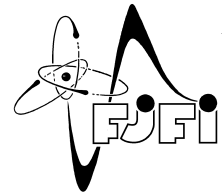


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská



Studium tepelných toků plazmatu na divertor tokamaku COMPASS

Divertor plasma heat flux studies in tokamak COMPASS

Výzkumný úkol

Autor: **Bc. Matyáš Grof**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Vondráček Ph.D.**
Akademický rok: 2018/2019

Poděkování:

Děkuji Ing. Petru Vondračkovi za ochotné, schopné a trpělivé vedení tohoto výzkumného úkolu. Děkuji za veškerou snahu mi vypomoci s teorií, či nalezením chyby v kódu a děkuji za věcné a podnětné konzultace.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon)

V Praze dne 9. září 2019

Bc. Matyáš Grof

Název práce:

Studium tepelných toků plazmatu na divertor tokamaku COMPASS

Autor: Bc. Matyáš Grof

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Druh práce: Výzkumný úkol

Vedoucí práce: Ing. Petr Vondráček Ph.D, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

Abstrakt: Znalost divertorových tepelných toků je podstatná pro budoucí designy divertorů na tokamacích. Pro určení tepelného toku na tokamaku ITER se extrapoluje ze škálování na ostatních tokamacích. Toto škálování pro plazma v H-mode v inter-ELMu bylo rekonstruováno a pro vyšší přesnost měření tepelných toků na tokamaku COMPASS byl nakalibrován místní termografní systém pro různé optické filtry. Změřené λ_q jsou faktorem 3 – 4 menší než vychází ze škálování.

Klíčová slova: COMPASS, divertor, tepelný tok, termografie, tokamak

Title:

Divertor plasma heat flux studies in the tokamak COMPASS

Author: Bc. Matyáš Grof

Abstract: For future divertor designs on tokamaks knowledge is necessary about divertor heat fluxes. Extrapolation from scaling is used for prediction of heat flux on tokamak ITER. That scaling was reproduced in H-mode, inter-ELM. Thermography system was completely recalibrated in order to improve measurement precision on tokamak COMPASS with different optical filters.

Key words: COMPASS, divertor, heat flux, thermography, tokamak

Obsah

1	Kalibrace infrakamery	5
1.1	Teorie	5
1.2	Experimentální provedení	6
1.3	Zahřívání safírového průzoru	6
1.4	Linearita na expoziční době a radianci	6
1.5	Algoritmus a provedení	8
1.6	Výsledky	8
2	Škálování v inter-ELMu	11
2.1	H-mode	11
2.2	Tepelné toky v H-mode	12
2.3	Škálování	15
3	Závěr	20
	Literatura	21

1. Kalibrace infrakamery

Na tokamaku COMPASS je mezi snímanou oblastí (divertorem) a infrakamerou umístěn endoskop a safírový průzor. To způsobuje deformaci a útlum záření z divertoru, které snímá infrakamera. Není vhodné užívat kalibraci infrakamery danou výrobcem právě kvůli této optické cestě. Bylo nutné kompletní kalibraci infrakamery zopakovat.

Kalibrace, které tato kompletní kalibrace měla obsahovat:

- NUC - Non-uniformity correction - korekci neuniformity signálu včetně vinětace
- BPR - Bad pixel replacement - dopočtení hodnot u vadných pixelů z průměru hodnot okolních pixelů
- Tepelná kalibrace - převod digitálních úrovní na radianci resp. teplotu

Čip infrakamery snímá radianci záření o určitých vlnových délkách a převádí ji na digitální úroveň. Každý pixel je mírně odlišně vyroben a je tudíž mírně odlišně citlivý na radianci signálu. Zároveň se do tohoto zapojuje zkreslení vinětací na cestě čočkami v optice termografního systému. Tyto 2 faktory zohledňuje NUC kalibrace.

1.1 Teorie

Pixel na infrakameře snímá radianci o určitém rozmezí vlnových délek a převádí tuto radianci do digitálních úrovní. Tento převod odpovídá vztahu [1]

$$DL = o_1 + o_2 * t_{\text{exp}} + g * L * t_{\text{exp}}, \quad (1.1)$$

kde DL jsou digitální úrovně, t_{exp} je integrační doba, L je radiance dopadající na čip (*in-band radiance*), o_1 , o_2 a g jsou konstanty. Tento vztah je možný následně upravit na tvar

$$L = \frac{\frac{DL - o_1}{t_{\text{exp}}} - o_2}{g}, \quad (1.2)$$

který je vyjádřený pro L , tedy pro zpětné dopočtení radiance z digitálních úrovní. Radiance, která je snímána infrakamerou není pouze radiance z měřeného objektu, ale zároveň je snímána radiance z okolí, odražená od objektu, vyzářená vnitřními komponentami infrakamery, endoskopu a safírovým průzorem. Pro velký rozdíl teplot měřeného objektu a ostatních zdrojů radiance je parazitní radiance zanedbatelná. Se snižujícím se rozdílem těchto teplot se zároveň zvyšuje chyba způsobená parazitní radiancí.

Uvedený vztah platí pouze v omezeném rozsahu digitálních úrovní daném konstrukcí infrakamery. Infrakamera má danou maximální hodnotu digitální úrovně nad kterou jsou snímky, či jen

jednotlivé pixely, saturevané. V praxi se saturace řeší snížením hodnoty expoziční doby, či optickými filtry. Pro příliš nízké hodnoty digitálních úrovní tento vztah také nefunguje správně vlivem chyby způsobené parazitní radiancí.

1.2 Experimentální provedení

Experimentální uspořádání bylo složeno z infrakamery, endoskopu, safírového průzoru a homogenně zahřátého kalibračního tělesa se zářením blízkým absolutně černému tělesu. Homogenně zahřáté těleso bylo zahřáté na známou teplotu, záření z něj bylo snímáno infrakamerou přes endoskop a safírový průzor. Vzdálenosti mezi jednotlivými objekty byly nastaveny, aby uspořádání bylo co nejpodobnější uspořádání v tokamaku, kde je místo homogenně zahřátého tělesa divertorová deska. Endoskop byl napojen na infrakameru a zároveň napojen na safírový průzor. Vzdálenost homogenně zahřátého tělesa a safírového průzoru byla 20 cm.

S tímto uspořádáním bylo homogenní těleso zahřáto na určitou teplotu a poté byly vyfoceny snímky s expozičními dobami: $1 \mu\text{s}$, $3 \mu\text{s}$, $5 \mu\text{s}$, $10 \mu\text{s}$, $20 \mu\text{s}$, $30 \mu\text{s}$, $50 \mu\text{s}$, $80 \mu\text{s}$, $100 \mu\text{s}$, $150 \mu\text{s}$, $200 \mu\text{s}$, $300 \mu\text{s}$, $400 \mu\text{s}$. Teploty, na které bylo homogenně zahřáté těleso zahřáto, byly: 30°C , 40°C , 50°C , 60°C , 70°C , 85°C , 100°C , 125°C , 150°C , 175°C , 200°C , 225°C , 250°C , 275°C , 300°C , 350°C , 400°C , 450°C , 500°C , 550°C , 600°C . Měření bylo následně opakováno s 3 různými optickými filtry dodanými s infrakamerou - ND 1.45, ND 2.0 a ND 3.0.

1.3 Zahřívání safírového průzoru

Jeden z kritických bodů této kalibrace je safírový průzor, který je pokryt antireflexní vrstvou pro vlnové délky snímávané infrakamerou. To zabraňuje odrazům záření a snižuje útlum radiance na průzoru, ale při zahřátí má schopnost tento průzor vyzařovat velké množství radiance, což zvyšuje chybu kalibrace.

Naneštěstí při experimentech v tokamaku se safírový průzor mírně zahřívá, což má vliv na určení teploty divertorové desky. Teplotu safírového průzoru není možné přímo snímat a tudíž nelze numericky kompenzovat vliv záření safírového průzoru. Chybu tímto způsobenou není možné kompenzovat, či rozšířit kalibraci o vliv teploty safírového průzoru.

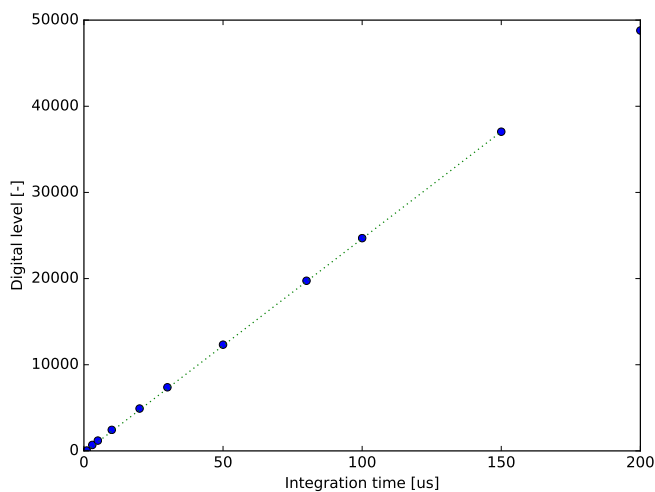
1.4 Linearita na expoziční době a radianci

Platnost vztahu (1.1) byla ověřována ověřením lineární závislosti na integrační době a na radianci.

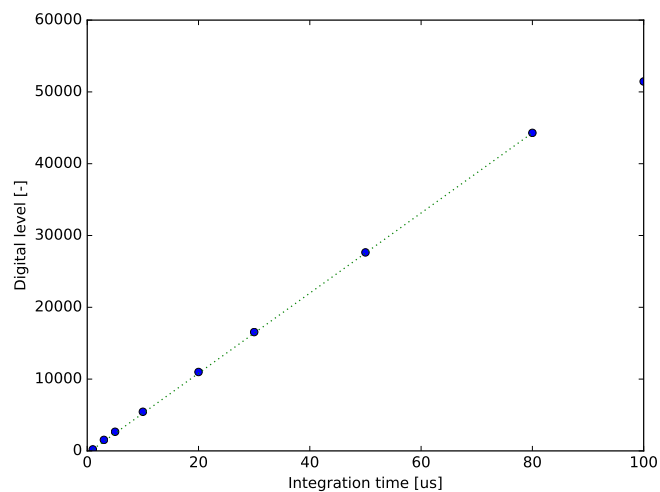
Pro homogenně zahřáté těleso na 85°C je vyobrazena závislost digitální úrovně na integrační době proložená lineární funkcí na Obr. 1.1. Bod s nejvyšší hodnotou integrační doby byl z proložení a následných dalších výpočtů vyjmut, protože se jedná o přesaturovaný snímek. Tedy snímek s nastavením nad hranicí rozsahu digitálních úrovní infrakamery, kdy již hodnoty nejsou validní.

Na Obr. 1.2 je vyobrazena závislost digitálních úrovní na integrační době proložená lineární funkcí pro homogenně zahřáté těleso na 125°C . Poslední přesaturovaný bod byl opět vyjmut z proložení a je zde pozorovatelnější odchylka od linearity.

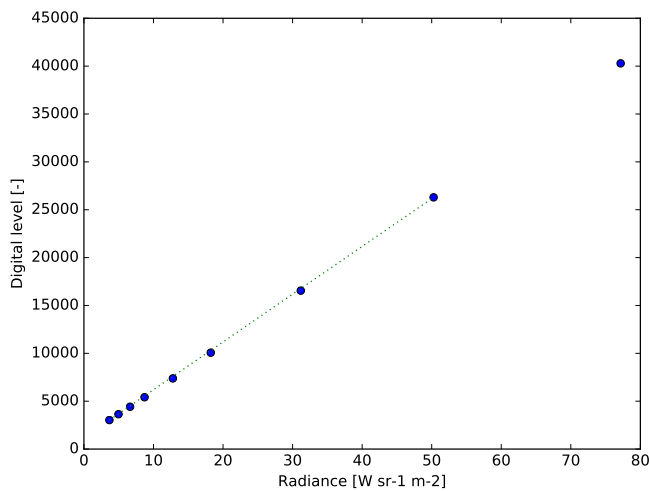
Obr. 1.3 resp. Obr. 1.4 vyobrazují závislost digitálních úrovní na radianci homogenně zahřátého tělesa pro integrační doby $30 \mu\text{s}$ resp. $80 \mu\text{s}$. Teploty, kterých dosahovalo homogenně zahřáté těleso, byly: $30, 40, 50, 60, 70, 85, 100, 125$ a 150°C resp. $30, 40, 50, 60, 70, 85, 100$ a 125°C .



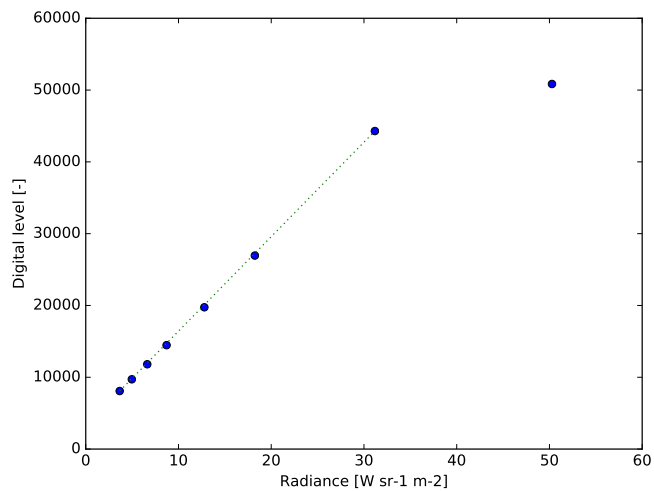
Obrázek 1.1: Závislost naměřené hodnoty digitálních úrovní na integrační době pro homogenně zahřáté těleso na 85 °C.



Obrázek 1.2: Závislost naměřené hodnoty digitálních úrovní na integrační době pro homogenně zahřáté těleso na 125 °C.



Obrázek 1.3: Závislost naměřené hodnoty digitálních úrovní radianci homogenně zahřátého tělesa pro integrační dobu 30 μs.



Obrázek 1.4: Závislost naměřené hodnoty digitálních úrovní radianci homogenně zahřátého tělesa pro integrační dobu 80 μs.

Opět byly vyjmuty z ověření lineární závislosti snímky s nejvyšší radiancí, které již dosahovaly přesaturovaných hodnot.

Lineární závislost na radianci signálu a lineární závislost na expoziční době byly potvrzeny, což podporuje platnost vztahu (1.1).

1.5 Algoritmus a provedení

Kalibrace samotná probíhá dopočítáváním radiance z digitální úrovně rovnicí 1.2. Radiance se následně přepočítává na teplotu. Pro provedení tohoto dopočítávání je nutné znát parametry σ_1 , σ_2 a g . Ty byly získány fitováním rovnice 1.1 nad kalibračními daty.

Pro využití rovnice 1.1 ke kalibraci infrakamery je nutné získat hodnoty uvedených konstant společně s jejich nepřesnostmi. To bylo provedením fitu uvedeného vztahu pro každý pixel jednotlivě zvlášť. NUC je tímto také zajištěno. Je to potvrzeno i mírnou odlišností parametrů fitu pro jednotlivé pixely.

Postup algoritmu je následující:

1. Převod dat z digitálních úrovní do radiance pixel po pixelu
2. Převod z radiance do teploty - look-up tabulkou sestavenou pomocí Planckova zákona váženého podle propustnosti systému a senzitivity detektoru pro dané vlnové délky
3. Provedení BPR

Tímto získaná data již v teplotách se dále zpracovávají a dopočítávají se z nich tepelné toky na divertor.

1.6 Výsledky

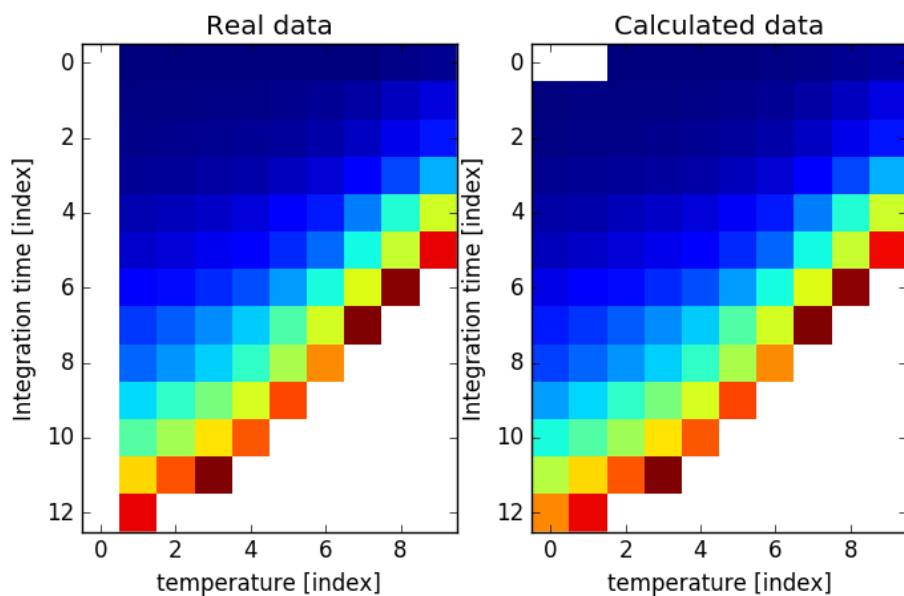
Zobrazení digitálních úrovní pro porovnání naměřených hodnot a dopočtených kalibrací jsou vyobrazeny na Obr. 1.5.

Správnost kalibrace byla ověřována na referenčních snímcích homogenní teploty, které byly z digitálních úrovní převedeny zmíněnou kalibrací do teploty. Chyba kalibrace byla určována více způsoby. Byla určena směrodatná odchylka od reálné teploty tělesa, relativní chyba určení teploty tělesa a byla dopočtena chyba jako chyba nepřímého měření.

	FW1	FW2	FW3	FW4
Teplota měřeného tělesa [°C]	100.0	200	500	500
Naměřená teplota (průměr) [°C]	99.9	200.3	500	502
Směrodatná odchylka [°C]	0.1	0.4	0.3	1.3
Relativní chyba [%]	0.10	0.20	0.06	0.26
Dopočtená chyba [°C]	0.11	0.35	1.9	2.9

Tabulka 1.1: Naměřená a referenční data a spočtené chyby kalibrace. FW1 je nastavení bez optického filtru, FW2, FW3 a FW4 jsou s optickými filtry.

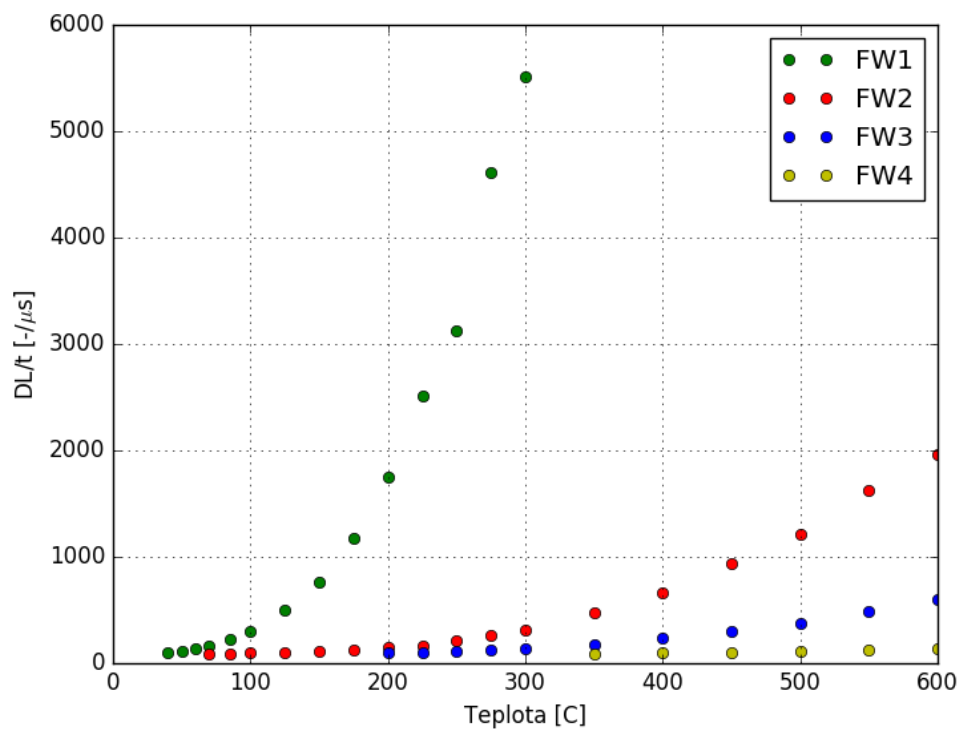
Problémem kalibrace jsou vibrace infrakamery a endoskopu v průběhu experimentu, které způsobují malé posuvy optické soustavy endoskopu vůči infrakameře a posun se může pohybovat až v



Obrázek 1.5: Skutečné hodnoty digitálních úrovní (vlevo) pro veškerá kalibrační data pro pixel ve středu zorného pole. Dopočtené hodnoty digitálních úrovní (vpravo) pro veškerá nastavení kalibračních dat pro pixel ve středu zorného pole.

řádu jednotek pixelů. To znesnadňuje NUC kalibraci, jelikož započítává i chyby v optické soustavě (př. vícenásobné odrazy signálu). Tudíž je možné, že nastane stav, kdy 2 sousední pixely, kde signál jednoho se optickou soustavou utlumuje více než druhého, se vůči optické soustavě posunou a určená hodnota pixelu se liší od reálných dat. Tomuto jevu není možné zabránit.

Kalibrační graf pro nastavení infrakamery je vyobrazen na obr. 1.6. Jedná se o přehledový graf infrakamery a digitálních úrovní pro jednotlivé expoziční doby a teploty měřeného tělesa.



Obrázek 1.6: Závislost digitálních úrovní dělených expoziční dobou na teplotě měřeného tělesa pro fúzné optické filtry infrakamery.

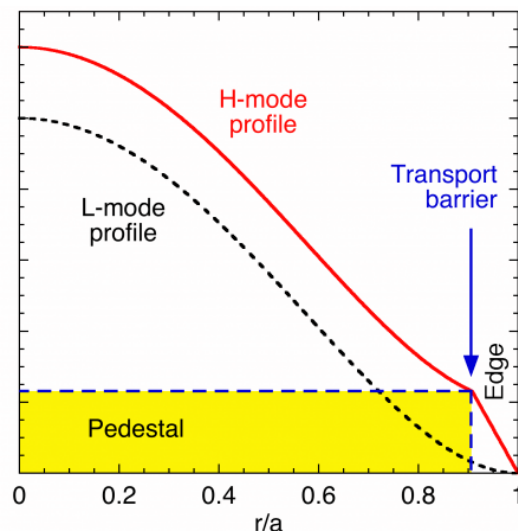
2. Škálování v inter-ELMu

Jeden z parametrů tepelného toku, *power decay length* je kritický pro odhad zátěže vnitřní stěny a divertoru tokamaku. Určení tohoto parametru je možné termografickým měřením tepelných toků na divertoru.

2.1 H-mode

H-mode, neboli *high confinement mode* je stav plazmatu v tokamaku. Poprvé byl dosažen roku 1982 na tokamaku ASDEX v Německu při experimentech s ohřevem neutrálními svazky. Doba udržení energie plazmatu se během okamžiku výrazně změnil, jelikož nastal přechod plazmatu z L-modu do H-modu. Pojem H-mode vznikl až později, jelikož tento přechod nebyl očekáván a byl objeven náhodou.

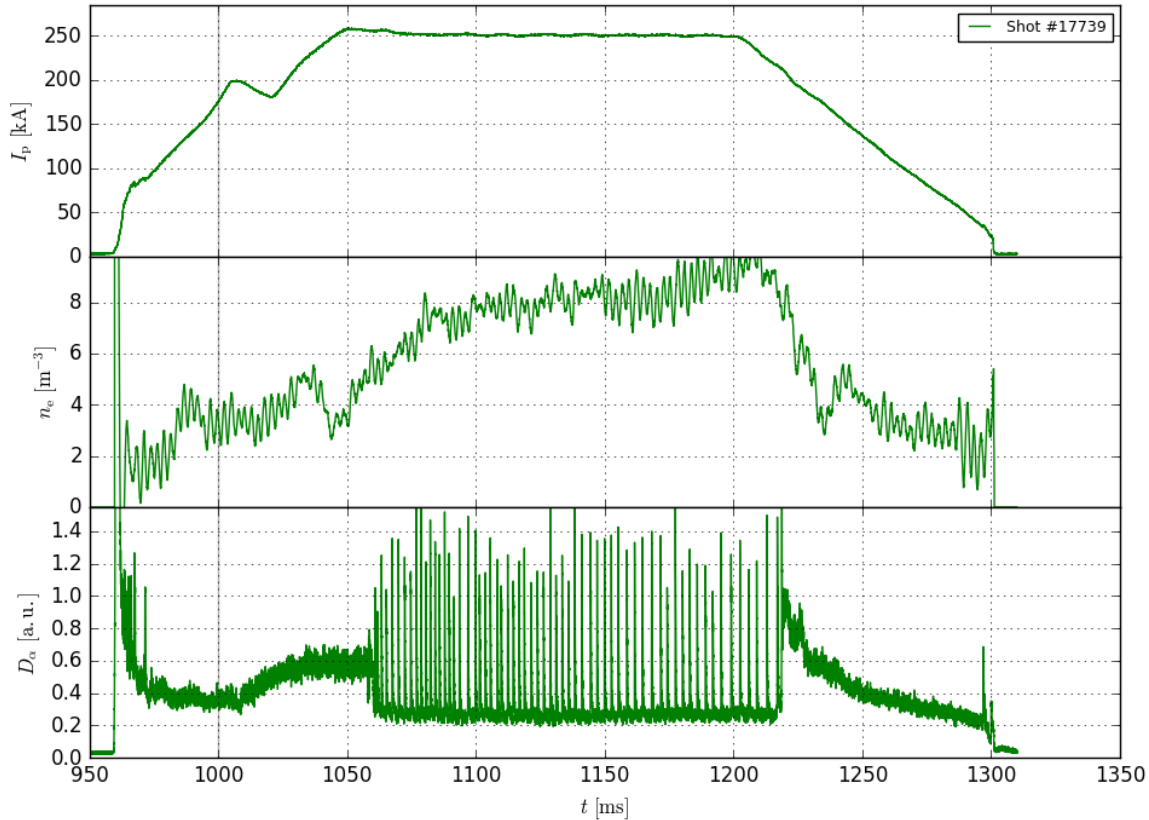
H-mode vzniká v magneticky udrženém plazmatu dostatečných energií a s dostatečným ohřevem. Vzniká přechodem z L-modu, kdy vznikne tzv. pedestal a změní se doba udržení plazmatu na přibližně dvojnásobek. Porovnání profilu plazmatu v H-modu a L-modu je vyobrazeno na obr. 2.1. Pedestal je stupeň, který má H-modové plazma a který utváří odlišnější okrajovou charakteristiku profilu. Celý profil plazmatu se v H-mode přes pedestal zvýší a okrajový profil není následně pozvolný jako v případě L-modu.



Obrázek 2.1: Vyobrazení profilu v L-modu a H-modu se zvýrazněným pedestalem *Převzato z [8]*

H-mode je doprovázen tzv. ELMy. Celým názvem jsou *edge localized modes*. Jedná se o nestability okrajového plazmatu způsobující interakci plazmatu s vnitřní stěnou. Zhrouť se část

okrajového plazmatu a způsobí výtrysk energických částic na vnitřní stěnu a divertor. Tento výtrysk bývá doprovázen peakem v D_α čáře. Tepelný tok při ELMu výrazně naroste a to na hodnoty v řádu 100 MW/m^2 pro krátký časový interval v řádu $0,5 \text{ ms}$. Inter-ELM je doba v H-modu mezi dvěma ELMy.



Obrázek 2.2: Proud v plazmatu, elektronová hustota plazmatu a D_α intenzita vyzařování plazmaru na vlnové délce Dalpha čáry v závislosti na čase pro shot 17739.

Příklad dat z H-modového plazmatu je vyobrazen na obr. 2.2, kde je vyobrazen proud v plazmatu $[I_p]$, elektronová hustota plazmatu $[n_e]$ a D_α čára v závislosti na čase. Lze si zde povšimnout nárustu hustoty plazmatu a poklesu D_α čáry doprovázené krátkými peaky při přechodu do H-modu. Peaky v D_α čáře indikují jednotlivé ELMy.

2.2 Tepelné toky v H-mode

Unikající částice z plazmatu jsou magnetickými poli nasměrovávány na divertor tokamaku. Zde tyto částice předávají svou energii divertoru. Pro minimalizaci tepelné zátěže divertorových desek částice nalétávají pod malým úhlem, čímž se tepelný tok rozloží. Je nutné rozlišovat kolmý a rovnoběžný tepelný tok.

Kolmý tepelný tok je definován jako tok dopadající kolmo na divertorovou desku. Rovnoběžný tepelný tok je definován jako tepelný tok rovnoběžný se směrem magnetických siločar. Rovnoběžný tepelný tok lze určit jako

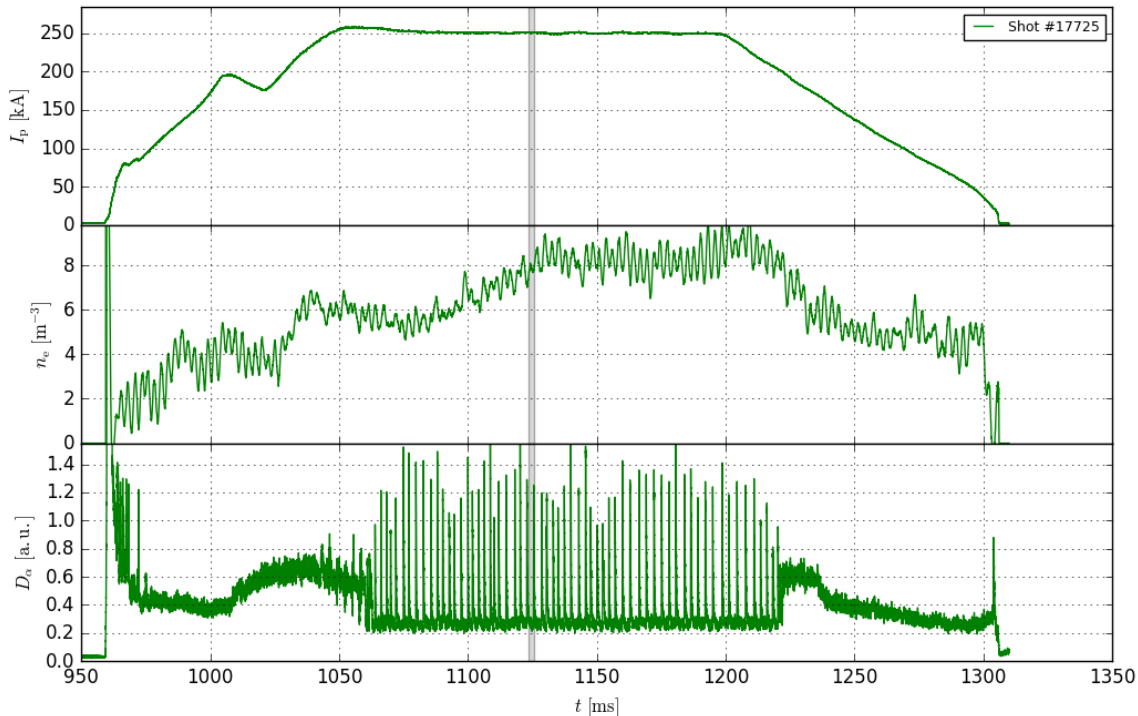
$$q_{\parallel} = \frac{q_{\perp}}{\sin \alpha}, \quad (2.1)$$

kde q_{\parallel} je rovnoběžný tepelný tok, q_{\perp} je kolmý tepelný tok a α je úhel nalétávajících částic. Tento vztah ovšem platí při zanedbání tepelného toku z pozadí, jinak je

$$q_{\perp} = q_{\parallel} \sin(\alpha) + q_{\text{BG}}, \quad (2.2)$$

kde q_{BG} je pozadový tepelný tok. Infrakamera měří vývoj teploty divertoru, což se následně přepočítává na kolmý tepelný tok. To je tepelný tok dopadající na divertorovou desku. Tento tepelný tok je nutné pro následné srovnání se sondami a z důvodu konvence přepočíst na paralelní tepelný tok. Paralelní tepelný tok na divertorovou desku se podél magnetických siločar přemapovává na *outer midplane tokamaku*.

Na Obr. 2.3 je vyobrazen proud plazmatem, hustota plazmatu a D_{α} čára v závislosti na čase pro shot 17725 se zvýrazněnou oblastí, kdy byl analyzován tepelný tok v inter-ELMu. Jedná se o časový interval 1123.5 – 1125.5 ms.

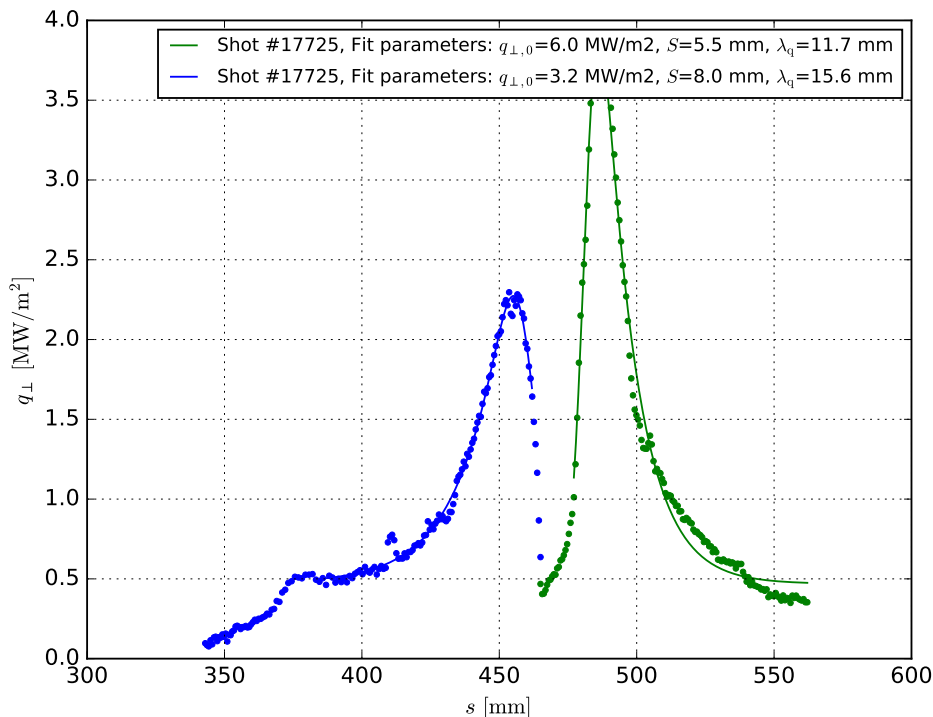


Obrázek 2.3: Proud v plazmatu, hustota plazmatu a D_{α} čára v závislosti na čase pro shot 17725. Zvýrazněn časový interval 1123.5 – 1125.5 ms, v kterém byl určován a analyzován tepelný tok na divertor.

Profil tepelného toku v tomto časovém intervalu je vyobrazen na Obr. 2.4. Lze si povšimnout odlišných profilů na vnitřní a vnější straně divertorové desky. Na vnitřní stranu působil tepelný tok o hodnotě $q_{\perp} = 3.2 \text{ MW/m}^2$ a na vnější stranu $q_{\perp} = 6.0 \text{ MW/m}^2$. Profil tepelného toku kopíruje tzv. Eichovu funkci, která je konvolucí gaussovy křivky a klesající exponenciální funkce. Přepisem

$$q(s) = \frac{q_0}{2} \left[\left(\frac{S}{2\lambda_q} \right)^2 - \frac{\bar{s}}{\lambda_q} \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{S}{2\lambda_q} - \frac{\bar{s}}{S} \right), \quad (2.3)$$

kde q_0 je hodnota tepelného toku, S je šíře Gaussovy křivky, $\bar{s} = s - s_0$, kde s_0 je poloha separatrix a s je prostorová souřadnice, λ_q je *power decay length*, neboli vzdálenost za kterou klesne tepelný tok na $\frac{1}{e}$ hodnoty. Po přemapování tepelného toku na *outer midplane* je nutné provést fitování znova, protože se změní všechny hodnoty z divertoru.



Obrázek 2.4: Kolmý tepelný tok na divertor pro shot 17725 v inter-ELMu pro časový interval 1123.5 – 1125.5 ms.

Tepelný tok se přemapovává na *outer midplane* podél magnetických silokřivek. Nejprve se přepočte kolmý tepelný tok na paralelní tepelný tok vztahem 2.1, následně platí vztah

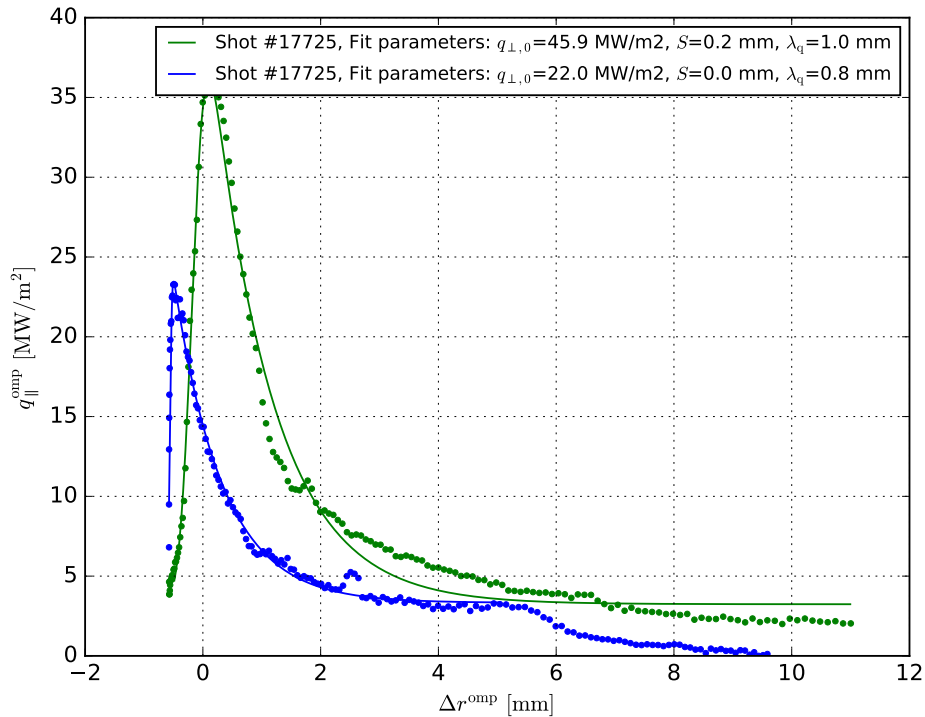
$$\frac{\Delta s(\theta)}{\Delta s(0)} = \frac{B_\theta(0)R(0)}{B_\theta(\theta)R(\theta)} = \frac{\lambda(\theta)}{\lambda(0)}, \quad (2.4)$$

kde B_θ je poloidální magnetická indukce, R je vzdálenost od hlavní osy tokamaku, Δs je vzdálenost dvou silokřivek poloidálního magnetického pole a λ je *power decay length*. Dále platí vztah

$$\frac{q_{\parallel}(\theta)}{q_{\parallel}(0)} = \frac{B(\theta)}{B(0)} \approx \frac{B_\phi(\theta)}{B_\phi(0)} = \frac{R(0)}{R(\theta)}, \quad (2.5)$$

kde q_{\parallel} je rovnoběžný tepelný tok, B je magnetická indukce a B_ϕ je toroidální magnetická indukce. Tepelný tok po přemapování na *outer midplane* je vyobrazen na obr. 2.5. Hodnoty se oproti tepelnému toku na divertoru v divertorových souřadnicích změnily. Tepelný tok byl určen jako $q_{\perp} = 45.9 \text{ MW/m}^2$ pro vnější divertorovou desku a $q_{\perp} = 22.0 \text{ MW/m}^2$ a pro vnitřní divertorovou

desku. *Power decay length* se změnil na hodnoty $\lambda_q = 1.0$ mm pro vnější divertorovou desku a $\lambda_q = 0.8$ mm pro vnitřní divertorovou desku.



Obrázek 2.5: Rovnoběžný tepelný tok přemapovaný na outermidplane v inter-ELMu pro shot 17725 a časový interval 1123.5 – 1125.5 ms.

Důležitým parametrem pro tepelné toky na divertor je tkz. *integral power width*, která je vztahem

$$\lambda_{int} = \frac{\int (q_{\perp}(s) - q_{BG}) ds}{q_{\perp,max} - q_{BG}}, \quad (2.6)$$

kde q_{BG} je tepelný tok z pozadí, $q_{\perp,max}$ je hodnota tepelného toku v maximu. Mezi *integral power width* a *power decay length* platí přibližný vztah

$$\lambda_{int} = \lambda_q + 1.64S, \quad (2.7)$$

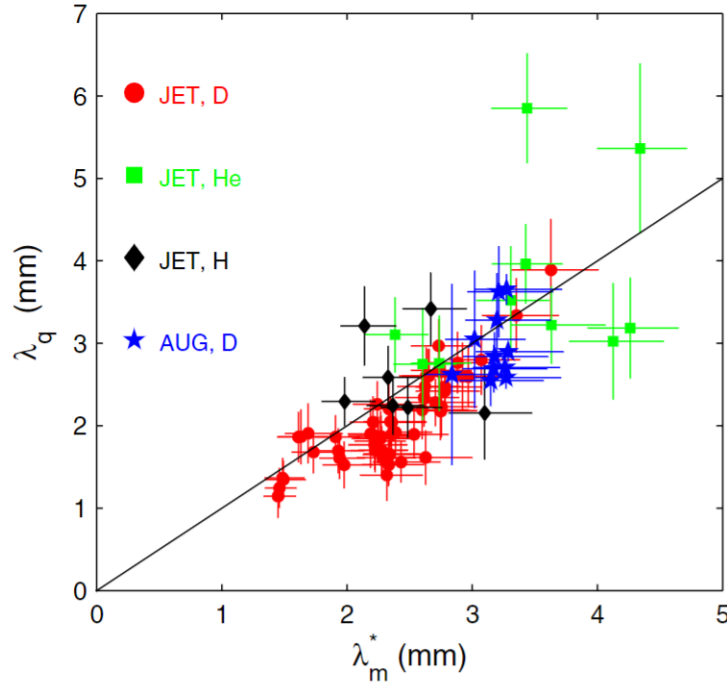
kde S je směrodatná odchylka gaussovy křivky.

2.3 Škálování

Experimentální měření *power decay length* v Inter-ELMu z tokamaků JET a ASDEX Upgrade byly použity pro určení empirického vztahu na základních datech z experimentu k spočtení *power decay length* v [2].

Tento empirický vztah je

$$\lambda_c = 0.73 B_T^{-0.78} q_{cyl}^{1.20} P_{SOL}^{0.10} R_{geo}^{0.02}, \quad (2.8)$$



Obrázek 2.6: Škálování λ_q pro tokamaky ASDEX Upgrade a JET, závislost naměřené a spočtené λ_q . Zde je v původním textu značeno λ_c jako λ_m . Převzato z [2].

kde B_T je magnetické pole v toroidálním směru, q_{cyl} je cylindrický *safety factor*, P_{SOL} je výkon procházející přes separatrix a R_{geo} je hlavní geometrický poloměr. [2] A platí vztah

$$q_{cyl} = \frac{2\pi a \epsilon B_T (1 + \kappa^2)}{\mu_0 I_p} \frac{1}{2}, \quad (2.9)$$

kde a je malý poloměr tokamaku, ϵ je *inverse aspect ratio*, κ je elongace plazmatu, μ_0 je permeabilita vakua a I_p je proud plazmatem. [2] Výsledky tohoto škálování z [2] jsou vyobrazeny na obr. 2.6. Hodnoty parametrů shotů zpracovaných v tomto škálování jsou vyobrazeny v tab. 2.1.

	I_p [MA]	B_t [T]	q_{95}	P_h [MW]
JET	1.0-3.5	1.1-3.2	2.6-5.5	5-24
AUG	0.8-1.2	1.5-2.4	2.6-5.1	2.5-12.5

Tabulka 2.1: Hodnoty parametrů zpracovaných shotů v [2].

Extrapolací parametrů lze dopočítat *power decay length* pro tokamak ITER. Kde předpokládaná data jsou $B_t = 5.3$ T, $I_p = 15$ MA, $P_{SOL} = 120$ MW, $R = 6.2$ m, $a = 2.0$ m, $\kappa = 1.7$. Následně dopočtem $\lambda_q \approx 1$ mm.

Na tokamaku COMPASS pro 23 H-modových shotů v Inter-ELMu bylo určeno *power decay length* na *outer midplane*. Jsou to shoty 17739, 17738, 17736, 17731, 17730, 17729, 17726, 17725, 17724, 17723, 17722, 17721, 17364, 17360, 17359, 17357, 17343, 17288, 17286, 17283, 17280, 17278. Parametry a data se tokamak COMPASS pohybuje na opačné straně extrapolace škálování, jelikož

je menší a méně výkonný než tokamak JET a tokamak ASDEX Upgrade. Parametry jsou $B_t = 0.9 - 2.1$ T, $I_p = 0.2 - 0.4$ MA, $P_{SO L} = 0.09 - 0.37$ MW, $R = 0.56$ m, $a = 0.15 - 0.23$ m, $\kappa = 1.8$.

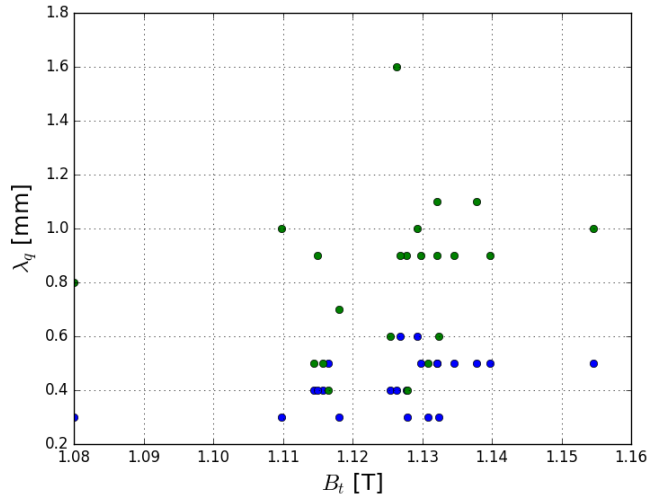
Na Obr. 2.7 je vyobrazena závislost naměřené λ_q na B_t pro měřený inter-ELM interval. Na Obr. 2.8 je vyobrazena závislost naměřené λ_q na q_{95} pro měřený inter-ELM interval. Na Obr. 2.9 je vyobrazena závislost naměřené λ_q na $P_{SO L}$ pro měřený inter-ELM interval. Na Obr. 2.10 je vyobrazena závislost naměřené λ_q na I_p pro měřený inter-ELM interval.

Výsledná data ze škálování při použití dat pouze z vnitřní divertorové desky jsou vyobrazeny na obr. 2.11. Naměřené λ_q se pro výše uvedené shoty v inter-ELMu pohybují v rozmezí $\lambda_q = 0.3 - 0.6$ mm a λ_c spočtené škálováním 2.8 ([2]) se pohybuje v rozmezí $\lambda_c = 1.1 - 1.9$ mm. Pro data z vnitřní divertorové desky je nejvyšší hodnota absolutní chyby 1.8 mm a relativní chyby 470 %. Průměrná hodnota absolutní chyby je 1.2 mm a průměrná hodnota relativní chyby je 320 %.

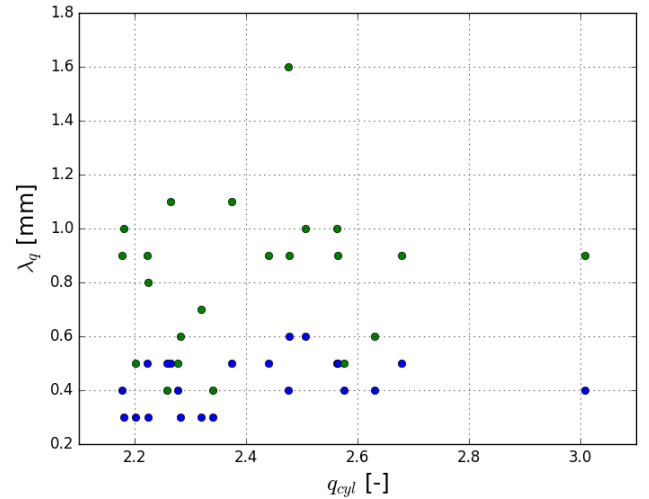
Výsledná data ze škálování při použití dat pouze z vnější divertorové desky jsou vyobrazeny na obr. 2.12. Naměřené λ_q se pro výše uvedené shoty v inter-ELMu pohybují v rozmezí $\lambda_q = 0.4 - 1.6$ mm a λ_c spočtené škálováním 2.8 ([2]) se pohybuje v rozmezí $\lambda_c = 1.1 - 1.9$ mm. Spočtené λ_c pro data z vnější divertorovou desku je identické s spočteným λ_c pro data z vnitřní divertorové desky. Pro data z vnitřní divertorové desky je nejvyšší hodnota absolutní chyby 1.4 mm a relativní chyby 330 %. Průměrná hodnota absolutní chyby je 0.9 mm a průměrná hodnota relativní chyby je 140 %.

Naměřená *power decay length* vychází menší než-li spočtená škálováním. To je v souladu s jinými měřeními na tokamaku COMPASS, kdy vychází λ_q menší než-li je předpokládáno, či dopočítáváno škálováními z větších tokamaků. Tento aspekt tokamaku COMPASS má několik možných vysvětlení. Je možné, že je chyba v magnetické rekonstrukci, kdy se *flux expansion* nadhodnocuje a následně profil tepelného toku se zúží při přemapování na *outer mid-plane*. Jiným možným vysvětlením jsou drifts částic deformující profil tepelného toku.

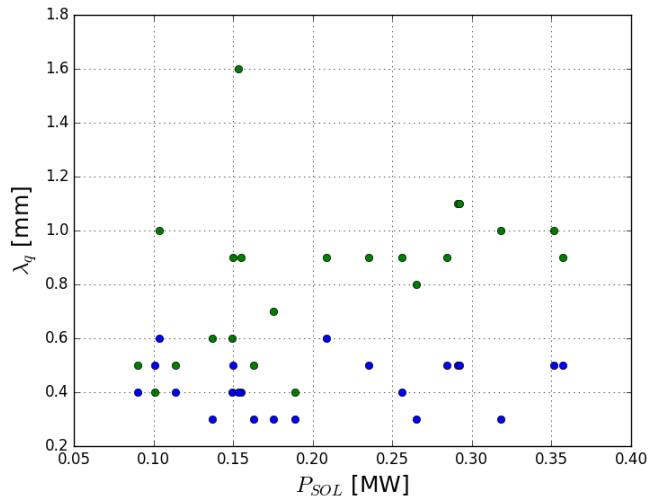
Ověření vztahu 2.7 u použitých vztahů je vyobrazeno na obr. 2.13 pro vnitřní divertorovou desku a 2.14 pro vnější divertorovou desku. Vzhledem k přibližnosti vztahu a chybě v měření si hodnoty odpovídají s výjimkou 3 hodnot z vnější divertorové desky, kde vztahem 2.7 dopočtená hodnota vyšla mírně vyšší než-li naměřená *integral power width*. [17]



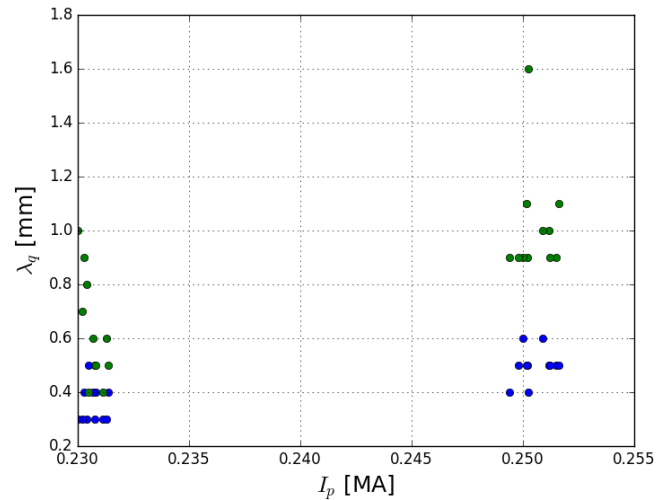
Obrázek 2.7: Závislost naměřené λ_q (červená - vnitřní divertorová deska, modra - vnější) na B_t .



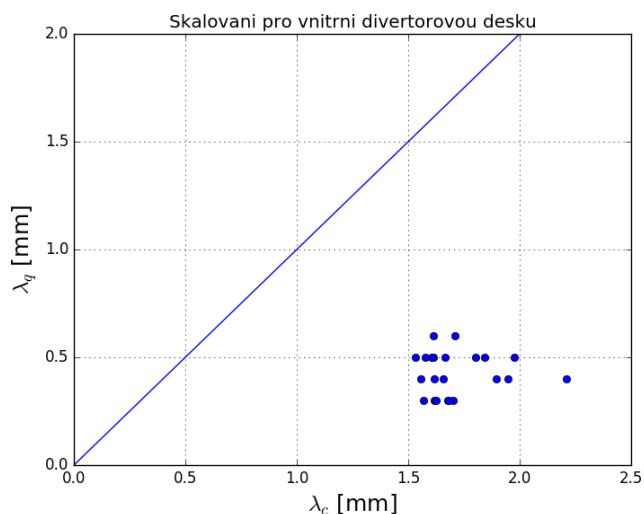
Obrázek 2.8: Závislost naměřené λ_q (červená - vnitřní divertorová deska, modra - vnější) na q_{cyl} .



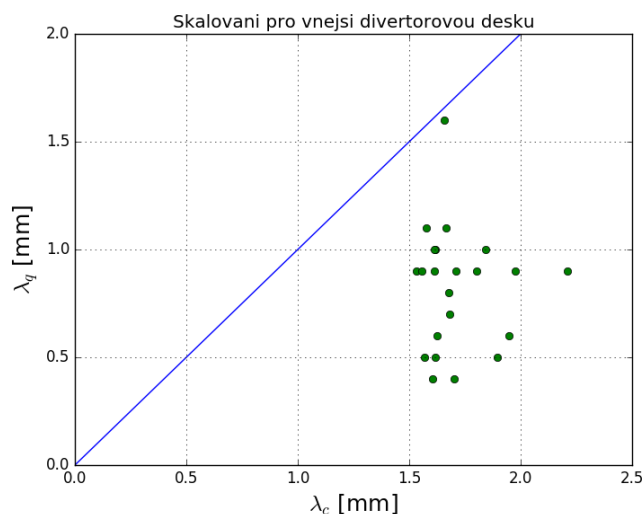
Obrázek 2.9: Závislost naměřené λ_q (červená - vnitřní divertorová deska, modra - vnější) na P_{SOL} .



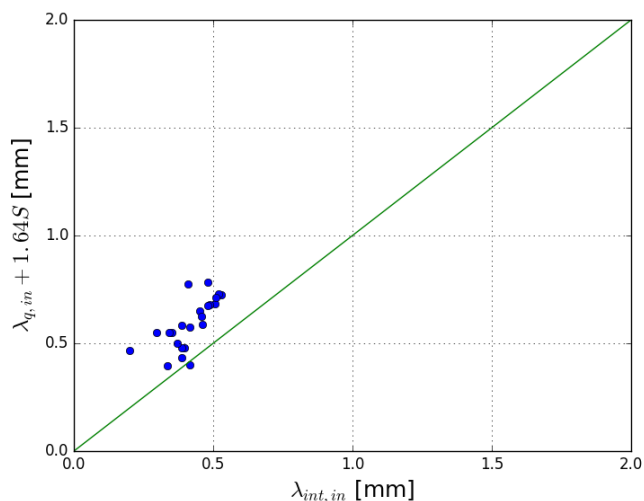
Obrázek 2.10: Závislost naměřené λ_q (červená - vnitřní divertorová deska, modra - vnější) na I_p .



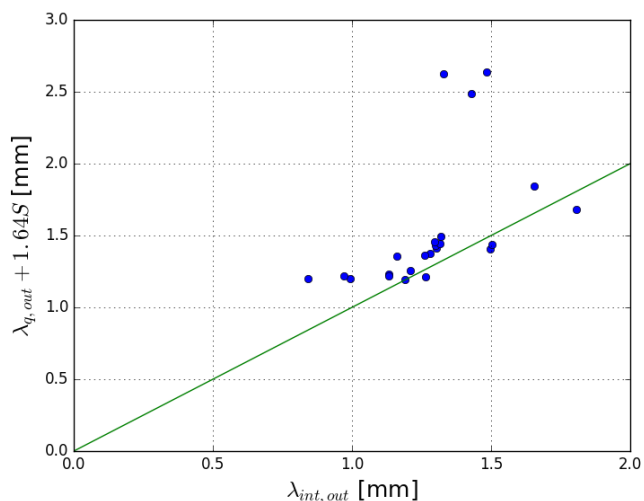
Obrázek 2.11: Závislost naměřené λ_q na spočtené pro vnitřní diverotorovou oblast při použití škálování 2.8 z [2].



Obrázek 2.12: Závislost naměřené λ_q na spočtené pro vnější divertorovou oblast při použití škálování 2.8 z [2].



Obrázek 2.13: Zavislost spočtené na naměřené *integral power width* pro data z vnitřní divertorové desky



Obrázek 2.14: Zavislost spočtené na naměřené *integral power width* pro data z vnější divertorové desky

3. Závěr

Byla provedena kalibrace termografního systému tokamaku COMPASS. Převod digitálních úrovní na teplotu měřeného objektu pro infrakameru s optickými filtry i bez optických filtrů byl sestaven s relativní chybou v určení teploty o nejvyšší hodnotě 0.26 %. Nepřesnosti kalibrace jsou vyobrazeny v tab. 1.1.

Bylo provedeno škálování *power decay length* v inter-ELMu na tokamaku COMPASS pro 23 H-modových shotů. Výsledné škálování pro data z vnitřní divertorové desky je vyobrazeno na obr. 2.11 a pro data z vnější divertorové desky je vyobrazeno na obr. 2.12. Naměřené *power decay lengths* vychází menší (faktorem 3 – 4) než-li určená škálováním, což je v souladu s ostatními měřeními na tokamaku COMPASS v inter-ELMu.

Naměřené experimentální profily tepelného toku bylo možné dobře popsat Eichovou funkcí (2.8)

Byl ověřován vztah 2.7 na inter-ELM datech použitých pro škálování. Výsledné porovnání naměřené a spočtené *integral power width* je vyobrazeno na obr. 2.13 pro data z vnitřní divertorové desky a na obr. 2.14 pro data z vnější divertorové desky.

Literatura

- [1] Ta prezentace popisující závislost DL na radianci
- [2] T. Eich, B. Siglin, A. Scarabosio, W. Fundamenski, R. J. Goldson, A. Herrmann, ASDEX Upgrade Team, Inter-ELM Power Decay Length for JET and ASDEX Upgrade: Measurement and Comparison with Heuristic Drift-Based Model, 2011, Physical review letters, 10.1103/PhysRevLett. 107.215001
- [3] T. Eich, B. Sieglin, A. Scarabosio, A. Herrmann, A. Kallenbach, G. F. Matthews, S. Jachmich, S. Brezinsek, M. Rack, R. J. Goldston, ASDEX Upgrade team, JET-EFDA contributors, Empirical scaling of inter-ELM power widths in ASDEX Upgrade and JET, 2013, Journal of Nuclear Materials 438 (2013) S72-S77
- [4] T. Eich, A. W. Leonard, R. A. Pitts, W. Fundamenski, R. J. Goldson, T. K. Gray, A. Herrmann, A. Kirk, A. Kallenbach, O. Kardaun, A. S. Kukushkin, B. LaBombard, R. Maingi, M. A. Makowski, A. Scarabosio, B. Sieglin, J. Terry, A. Thornton, ASDEX Upgrade team, JET EFDA Contributors, Scaling of the tokamak near the scrape-off layer H-mode power width and implications for ITER, Nuclear fusion, 10.1088/0029-5515/53/9/093031
- [5] Matyáš Grof, Bakalářská práce, Studium tepelných toků plazmatu na vnitřní stěnu tokamaku COMPASS, 2018
- [6] Y. Corre, J.-L. Gardarein, R. Dejarnac, J. Gaspar, J. P. Gunn, M.-H. Aumeunier, X. Courtois, M. Missirlian, F. Rigollet, Methodology for heat flux investigation on leading edges using infrared thermography, Nuclear Fusion, 2017, 10.1088/0029-5515/57/1/016009
- [7] Telops, HypIR Software Suite User's Guide, September 2015 rev 1.1.2
- [8] <http://fusionwiki.ciemat.es/wiki/Pedestal>
- [9] <http://fusionwiki.ciemat.es/wiki/H-mode>
- [10] <https://www.iter.org/newsline/86/659>
- [11] B. Sieglin et al., Progress in extrapolating divertor heat fluxes towards large fusion devices, Physics Scripta, 2017, 014071
- [12] T. Eich et al., ELM divertor peak energy fluence scaling to ITER with data from JET, MAST and ASDEX Upgrade, Nuclear Materials and Energy, 2352-1791
- [13] A. Loarte, S. Bosch, A. Chankin, S. Clement, A. Herrmann, D. Hill, K. Itami, J. Lingertat, B. Lipschultz, K. McCormick, R. Monk, G. D. Porter, M. Shimada, M. Sugihara, Multi-machine scaling of the divertor peak heat flux and width for L-mode and H-mode discharges, Journal of Nuclear Materials 266-269 (1999) 587-592

- [14] P. Vondráček, Doctoral Thesis, Plasma Heat Flux to Solid Structures in Tokamaks, 2019
- [15] C. G. Silva, S. J. Fielding, K. B. Axon, M. G. Booth, ELMs and asymmetries at the COMPASS-D boundary, 0741-3335/98/061159-12S19.50
- [16] Carlos Alberto Nogueira Garcia da Silva, Doctoral Thesis, Divertor physics studies on COMPASS-D, 2000
- [17] Camille Baudoin, Patrick Tamain, Hugo Bufferand, Guido Ciraolo, Nicolas Fedorczak, Davide Galassi, Alberto Gallo, Philippe Ghendrih, Nicolas Nace, Drift driven cross-field transport and scrape-off layer width in the limit of low anomalous transport, Plasma Phys. Control. Fusion 60 (2018) 105007, 0741-3335/18/105007+13\$33.00