

Měření makroskopických parametrů plazmatu v reálném čase

Ondrej Kudlacek

Obsah

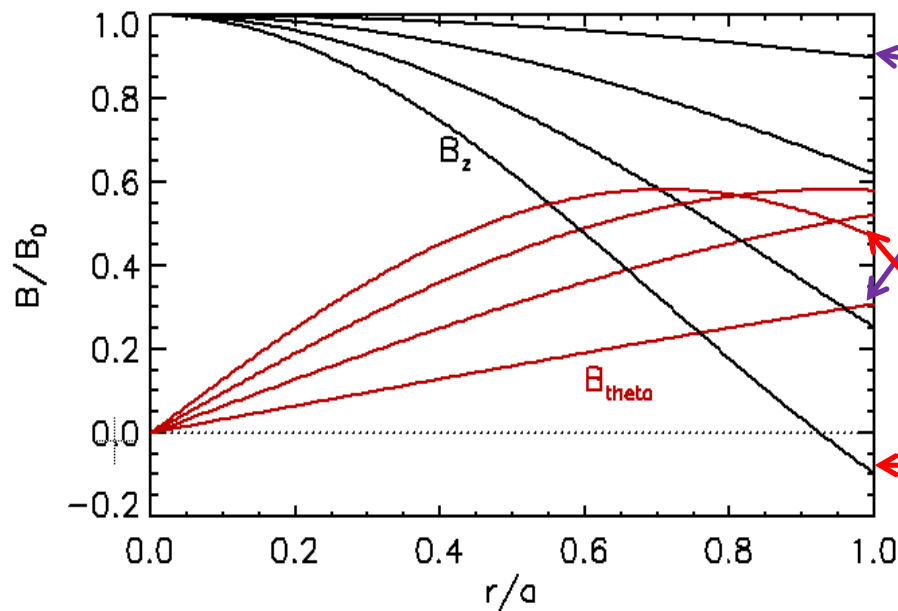
- Úvod- pinče s obráceným polem a tokamakové výboje, RFX-mod
- Rekonstrukce hranice plazmatu
- Měření $\beta_p + I_i/2$
- Měření q_{95}

I. Úvod- pinč s obráceným polem a tokamak

- RFX-mod- pinč s obráceným polem (RFP)
- Provozován i v tokamakovém režimu
- Některé poznatky z RFP oblasti použitelné v oblasti tokamaků

Pinče s obráceným polem- základy

- 2 bezpečné toroidální konfigurace
- Tokamak: B_T dominantní- **cívky**
- RFP: B_p dominantní- **proud plazmatem**



Tokamak- bezpečná
konfigurace

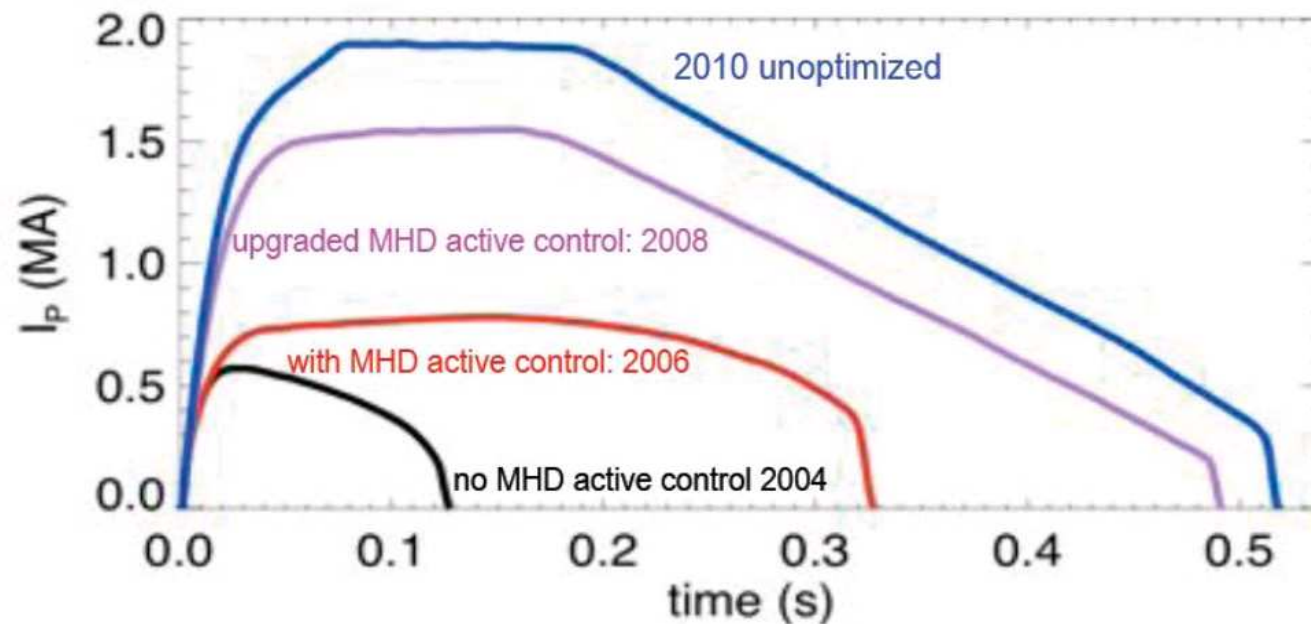


RFP- relativní bezpečí

(4)

RFP nestability

- **Smyčková nestabilita**- příliš vysoký proud
- **Magnetické ostrovy**- racionální q
- Zpětnovazební kontrola pomocí sedlových cívek



RFP a Tokamak

- RFP může být provozován i jako tokamak
- Některé společné problémy- magnetické ostrovy
- Čistě tokamakové nestability (ELM, pilový kmit) ovlivněny polem sedlových cívek
- Tokamaky- málo sedlových cívek: omezené možnosti kontroly (DIII-D 12, AUG 24)
- RFP: cívek je dostatek (RFX 192)
- Tokamakové výboje s okrajovým koeficientem stability < 2
- Zpětnovazební kontrola periody pilových kmitů
- Zatím pouze kruhové plazma
- Cíl: tvar plazmatu blízký ITERu
- První krok- nutnost přesné detekce hranice plazmatu

RFX-mod

- Největší RFP na světě
- Nachází se v Padově
- $R = 2 \text{ m}$, $a = 0.46 \text{ m}$, kruhová komora
- 192 nezávislých aktivních sedlových cívek
- Rozsáhlé možnosti tvarování plazmatu



II. Rekonstrukce hranice plazmatu

Rekonstrukce- úvod

- Grad-Shafranovova rovnice

$$\Delta^* \psi = -\mu_0 R^2 \frac{dp}{d\psi} - \frac{1}{2} \frac{dF^2}{d\psi}$$

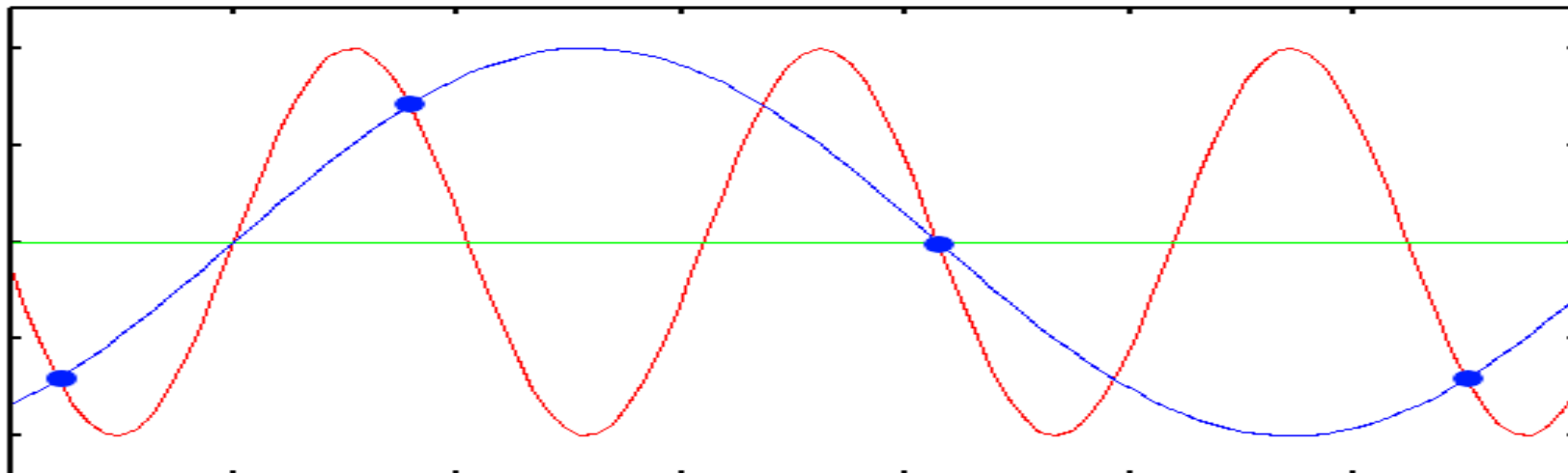
- 2 základní metody:
- Kódy přímo řešící GS rovnici: vstupy jsou proudy v PF cívkách, proud plazmatem a tlakový + proudový profil (MAXFEA)
- Inverzní kódy- konfigurace plazmatu rekonstruována z magnetických signálů (EFIT)
- Existuje mnoho kódů, některé i RT
- Vyžadují dostatek senzorů (58 AUG, 99 TCV)
- RFX: 8 FL, 8 Mirnovových cívek => Chce to něco nového...

Rekonstrukce hranice plazmatu- princip

- Magnetický potenciál ve vakuu: $\Delta\varphi = 0$, $\mathbf{B} = \nabla\varphi$
- Analytické řešení Laplaceovy rovnice ve válcových souřadnicích:
$$\varphi = \varphi_0\theta + \sum_{k=1}^N \cos(k\theta)(A_{kc}r^k + B_{kc}r^{-k}) + \sin(k\theta)(A_{ks}r^k + B_{ks}r^{-k})$$
- Konstanty $A_{kc,s}$, $B_{kc,s}$ jsou dány okrajovými podmínkami- měření magnetického toku (ψ) a poloidálního magnetického pole (B_p)
- Výpočet pomocí kruhových harmonických frekvencí ψ a B_p
- 8 sensorů => 3 harmonické frekvence
- Naprosto nedostatečné...

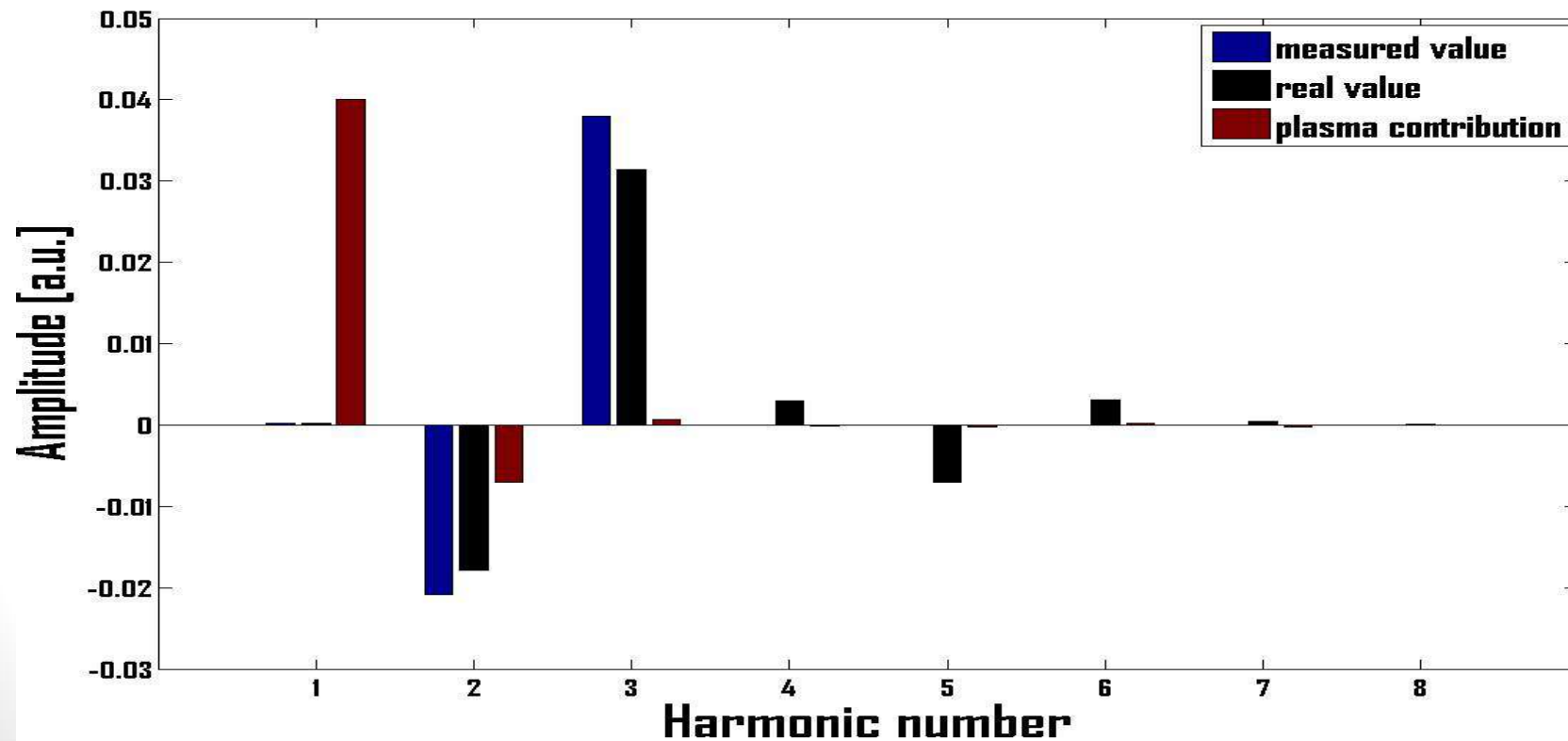
Nedostatek sensorů- problémy

- Vyšší harmonické ovlivňují měřenou amplitudu nižších- aliasing



Nedostatek sensorů- problémy

- Vyšší harmonické ovlivňují měřenou amplitudu nižších- aliasing
- Informace ve vyšších harmonických ztracena
- MAXFEA simulace:



Nedostatek sensorů- řešení

- Příspěvek plazmatu k vyšším harmonickým zanedbatelný
 - Vyšší harmonické spočteny pouze z proudů v PF cívkách
 - Jejich příspěvek odečten od signálů na magnetických senzorech- aliasing je odebrán
-
- **Co známe:** magnetický potenciál, magnetické pole všude ve vakuu
 - **Co potřebujeme:** Hranici plazmatu

Magnetický tok

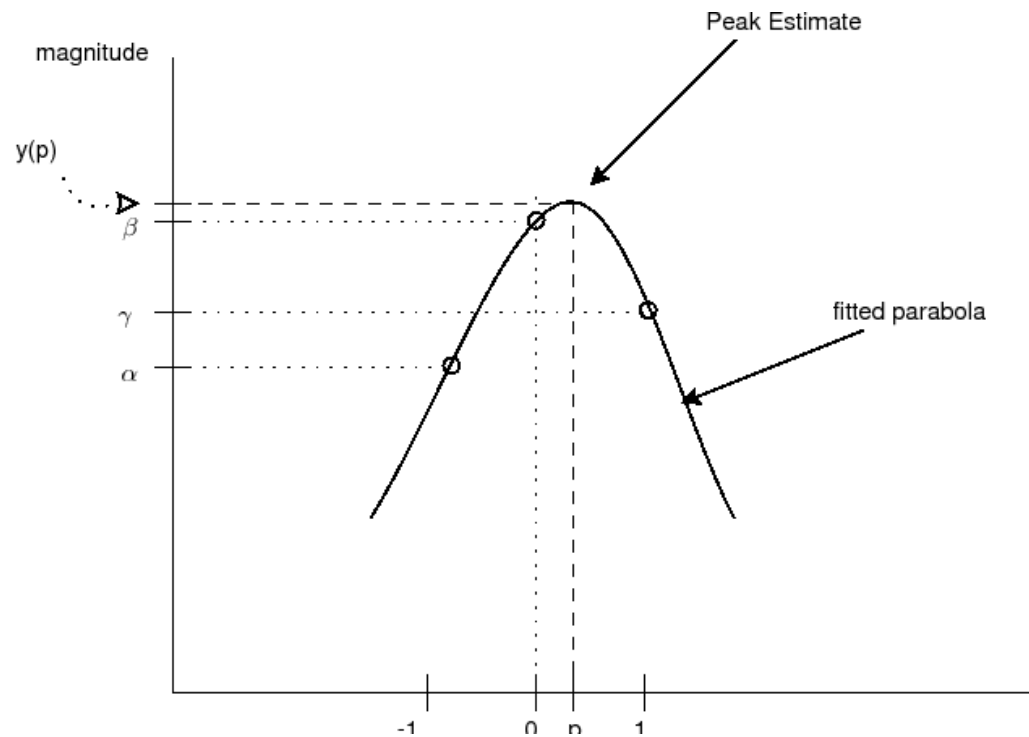
- Hranice plazmatu = vrstevnice magnetického toku
- Výpočet ψ pomocí integrace magnetického pole

$$\psi_a - \psi_b = 2\pi R_0 \cdot (r_{FL} \cdot \int_{\theta_b}^{\theta_a} B_r d\theta - \int_{r_b}^{r_a} B_\theta dr)$$

- Hodnota ψ je známa na 8 místech- 8 flux loopů
- **Jak najít tok na hranici plazmatu?**

Hraniční tok- limiterový režim

- Hraniční tok = nejvyšší tok na první stěně
- Kvadratická interpolace



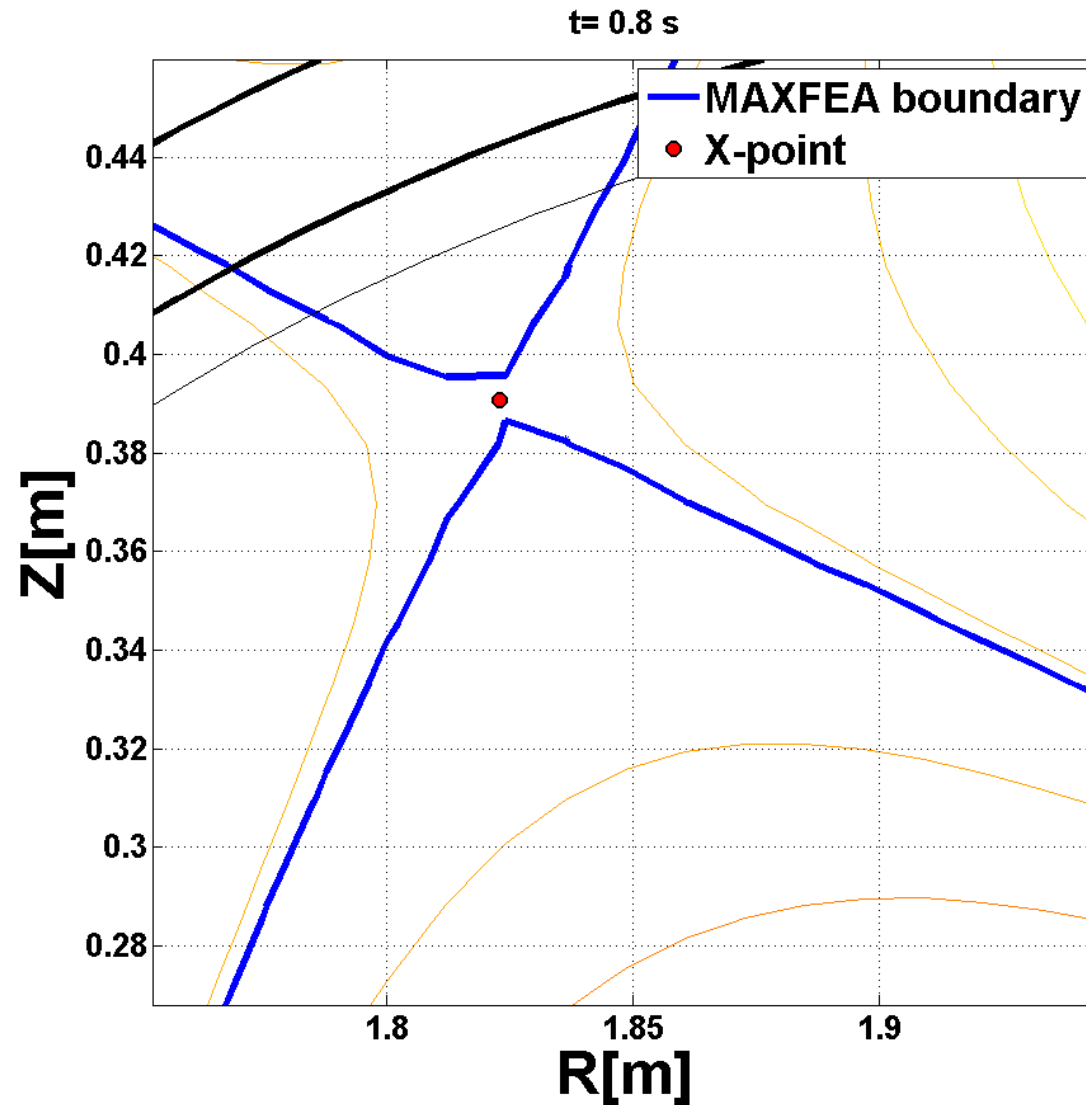
Hraniční tok- divertorový režim

- Hraniční tok= tok na X-point
- Poloha X-pointu neznámá
- X-point: $B_r = 0, B_\theta = 0$, umíme spočítat obě složky
- Hrubý odhad polohy X-pointu je dán designem výboje
- B_r, B_θ spočteny v 36 pevných bodech (oblast 15 X 15 cm) v okolí předpokládané polohy X-pointu a aproximovány kvadratickou formou:

$$B_{r,\theta} = a_{r,\theta}R^2 + b_{r,\theta}Z^2 + c_{r,\theta}RZ + d_{r,\theta}R + e_{r,\theta}Z + f$$

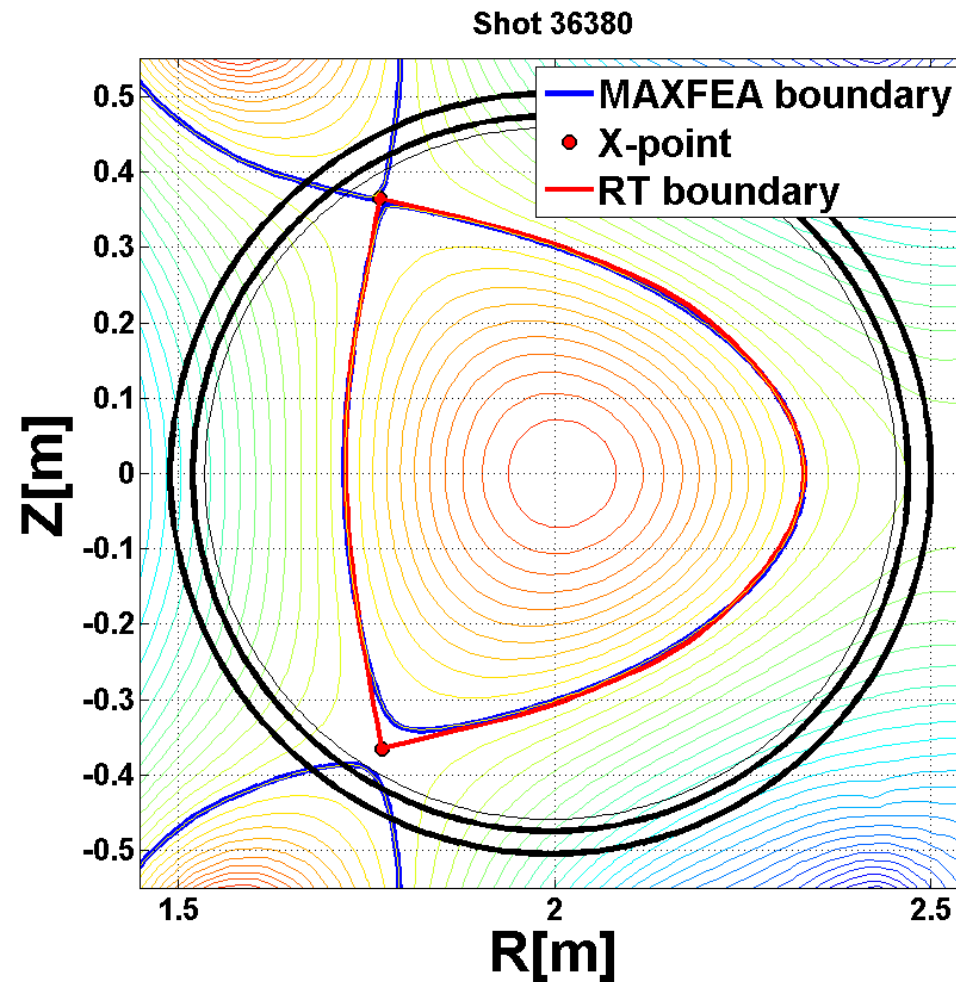
- Reprezentace kvadratickou formou- analytické řešení soustavy
- Magnetický tok na separatrix spočten integrací od nejbližšího FL k X-pointu

Výpočet polohy X-pointu



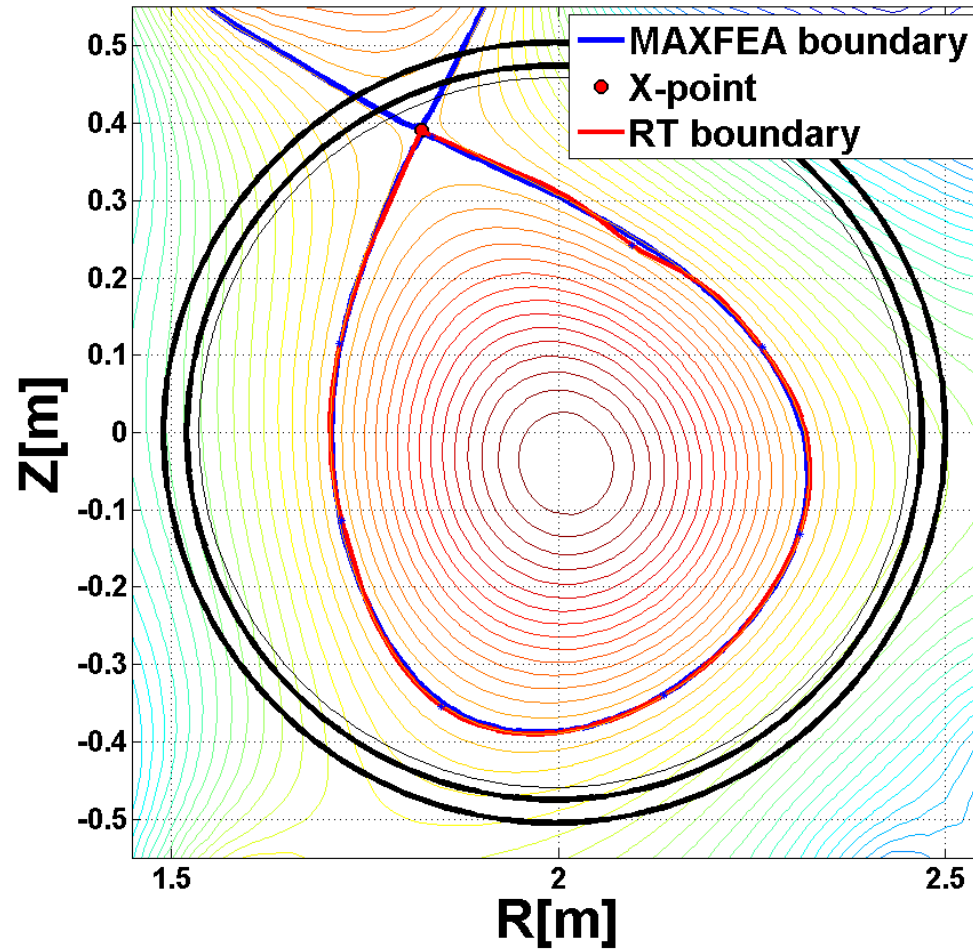
Hranice plazmatu- MAXFEA DN

- Chyba < 1 cm

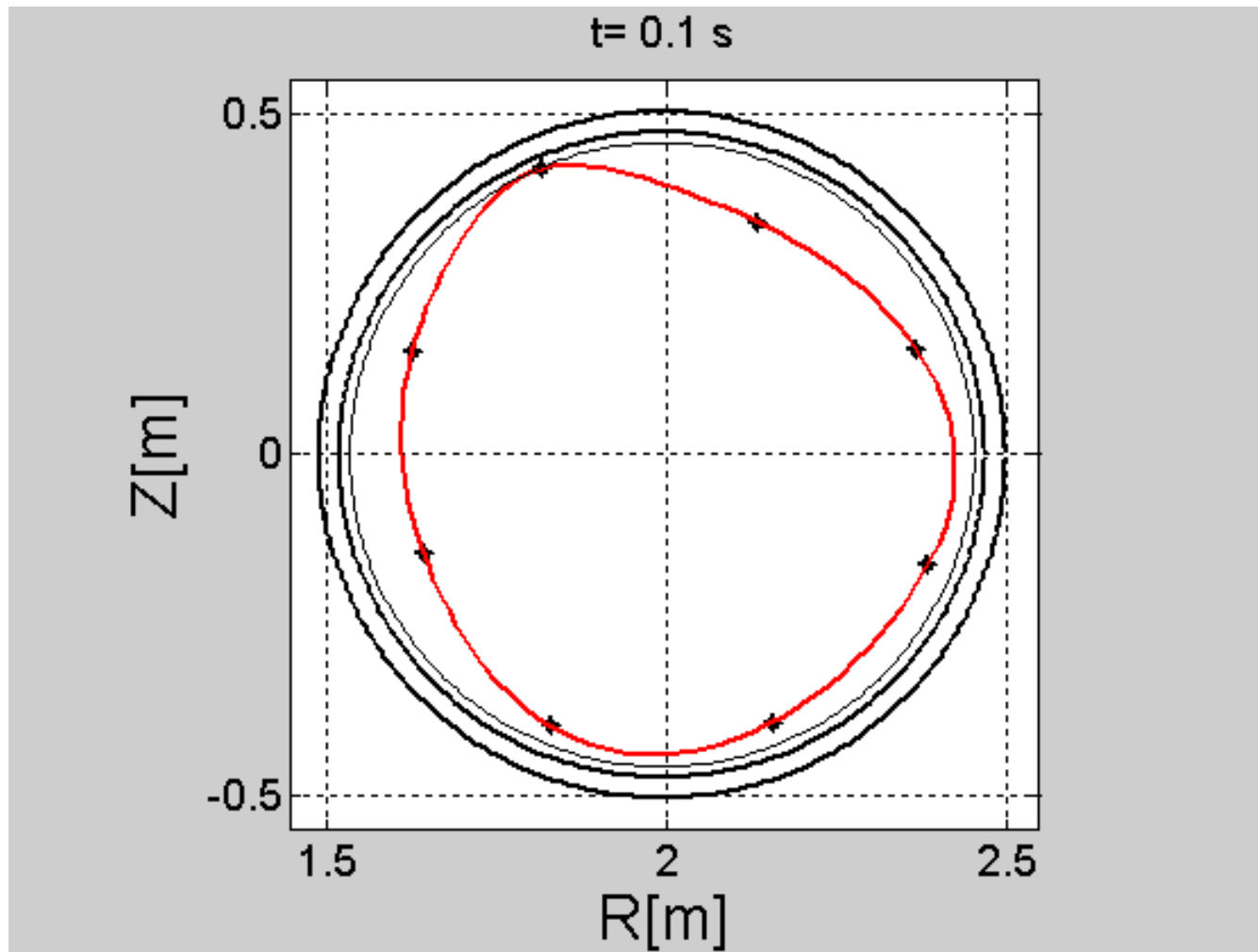


SN výboj

- Chyba < 1 cm

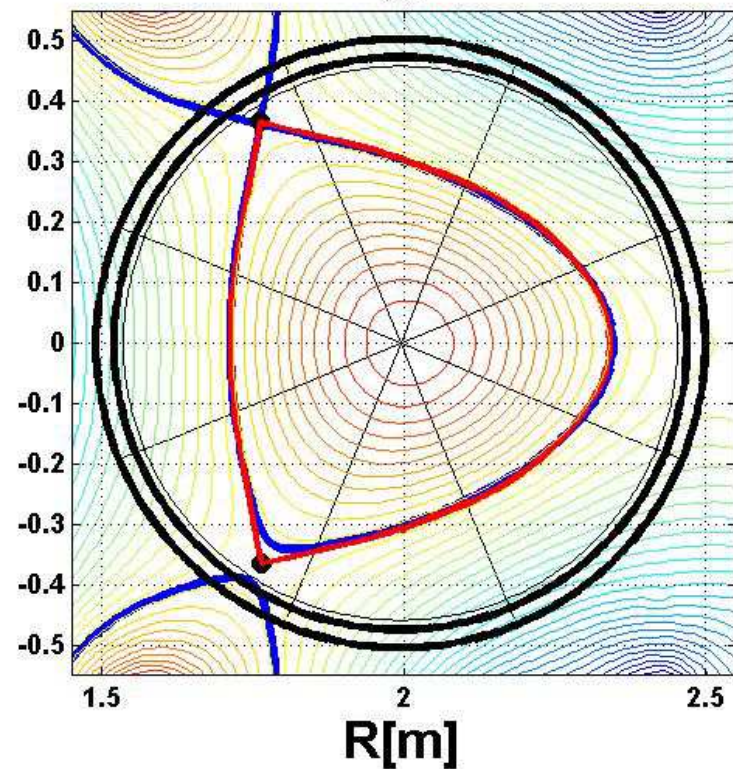
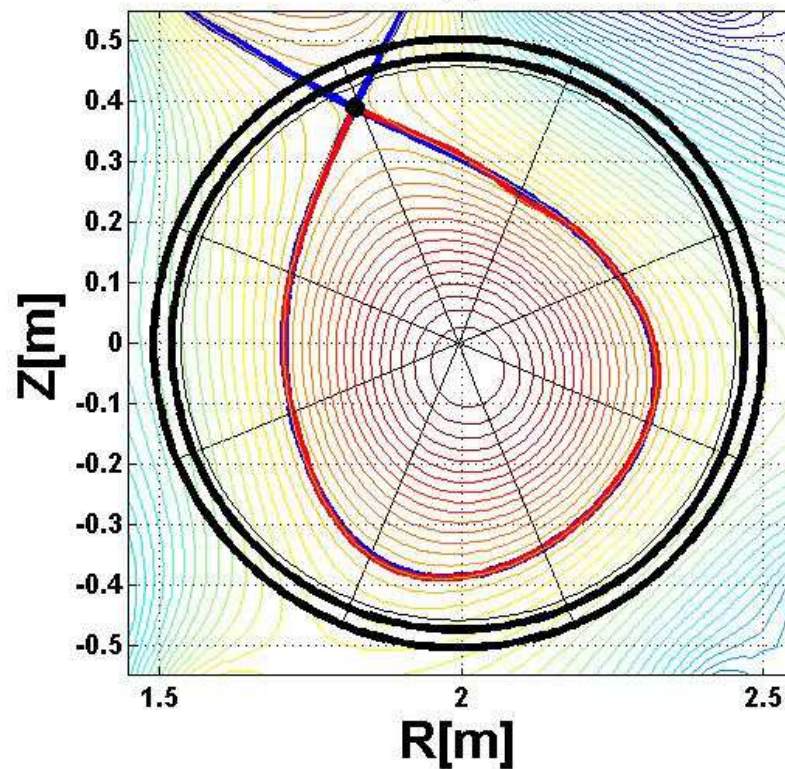


Vývoj hranice plazmatu- SN

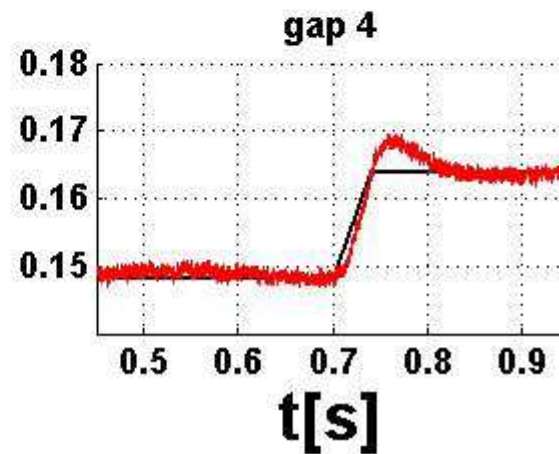
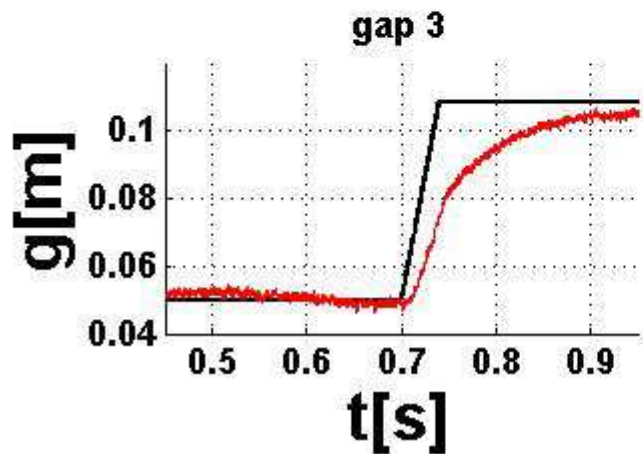
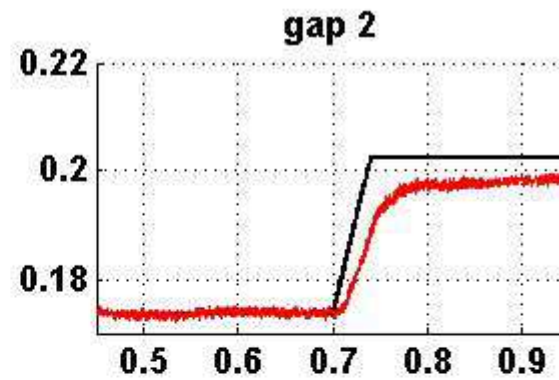
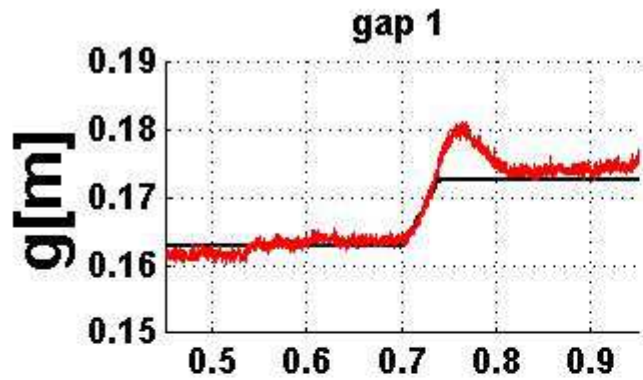


RT aplikace

- 8 mezer mezi první stěnou a plazmatem
- Výpočetní čas pod 0.1 ms



Změna reference



Rekonstrukce hranice plazmatu- závěr

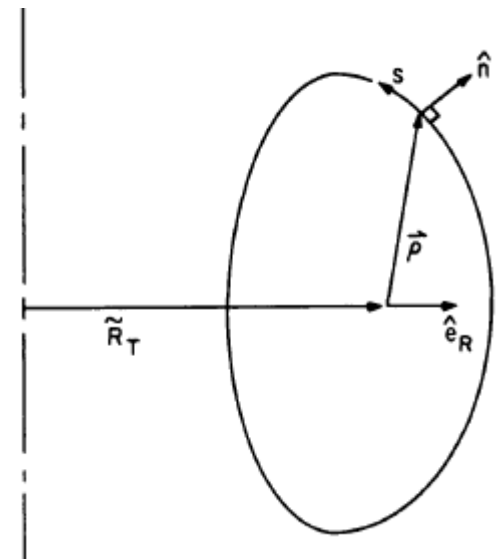
- Hranice rekonstruována pro široké spektrum výbojů- kruhový, elongovaný, SN a DN
- Chyba pod 1 cm
- Použito pro kontrolu plazmatu v reálném čase

III. Měření $\beta_p + I_i/2$

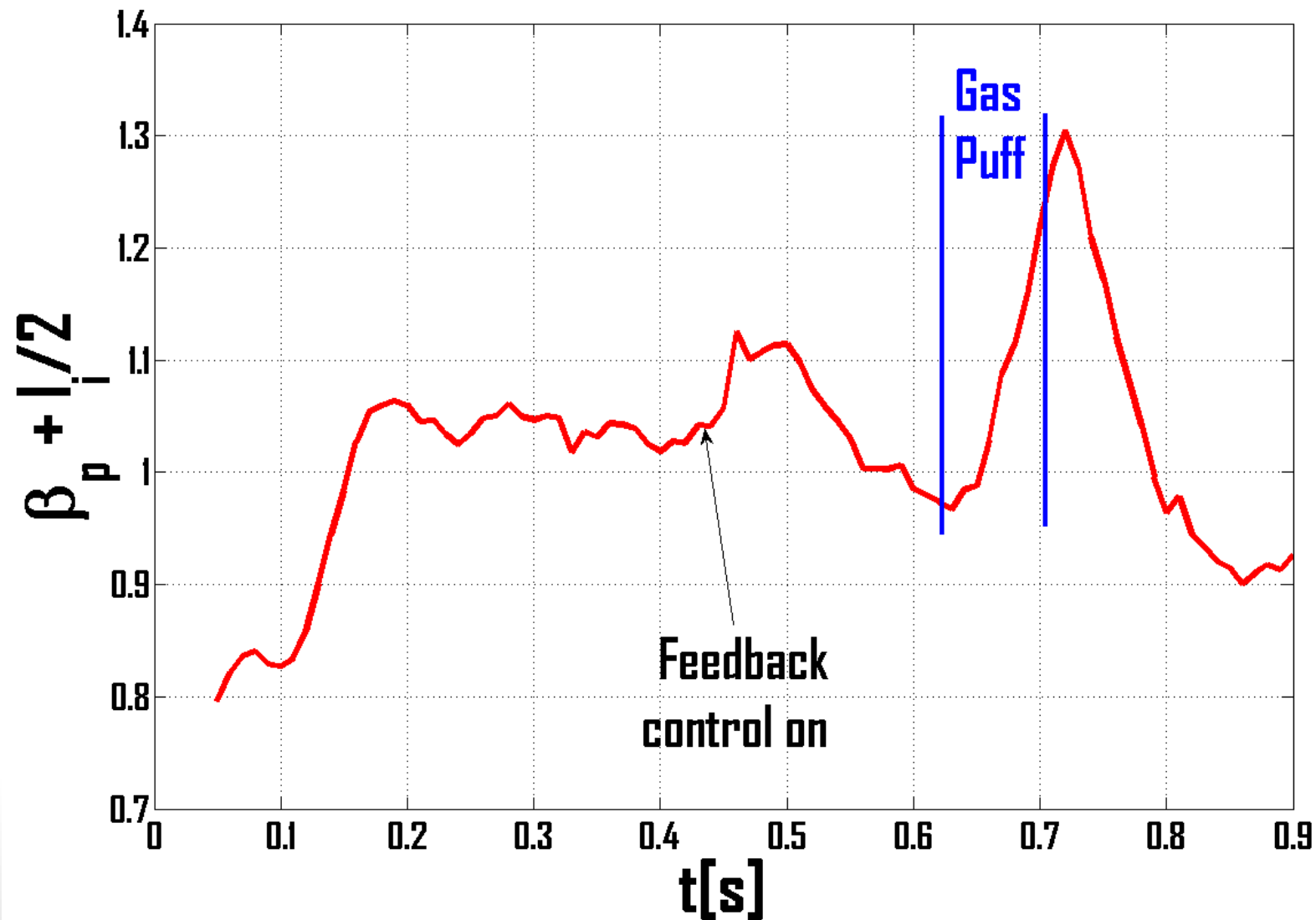
- Důležitý makroskopický parametr
- B_p – tlak v plazmatu, kvalita udržení
- I_i – proudové rozložení v plazmatu
- Těžko se odlišují

$\beta_P + l_i/2$

- $\beta_P = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \int p \cdot dV}{V \cdot \langle B_\theta^2(\text{boundary}) \rangle}$
- $l_i = \frac{\int B_\theta^2 \cdot dV}{V \cdot \langle B_\theta^2(\text{boundary}) \rangle}$
- Zjednodušení: 2 integrály podél hranice plazmatu
- $s_1 = \frac{\pi}{V \cdot \langle B_P^2 \rangle} \oint R_T B_P^2 \cdot \vec{n} \cdot \vec{\zeta} ds$
- $s_2 = \frac{\pi \cdot R_T}{V \cdot \langle B_P^2 \rangle} \oint R_T \cdot B_P^2 \cdot \vec{n} \cdot \vec{e}_R ds$
- $\beta_P + \frac{l_i}{2} = \frac{s_1}{2} + s_2$
- Hranice plazmatu známa, B_p ve vakuu též
- => Výpočet snadný
- Chyba odhadu- < 4 %

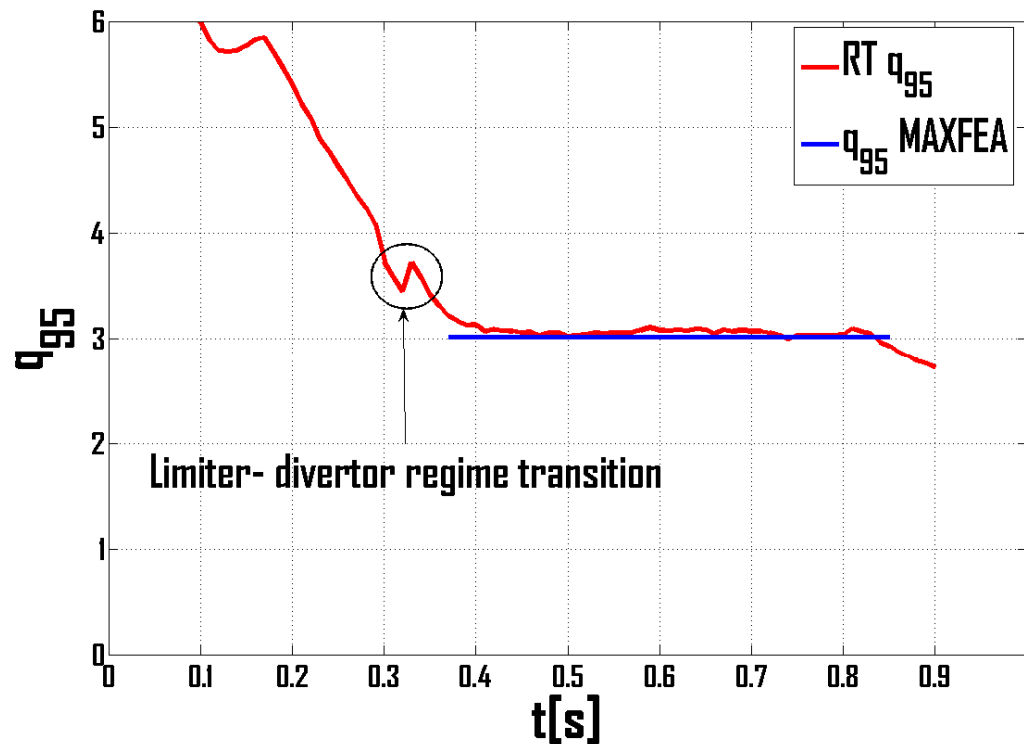


Experimentální potvrzení



IV. Měření q_{95}

- Znalost koeficientu stability na okraji plazmatu nutná pro kontrolu smyčkových nestabilit a magnetických ostrovů
- $q_x = \frac{d\phi_x}{d\psi_x}$ (v tomto případě $x = 95$)



Závěr & cíle

- RT rekonstrukce hranice plazmatu- chyba < 1 cm
- Odhad $\beta_p + I_i/2$ – chyba pod 4 %
- q_{95} měřeno s chybou pod 3 %
- Vše je možno použít pro zpětnovazební kontrolu v reálném čase
- **Blízká budoucnost:**
 - 1) Pokus o dosažení H-modu
 - 2) Kontrola divertorového výboje s $q_{95} < 2$ nejlépe v H-modu

Poděkování

- RFX tým- G. Marchiori, C. Finotti, P. Zanca, L. Marrelli, R. Cavazzana a mnoho dalších
- Za pozvání na zimní školu
- Za pozornost

Závěr & cíle

- RT rekonstrukce hranice plazmatu- chyba < 1 cm
- Odhad $\beta_p + I_i/2$ – chyba pod 4 %
- q_{95} měřeno s chybou pod 3 %
- Vše je možno použít pro zpětnovazební kontrolu v reálném čase
- **Blízká budoucnost:**
 - 1) Pokus o dosažení H-modu
 - 2) Kontrola divertorového výboje s $q_{95} < 2$ nejlépe v H-modu