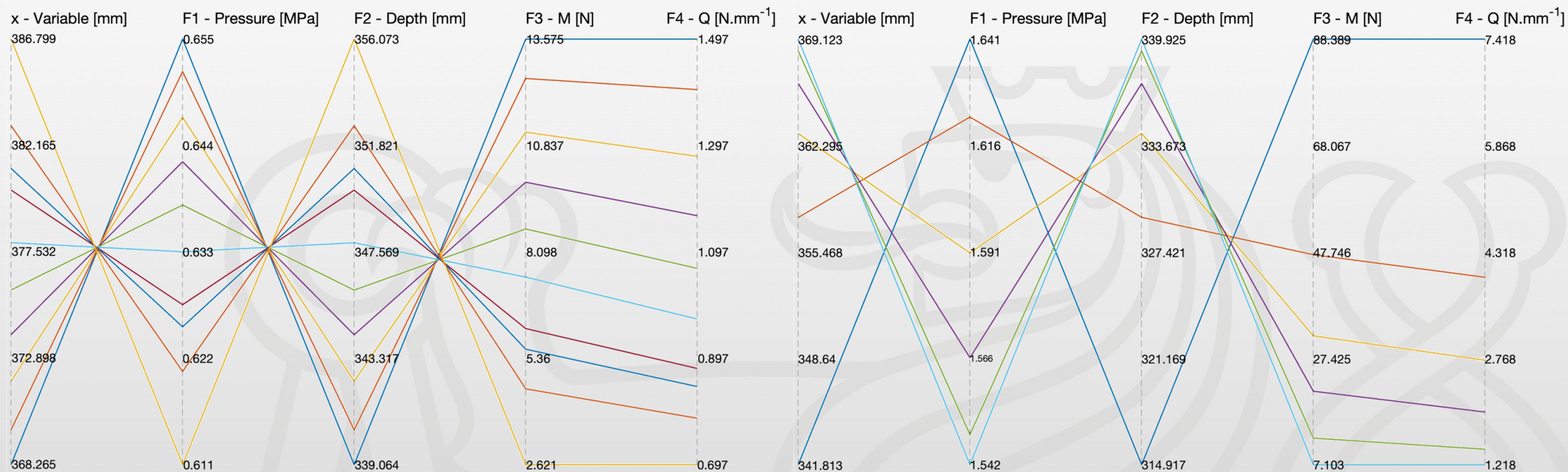
➤ dva „data-driven“ evoluční algoritmy

- Evolutionary Deep Neural Nets – EvoDN2
- Constrained Reference Vector Algorithm - cRVEA



Možnosti vícekriteriální optimalizace nádob

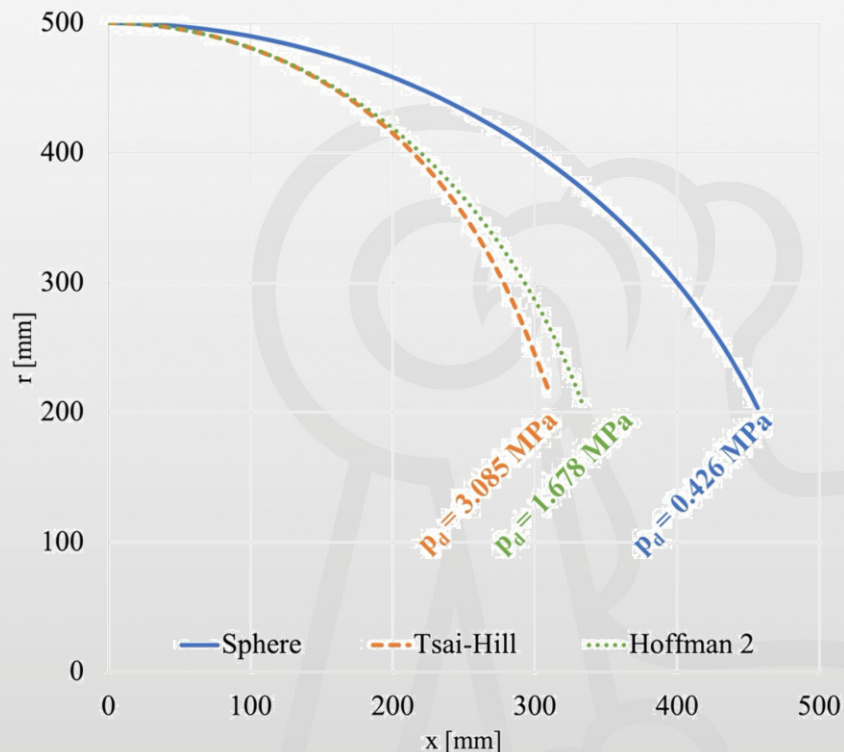
➤ **paralelní grafy pro materiálové systémy sklo/epoxy a C/epoxy**



Možnosti vícekriteriální optimalizace nádob

- v případě sklo/epoxy systému – porucha ve dnu
- v případě carbon/epoxy systému se přídatná napětí od síly a momentu odečtou od membránového stavu (anizotropie uhlíkového vlákna)

Meridian curves





Original Article

Institution of
**MECHANICAL
ENGINEERS**



Analysis and optimization of junction between cylindrical part and end dome of filament wound pressure vessels using data driven evolutionary algorithms

Dominik Vondráček , Zdeněk Padovec , Tomáš Mareš and Nirupam Chakraborti

Proc IMechE Part C:
J Mechanical Engineering Science
1–14
© IMechE 2023
Article reuse guidelines:
sagepub.com/journals-permissions
DOI: 10.1177/09544062231191319
journals.sagepub.com/home/pic

 Sage

Závěr

- **bylo ukázáno řešení samotné válcové části navíjené nádoby (analyticky + MKP), samotných den (analyticky + MKP) a spoje válec/dno (analyticky)**
- **uvedené výsledky platí pro konkrétní materiálovou kombinaci sklo/epoxy**
- **jiné materiálové kombinace (C/epoxy) jsou předmětem zadání bakalářských/diplomových/dizertačních prací na ČVUT FS**
 - **Student: Martin Ševčík; Školitel: Zdeněk Padovec; Název: Algoritmizace graficko-početní metody pro stanovení hlavních poloměrů křivosti kompozitní skořepiny; Datum obhájení: 19.6.2023**
 - **Student: Ondřej Novotný; Školitel: Zdeněk Padovec; Název: Analýza napjatosti ve vybraných dnech pro válcové tlakové nádoby navinuté z kompozitních materiálů; Datum obhájení: 16.2.2023.**
 - **Student: Filip Barda; Školitel: Zdeněk Padovec; Název: Analýza napjatosti v tenkostěnných navíjených tlakových nádobách z kompozitních materiálů; Datum obhájení: 30.8.2023**
 - **Student: Dominik Vondráček; Školitel: Tomáš Mareš; Školitel specialista: Zdeněk Padovec; Optimalizace kompozitových tlakových nádob.**
 - ...
- **spolupráce s ACO Industries Tábor, s.r.o. v rámci NCK Mestec**
- **zařazení laboratorního navíjecího stroje X-winder do výuky/výzkumu**

