



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

TOMOGRAFIE VIDITELNÉHO ZÁŘENÍ NA TOKAMAKU GOLEM

Mariánská 2023

Bc. Jakub Chlum (vedoucí Ing. Jakub Svoboda)

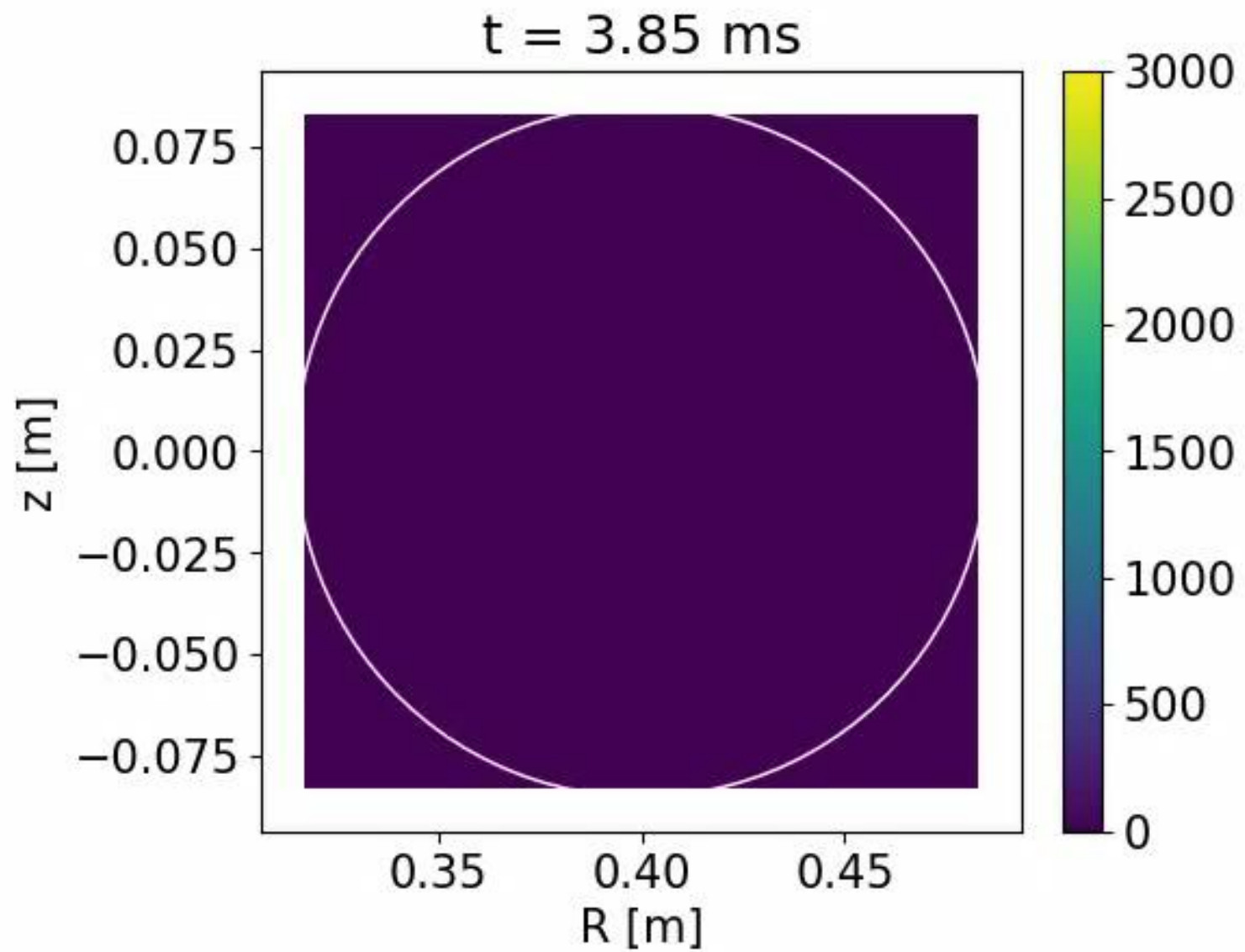
16. – 20.01.2023

BP: Implementace tomografické inverze na tokamak GOLEM

- implementace
- první výsledky

VÚ: Ověření přesnosti tomografie viditelného záření na tokamaku GOLEM

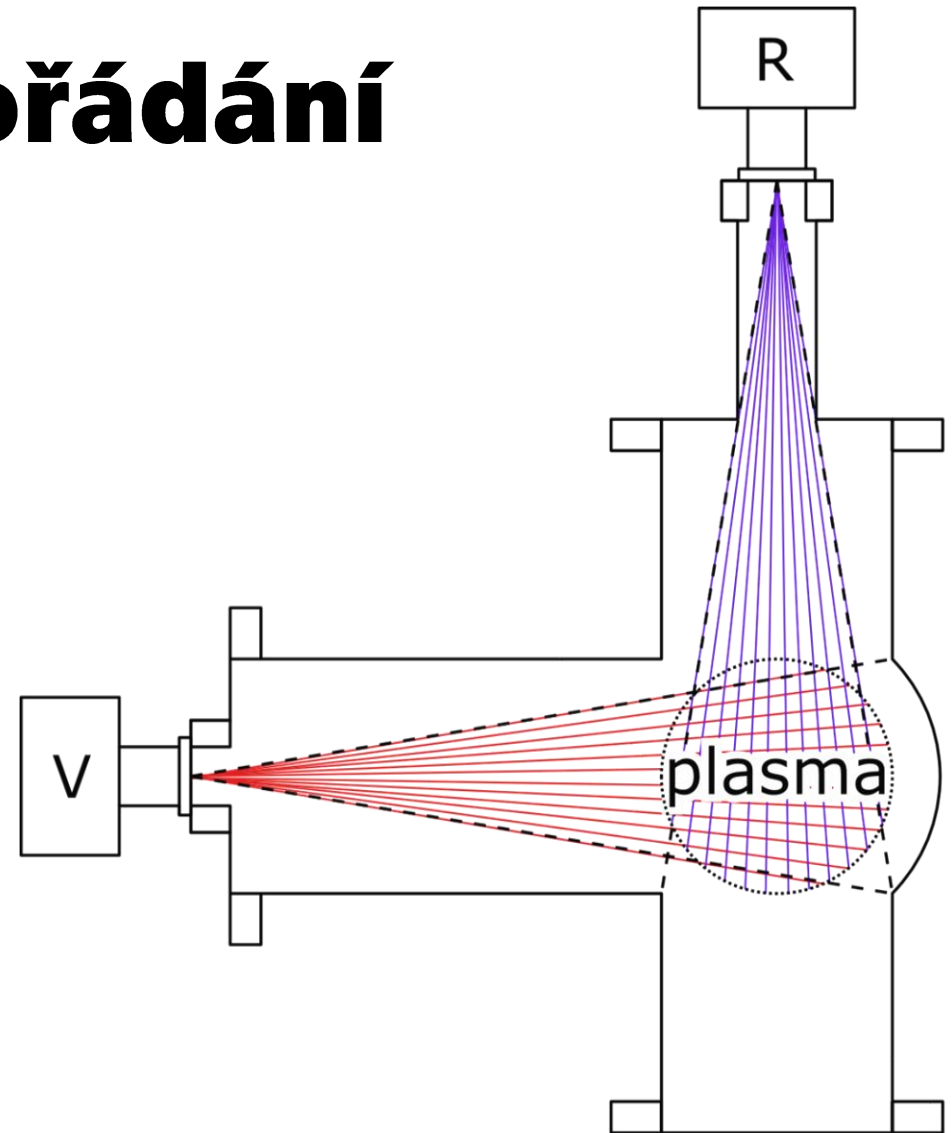
- dosavadní práce
- plánované cíle



Technické uspořádání

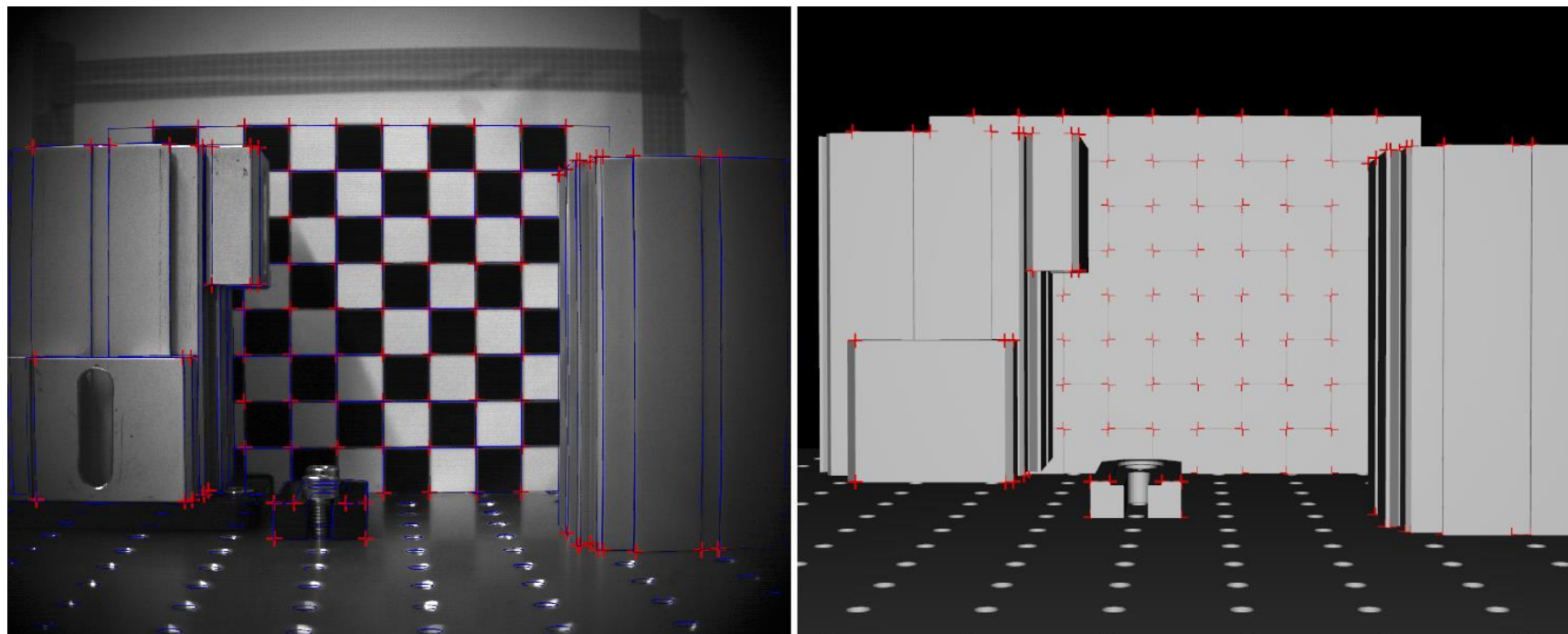


Obr.: Rychlá kamera Photron Mini UX50 [1]



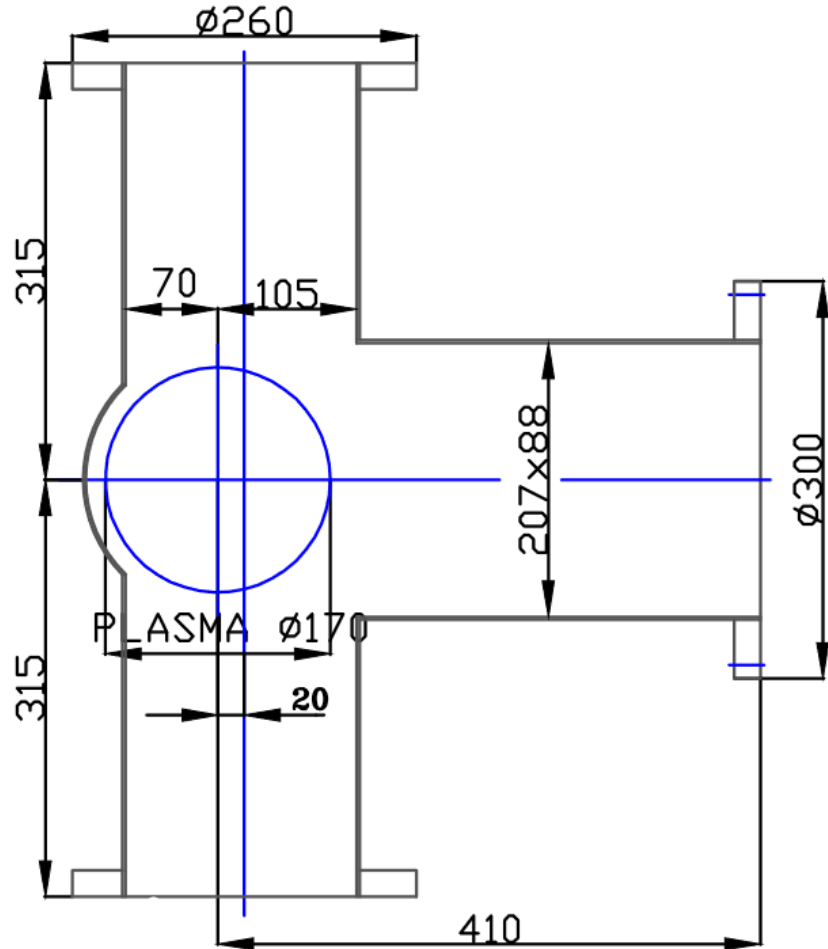
Obr.: Schéma umístění kamer na velkém kříži tokamaku GOLEM

- kalibrace čočky
- geometrická kalibrace
- Calcam [3]



Obr.: Porovnání snímku scény s jejím 3D modelem v Calcam

Kalibrace kamer

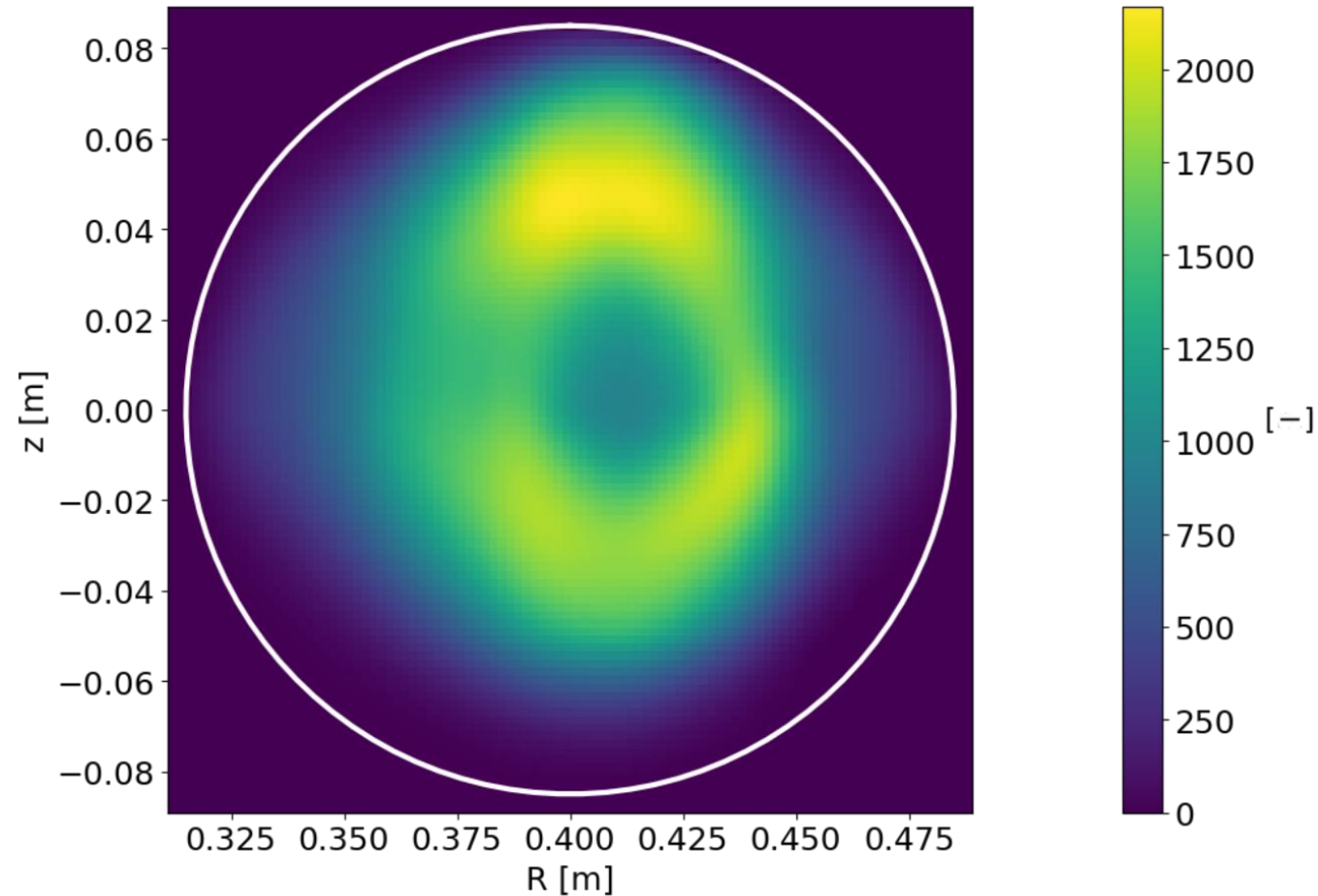


Obr.: Výkres velkého kříže GOLEMu



Obr.: Umístění kamery R na velkém kříži

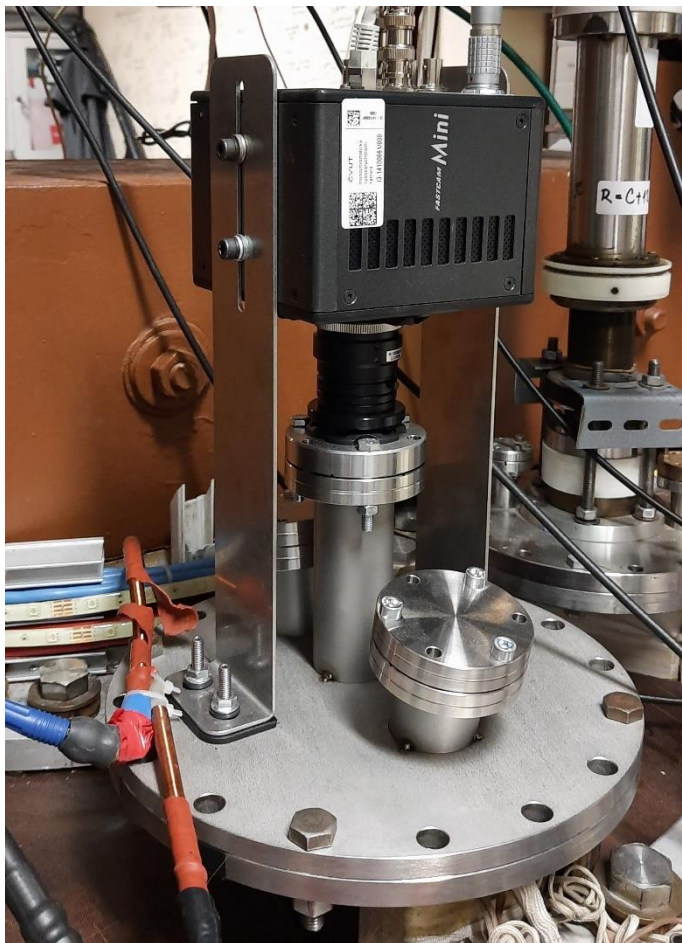
První výsledky



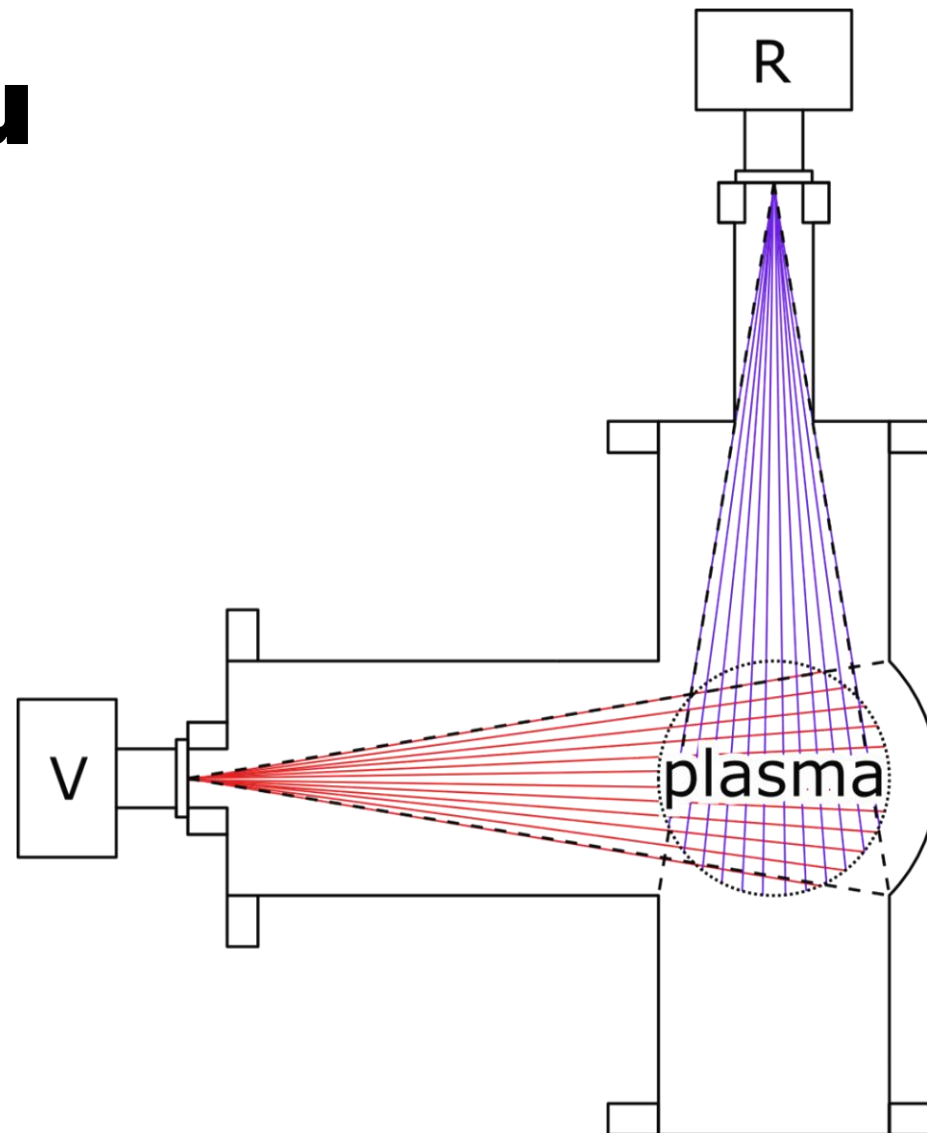
- algoritmus MFR [6]
- Tomotok [1]
- anizotropní vyhlazování vzhledem k magnetickým povrchům
- dutý tvar profilu

Obr.: Tomografická rekonstrukce, výboj #39304, snímky č. 208, limiter bílou čarou

Stínění trubkou

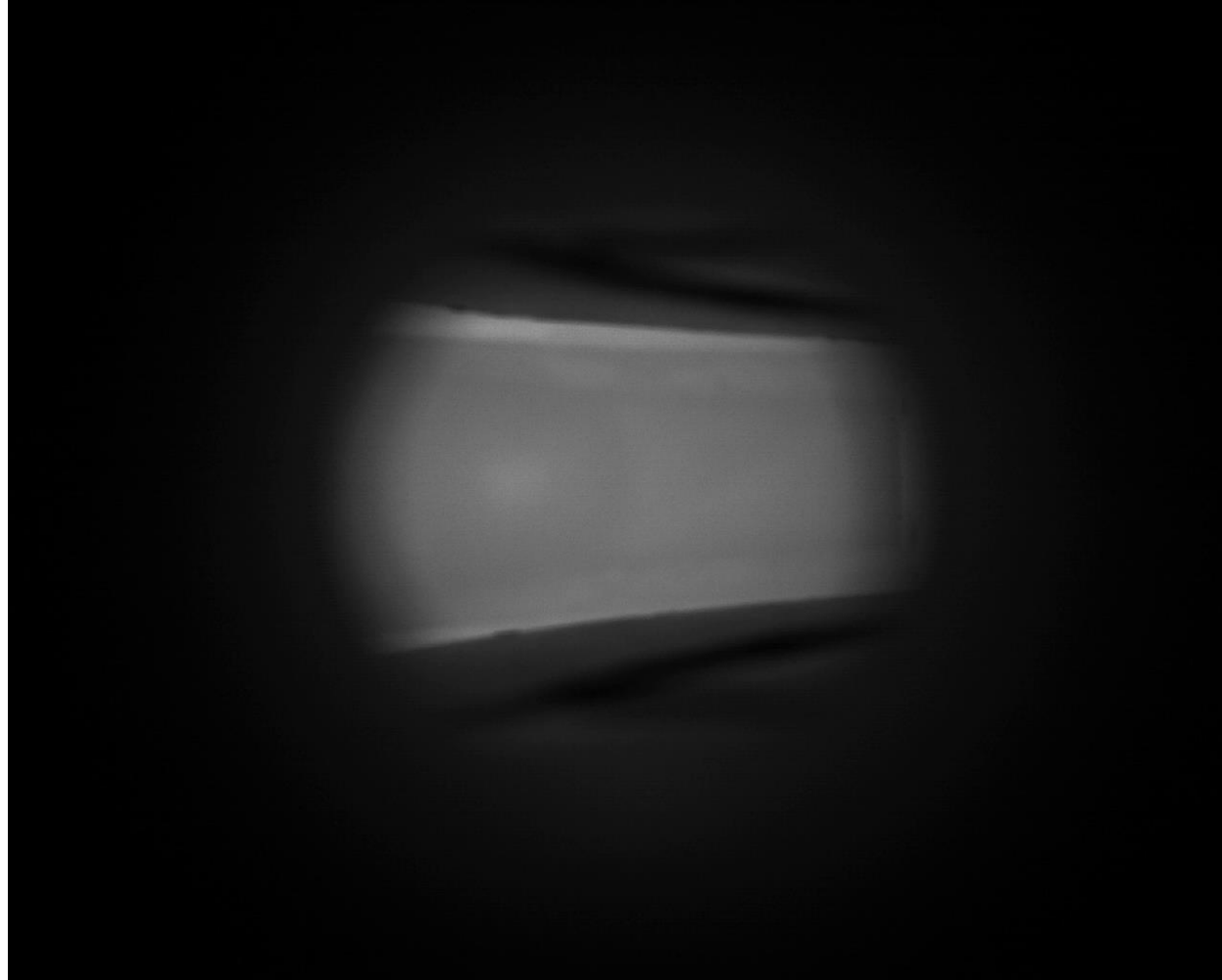


Obr.: Umístění kamery R na velkém kříži GOLEMu



Obr.: Schéma umístění kamer na velkém kříži tokamaku GOLEM

Stínění trubkou



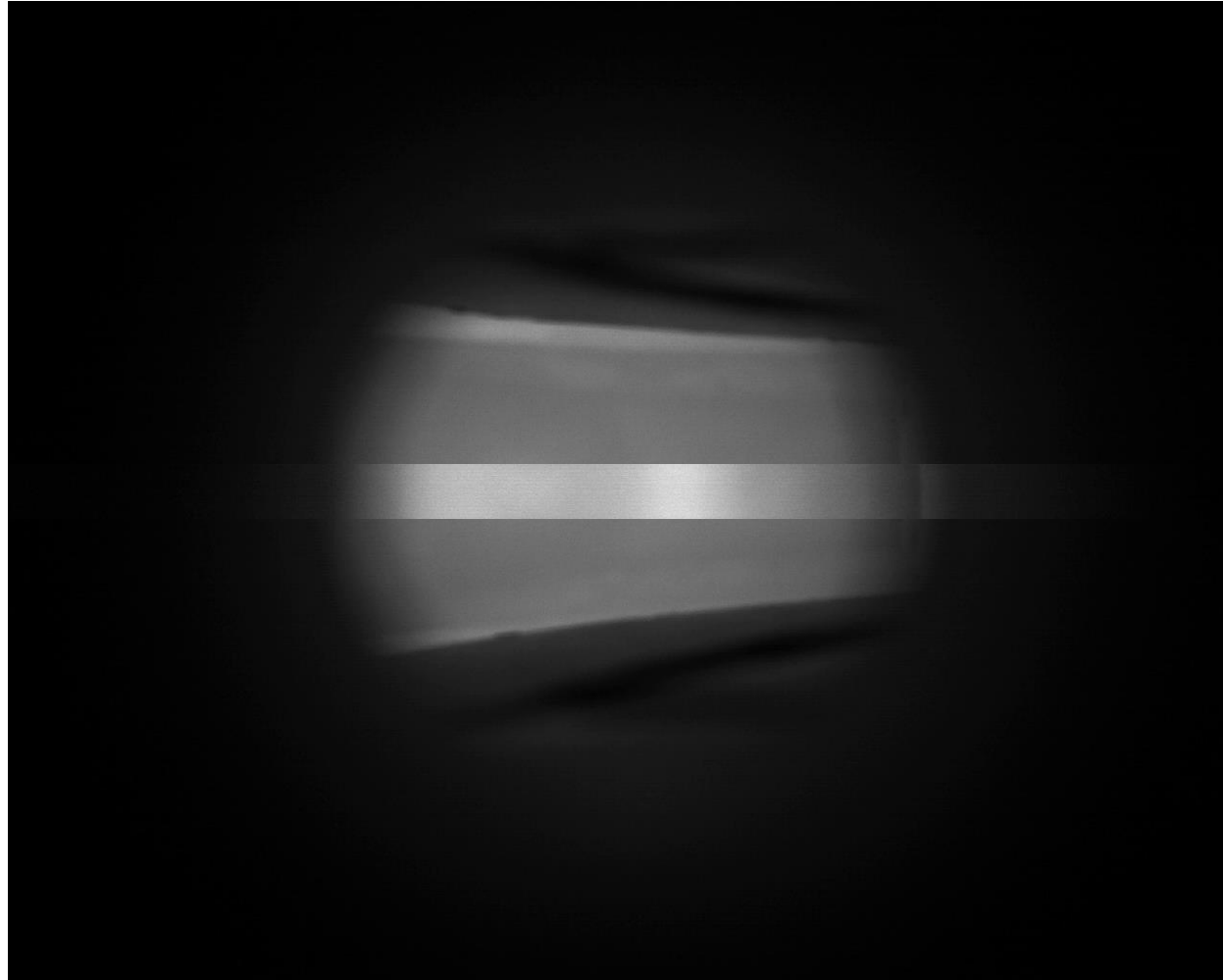
Obr.: Snímek doutnavého výboje pořízený kamerou R

Stínění trubkou



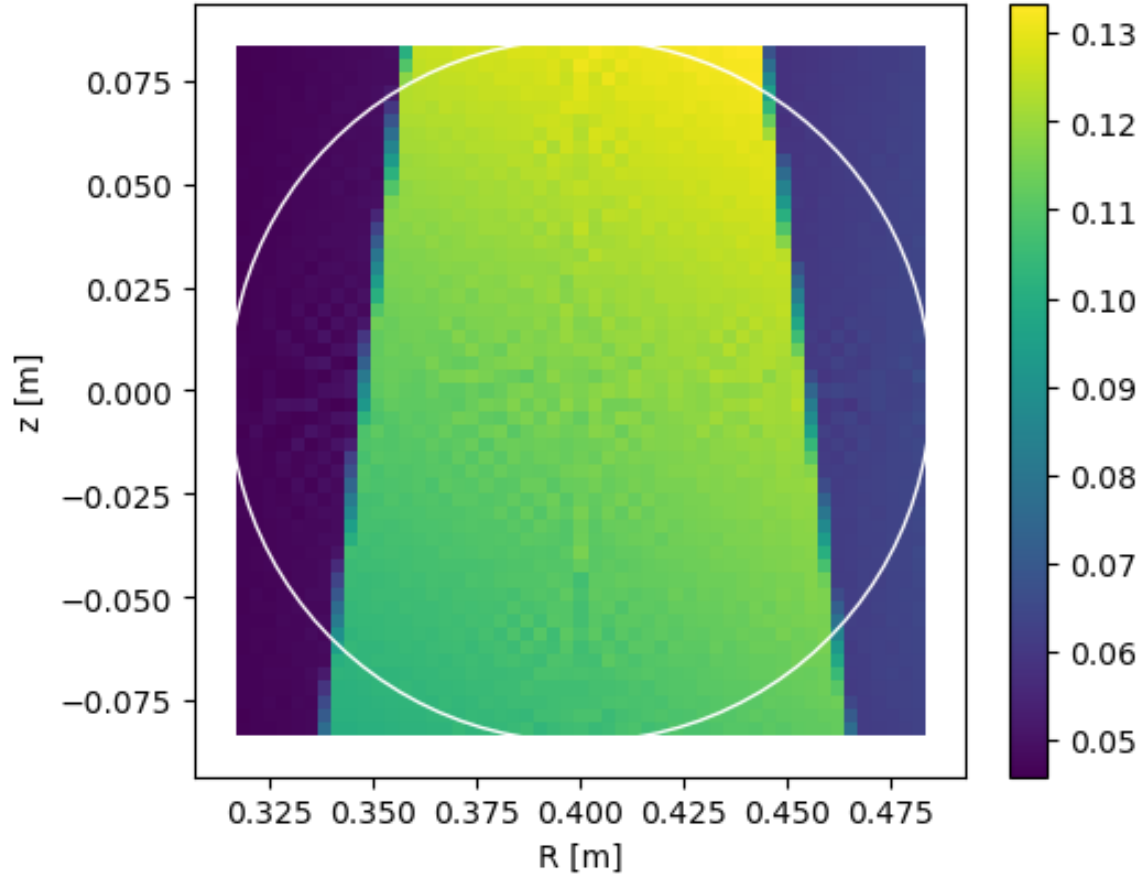
Obr.: Snímek z výboje #39304

Stínění trubkou

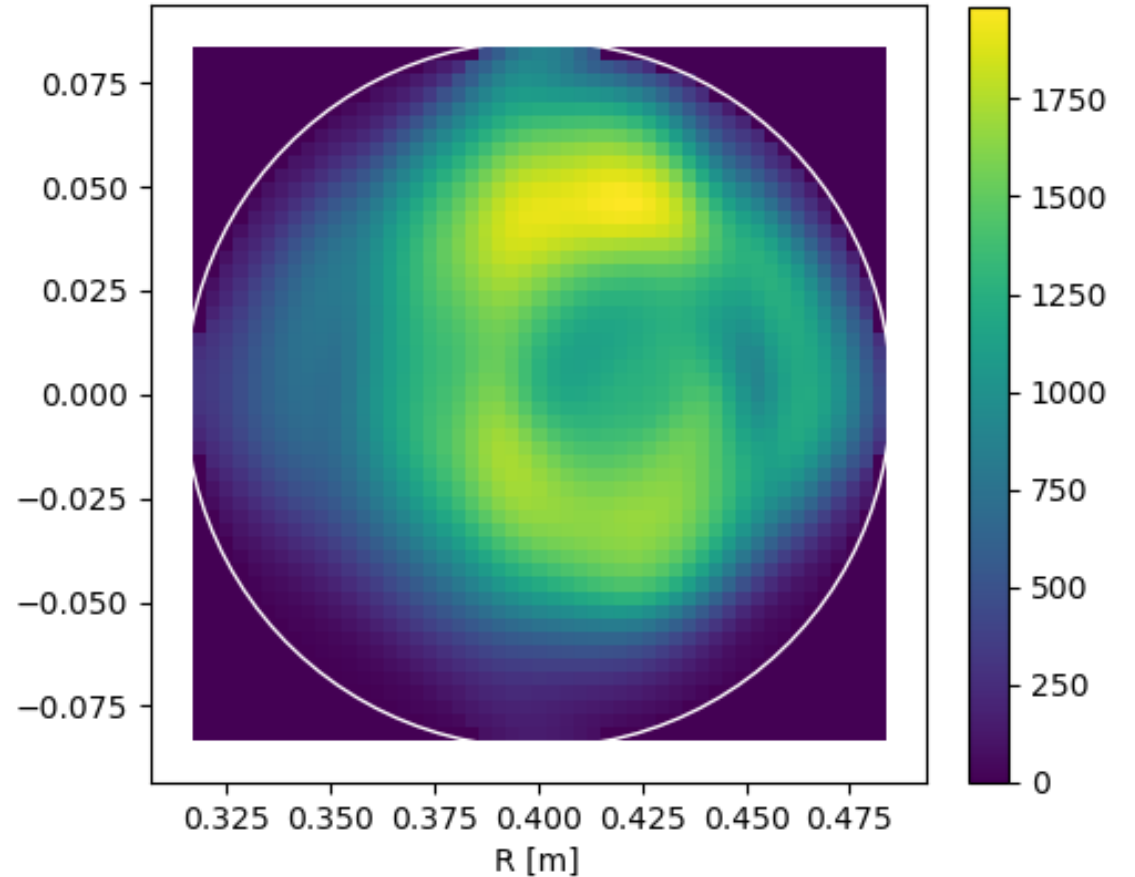


Obr.: Snímek doutnavého výboje pořízený kamerou R, navíc překrytý snímkem z výboje #39304

Stínění trubkou

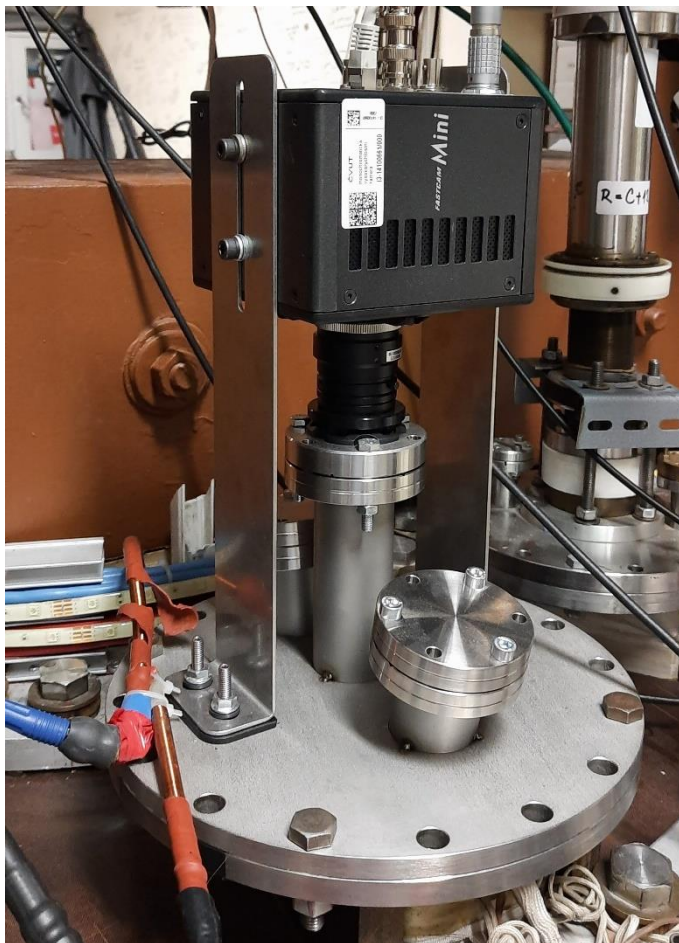


Obr.: Hustota zorných linií v rekonstrukční rovině, limiter bílou čarou

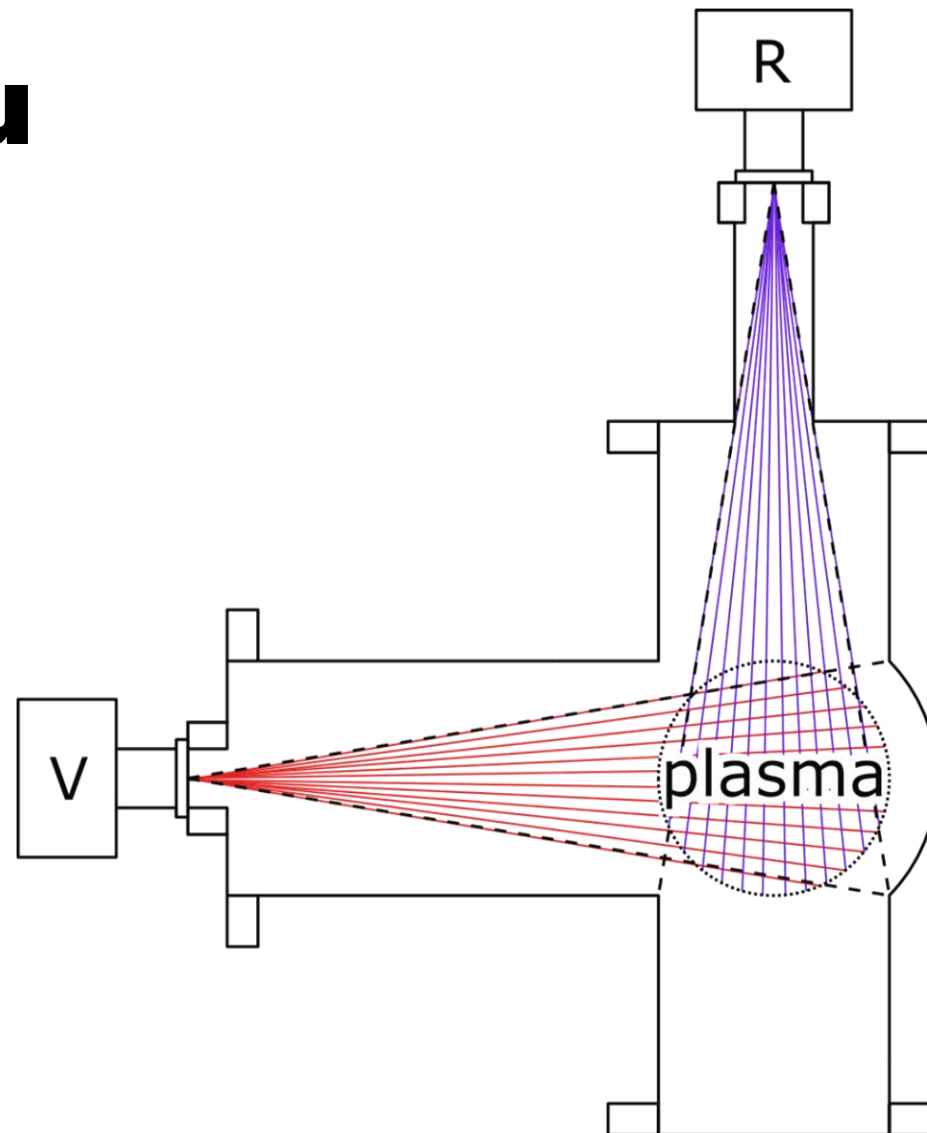


Obr.: Tomografická rekonstrukce se zahrnutím omezeného zorného pole

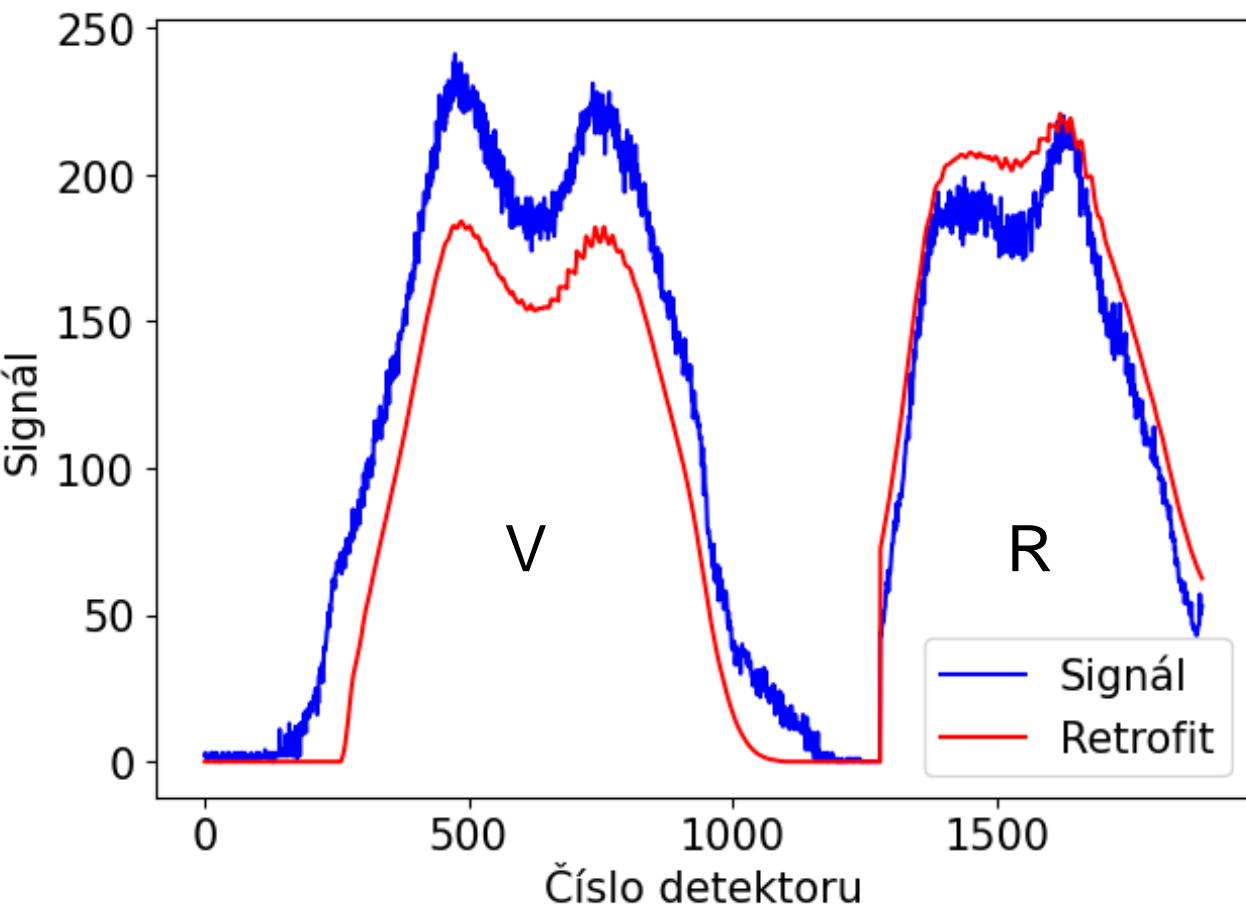
Stínění trubkou



Obr.: Umístění kamery R na velkém kříži GOLEMu



Obr.: Schéma umístění kamer na velkém kříži tokamaku GOLEM



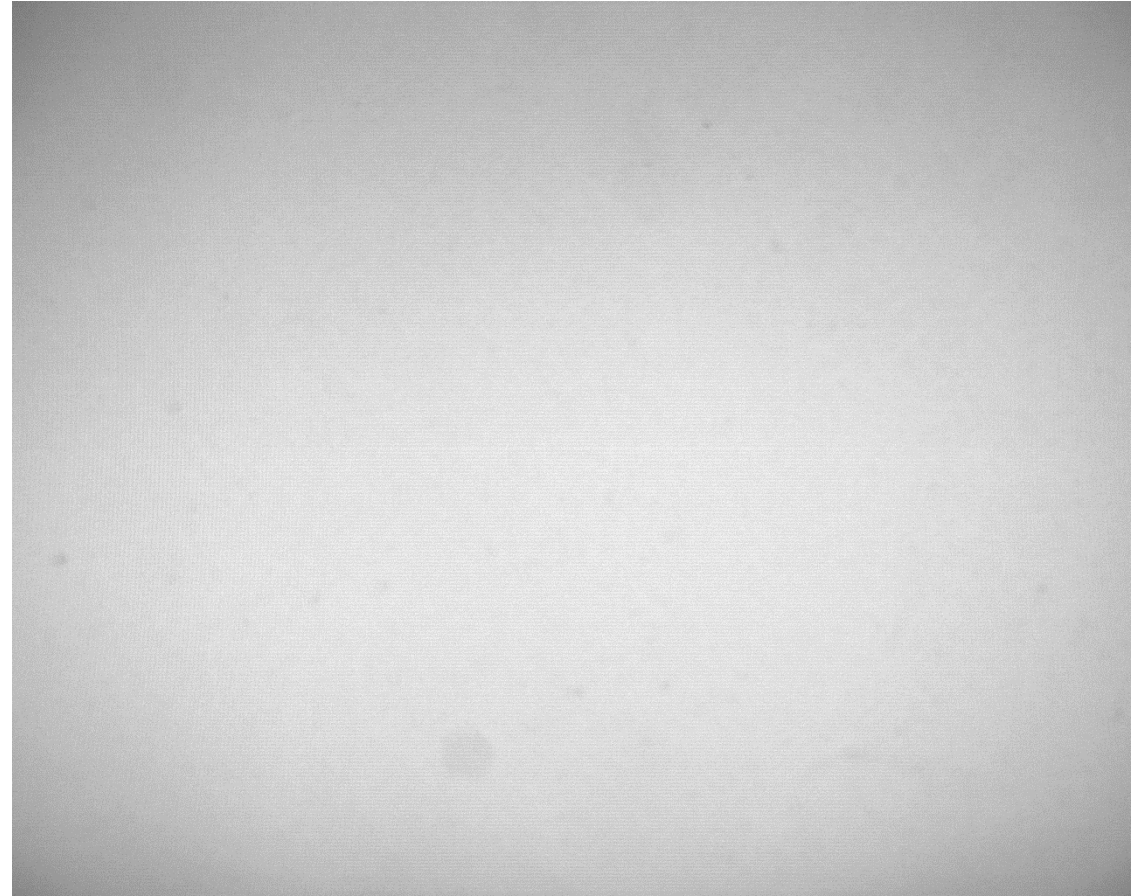
Obr.: Porovnání skutečného signálu s retrofitovaným signálem

- zpětný výpočet signálu z výsledného profilu
- rozdílný od signálu
 - hladší
 - jiná výška

Relativní kalibrace



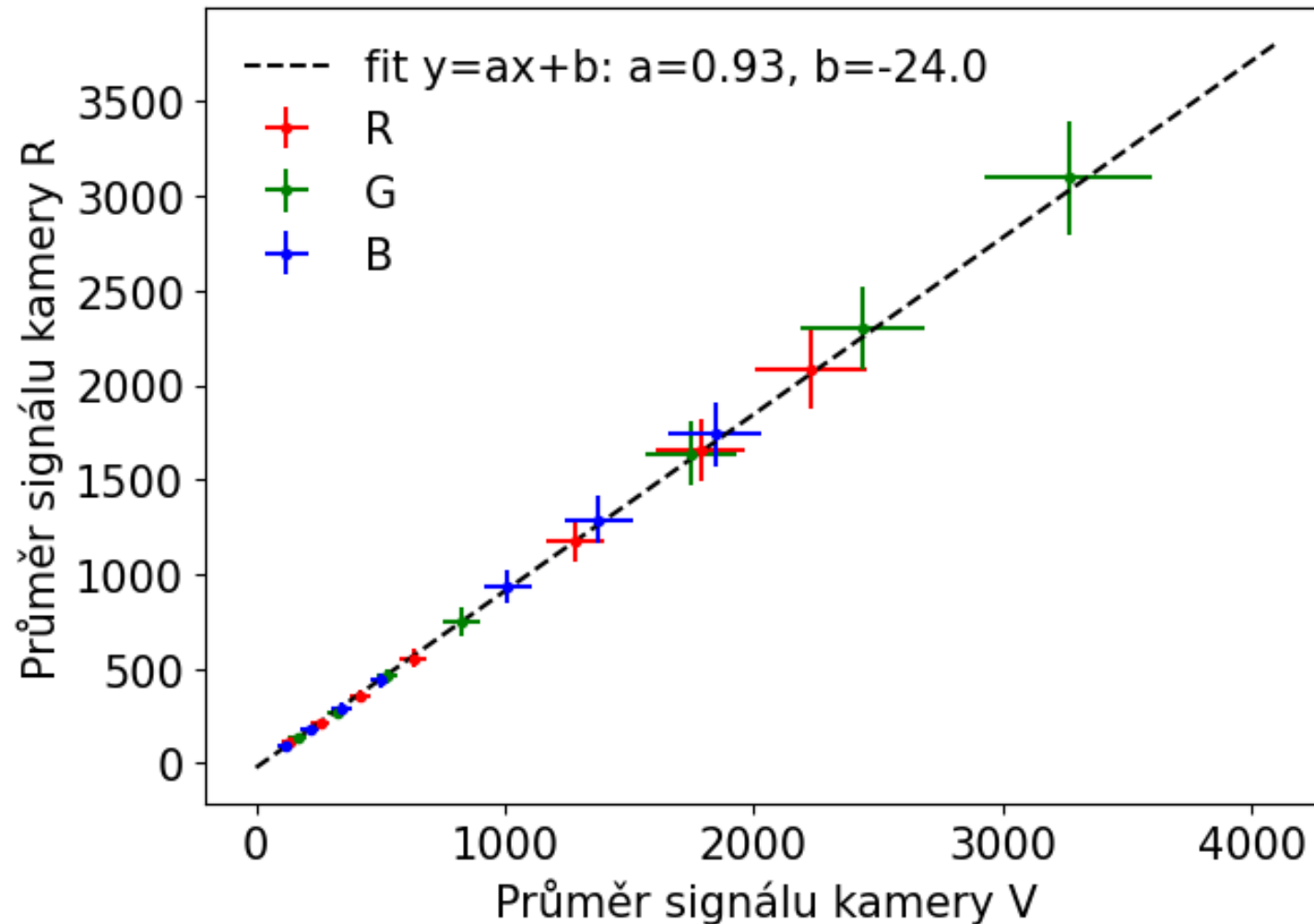
Obr.: Kalibrační snímek z kamery R



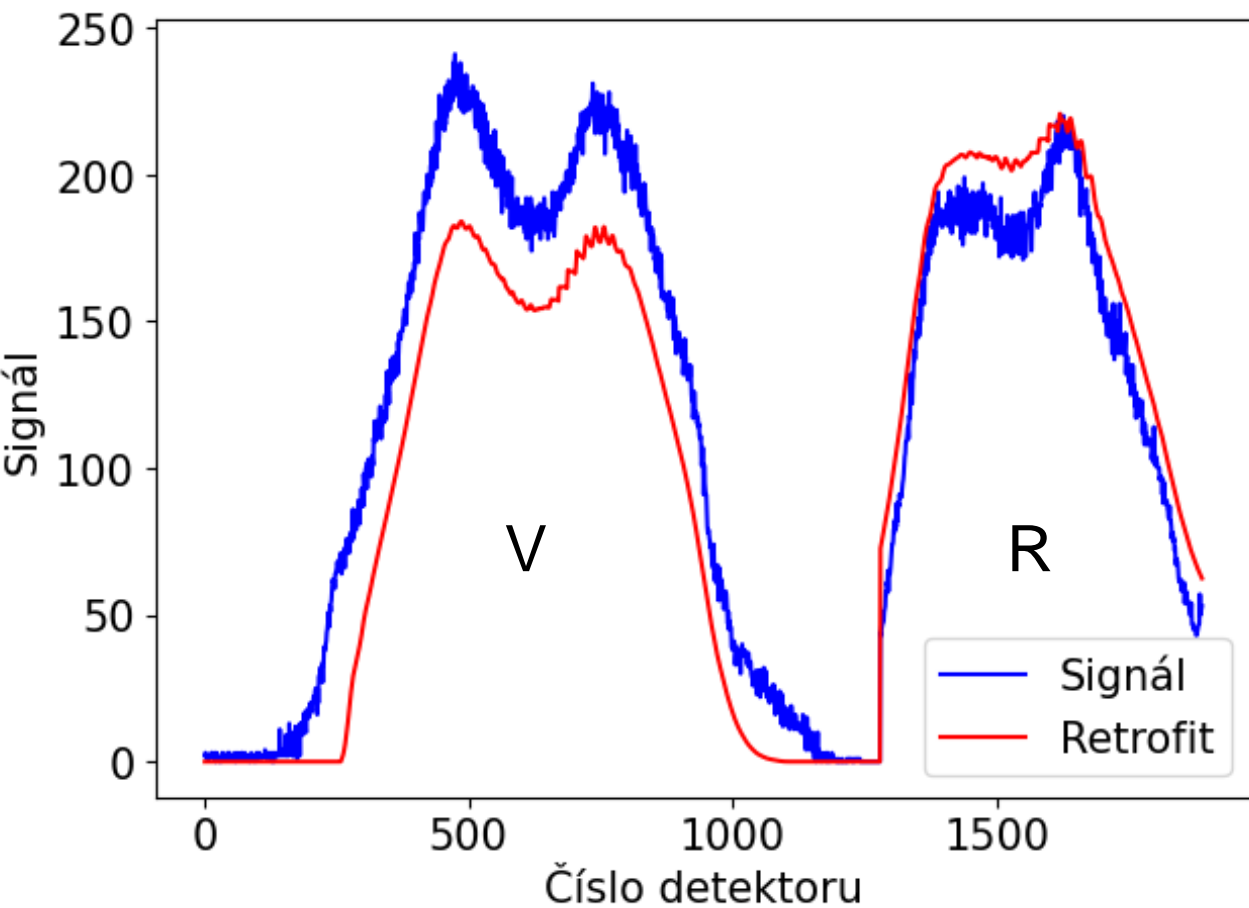
Obr.: Kalibrační snímek z kamery V

Relativní kalibrace

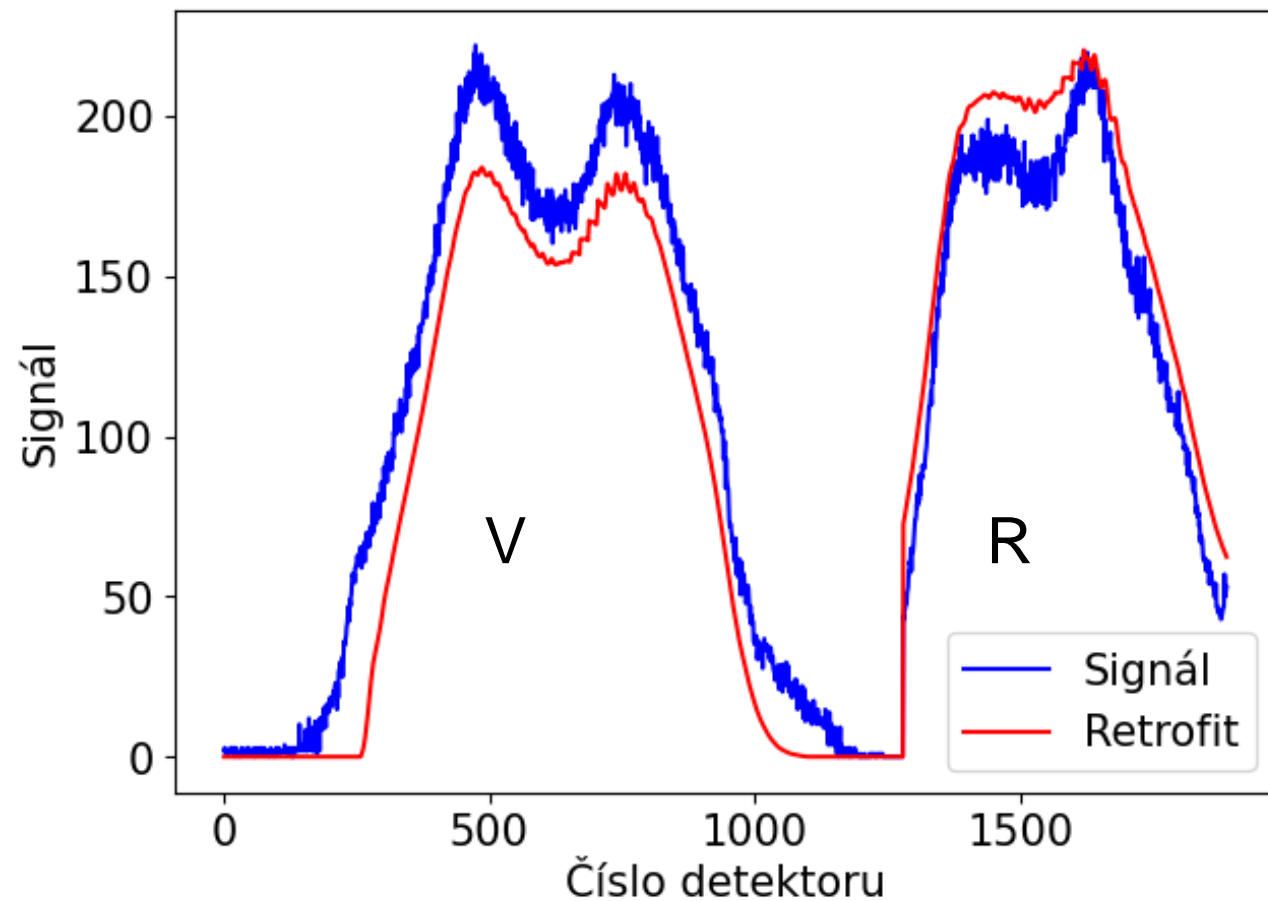
- lineární závislost
- nezávisle na barvě



Obr.: Kalibrační křivka pro průměr signálu z kamer



Obr.: Retrofit před relativní kalibrací



Obr.: Retrofit po relativní kalibraci

Kalibrace pixel po pixelu

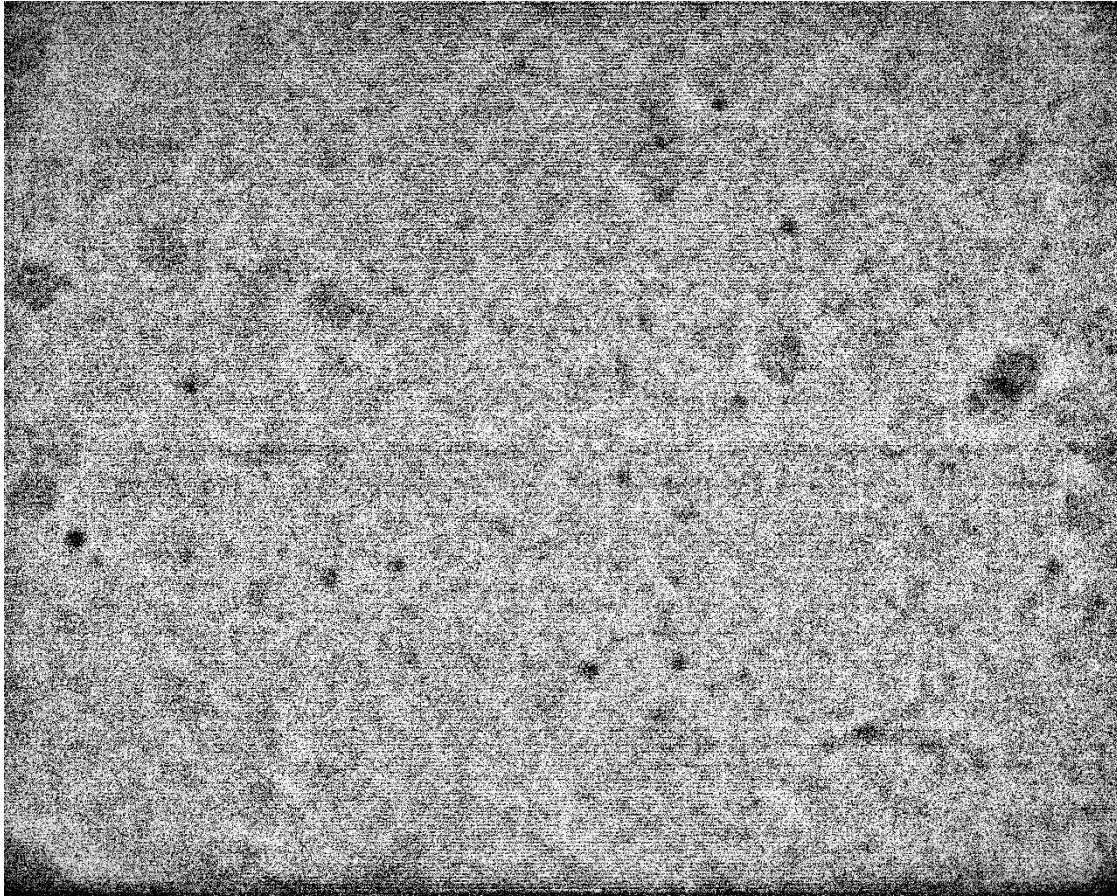


Obr.: Kalibrační snímek z kamery R

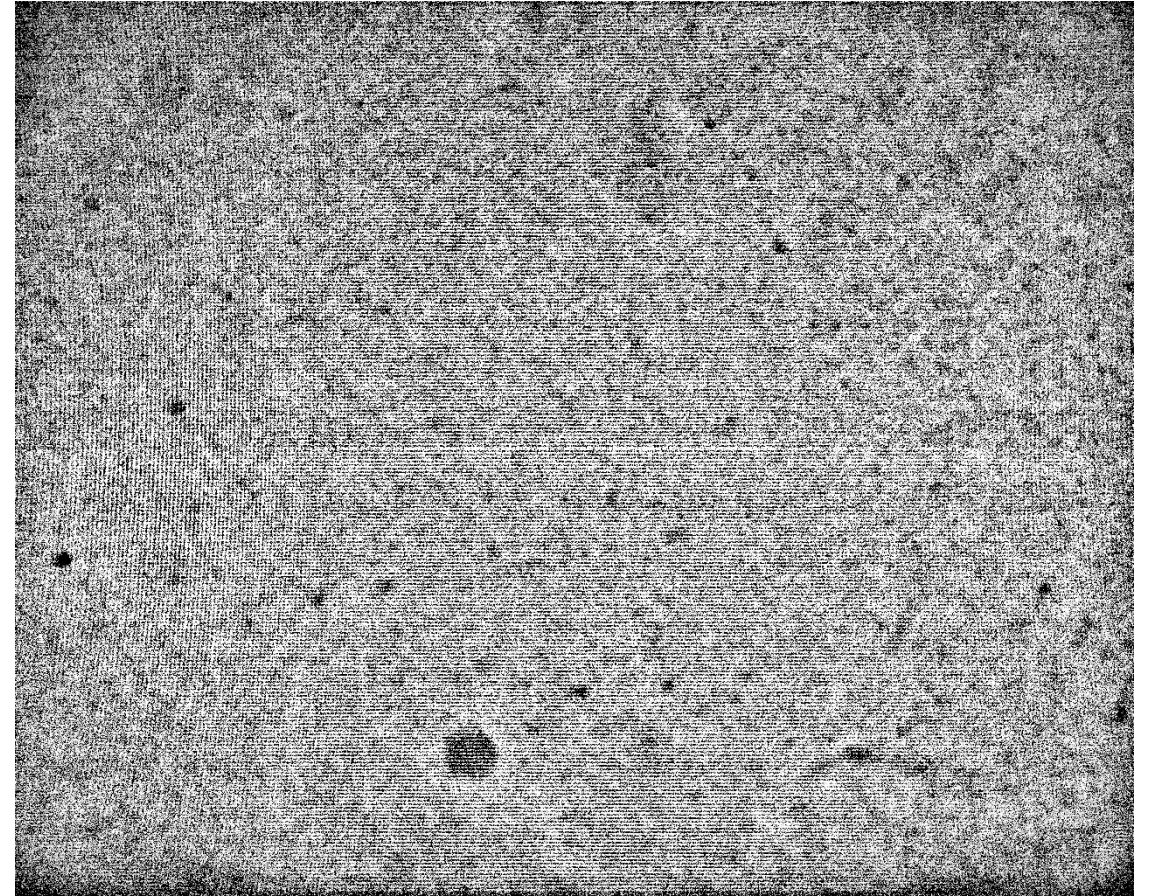


Obr.: Kalibrační snímek z kamery V

Kalibrace pixel po pixelu



Obr.: Kalibrační snímek z kamery R,
upraveno



Obr.: Kalibrační snímek z kamery V,
upraveno

Fotogrammetrie

- zpřesnění geometrické kalibrace
- rozlišení až 0,05 mm

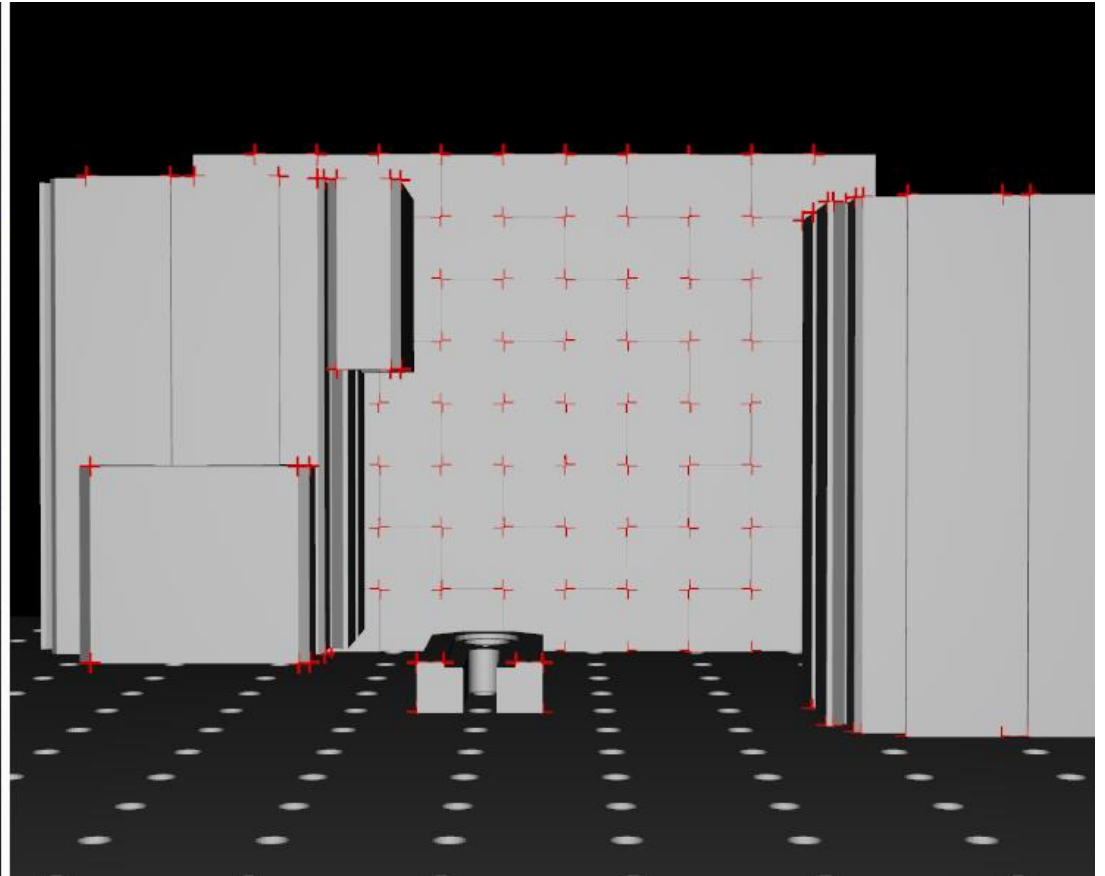
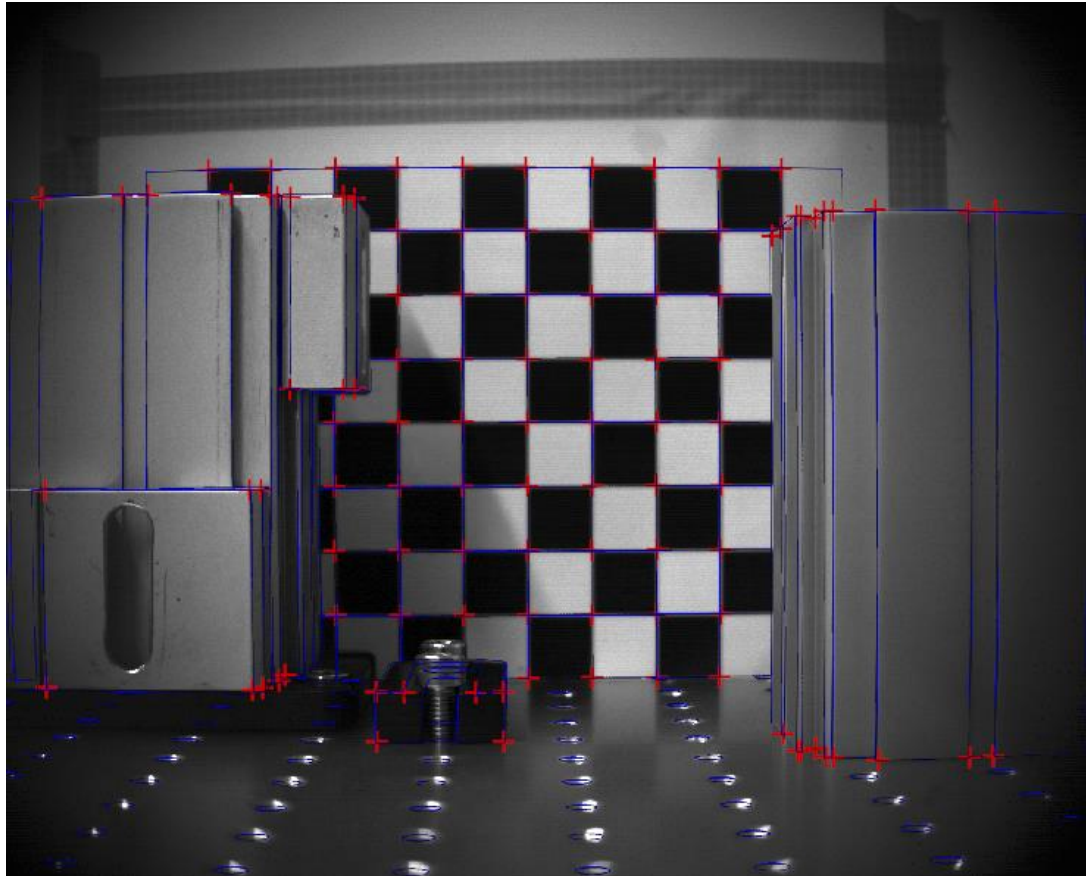
Modelování chyb

- Martin Imříšek, *Studium transformace chyb v tomografii fúzních neutronů* [5]



Obr.: Fotogrammetrický skener ZEISS T-SCAN hawk [4]

Další plány



Další plány

Fotogrammetrie

- zpřesnění geometrické kalibrace
- rozlišení až 0,05 mm

Modelování chyb

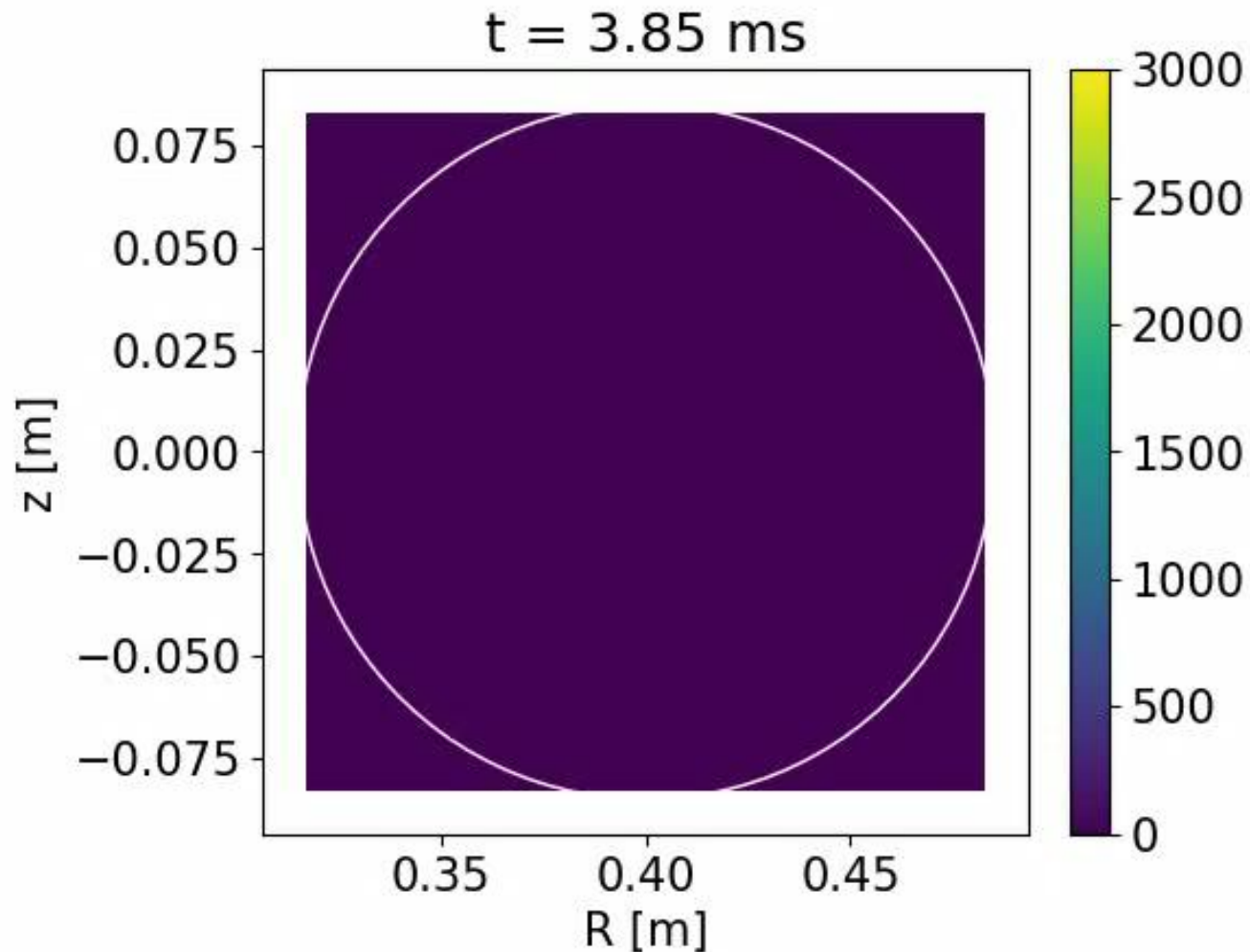
- Martin Imříšek, *Studium transformace chyb v tomografii fúzních neutronů* [5]



Obr.: Fotogrammetrický skener ZEISS T-SCAN hawk [4]

Další možnosti

- magnetické povrchy
- anizotropie hladkosti
- popis zorných linií
- odrazy od stěn
- automatizace

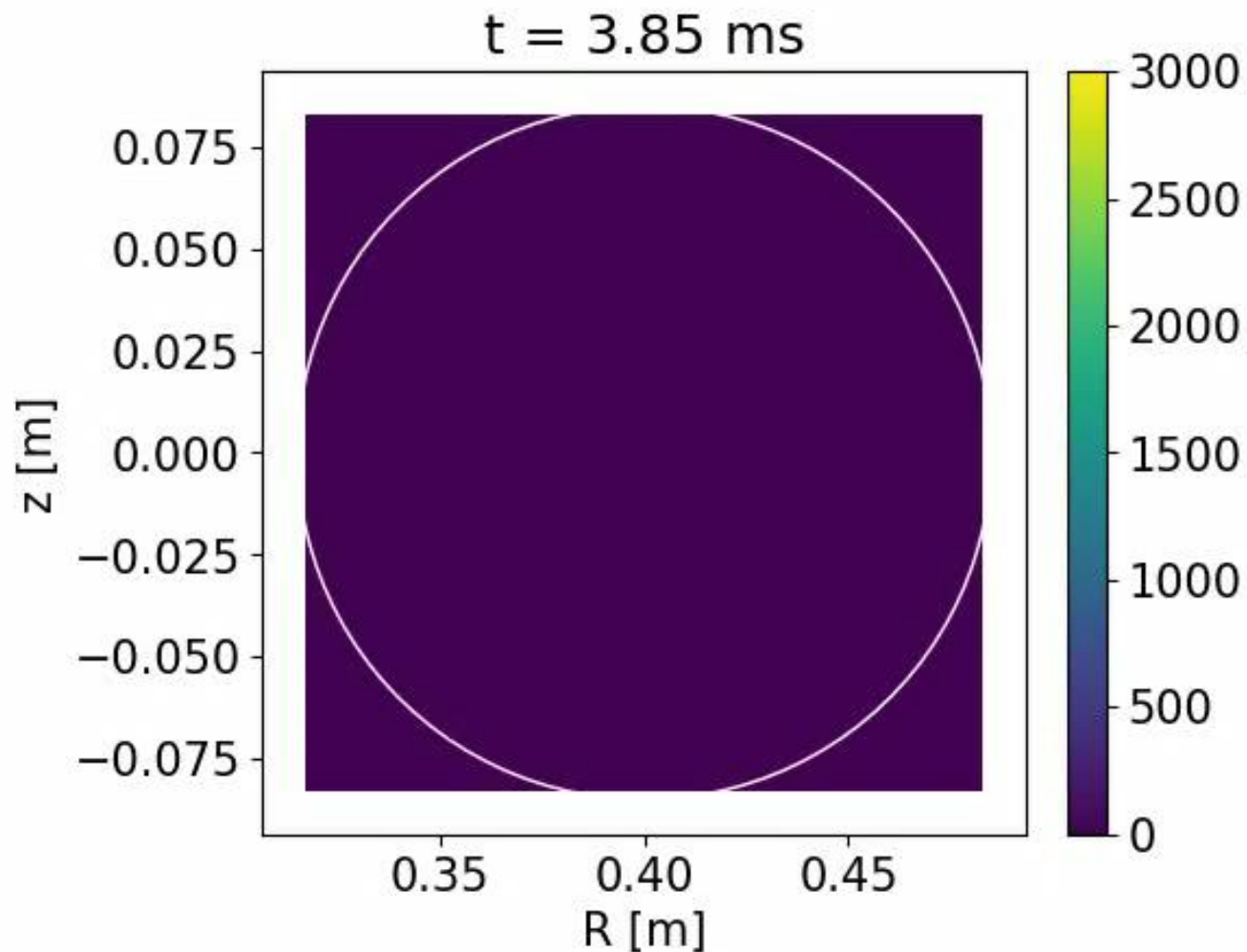


BP:

- implementace
- první výsledky

VÚ:

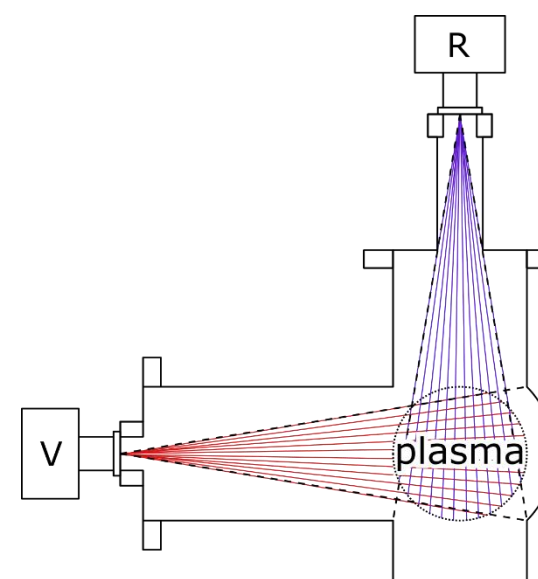
- dosavadní práce
- plánované cíle



- [1] SVOBODA, J. et al. Tomotok: Python package for tomography of tokamak plasma radiation. *Journal of Instrumentation*. 2021, 16 (C12015)
- [2] Photron Europe Limited. *Product Datasheet Mini UX Fastcam series by Photron*, [online]. 2021. [cit. 2022-06-27] Dostupné z: <https://photron.com/wp-content/uploads/2021/08/Mini-UX-2021.pdf>
- [3] SILBURN, S. et al. Calcam, 2.8.3, [software]. Zenodo, 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6405602>
- [4] GOM Metrology. *T-Scan Hawk Productflyer*, [online]. 2021. [cit. 2022-01-16] Dostupné z: <https://www.3dees.cz/images/scans/zeiss/t-scan-hawk/T-Scan-Hawk-Produktflyer-A4-CZ-Download.pdf>
- [5] IMRÍŠEK, M. *Studium transformace chyb v tomografii fúzních neutronů*. Praha, 2008. Bakalářská práce. ČVUT, FJFI.
- [6] MLYNÁŘ, J, et al. Current Research into Applications of Tomography for Fusion Diagnostics. *Journal of Fusion Energy*. 2018, 38(2019), 458–466.

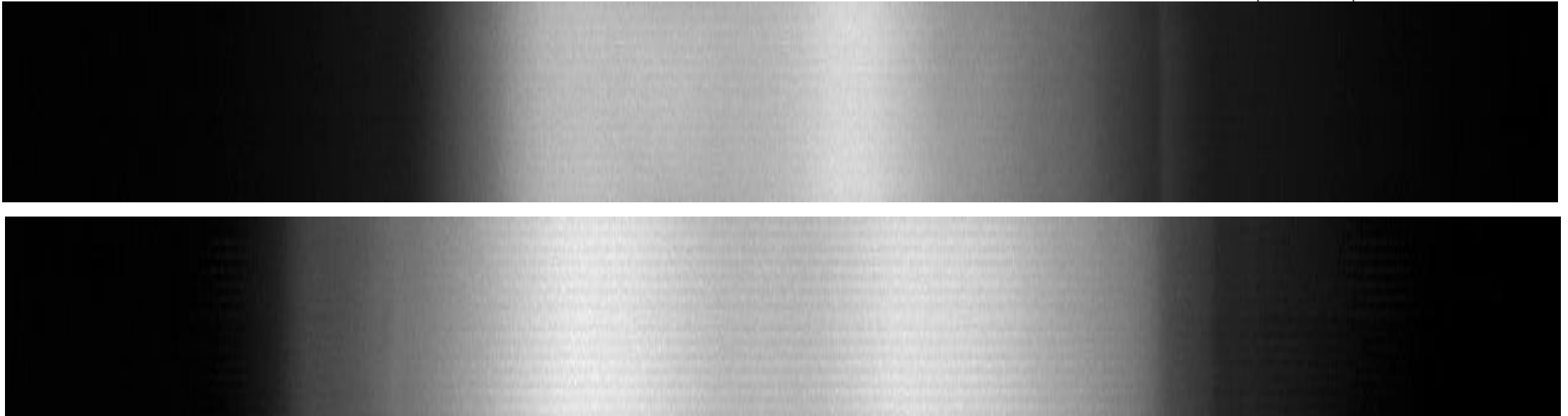
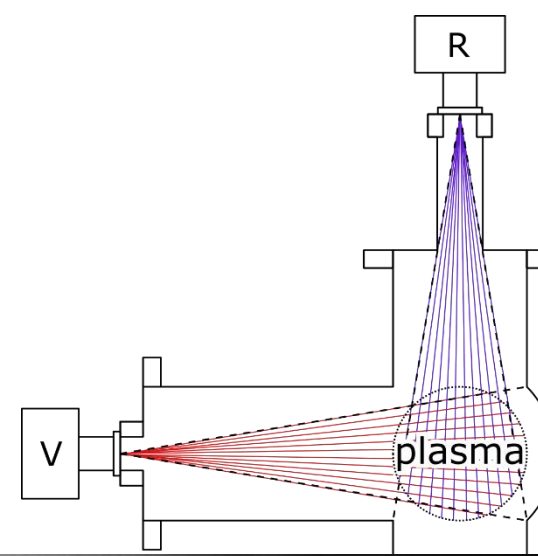
- $f = T \cdot g + \xi$
- $(\tilde{T}^T \cdot \tilde{T} + \alpha H^{(n)}) \cdot g^{(n+1)} = \tilde{T}^T \cdot \tilde{f}$
 - $H^{(n)}$ – regularizační matice
 - α – regularizační parametr
- $H^{(n)} = S(\eta) B_{\parallel}^T \cdot W^{(n)} \cdot B_{\parallel} + S(-\eta) B_{\perp}^T \cdot W^{(n)} \cdot B_{\perp}$
- $W_{ij}^{(n)} = \frac{1}{g_i^{(n-1)}} \cdot \delta_{ij}$
- $S(\eta) = \frac{1}{1+e^{-\eta}}$
- α z minimalizace $|\chi^2 - 1| = \left| \frac{1}{n_l} (\tilde{T} \cdot g - \tilde{f})^T \cdot (\tilde{T} \cdot g - \tilde{f}) - 1 \right|$

Snímky z kamer



Obr.: : Snímky č. 208 z výboje #39304, nahoře kamera R, dole kamera V

Snímky z kamer



Obr.: : Snímky č. 208 z výboje #39304, nahoře kamera R, dole kamera V

Kalibrace pixel po pixelu

- $C = \frac{(R-D)\langle F-D \rangle}{(F-D)}$
 - C - corrected
 - R - real
 - D - dark
 - F - flat

Kalibrace pixel po pixelu

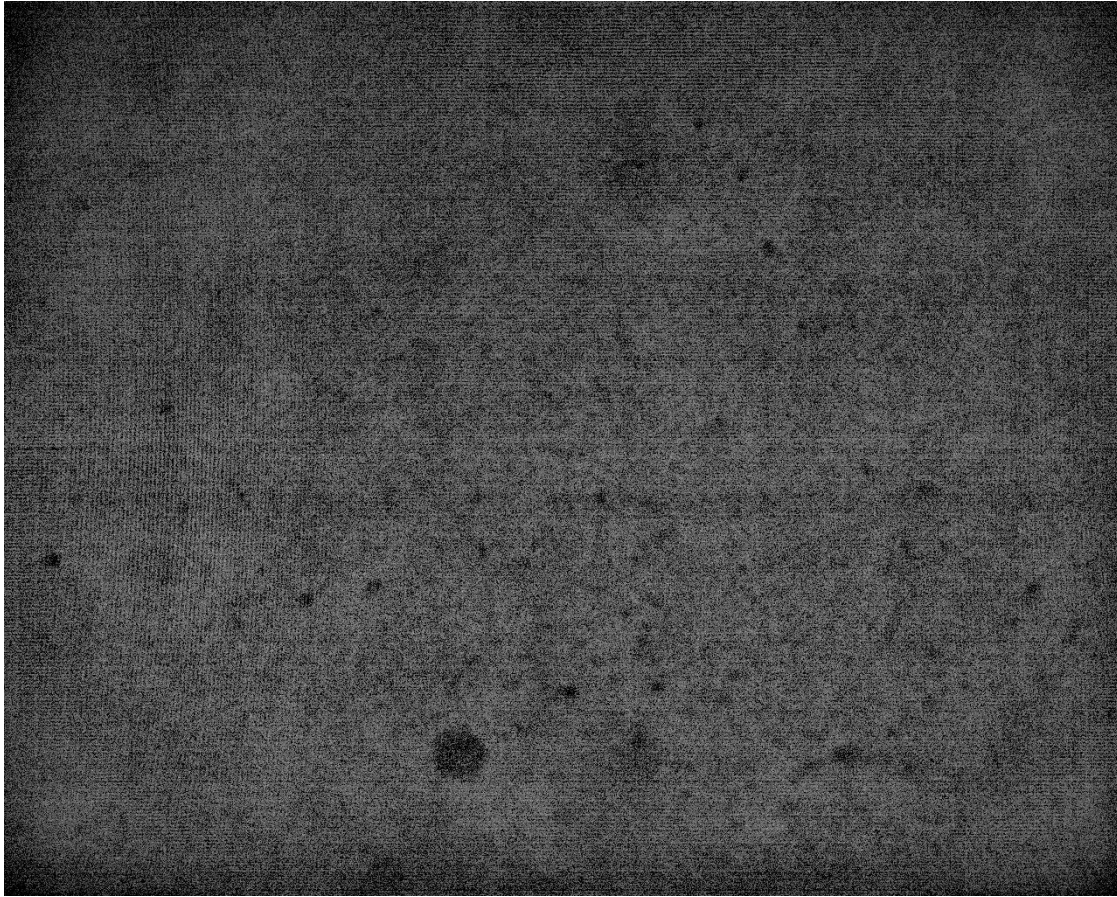


Obr.: Skutečný snímek

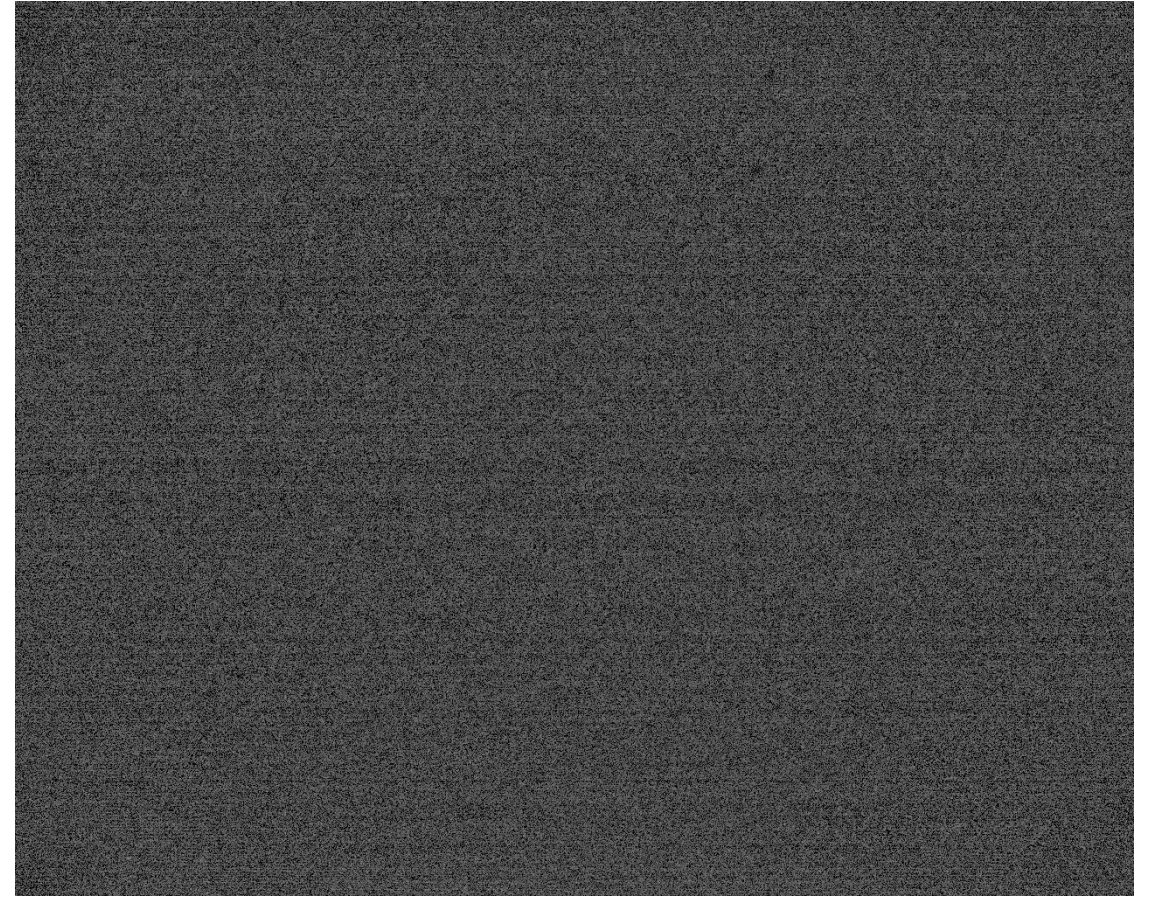


Obr.: Zkalibrovaný snímek

Kalibrace pixel po pixelu



Obr.: Skutečný snímek, upraveno



Obr.: Zkalibrovaný snímek, upraveno

Rychlost

- 3,9 GHz procesor
- jedna řada detektorů
 - 30×30 px → 1 s
 - 40×40 px → 4 s
 - 50×50 px → 15 s
 - 100×100 px → 10 min