

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta



Vliv typu kolimátoru na parametry scintilační kamery

Bakalářská práce

Autor : Veronika Štědrová
Vedoucí práce : RNDr. Olga Nováková, Csc

datum odevzdání : 15.5.2007

Abstract

Influence of collimator type to scintillation camera parameters

Bachelor work Influence of collimator type to scintillation camera is focused especially on experimental measurement and elaboration of results. In theoretical section I deal with a base principle of scintigraphy, describing of Gamma camera, single types of collimators, splitting of collimators according to a type of construction, and according to spatial resolution and sensitivity. In other sections there are examined exact methodology of measurements sensitivity of collimator and spatial resolution and results of measurements. The results are compared with specification given by producers and values published by other authors. In conclusion I recommend the essential type of collimator for nuclear medicine department.

Anotace

Štědrová, Veronika – Název bakalářské práce : Vliv typu kolimátoru na parametry scintilační kamery.

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, České Budějovice, Jírovцова 24/1347

Vedoucí práce: RNDr. Olga Nováková Csc.

České Budějovice: JCU ZSF, 2007, 45 stran

Bakalářská práce *Vliv typu kolimátoru na parametry scintilační kamery* je zaměřena zejména na experimentální měření a zpracování výsledků. V teoretické části se zabývám základním principem scintigrafie, popisem gamakamery, jednotlivými typy kolimátorů, rozdělení kolimátorů podle typu konstrukce a podle polohového rozlišení a citlivosti. V práci je uvedena přesná metodika měření citlivosti a polohového rozlišení kolimátorů a naměřené výsledky. Výsledky jsou porovnány s údaji výrobce a hodnotami uvedenými v odborné literatuře. V závěru jsem uvedla doporučení pro základní typ kolimátorů, kterým by mělo být pracoviště nukleární medicíny vybaveno.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním mé bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích 15.5. 2007

Veronika Štědrová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat RNDr. Olze Novákové, Csc. za odbornou pomoc a vedení mé práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Daniele Kotalové za odbornou pomoc při realizaci měření, za čas který mi věnovala a cenné odborné rady, které mi poskytla. Také bych ráda poděkovala Ing. Jiřímu Trnkovi za vytvoření počítačového programu potřebnému ke zpracování mých výsledků.

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1. ÚVOD | 8 |
| 2. SOUČASNÝ STAV | 9 |
| 2.1 Princip Scintigrafie | 9 |
| 2.2 Scintilační kamera | 11 |
| 2.3 Kolimátory | 13 |
| 2.3.1 <i>Kolimátory s paralelními otvory</i> | 13 |
| 2.3.2 <i>Kolimátory s jinak geometricky uspořádanými otvory</i> | 15 |
| 2.3.3 <i>Rozdělení nízkoenergetických kolimátorů</i> | 17 |
| 2.4 Parametry kolimátorů | 19 |
| 2.4.1 <i>Prostorová (polohová) rozlišovací schopnost</i> | 19 |
| 2.4.2 <i>Citlivost kolimátoru</i> | 21 |
| 2.4.3 <i>Vztah mezi citlivostí a polohovou (prostorovou) rozlišovací schopností</i> | 21 |
| 3. CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA | 22 |
| 3.1 Cíl práce | 22 |
| 3.2 Hypotéza | 22 |
| 4. METODIKA MĚŘENÍ | 23 |
| 4.1 Citlivost kolimátoru | 23 |
| 4.2 Polohová rozlišovací schopnost | 24 |
| 5. VÝSLEDK MEŘENÍ | 27 |
| 5.1 Citlivost | 27 |
| 5.1.1 Stanovení vlivu akvizičních podmínek na citlivost | 27 |
| 5.1.1.1 <i>Vliv velikosti misky</i> | 27 |
| 5.1.1.2 <i>Vliv vzdálenosti</i> | 28 |
| 5.1.1.3 <i>Vliv velikosti matice</i> | 28 |
| 5.1.1.4 <i>Vliv aktivity</i> | 29 |
| 5.1.1.5 <i>Vliv velikosti nastaveného energetického okna</i> | 29 |
| 5.1.2 Měření citlivost kamer | 30 |
| 5.1.2.1 <i>Citlivost – Infinia – kolimátor LEHR</i> | 30 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.1.2.2 | <i>Citlivost – Infinia Hawkeye – kolimátor LEHR</i> | 30 |
| 5.1.2.3 | <i>Citlivost - Infinia Hawkeye – kolimátor LEGP</i> | 30 |
| 5.1.2.4 | <i>Citlivost - Infinia Hawkeye – kolimátor MEGP</i> | 31 |
| 5.1.2.5 | <i>Citlivost – MB 9200 – kolimátor LEHR</i> | 31 |
| 5.1.2.6 | <i>Citlivost – MB 9200 – kolimátor LEGP</i> | 31 |
| 5.2 | Polohová rozlišovací schopnost | 33 |
| 5.2.1 | <i>Kamera MB 9200</i> | 33 |
| 5.2.2 | <i>Kamera Infinia</i> | 34 |
| 5.2.3 | <i>Kamera Infinia Hawkeye</i> | 34 |
| 5.3 | Klinické ověření výsledků | 39 |
| 6. | DISKUSE | 40 |
| 7. | ZÁVĚR | 41 |
| 8. | SEZNAM LITERATURY | 42 |
| 9. | KLÍČOVÁ SLOVA | 43 |
| 10. | ZKRATKY | 44 |
| 11. | SEZNAM PŘÍLOH | 45 |

1. ÚVOD

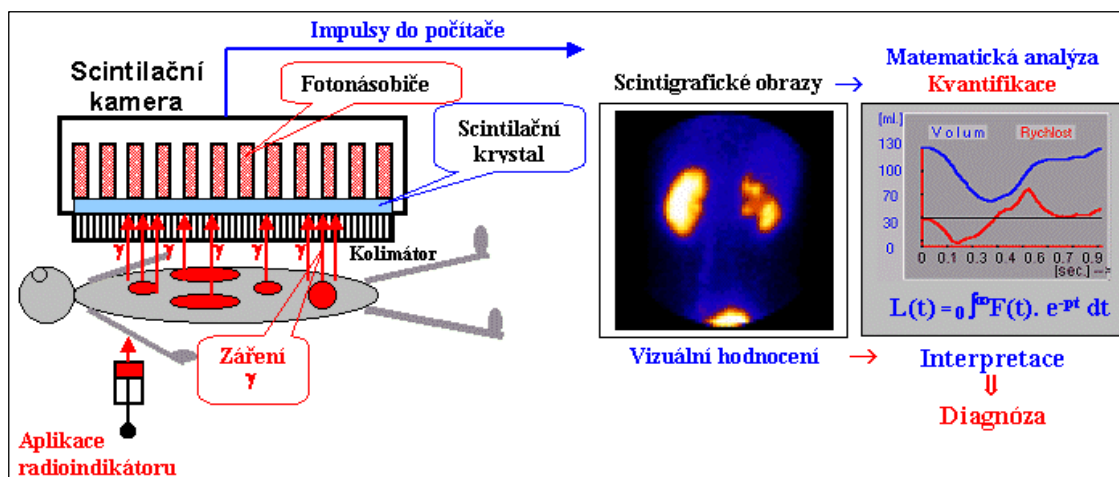
Scintigrafické vyšetřování v nukleární medicíně dává informace o distribuci radiofarmak v těle pacienta a časových změnách této distribuce. Cílem vyšetření je zobrazení léze s objemovou aktivitou radionuklidu odlišnou od objemové aktivity okolí. Informace o zobrazovaném objektu jsou ovlivněny vlastnostmi záření gama, charakteristikami radiofarmaka, vlastnostmi prostředí, kterým záření prochází z objektu do zobrazovacího přístroje, fyzikálními a technickými parametry přístroje a zpracování obrazu. K tomu, abychom docílili kvalitního zobrazení požadovaného objektu jsou zapotřebí správně zvolené parametry zobrazovacího přístroje, mezi ně patří i volba typu kolimátoru.

Cílem této práce je stanovení optimálního typu kolimátoru podle typu vyšetření a použitého radiofarmaka. Optimální typ kolimátoru byl stanoven na základě měření citlivosti a polohové rozlišovací schopnosti kolimátorů používaných na gama kamerách v Ústavu nukleární medicíny VFN 1.LF UK. Dalšími parametry, které jsou v této práci měřeny a je porovnán jejich vztah k citlivosti kolimátoru, jsou volba matrice, volba velikosti energetického okna, vzdálenost snímaného cíle od detektoru, doba snímání a velikost aktivity. Všechna měření byla provedena s radionuklidem ^{99m}Tc .

2. SOUČASNÝ STAV

2.1 PRINCIP SCINTIGRAFIE

Scintigrafie je jednou z hlavních metod nukleární medicíny (obr 1). Jejím účelem je zobrazit distribuci radiofarmaka v organismu. Principem je aplikace a následné snímání vhodné chemické látky s navázaným radionuklidem, které dohromady tvoří radiofarmakum. Radiofarmakum se po vstupu do organismu distribuuje podle farmakokinetiky daného radiofarmaka. Existuje řada radiofarmak pro zobrazení funkce různých orgánů a tkání, např.: ledvin, skeletu, myokardu, jater, nádorové nebo zánětlivé tkáně. Míra lokální akumulace radiofarmaka v daném orgánu nebo tkáni závisí na intenzitě metabolických a funkčních dějů. Indikátorem případné poruchy funkce nebo léze, kterou můžeme dále lokalizovat a kvantifikovat, je akumulace radiofarmaka ve vyšetřovaném orgánu nebo tkáni.⁽⁵⁾



Obr 1: princip scintigrafie /4/

Pro zobrazení se preferují radionuklidy emitující záření gama v rozmezí 80 – 511 keV. Tato energie záření gama je dostatečná k tomu, aby záření v dostatečném množství proniklo tělem pacienta i z hluboce uložených orgánů a zároveň bylo snadno detekováno pomocí scintilačních krystalů. Ve vyšetřovaném objektu jsou ložiska o

zvýšené koncentraci radiofarmaka. Z každého místa se izotropně emituje záření gama, které proniká ven z vyšetřovaného objektu. Pro vznik obrazu je nutné provést kolimaci záření. Kolimace dosahujeme olověnou deskou umístěnou před detektorem. Tato olověná deska – kolimátor má mnoho drobných otvorů. Kolimátorem projdou pouze ty fotony gama, které se pohybují téměř ve směru osy otvorů. Ostatní fotony, které nejdou ve směru osy, jsou pohlceny olověnými přepážkami mezi otvory – septy. Kolimátor tak vytváří projekci distribuce radiofarmaka do roviny scintilačního detektoru. Scintilačním detektorem je velkoplošný tenký krystal NaI (Tl). Každý foton gama záření, který projde kolimátorem, vyvolá v krystalu scintilační záblesk. Scintilace v krystalu jsou snímány soustavou fotonásobičů, které převádějí scintilace na elektrické impulzy, které můžeme dále zpracovávat v elektrických obvodech.

Základním druhem snímání distribuce radiofarmaka je **scintigrafie statická** – jeden či několik scintigrafických obrazů dané oblasti. Dalším typem zobrazení je **dynamická scintigrafie**. Dynamickou scintigrafii provádíme tehdy, chceme-li sledovat děj měnící se v závislosti na čase. Je to série snímků vyšetřované oblasti v časových intervalech. U dynamické scintigrafie lze při hodnocení studie vytvářet křivky závislosti aktivity na čase a matematickou analýzou stanovovat kvantitativní parametry funkce jednotlivých tkání. **Scintigrafie tomografická** je prostorové trojrozměrné zobrazení požadované oblasti. Tato metoda se označuje jako **SPECT** (Single Photon Emission Computed Tomography) jednofotonová emisní počítačová tomografie. Je to série planárních snímků, kdy detektor kamery rotuje kolem pacienta. Z jednotlivých planárních snímků se počítačovou rekonstrukcí vytvoří tomografické obrazy.⁽²⁾

2.2 SCINTILAČNÍ KAMERA

Scintilační kamera se skládá z gantry jehož součástí jsou detektory (jeden či více), vyhodnocovací aparatura a ovládací konzole. Dále je součástí kamery zobrazovací systém a vyšetřovací lůžko. Součástí detektoru je kolimátor, scintilační krystal, světlovod, soustava fotonásobičů. Všechny tyto součásti detektoru, kromě kolimátoru, jsou stíněny olověným pouzdem.



Obr 2.: Scintigrafická kamera Infinia Hawkey firmy GE

Kolimátory jsou olověné desky s mnoha malými otvory. Slouží k vymezení směru fotonů, dopadajících na scintilační krystal. Fotony, které neprocházejí ve směru osy otvorů kolimátoru jsou pohlceny v olověných přepážkách (septech) mezi otvory. Kolimátory jsou výměnné a na jejich vlastnostech závisí kvalita obrazu.⁽⁵⁾

Scintilační kamera je vybavena velkoplošným **scintilačním krystalem**. Pro scintilační gama kamery se jako scintilačních krystalů používá výlučně NaI(Tl) především díky jeho vlastnostem a zvládnutí výroby i ve velkých rozměrech. Dříve se pro gama kamery vyráběly scintilační krystaly s kruhovým průměrem až 50 cm. Dnes se převážně vyrábějí detektory obdélníkového tvaru o velikosti až 45 x 60 cm.

Rozměrově menší krystaly se používají ke speciálním účelům např. pro SPECT mozku nebo SPECT myokardu. Tloušťka krystalu se ve většině případů volí 3/8" tedy 9,5 mm (1" = 25 mm). Jako reflexní materiál se používá TiO₂. Krystal je hermeticky uzavřen v tenkém hliníkovém pouzdře, aby se zabránilo přístupu světla a vlhkosti.

Na krystal naléhá nebo je pomocí světlovodu připojena soustava **fotonásobičů**. Světelné fotony jsou ve fotonásobiči konvertovány na elektrický signál. Počet fotonásobičů je pro jeden detektor mezi 30 – 100, běžný počet je kolem 55 - 60. Typická velikost čela fotonásobiče je 5,1 – 7,6 cm (2" – 3"). Tvar fotonásobiče může být kruhový, hexagonální i čtvercový. Nejvýhodnější tvar fotonásobiče z hlediska maximálního pokrytí scintilačního detektoru je hexagonální, případně čtvercový. Vzhledem k citlivosti fotonásobiče na zemské magnetické pole jsou fotonásobiče pokryty tenkou mumetalovou kovovou fólií. Pokud by kovovou fólii neměli, mohl by se při rotaci detektoru měnit zisk fotonásobiče. Někteří výrobci vkládají mezi fotonásobič a scintilační krystal světlovodič, většina výrobců pokládá fotonásobiče přímo na plochu detektoru. K zajištění dobrého optického kontaktu mezi krystalem a fotonásobičem se používají silikonové gely. Pro správnou funkci kamery je důležité, aby všechny fotonásobiče měli pokud možno shodné technické parametry. Ve většině moderních kamer je elektronika (předzesilovač, analyzátor, automatická kontrola zisku, AD převodník) přímo u jednotlivých fotonásobičů. Tímto způsobem se minimalizuje zkreslení signálu, které by mohlo být způsobeno dlouhým kabelovým vedením mezi detektorem a akviziční konzolí. ^(1,4)

2.3 KOLIMÁTORY

Primárním "optickým členem" scintilační kamery, kterým prochází jako první záření γ , je kolimátor. Kolimátory u scintilačních kamer jsou výměnné - existuje několik typů kolimátorů s jednoznačně definovanými vlastnostmi (tabulka 1. a 2.). Na vlastnostech kolimátoru proto do značné míry závisí konečná kvalita scintigrafického obrazu.⁽⁴⁾

Rozeznáváme kolimátory s paralelními otvory a kolimátory s jinak geometricky uspořádanými otvory (pro některé speciální typy vyšetření). Paralelní kolimátory rozdělujeme podle energie na kolimátory pro nízké, střední a vysoké energie. Nízkoenergetické paralelní kolimátory mohou být ještě rozlišeny podle jejich citlivosti a polohového rozlišení. U ostatních kolimátorů toto rozdělení nemá smysl neboť u nich nemůžeme dosáhnout ani dobrého polohového rozlišení, ani vysoké citlivosti.⁽⁴⁾

2.3.1 Kolimátory s paralelními otvory: patří mezi nejpoužívanější typy

- *Kolimátory pro nízké energie (LE - Low Energy)* (obr.3) - nejčastěji používané pro 140 keV ^{99m}Tc , jsou poměrně subtilní konstrukce s velkým počtem drobných otvorů (cca 30000), mezi nimiž jsou poměrně tenké přepážky (cca 0,2 - 0,5 mm).⁽⁴⁾



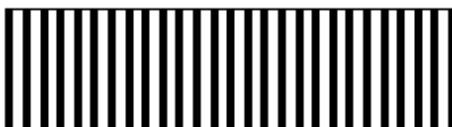
Obr. 3: Kolimátor pro nízké energie /4/

- *Kolimátory pro střední energie (Medium Energy)* (obr.4) - mají poměrně robustní konstrukci s tloušťkou přepážek mezi otvory cca 2-3mm. Používají se například pro ^{111}In (171 a 245 keV).⁽⁴⁾



Obr. 4: Kolimátor pro střední energie /4/

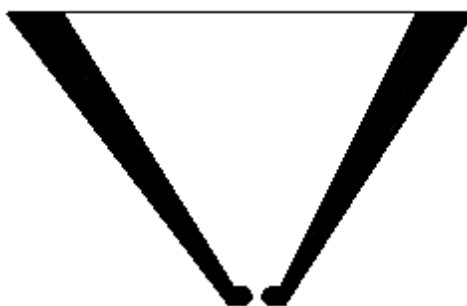
- *Kolimátory pro vysoké energie (HE - High Energy)* (obr.5) - musejí mít robustní konstrukci s dostatečně tlustými přepážkami mezi otvory, aby byla zabezpečena dostatečná absorpce záření γ přicházejícího z šikmých směrů a nedocházelo tak k prozařování přepážkami. Tyto kolimátory používáme například pro ^{131}I (364 keV).⁽⁴⁾



Obr. 5: Kolimátor pro vysoké energie /4/

2.3.2 Kolimátory s jinak geometricky uspořádanými otvory :

- **Kolimátor typu Pinhole** (obr.6) - je nejjednodušším druhem kolimátoru, protože má pouze jeden otvor, jehož průměr můžeme měnit. Jeho detekční účinnost je obecně velmi malá. Zvláštností je, že velikost obrazu velmi silně závisí na vzdálenosti zobrazovaného objektu od otvoru kolimátoru pinhole. Pokud je vzdálenost zobrazovaného předmětu od otvoru menší než vzdálenost otvoru od krystalu kamery, poskytuje pinhole zvětšený a převrácený obraz. Tento kolimátor se využívá při zobrazování štítné žlázy a kloubních spojení u dospělých i dětí.⁽⁴⁾



Obr. 6: Kolimátor pinhole /4/

- **Kolimátory konvergentní a divergentní** - jsou kolimátory se sbíhajícími nebo rozbíhajícími se otvory směřujícími do určitého bodu - *ohniska*. Tyto kolimátory poskytují zvětšený nebo zmenšený obraz.⁽⁴⁾

- **Divergentní kolimátory** (obr.7) - se používaly ke zmenšení obrazu v době, kdy gama kamery měly ještě malé zorné pole (kolem 25cm), takže velké orgány např. plíce se do zorného pole nevešly.⁽⁴⁾



Obr. 7: Kolimátor divergentní /4/

◦ **Konvergentní kolimátory** (obr. 8) – se používaly pro zobrazování malých orgánů jako je srdce, aby bylo lépe využito velké zorné pole kamery. Nevýhodou těchto kolimátorů je závislost měřítka zobrazení na vzdálenosti od čela kolimátoru. Technická zdokonalení scintilačních kamer vedoucí ke zvětšení zorného pole a zlepšení vnitřního rozlišení soustavy krystal+fotonásobiče odsunuly tyto druhy kolimátorů do historie.⁽⁴⁾



Obr. 8: Kolimátor konvergentní /4/

• **Kolimátory Fan Beam** – mají otvory konvergentní jen v jednom směru, zatímco v druhém směru jsou otvory paralelní - ohnisko je přímka (resp. úsečka). Tyto kolimátory se občas využívají u SPECT zobrazení mozku a myokardu. Jejich výhodou je, že mají relativně vysokou citlivost a zároveň dobré rozlišení i ve větších vzdálenostech od těla; právě u scintigrafie myokardu a mozku nemůžeme vzhledem k tvaru těla pacienta přiblížit detektor kamery dostatečně blízko.⁽⁴⁾

| NÁZEV | PRŮMĚR OTVORŮ (mm) | TLOUŠŤKA SEPT (mm) | POČET OTVORŮ | DĚLKA OTVORŮ (mm) |
|-------|--------------------|--------------------|--------------|-------------------|
| LEGP | 1,9 | 0,2 | 56560 | 35 |
| LEHR | 1,5 | 0,2 | 86300 | 35 |
| MEGP | 3,0 | 1,05 | 15210 | 58 |

tabulka 1: Parametry kolimátorů pro kameru Infinia (GE Medical)

| NÁZEV | PRŮMĚR OTVORŮ (mm) | TLOUŠŤKA SEPT (mm) | DĚLKA OTVORŮ (mm) |
|-------|--------------------|--------------------|-------------------|
| LEGP | 1,9 | 0,2 | 35 |
| LEHR | 1,5 | 0,16 | 35 |

tabulka 2: Parametry kolimátorů pro kameru MB 9200 (Mediso)

2.3.3 Rozdělení nízkoenergetických kolimátorů podle polohového rozlišení a citlivosti:

- **Kolimátory s vysokou citlivostí (HS - High Sensitivity)** - mají krátké a poněkud větší průměry otvorů (samozřejmě tenké přepážky), aby kolimátorem procházelo co nejvíce záření γ z většího prostorového úhlu pro každý otvor. Za tuto zvýšenou citlivost se však "platí" poněkud zhoršenou polohovou rozlišovací schopností zobrazení, která se navíc poměrně rychle zhoršuje se vzdáleností od čela kolimátoru. Kolimátory HS se nyní používají poměrně zřídka.⁽⁴⁾
- **Kolimátory s vysokým rozlišením (HR - High Resolution)** - mají delší a drobnější otvory (cca 1-2mm) s tenkými přepážkami (cca 0,2-0,4mm), takže každý otvor snímá záření z poměrně malého prostorového úhlu. Vyšší polohové rozlišení vede k poněkud nižší citlivosti (ve srovnání s kolimátory HS).⁽⁴⁾

- ***Kolimátory s ultra-vysokým rozlišením (UHR - Ultra High Resolution)*** - mají dlouhé a velmi drobné otvory (cca 1mm), při dostatečně tenkých přepážkách (cca 0,1-0,2mm), což zaručuje velmi vysokou polohovou rozlišovací schopnost, která se navíc jen pomaleji zhoršuje se vzdáleností od čela kolimátoru. Dosahuje se toho však bohužel za cenu výrazně snížené citlivosti (detekční účinnosti) - asi 4-krát, což činí tento kolimátor jen velmi omezeně použitelný. ⁽⁴⁾

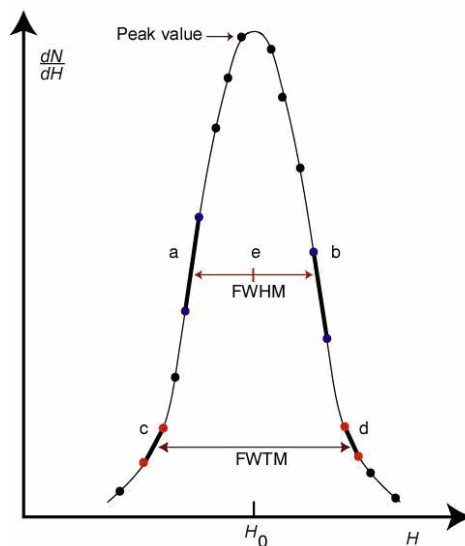
- ***Kolimátory s vhodným kompromisem mezi rozlišením a citlivostí se označují jako LEAP -Low Energy All Purpose***, jejich výhodou je jejich univerzálnost.

2.4 PARAMETRY KOLIMÁTORŮ

Mezi parametry důležité z hlediska použitého typu kolimátoru patří především citlivost a polohová rozlišovací schopnost (= prostorová rozlišovací schopnost).

2.4.1 Polohová (prostorová) rozlišovací schopnost

Polohovou rozlišovací schopností se rozumí šířka profilu bodového nebo čárového zdroje v polovině maximální výšky a označujeme ji jako FWHM (z angl. full width at half maximum). Čím je zobrazovací systém kvalitnější, tím je profil bodového nebo čárového zdroje vyšší, užší a štíhlejší, tj, bližší skutečnému profilu zobrazovaného objektu. Dva bodové resp.čárové zdroje od sebe zobrazovací systém rozliší jako diskrétní body nebo čáry, jestliže jsou od sebe vzdáleny o FWHM (obr.9). Nevýhodou FWHM je, že nerespektuje tvar celého profilu – různé profily bodového nebo čárového zdroje mohou mít stejnou hodnotu FWHM. Proto se někdy navíc udává šířka profilu také v desetíně maximální výšky – FWTM (z angl. full width at tenth maximum).⁽²⁾



Obr. 9: Polohová rozlišovací schopnost /3/

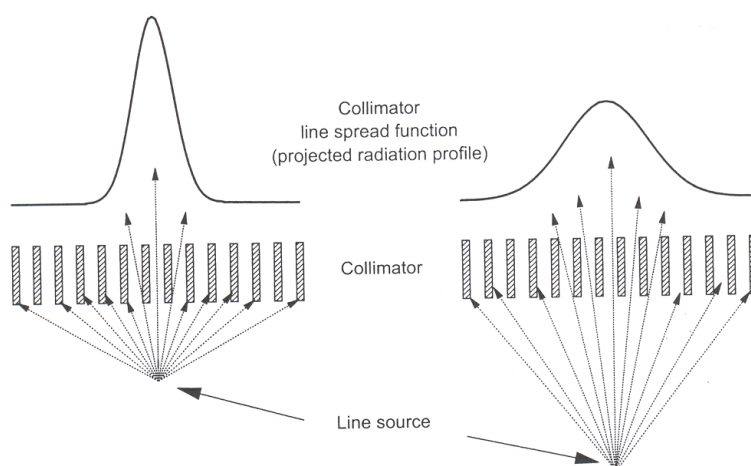
Polohová rozlišovací schopnost kamery je dána dvěma složkami - rozlišovací schopností kolimátoru a vnitřním rozlišením detektoru kamery. Polohová rozlišovací

schopnost kolimátoru závisí na průměru otvorů, šířce přepážek, výšce kolimátoru a závisí na vzdálenosti zobrazovaného objektu od kolimátoru. Dále se zde uplatňuje rozptyl záření γ na septech kolimátoru a prozařování záření γ septy kolimátoru.⁽⁴⁾

Vnitřní polohové rozlišení se zhoršuje s nižší energií, protože fotony o menší energii vytvoří méně světelných fotonů na jednu scintilaci a menší počet světelných fotonů způsobuje větší fluktuaci v jejich distribuci. Vnitřní polohové rozlišení také závisí na tloušťce krystalu. Při větší tloušťce krystalu dochází k většímu počtu rozptylů scintilačních fotonů než dosáhnou fotonásobičů a je větší pravděpodobnost detekce vícenásobného Comptonova rozptylu.

Dalším faktorem, který ovlivňuje vnitřní polohové rozlišení je velikost a počet fotonásobičů. Použitím fotonásobičů s menším průměrem se vnitřní polohové rozlišení zlepšuje, stejně tak i s větším počtem fotonásobičů. Pro ^{99m}Tc se vnitřní polohové rozlišení (FWHM) pohybuje v rozmezí 2,9 – 4,5 mm. Lepší polohové rozlišení než 3 mm není možné dosáhnout díky omezení světelného výtěžku NaI(Tl). V praxi se na polohové rozlišovací schopnosti nejvíce podílí polohové rozlišení kolimátoru.

Rozlišovací schopnost kolimátoru je velmi ovlivněna vzdáleností zdroje od kolimátoru. Se zvětšující se vzdáleností zdroje od kolimátoru se zhoršuje rozlišovací schopnost kolimátoru, zvětšuje se šířka profilu odezvy čárového nebo bodového zdroje. Proto je nezbytně nutné, aby při vyšetření pacienta byly detektory kamery co nejbližší k pacientovi.⁽³⁾



Obr.10: Vliv vzdálenosti zdroje od kolimátoru na rozlišení kolimátoru /3/

Celková polohová rozlišovací schopnost systému R_{sys} je dána: ⁽⁴⁾

$$R_{sys} = \sqrt{R_{vnit}^2 + R_{kol}^2}$$

Kde R_{vnit} je vnitřní polohová rozlišovací schopnost detektoru a R_{kol} je polohová rozlišovací schopnost kolimátoru. V praxi se polohová rozlišovací schopnost systému nepočítá dle výše uvedeného vztahu, ale stanovuje se měřením. Metodika měření polohové rozlišovací schopnosti, která je uvedena v následující kapitole je uvedena podle doporučení SÚJB (Státní úřad pro jadernou bezpečnost).⁽⁴⁾

2.4.2 Citlivost kolimátoru

Citlivost je definována jako četnost impulzů měřená s plošným zdrojem fotonového záření o průměru 10 cm vztažená na jednotkovou aktivitu zdroje ($\text{imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$). Nejčastěji se citlivost udává pro $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Citlivost dané kombinace kolimátoru a detektoru je stejná při planárním i SPECT zobrazování. ⁽²⁾

2.4.3 Vztah mezi citlivostí a polohovou (prostorovou) rozlišovací schopností

Mezi citlivostí detektoru k a jeho celkovým polohovým rozlišením r_c platí přibližný vztah $k \sim r_c^{-2}$ (obě veličiny jsou měřeny s $^{99\text{m}}\text{Tc}$, pronikání fotonů 140 keV přepážkami mezi otvory kolimátoru se předpokládá velmi malé). Uvedený vztah se dá vyjádřit slovy tak, že čím je lepší polohové rozlišení zobrazovacího systému, tj. čím je menší FWHM, tím je menší jeho citlivost. Důsledkem menší citlivosti přístroje jsou nižší hustoty impulzů v obraze a vyšší statistický šum. ⁽²⁾

3. CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA

3.1 Cíl práce

Cílem této práce je stanovit hlavní parametry různých typů kolimátoru u scintilačních kamer umístěných v Ústavu nukleární medicíny 1.LF UK a VFN. Na základě experimentálních výsledků zhodnotit vliv podmínek měření a vhodnost kolimátorů pro vybraná vyšetření.

3.2 Hypotéza

Pro různá vyšetření s ^{99m}Tc je nejvhodnější kolimátor s vysokým polohovým rozlišením (typ LEHR).

4. METODIKA MĚŘENÍ

4.1 Citlivost kolimátoru

Metodika měření dle doporučení SÚJB:

- Petriho miska o průměru nejméně 10 cm se naplní roztokem ^{99m}Tc , jehož aktivita byla předtím pečlivě změřena v měřiči aktivity (studnová ionizační komora); tloušťka kapaliny v misce nesmí převýšit 3 mm.
- Miska se umístí v centru zorného pole detektoru ve vzdálenosti 10 cm od čela kolimátoru. Měřená četnost impulzů nesmí převýšit $2 \cdot 10^4 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$; statistická chyba měřeného počtu impulzů musí být menší než 1%.
- Citlivost se vypočte dělením změřené četnosti impulzů (korigované na pozadí) aktivitou roztoku.⁽⁶⁾

Při měření citlivosti jsme postupovali podle metodiky měření uvedené v doporučení SÚJB (viz výše). Aktivitu roztoku jsem změřila na měřiči aktivity Bqmetr 3. Tento měřič aktivity je ročně kontrolován ČMI (Český Meteorologický Institut), tím je zajištěna přesnost měření aktivity $\pm 10\%$. Po aplikaci roztoku do misky, byl změřen zbytek stříkačky opět v měřiči aktivity a naměřená hodnota odečtena od původní hodnoty. Od naměřené hodnoty aktivity bylo odečteno pozadí. Všechny hodnoty jsme změřili 4x a z naměřených hodnot byl vypočítán aritmetický průměr podle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

kde x_i jsou naměřené hodnoty.

Při vyhodnocení citlivosti byla naměřená aktivita přepočtena k času měření citlivosti na kameře podle přeměnového zákona:

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}(t_2 - t_1)}$$

kde A je aktivita v čase t_2 , A_0 je aktivita v čase t_1 ,

$T_{1/2}$ je poločas přeměny ^{99m}Tc (6,02 hodin).

4.2 Polohová rozlišovací schopnost

Metodika měření dle doporučení SÚJB:

- Trubička o vnitřním průměru 1 mm nebo menším (nejlépe 0,5 mm) a délce nejméně 20 cm (nejlépe skleněná pipeta) se naplní roztokem obsahujícím zvolený radionuklid (měrná aktivita kolem $700 \text{ MBq}\cdot\text{ml}^{-1}$) a umístí se ve vzdálenosti 10 cm od čela použitého kolimátoru v rovině kolmé k ose detektoru.
- Zhotoví se obraz čárového zdroje v matici, při níž je velikost pixelu menší nebo rovna $0,1 \text{ FWHM}$ (volí se nejjemnější matice, jež je k dispozici); v pixelu ve středu obrazu musí být alespoň 10.000 impulzů.
- Kolmo k čárovému zdroji se obrazem vede profil o šířce 3 pixelů a vyhodnotí se jeho pološířka FWHM v mm.
- Tentýž postup se použije po přemístění čárového zdroje do jiných míst zorného pole.⁽⁶⁾

Pro měření polohové rozlišovací schopnosti jsme použili dvě skleněné pipety, každá o vnitřním průměru 1mm. Pipety byly umístěny na papírovou destičku tak, aby vzdálenost mezi nimi byla přesně 10 cm. Toto uspořádání slouží ke kontrole převodního faktoru velikosti pixelu na mm. Pipety byly naplněny roztokem o objemové aktivitě cca 700 MBq/ml . Při akvizici na kamerách byly pipety umístěny ve vzdálenosti 10 cm od kolimátoru, velikost matice byla volena 1024×1024 (nejjemnější dostupná matice). Polohovou rozlišovací schopnost jsme měřili pro osu x a pro osu y. Stanovení polohové rozlišovací schopnosti (FWHM , FWTM) jsme provedli pomocí programu, který byl napsán v Matlabu radiologickým fyzikem pracoviště (Ing. Jiří Trnka). Šířku zvoleného profilu jsme volili jeden pixel. Dále bylo v programu třeba volit počet bodů, kterými se naměřený profil fituje Gaussovou funkcí. Tento počet bodů byl měněn tak, aby vždy fitovaný profil odpovídal co nejlépe naměřenému profilu.

Pro každý kolimátor a každou osu jsme zvolili vždy 3 místa pro vyhodnocení profilu. Výsledná hodnota polohové rozlišovací schopnosti je tedy vypočtena jako aritmetický průměr ze 6 hodnot (3 profily pro 2 pipety) dle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Dále jsem vypočetla výběrovou směrodatnou odchylku dle vztahu:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Citlivost a polohová rozlišovací schopnost byla stanovena pro následující kolimátory: LEHR, LEGP, MEGP (kamera Infinia a Infinia/Hawkeye firmy GE Medical) a LEHR, LEGP (kamera MB 9200 firmy Mediso).

| NÁZEV | NOMINÁLNÍ ENERGIE (keV) | PRŮNIK PŘEPÁŽKAMI PŘI NOMINÁLNÍ ENERGII | SYSTÉMOVÉ ROZLIŠENÍ V 10 cm (FWHM mm) | SYSTÉMOVÁ CITLIVOST (imp/s/MBq), okno 20% |
|-------------|-------------------------|---|---------------------------------------|---|
| LEGP | 140 | 1,10 % | 8,9 | 120 (^{99m}Tc) |
| LEHR | 140 | 1,00 % | 7,4 | 68 (^{99m}Tc) |
| MEGP | 300 | 1,90 % | 11,6 | 90 (^{67}Ga) |

tabulka 3: Parametry kolimátorů pro kameru MB 9200 (Mediso) dle údajů výrobce

| NÁZEV | NOMINÁLNÍ ENERGIE (keV) | PRŮNIK PŘEPÁŽKAMI PŘI NOMINÁLNÍ ENERGII | SYSTÉMOVÉ ROZLIŠENÍ V 10 cm (FWHM mm) | SYSTÉMOVÁ CITLIVOST (imp/sec/MBq), okno ±10% |
|-------------|-------------------------|---|---------------------------------------|--|
| LEGP | 140 | 0,8 % (^{99m}Tc) | 9,0 | 121 |
| LEHR | 140 | 0,3 % (^{99m}Tc) | 7,4 | 72 |
| MEGP | 300 | 2,0 % (^{67}Ga) | 9,4 | 65 |

tabulka 4: Parametry kolimátorů pro kameru Infinia (GE Medical) dle údajů výrobce

5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

5.1 Citlivost

5.1.1 Stanovení vlivu akvizičních pomínek na citlivost

Před stanovením citlivosti pro jednotlivé kolimátory jsem si ověřila závislost citlivosti na jednotlivých akvizičních parametrech.

5.1.1.1 Vliv velikosti misky

Pro měření byly použity 3 velikosti misek – průměr 8,8 cm, 9,6 cm, 14,2 cm. Všechny misky byly vyrobeny ze stejného materiálu – skla. Při měření bylo postupováno dle výše uvedené metodiky měření.

Výsledky:

1. miska

M1 - průměr – 14,2 cm

detektor 1 - $C = 79,3 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (101,7%)

detektor 2 - $C = 78,3 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (100,4%)

2. miska

M2 – průměr – 9,6 cm

detektor 1 - $C = 78,0 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (100%)

detektor 2 - $C = 77,4 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (99,2%)

3. miska

M3 – průměr – 8,8 cm

detektor 1 - $C = 78,2 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (100,2%)

detektor 2 - $C = 77,3 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (99,1%)

V závorce je uvedena relativní změna citlivosti, miska č. 2 je 100%. Z naměřených hodnot vyplývá, že při rozměrech misky 8,8 – 14,2 cm se naměřená

citlivost liší maximálně o 2,6%. Pro další měření bude použita miska č.2, jejíž rozměr se blíží doporučení SÚJB.

5.1.1.2 Vliv vzdálenosti

Miska č.2 (M2) byla měřena ve třech různých vzdálenostech od kolimátoru – přímo na kolimátoru, ve vzdálenosti 8,4 cm a 10,8 cm. Vzdálenost byla zajištěna materiálem, jehož hustota je blízká vzduchu (polystyren). Měření citlivosti bylo provedeno pro jeden typ kamery a jeden detektor.

Výsledky:

1. vzdálenost – přímo na kolimátoru – $C = 77,4 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (100,2%)
2. vzdálenost – 8,4 cm – $C = 77,2 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (100%)
3. vzdálenost – 10,8 cm – $C = 76,8 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (99,4%)

Při porovnání výsledků jsem došla k závěru, že v rozmezí vzdáleností 0 cm - 10,8 cm od kolimátoru se naměřená citlivost liší max. o 0,5%. Pro jednodušší manipulaci, nastavení a reprodukovatelnost bude citlivost při dalších měřeních měřena přímo na kolimátoru.

5.1.1.3 Vliv velikosti matice

Pro stanovení vlivu velikosti akviziční matice na citlivost kolimátoru jsem použila tři různé matice: 128 x 128, 256 x 265, 512 x 512. Citlivost byla stanovena pomocí misky č.2, pro jeden detektor kamery (D2, GE Inifnia).

Výsledek:

- Matice 128x128 – $C = 75,3 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (99,9%)
Matice 256x256 – $C = 75,4 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (100%)
Matice 512x512 – $C = 75,3 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (99,9%)

Z uvedených výsledků vyplývá, že stanovení citlivosti je nezávislé na velikosti akviziční matice. Citlivost není typem matice ovlivněna. Pro porovnání citlivosti jednotlivých kolimátorů bude použita matice o velikosti 256 x 256. Tato matice se používá ve většině klinických studií.

5.1.1.4 Vliv aktivity

Pro měření byla použita miska č.2 pokaždé s jinou aktivitou. Měřeno bylo na detektoru D2, matice 256x256. 1. aktivita byla 94,1 MBq ^{99m}Tc (čas snímání 4 minuty), 2. aktivita byla 28,2 MBq ^{99m}Tc (čas snímání 16 minut).

Výsledky:

1. aktivita – $C = 75,4 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$

2. aktivita – $C = 75,5 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$

Naměřená citlivost pro obě hodnoty aktivity se neliší, jelikož naměřená četnost pro obě hodnoty aktivity leží v oblasti, kde nedochází ke zkreslení četnosti impulzů vlivem superpozice impulzů.

5.1.1.5 Vliv velikosti nastaveného energetického okna

Posledním parametrem, pro který jsem ověřila závislost citlivosti byla velikost energetického okna. Pro klinické studie se zpravidla používá šířka energetického okna $\pm 10\%$. Výrobci udávají citlivost při šířce energetického okna $\pm 10\%$. Pro porovnání bylo měřeno s šířkou energetického okna $\pm 10\%$ a $\pm 7,5\%$. Při měření bylo vždy energetické okno nastaveno symetricky na fotopík ^{99m}Tc 140 keV.

Výsledek:

Okno 7,5% - detektor 1 - $C = 72,0 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (100%)

- detektor 2 – $C = 71,6 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (99,4%)

Okno 10% - detektor 1 - $C = 77,1 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (107%)

- detektor 2 - $C = 76,0 \text{ imp.s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ (106%)

Při použití šíře energetického okna $\pm 7,5\%$ je citlivost nižší o 7,6% než u šíře energetického okna $\pm 10\%$. Při dalším měření bude proto energetické okno nastaveno na $\pm 10\%$.

5.1.2 Měření citlivosti kamer

Pro měření citlivosti na jednotlivých kamerách jsem použila následující parametry: Misku č.2, vzdálenost – přímo na detektoru, matice 256x256, energetické okno nastaveno na $\pm 10\%$ symetricky na 140 keV, pro všechna měření byl použit radionuklid ^{99m}Tc (tabulka 5).

5.1.2.1 Citlivost – Infinia – kolimátor LEHR

Výsledky:

- detektor 1 C = 80,8 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (100%)
- detektor 2 C = 79,9 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (98,9%)

Naměřená citlivost mezi detektory pro LEHR se liší o 1,1%, což je v toleranci, neboť doporučení SÚJB uvádí toleranci 10%.

5.1.2.2 Citlivost – Infinia Hawkeye – kolimátor LEHR

Výsledky:

- detektor 1 C = 79,3 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (100%)
- detektor 2 C = 80,8 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (101,9%)

Naměřená citlivost mezi detektory pro LEHR se liší o 1,9%.

5.1.2.3 Citlivost - Infinia Hawkeye – kolimátor LEGP

Výsledky:

- detektor 1 C = 139,4 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (100%)
- detektor 2 C = 137,8 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (98,9%)

Naměřená citlivost mezi detektory pro LEGP se liší o 1,1%.

5.1.2.4 Citlivost - *Infinia Hawkeye* – kolimátor MEGP

Výsledky:

- detektor 1 C = 79,0 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (100%)

- detektor 2 C = 78,0 imp.s⁻¹. MBq⁻¹ (98,7%)

Naměřená citlivost mezi detektory pro MEGP se liší o 1,3%.

5.1.2.5 Citlivost – MB 9200 – kolimátor LEHR

Výsledky:

C = 63,3 imp.s⁻¹. MBq⁻¹

5.1.2.6 Citlivost – MB 9200 – kolimátor LEGP

Výsledky:

C = 145,3 imp.s⁻¹. MBq⁻¹

Naměřená hodnota citlivosti LEHR kolimátoru (80,1 imp.s⁻¹MBq⁻¹) je větší o 11,3% než hodnota uvedená výrobcem. Pro LEGP je naměřená hodnota citlivosti větší o 14,6%. Pro MEGP kolimátor nebylo možné porovnat naměřenou hodnotu citlivosti s hodnotou výrobce neboť výrobce udává citlivost pro jiný radionuklid (⁶⁷Ga), který není k dispozici. Pro LEHR kolimátor firmy Mediso jsem naměřila o 7,4% lepší citlivost než udává výrobce. Pro LEGP se naměřená citlivost liší o 13% od hodnoty výrobce (tabulka 5).

Z naměřených výsledků vyplývá, že kolimátor GE LEHR má citlivost o 73% horší než LEGP a téměř stejnou citlivost jak kolimátor MEGP (rozdíl jsou 2%). Pro kolimátor LEHR firmy Mediso jsem naměřila o 130% horší citlivost než pro kolimátor LEGP (tabulka 6).

| Naměřená citlivost (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) | Infinia(GE) | Infinia Hawkeye (GE) | | | MB 9200 (Mediso) | |
|--|-------------|----------------------|-------------|---------------------------|------------------|-------------|
| | | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR | LEGP |
| Kolimátor | LEHR | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR | LEGP |
| Detektor 1 | 80,8 | 79,3 | 139,4 | 79,0 | 63,3 | 145,3 |
| Detektor 2 | 79,9 | 80,8 | 137,8 | 78,0 | - | - |
| průměr | 80,4 | 80,1 | 138,6 | 78,5 | 63,3 | 145,3 |
| Citlivost udaná výrobce (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) | 72 | 72 | 121 | 65 (⁶⁷ Ga) | 68 | 120 |
| % rozdíl | 11,7% | 11,3% | 14,6% | --- | 7,4% | 13% |

tabulka 5: Porovnání naměřené citlivosti kolimátorů s hodnotou výrobce

| Naměřená citlivost (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) | Infinia(GE) | Infinia Hawkeye (GE) | | | MB 9200 (Mediso) | |
|--|-------------|----------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
| | | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR | LEGP |
| Kolimátor | LEHR | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR | LEGP |
| Detektor 1 | 80,8 | 79,3 | 139,4 | 79,0 | 63,3 | 145,3 |
| Detektor 2 | 79,9 | 80,8 | 137,8 | 78,0 | - | - |
| D2/D1 | 1,1% | 1,9% | 1,1% | 1,3% | - | - |
| průměr | 80,4 | 80,1 | 138,6 | 78,5 | 63,3 | 145,3 |
| Citlivost | 101% | 100% | 173% | 98% | 100% | 230% |

tabulka 6: Porovnání naměřené citlivosti jednotlivých kolimátorů

5.2 Polohová rozlišovací schopnost

Pro měření polohové rozlišovací schopnosti na jednotlivých kamerách byly použity následující parametry: energetické okno nastaveno na $\pm 10\%$ symetricky na 140 keV, matice 1024x1024.

Při měření bylo postupováno dle výše uvedené metodiky měření. Následující uvedené hodnoty polohové rozlišovací schopnosti jsou aritmetické průměry vypočteny ze 6 hodnot a jejich výběrová standardní odchylka.

5.2.1 Kamera: MB 9200

Výsledky:

FWHM:

LEHR osa x – $7,2 \pm 0,2$ mm

osa y – $7,3 \pm 0,2$ mm

LEGP osa x – $9,4 \pm 0,2$ mm

osa y – $9,4 \pm 0,1$ mm

FWTM:

LEHR osa x – $13,1 \pm 0,3$ mm

osa y – $13,3 \pm 0,4$ mm

LEGP osa x – $17,1 \pm 0,3$ mm

osa y – $17,1 \pm 0,2$ mm

Z naměřených hodnot pro kolimátory LEHR a LEGP kamery MB 9200 vyplývá, že kolimátor LEHR má o 30,6% lepší FWHM i FWTM než kolimátor LEGP. Naměřené hodnoty se od hodnot výrobce (FWHM: LEHR 6,5 mm a LEGP 8,2 mm) liší o -12,3% pro LEHR a -14,6% pro LEGP.

5.2.2 Kamera: Infinia

Výsledky:

FWHM

LEHR – detektor 1 - osa x – $8,1\pm 0,2$ mm

- osa y – $7,8\pm 0,1$ mm

– detektor 2 - osa x – $8,2\pm 0,2$ mm

- osa y – $7,9\pm 0,1$ mm

FWTM:

LEHR – detektor 1 - osa x – $13,5\pm 0,2$ mm

- osa y – $13,6\pm 0,2$ mm

– detektor 2 - osa x – $13,8\pm 0,4$ mm

- osa y – $14,0\pm 0,3$ mm

5.2.3 Kamera Infinia Hawkeye

Výsledky:

FWHM:

LEHR – detektor 1 - osa x – $8,2\pm 0,1$ mm

- osa y – $7,9\pm 0,2$ mm

– detektor 2 - osa x – $8,3\pm 0,1$ mm

- osa y – $7,9\pm 0,2$ mm

LEGP – detektor 1 - osa x – $9,2\pm 0,1$ mm

- osa y – $9,2\pm 0,1$ mm

– detektor 2 - osa x – $9,3\pm 0,1$ mm

- osa y – $9,6\pm 0,2$ mm

MEGP – detektor 1 - osa x – $9,1\pm 0,1$ mm

- osa y – $9,2\pm 0,2$ mm

– detektor 2 - osa x – $9,1\pm 0,1$ mm

- osa y – $9,3\pm 0,2$ mm

FWTM:

LEHR – detektor 1 - osa x – $13,6\pm 0,3$ mm

- osa y – $13,8\pm 0,3$ mm

– detektor 2 - osa x – $13,8\pm 0,3$ mm

- osa y – $13,8\pm 0,3$ mm

LEGP – detektor 1 - osa x – $16,3\pm 0,2$ mm

- osa y – $16,7\pm 0,3$ mm

– detektor 2 - osa x – $16,4\pm 0,1$ mm

- osa y – $17,1\pm 0,2$ mm

MEGP – detektor 1 - osa x – $16,6\pm 0,2$ mm

- osa y – $16,0\pm 0,2$ mm

– detektor 2 - osa x – $16,2\pm 0,1$ mm

- osa y – $16,1\pm 0,2$ mm

Z naměřených výsledků jsem zjistila, že polohová rozlišovací schopnost v ose x (FWHM i FWTM) se liší maximálně o 5% od osy y. Dále jsem porovnávala rozdíl polohové rozlišovací schopnosti mezi jednotlivými detektory. Maximální rozdíl mezi detektory byl 4% (FWHM, LEGP, Infinia Hawkeye v ose y). Pro ostatní detektory se rozdíl v polohové rozlišovací schopnosti pohyboval kolem 2% (tabulka 7 a tabulka 8).

Naměřené hodnoty polohové rozlišovací schopnosti se pro LEHR kolimátor (FWHM = 8,0 mm, průměr z obou kamer i detektorů) liší o 8,1% od hodnoty uvedené výrobcem (LEHR 7,4 mm). Pro LEGP se naměřená FWHM = 9,3 mm liší o 4,4% od hodnoty uvedenou výrobcem (FWHM = 9,0 mm). Pro MEGP kolimátor nebylo možné porovnat naměřené hodnoty s hodnotami výrobce neboť výrobce udává FWHM pro jiný radionuklid (^{67}Ga), který není k dispozici (tabulka 9).

Dále z naměřených hodnot vyplývá, že kolimátor GE LEHR má o 18% (FWHM) a 21% (FWTM) lepší polohové rozlišení než LEGP a o 15% (FWHM) a 18% (FWTM) lepší než MEGP. Hodnota polohového rozlišení LEGP a MEGP pro $^{99\text{m}}\text{Tc}$ je téměř stejná. Pro LEHR kolimátor firmy Mediso jsem naměřila o 30% lepší polohovou rozlišovací schopnost (FWHM i FWTM) než pro kolimátor LEGP (tabulka 9 a 10).

| Polohová rozlišovací schopnost (mm) | | Infinia(GE) | Infinia Hawkeye (GE) | | | MB 9200 (Mediso) | |
|-------------------------------------|-------|-------------|----------------------|------|------|------------------|------|
| FWHM | | LEHR | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR | LEGP |
| D 1 | osa x | 8,1 | 8,2 | 9,2 | 9,1 | 7,2 | 9,4 |
| | osa y | 7,8 | 7,9 | 9,2 | 9,2 | 7,3 | 9,4 |
| | y/x | 3,7% | 3,7% | 0,0% | 1,1% | 1,4% | 0,0% |
| D 2 | osa x | 8,2 | 8,2 | 9,3 | 9,1 | - | - |
| | osa y | 7,9 | 7,9 | 9,6 | 9,3 | | |
| | y/x | 3,7% | 4,8% | 3,2% | 2,2% | | |
| D2/D1 | osa x | 1,2% | 0,0% | 1,1% | 0,0% | - | - |
| | osa y | 1,2% | 0,0% | 4,3% | 1,1% | - | - |

tabulka 7: Polohová rozlišovací schopnost FWHM

| Polohová rozlišovací schopnost (mm) | | Infinia(GE) | Infinia Hawkeye (GE) | | | MB 9200 (Mediso) | |
|-------------------------------------|-------|-------------|----------------------|------|------|------------------|------|
| FWTM | | LEHR | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR | LEGP |
| D 1 | osa x | 13,5 | 13,6 | 16,3 | 16,6 | 13,1 | 17,1 |
| | osa y | 13,6 | 13,8 | 16,7 | 16,0 | 13,3 | 17,1 |
| | y/x | 0,7% | 1,5% | 2,5% | 3,6% | 1,5% | 0,0% |
| D 2 | osa x | 13,8 | 13,8 | 16,4 | 16,2 | - | - |
| | osa y | 14,0 | 13,8 | 17,1 | 16,1 | | |
| | y/x | 1,4% | 0,0% | 4,3% | 0,7% | | |
| D2/D1 | osa x | 2,2% | 1,5% | 0,6% | 2,4% | - | - |
| | osa y | 2,9% | 0,0% | 2,4% | 0,6% | - | - |

tabulka 8: Polohová rozlišovací schopnost FWTM

| Polohová rozlišovací schopnost (mm) | Infinia(GE) | Infinia Hawkeye (GE) | | | MB 9200 (Mediso) | |
|--|-------------|----------------------|------|----------------------------|------------------|------|
| | | LEHR | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR |
| Detektor 1 | 8,0 | 8,0 | 9,2 | 9,2 | 7,3 | 9,4 |
| Detektor 2 | 8,1 | 8,0 | 9,5 | 9,2 | - | - |
| průměr | 8,0 | 8,0 | 9,4 | 9,2 | - | - |
| FWHM výrobce (mm) | 7,4 | 7,4 | 9,0 | 9,4 (⁶⁷ Ga) | 7,4 | 8,9 |
| % rozdíl | 8,1% | 8,1% | 4,4% | --- | 1,4% | 5,6% |
| FWHM_{měř} | 100% | 100% | 118% | 115% | 100% | 129% |

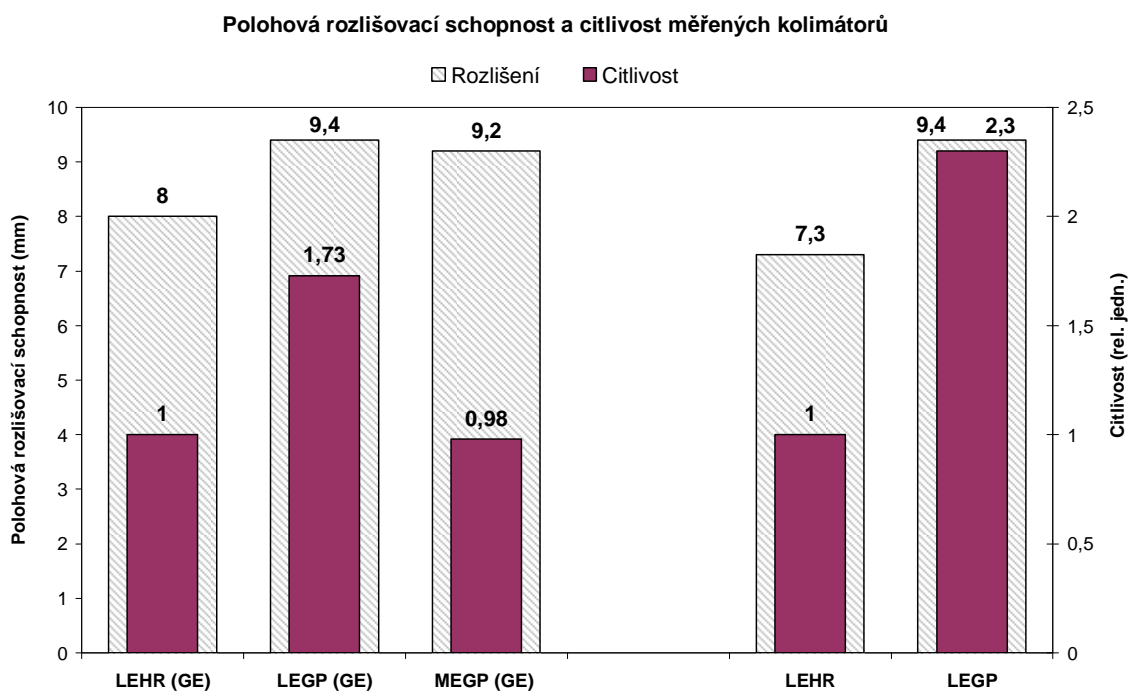
tabulka 9: Porovnání naměřených hodnot FWHM s hodnotami výrobce

| Polohová rozlišovací schopnost (mm) | Infinia(GE) | Infinia Hawkeye (GE) | | | MB 9200 (Mediso) | |
|--|-------------|----------------------|-------|-------|------------------|------|
| | | LEHR | LEHR | LEGP | MEGP | LEHR |
| Detektor 1 | 13,6 | 13,7 | 16,5 | 16,3 | 13,2 | 17,1 |
| Detektor 2 | 13,9 | 13,8 | 16,8 | 16,2 | - | - |
| průměr | 13,75 | 13,75 | 16,65 | 16,25 | - | - |
| FWTM_{měř} | 100% | 100% | 121% | 118% | 100% | 130% |

tabulka 10: Porovnání naměřených hodnot FWTM

Další zajímavé porovnání je mezi kolimátory stejného typu od různého výrobce. Kolimátor LEHR firmy GE má o 9% horší polohové rozlišení než stejný typ kolimátoru firmy Mediso. Tento výsledek je plně v souladu s očekáváním, neboť kolimátor LEHR firmy Mediso má ve srovnání s LEHR firmy GE tenší přepážku mezi otvory o 0,04 mm. Ostatní parametry kolimátoru (průměr otvorů a výška kolimátoru) je stejná. Oba kolimátory LEGP firmy GE i firmy Mediso mají naprosto identické parametry, což je opět v souladu se stejnou naměřenou hodnotou polohové rozlišovací schopnosti.

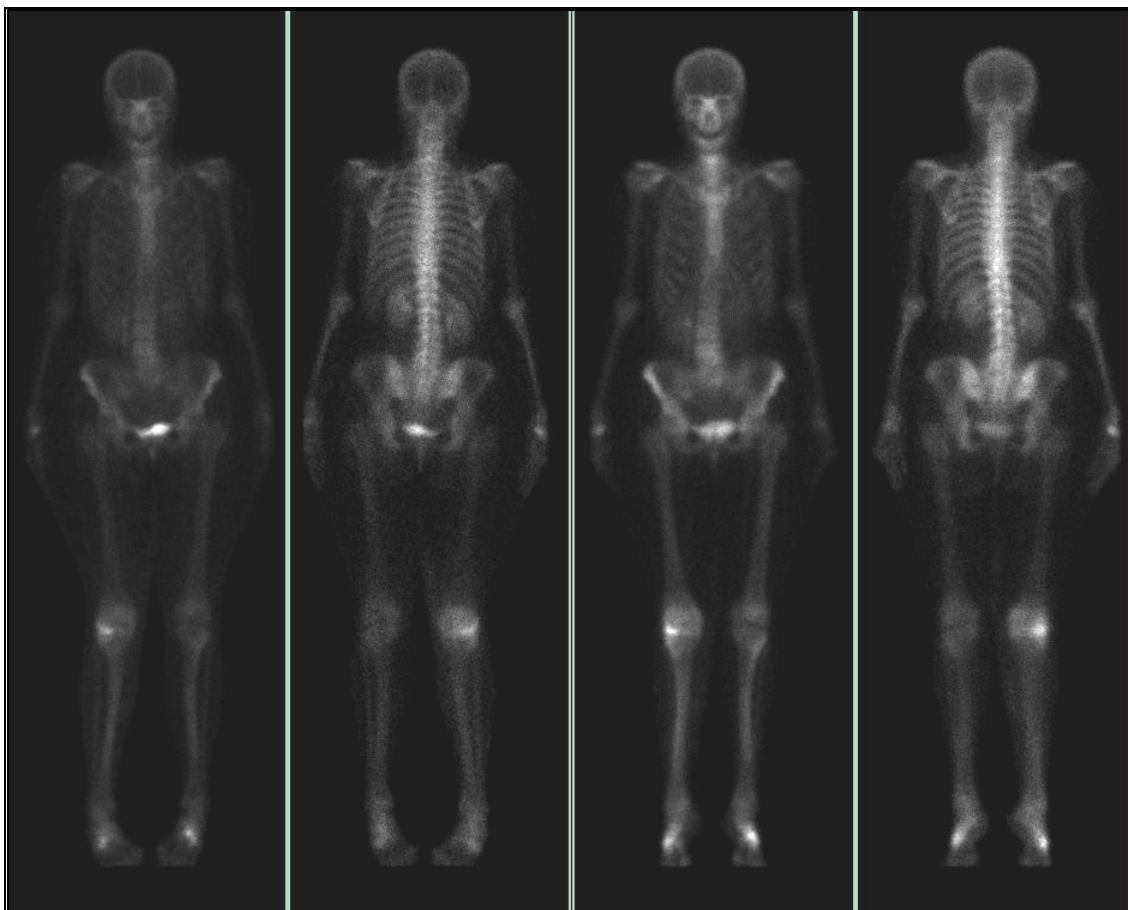
Grafické znázornění výsledných hodnot polohové rozlišovací schopnosti a citlivosti měřených kolimátorů je uvedeno na obr. 11.



Obr. 11: Grafické znázornění výsledků pro měřené kolimátory

5.3 Klinické ověření výsledků

Pro ověření našich výsledků jsme provedli u jednoho pacienta v Ústavu nukleární medicíny 1.LF UK a VFN scintigrafii skeletu (aplikovaná aktivita 700 MBq) na kameře Infinia Hawkeye za použití kolimátoru LEHR a poté u stejného pacienta stejnou studií za stejných akvizičních podmínek s kolimátorem LEGP. Tímto vyšetřením jsme si ověřili, že kolimátor LEGP je pro scintigrafii skeletu nevhodný díky jeho horší polohové rozlišovací schopnosti (viz obr.12:zleva:LEHR, LEHR, LEGP, LEGP). Zejména je horší polohové rozlišení u LEGP patrné na předozadních snímcích v oblasti lumbální páteře. Menší citlivost LEHR lze částečně vykompenzovat delší dobou vyšetření.



Obr. 12: Scintigrafie skeletu – použití kolimátoru LEHR a LEGP

6. DISKUSE

V této práci jsem se zabývala měřením dvou základních parametrů kolimátorů – citlivosti a polohové rozlišovací schopnosti. Měření byla provedena pro kolimátory typu LEHR, LEGP (pro dva různé výrobce) a MEGP. Z měření vyplynulo, že citlivost nezávisí na velikosti akviziční matice, na velikosti misky v rozmezí průměru 8,8 cm až 14,2 cm a je téměř stejná při měření ve vzdálenosti 0 cm až 10 cm od kolimátoru. Citlivost závisí na šířce energetického okna, proto je třeba dát pozor při porovnávání citlivosti (např. při porovnání dvou kamer), za jakých podmínek byla citlivost stanovena.

Porovnáním citlivosti detektorů jedné kamery jsme zjistili, že se citlivost mezi detektory jedné kamery liší maximálně o 2%. Tato hodnota je v souladu s hodnotami uvedenými v odborné literatuře i v národním doporučení SÚJB, které uvádí toleranci rozdílné citlivosti detektorů maximálně 10%.

Při měření polohové rozlišovací schopnosti jsem dospěla k následujícím výsledkům. Polohová rozlišovací schopnost v ose x a v ose y se liší maximálně o 5% a polohová rozlišovací schopnost naměřená pro detektory jedné kamery se liší maximálně o 4%.

Dalším cílem této práce bylo porovnání stejného typu kolimátoru (LEHR a LEGP) dvou různých výrobců (GE a Mediso). Kolimátor LEHR firmy Mediso má pouze o 0,04 mm tenčí přepážky, jinak jsou jeho parametry identické s LEHR GE. Této skutečnosti odpovídá i lepší polohová rozlišovací schopnost o 9%. Kolimátory LEGP obou firem mají identickou geometrii, naměřené hodnoty polohové rozlišovací schopnosti jsou stejné a hodnoty citlivosti se liší o 8%.

7. ZÁVĚR

Tato práce byla provedena na Ústavu nukleární medicíny 1.LF UK a VFN v Praze pro 3 scintilační kamery, dvě SPECT kamery Infinia firmy GE a jednu planární kameru MB9200 firmy Mediso. Na pracovišti jsou součástí kamer různé typy kolimátorů: LEHR, LEGP a MEGP pro Infinia, LEHR a LEGP pro MB9200.

Měřením jsem prokázala, že největší citlivost má kolimátor LEGP a to až dvojnásobnou vůči LEHR. Proto je LEGP kolimátor vhodný pro studie, u kterých není dostatečný počet impulzů v obraze např. u některých dynamických studií. Naprosto nevhodný je LEGP kolimátor u studií, kde je potřeba velmi vysokého prostorového rozlišení, např. u scintigrafie skeletu. Současně jsem zjistila, že nejlepší polohovou rozlišovací schopnost má LEHR kolimátor, polohová rozlišovací schopnost LEGP a MEGP kolimátou pro ^{99m}Tc je srovnatelná.

Pro ověření své hypotézy jsem zvolila jedno z nejběžnějších vyšetření nukleární medicíny – celotělové planární vyšetření skeletu. Při porovnání snímků získaných s kolimátory LEHR a LEGP jsem zjistila, že moje hypotéza neplatí. Kolimátor LEGP má pro tento typ vyšetření nedostatečnou polohovou rozlišovací schopnost. Z tohoto důvodu může být zhoršena interpretace snímku lékařem.

Domnívám se, že základním vybavením pracoviště nukleární medicíny by měl být LEHR kolimátor, kromě dynamických studií, u kterých není třeba vysokého prostorového rozlišení je vhodné doplnit pracoviště LEGP kolimátorem.

Kolimátor MEGP má pro ^{99m}Tc přibližnou citlivost jako LEHR a polohovou rozlišovací schopnost jako LEGP. Tato skutečnost není v literatuře publikována, neboť se MEGP pro ^{99m}Tc nepoužívá. Je však možné se zamyslet nad použitím MEGP kolimátoru pro radionuklidy s větší energií než ^{99m}Tc např. ^{123}I , ^{81m}Kr apod., pro které se ve většině případů používá LEHR, případně LEGP.

8. SEZNAM LITERATURY

- (1) BAKOS, K., HUŠÁK, V. *Nukleární medicína – učebnice pro zdravotnické školy*. Praha: Avicenum, 1985.
- (2) HUŠÁK, V., MYSLIVEČEK, M., KORNDÁ, P., KLEINBAUER, K., KAMÍNEK, M., ERBAN, J. *Fyzikální základy planárního a tomografického zobrazování v nukleární medicíně*. Česká Radiologie, 2001; 53: 47-58.
- (3) CHERRY et al. *Physics in Nuclear Medicine*, 3rd edition, Elsevier Science (USA), 2003, ISBN 0-7216-8341-X
- (4) ULLMANN, V. *Jaderná a radiační fyzika, nukleární medicína* [online]. [cit. 2007-04-29]. Dostupné na WWW: <http://www.sweb.cz/astroNuklFyzika/>.
- (5) KOLEKTIV AUTORŮ. *Nukleární medicína*. Jilemnice : Gentiana, 2002. ISBN 80-86527-05-0.
- (6) DOPORUČENÍ SÚJB: *Systém zabezpečení jakosti na pracovištích nukleární medicíny – přístrojová technika*. Zbraslav : Nuklin - Ústav jaderných infirmací, 1999. ISSN 1212-177, ISBN 80-7073-007-3.

9. KLÍČOVÁ SLOVA

- Scintigrafie
- Gama kamera
- Parametry kolimátoru
- Citlivost
- Polohová rozlišovací schopnost

10. ZKRATKY

| | |
|--------------|--|
| SÚJB..... | Státní úřad pro jadernou bezpečnost |
| SPECT..... | Single photon emission computed tomography |
| FWHM..... | Full width at half maximum |
| FWTM..... | Full width at tenth maximum |
| LEGP..... | Low energy general purpose |
| LEHR..... | Low energy high resolution |
| MEGP..... | Medium energy general purpose |
| ČMI..... | Český Metrologický Institut |
| VFN..... | Všeobecná fakultní nemocnice |
| 1.LF UK..... | 1.Lékařská fakulta Univerzity Karlovy |

11. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Citlivost

Příloha 2: Polohová rozlišovací schopnost

Příloha 1: Citlivost

CITLIVOST VERSUS VELIKOST MISKY

| POZADÍ | | |
|------------|------------|-------|
| detektor 1 | imp/5 min. | imp/s |
| miska 1 | 11748 | 39 |
| miska 2 | 11750 | 39 |
| miska 3 | 11539 | 38 |
| detektor 2 | | |
| miska 1 | 11800 | 39 |
| miska 2 | 11505 | 38 |
| miska 3 | 11674 | 39 |

| miska 1 | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------|-----|------|------|----------------|-----------------|
| miska 1 | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
| střikačka | 13:20 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | |
| zbytková aktivita | 13:52 | 1,19 | 1,2 | 1,19 | 1,19 | 1,192 | 1,26749 |
| aktivita misky | | | | | | | 51,73 |

| | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s⁻¹.MBq⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|--|
| detektor 1 | 13:50 | 5 min | 1172963 | 1242473 | 4142 | 79,3 |
| detektor 2 | 13:57 | 5 min | 1142188 | 1226236 | 4087 | 78,3 |

| miska 2 | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------|-------|-------|-------|----------------|-----------------|
| miska 2 | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
| stříkačka | 13:17 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | |
| zbytková aktivita | 14:11 | 0,368 | 0,372 | 0,372 | 0,363 | 0,36875 | 0,41 |
| aktivita misky | | | | | | | 52,09 |

| | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|---|
| detektor 1 | 14:15 | 5 min | 1100351 | 1229899 | 4100 | 78,0 |
| detektor 2 | 14:05 | 5 min | 1113441 | 1220875 | 4070 | 77,4 |

| miska 3 | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------|-------|-------|-------|----------------|-----------------|
| miska 3 | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
| stříkačka | 13:15 | 49,5 | 49,5 | 49,5 | 49,5 | 49,5 | |
| zbytková aktivita | 14:45 | 0,521 | 0,513 | 0,513 | 0,508 | 0,51375 | 0,61 |
| aktivita misky | | | | | | | 48,89 |

| | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|---|
| detektor 1 | 14:45 | 5 min. | 975123 | 1158956 | 3863 | 78,2 |
| detektor 2 | 14:51 | 5 min. | 952279 | 1144912 | 3816 | 77,3 |

| detektor 1 | čas | imp/5 min. | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|------------|-----------------------------|-------|---|
| miska 1 | 13:50 | 1172963 | 1242473 | 4142 | 79,3 |
| miska 2 | 14:15 | 1100351 | 1229899 | 4100 | 78,0 |
| miska 3 | 14:45 | 975123 | 1158956 | 3863 | 78,2 |
| detektor 2 | čas | imp/5 min. | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
| miska 1 | 13:57 | 1142188 | 1226236 | 4087 | 78,3 |
| miska 2 | 14:05 | 1113441 | 1220875 | 4070 | 77,4 |
| miska 3 | 14:51 | 952279 | 1144912 | 3816 | 77,3 |

CITLIVOST VERSUS VZDÁLENOST

| detektor 2, miska 2 | | | | | | |
|---------------------|------------|-------|-----------|-----------------------------|-------|---|
| | vzdálenost | čas | imp/5min. | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
| miska 2 | na detekt. | 14:05 | 1113441 | 1220875 | 4070 | 77,4 |
| miska 2 | 8,4 cm | 15:04 | 992093 | 1218226 | 4061 | 77,2 |
| miska 2 | 10,8 cm | 15:13 | 969868 | 1211683 | 4039 | 76,8 |

CITLIVOST VERSUS AKTIVITA

| detektor 2, miska 2 | | | | | | | |
|-----------------------|----------|---------|------------|------------|-----------------------------|----------------|---|
| akt.1. | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
| stříkačka | 15:32 | 98,4 | 98,8 | 98,8 | 98,8 | 98,7 | |
| zbytková aktivita | 15:50 | 4,78 | 4,78 | 4,78 | 4,78 | 4,78 | 4,9 |
| aktivita misky | | | | | | | 93,8 |
| akt2. | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
| stříkačka | 15:30 | 29,3 | 29,2 | 29 | 29,2 | 29,18 | |
| zbytková aktivita | 15:55 | 1,06 | 1,08 | 1,07 | 1,06 | 1,07 | 1,0 |
| aktivita misky | | | | | | | 28,2 |
| | aktivita | čas | čas měření | imp. (imp) | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
| miska 2-akt.1. | 94,1 | 15:46 | 4 minuty | 1660451 | 1705666 | 7107 | 75,4 |
| miska 2-akr.2. | 28,20 | 15:56 | 16 minut | 1977801 | 2078985 | 2166 | 75,5 |

CITLIVOST VERSUS VELIKOST MATICE

| detektor 2 , miska 2 | | | | | | | |
|----------------------|----------|-------|-------------|-----------|-----------------------------|-------|---|
| matice | aktivita | čas | čas snímání | imp/4 min | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
| 128 x 128 | 93,8 | 16:13 | 4 minuty | 1574418 | 1703296 | 7097 | 75,3 |
| 256 x 256 | 93,8 | 15:46 | 4 minuty | 1660451 | 1705666 | 7107 | 75,4 |
| 512 x 512 | 93,8 | 16:19 | 4 minuty | 1557253 | 1704236 | 7101 | 75,3 |

**CITLIVOST
INFINIA - LEHR KOLIMÁTOR**

| POZADÍ | čas sním. | imp/ 5min. | imp/s |
|------------|-----------|------------|-------|
| detektor 1 | 5 minut | 11438 | 38 |
| detektor 2 | 5 minut | 11744 | 39 |

| aktivita | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------|------|------|------|----------------|-----------------|
| miska 2 | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
| stříkačka | 13:20 | 61,1 | 61,6 | 60,7 | 61,1 | 61,13 | |
| zbytková aktivita | 13:55 | 3,08 | 3,07 | 3,11 | 3,08 | 3,1 | 3,299 |
| aktivita misky | | | | | | | 57,83 |

| miska 2 | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s⁻¹.MBq⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|--|
| detektor 1 | 13:52 | 5 minut | 1328248 | 1412370 | 4708 | 80,8 |
| detektor 2 | 13:58 | 5 minut | 1298983 | 1397247 | 4657 | 79,9 |

**CITLIVOST
INFINIA HAWKEY - LEHR KOLIMÁTOR**

| POZADÍ | čas sním. | imp/5 min. | imp/sec |
|------------|-----------|------------|---------|
| detektor 1 | 5 minut | 11841 | 39 |
| detektor 2 | 5 minut | 12033 | 40 |

| miska 2 | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měřeni aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|---|
| detektor 1 | 14:08 | 5 minut | 1265037 | 1387098 | 4624 | 79,3 |
| detektor 2 | 14:15 | 5 minut | 1271160 | 1412662 | 4709 | 80,8 |

INFINIA HAWKEY - MEGP KOLIMÁTOR

| POZADÍ | čas sním. | imp/5 min. | imp/s |
|------------|-----------|------------|-------|
| detektor 1 | 5 minut | 8602 | 29 |
| detektor 2 | 5 minut | 8190 | 27 |

| miska 2 | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měřeni aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|---|
| detektor 1 | 15:05 | 5 minut | 1127548 | 1379252 | 4598 | 79,0 |
| detektor 2 | 14:58 | 5 minut | 1127978 | 1361368 | 4538 | 78,0 |

INFINIA HAWKEY - LEGP KOLIMÁTOR

| POZADÍ | čas sním. | imp/5 min. | imp/sec |
|------------|-----------|------------|---------|
| detektor 1 | 5 minut | 12246 | 41 |
| detektor 2 | 5 minut | 12779 | 43 |

| miska 2 | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měřeni aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|---|
| detektor 1 | 16:16 | 5 minut | 1733541 | 2430051 | 8100 | 139,4 |
| detektor 2 | 16:00 | 5 minut | 1768109 | 2403564 | 8012 | 137,8 |

**CITLIVOST
MB 9200**

| miska 2 | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
|-----------------------|-------|---------|-------|-------|-------|----------------|-----------------|
| stříkačka | 14:08 | 48,7 | 48,2 | 48,7 | 48,7 | 48,6 | |
| zbytková aktivita | 15:41 | 0,017 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,010 | 0,0 |
| aktivita misky | | | | | | | 48,6 |

| POZADÍ | čas sním. | imp/5 min. | imp/sec |
|---------------|-----------|------------|---------|
| LEHR | 5 minut | 1141 | 4 |
| LEGP | 5 minut | 1508 | 5 |

| kolimátor | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měřeni aktivity | imp/sec | C (imp.s⁻¹.MBq⁻¹) |
|-----------|-------|-----------|------------|-----------------------------|---------|--|
| LEHR | 14:50 | 5 minut | 851899 | 923404 | 3078 | 63,3 |
| LEGP | 15:10 | 5 minut | 1881226 | 2118911 | 7063 | 145,3 |

CITLIVOST VERSUS VELIKOST OKNA - INFINIA

| OKNO 10% | | | |
|------------|-----------|------------|---------|
| POZADÍ | čas sním. | imp/5 min. | imp/sec |
| detektor 1 | 5 minut | 11729 | 39 |
| detektor 2 | 5 minut | 11819 | 39 |
| OKNO 7,5% | | | |
| POZADÍ | čas sním. | imp/5 min. | imp/sec |
| detektor 1 | 5 minut | 8846 | 29 |
| detektor 2 | 5 minut | 8897 | 30 |

| miska 2 | čas | A (MBq) | | | | průměr A (MBq) | korekce A (MBq) |
|-----------------------|-------|---------|-------|-------|-------|----------------|-----------------|
| stříkačka | 14:29 | 78,5 | 79,5 | 79,5 | 79,5 | 79,3 | |
| zbytková aktivita | 14:55 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,0 |
| aktivita misky | | | | | | | 79,2 |

| OKNO 10% | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|---|
| detektor 1 | 15:05 | 5 minut | 1720925 | 1844017 | 6147 | 77,1 |
| detektor 2 | 14:59 | 5 minut | 1717020 | 1818770 | 6063 | 76,0 |

| OKNO 7,5% | čas | čas sním. | imp. (imp) | imp. k času měření aktivity | imp/s | C (imp.s ⁻¹ .MBq ⁻¹) |
|------------|-------|-----------|------------|-----------------------------|-------|---|
| detektor 1 | 15:12 | 5 minut | 1583040 | 1719209 | 5731 | 72,0 |
| detektor 2 | 15:19 | 5 minut | 1554061 | 1710562 | 5702 | 71,6 |

Příloha 2: Polová rozlišovací schopnost

**POLOHOVÁ ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST
INFINIA/HAWKEYE - LEHR
1024x1024**

| D1 | X | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 14,608 | 8,034 | 24,889 | 13,689 |
| | 14,727 | 8,100 | 24,218 | 13,320 |
| | 14,892 | 8,191 | 24,060 | 13,233 |
| 2.profil | 14,788 | 8,133 | 24,845 | 13,665 |
| | 15,233 | 8,378 | 25,462 | 14,004 |
| | 14,939 | 8,216 | 24,815 | 13,648 |
| průměr | | 8,175 | | 13,593 |
| SD | | 0,119 | | 0,279 |

| D1 | Y | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 14,198 | 7,809 | 25,876 | 14,232 |
| | 14,519 | 7,985 | 25,681 | 14,125 |
| | 14,267 | 7,847 | 25,029 | 13,766 |
| 2.profil | 14,847 | 8,166 | 24,633 | 13,548 |
| | 14,128 | 7,770 | 24,584 | 13,521 |
| | 13,853 | 7,619 | 24,537 | 13,495 |
| průměr | | 7,866 | | 13,781 |
| SD | | 0,189 | | 0,324 |

| D2 | X | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 14,845 | 8,165 | 24,840 | 13,662 |
| | 15,105 | 8,308 | 24,916 | 13,704 |
| | 15,123 | 8,318 | 24,190 | 13,305 |
| 2.profil | 15,092 | 8,301 | 25,600 | 14,080 |
| | 15,030 | 8,267 | 25,300 | 13,915 |
| | 14,932 | 8,213 | 25,188 | 13,853 |
| průměr | | 8,262 | | 13,753 |
| SD | | 0,061 | | 0,266 |

| D2 | Y | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 14,485 | 8,020 | 24,486 | 13,467 |
| | 14,329 | 7,933 | 25,174 | 13,846 |
| | 14,089 | 7,801 | 25,307 | 13,919 |
| 2.profil | 14,299 | 7,917 | 25,982 | 14,290 |
| | 13,711 | 7,591 | 24,456 | 13,451 |
| | 14,633 | 8,102 | 24,679 | 13,573 |
| průměr | | 7,894 | | 13,758 |
| SD | | 0,180 | | 0,325 |

**POLOHOVÁ ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST
INFINIA/HAWKEYE - LEGP
1024x1024**

| D1 | X | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 16,765 | 9,221 | 29,735 | 16,354 |
| | 16,528 | 9,090 | 30,176 | 16,597 |
| | 16,863 | 9,275 | 30,071 | 16,539 |
| 2.profil | 17,023 | 9,363 | 29,461 | 16,204 |
| | 16,783 | 9,231 | 29,172 | 16,045 |
| | 16,618 | 9,140 | 29,571 | 16,264 |
| průměr | | 9,220 | | 16,334 |
| SD | | 0,097 | | 0,208 |

| D1 | Y | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 16,636 | 9,150 | 30,542 | 16,798 |
| | 16,956 | 9,326 | 29,567 | 16,262 |
| | 16,672 | 9,170 | 29,568 | 16,262 |
| 2.profil | 16,749 | 9,212 | 30,854 | 16,970 |
| | 16,834 | 9,259 | 30,692 | 16,881 |
| | 16,175 | 8,896 | 30,667 | 16,867 |
| průměr | | 9,169 | | 16,673 |
| SD | | 0,148 | | 0,323 |

| D2 | X | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 17,020 | 9,361 | 30,060 | 16,533 |
| | 17,096 | 9,403 | 29,853 | 16,419 |
| | 17,229 | 9,476 | 29,787 | 16,383 |
| 2.profil | 16,921 | 9,307 | 29,383 | 16,161 |
| | 16,856 | 9,271 | 29,799 | 16,389 |
| | 16,466 | 9,056 | 29,536 | 16,245 |
| průměr | | 9,312 | | 16,355 |
| SD | | 0,145 | | 0,132 |

| D2 | Y | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 16,933 | 9,375 | 30,735 | 16,904 |
| | 17,699 | 9,799 | 31,371 | 17,254 |
| | 17,298 | 9,577 | 30,627 | 16,845 |
| 2.profil | 17,834 | 9,874 | 31,283 | 17,206 |
| | 17,343 | 9,602 | 31,461 | 17,304 |
| | 17,203 | 9,525 | 31,113 | 17,112 |
| průměr | | 9,625 | | 17,104 |
| SD | | 0,183 | | 0,190 |

**POLOHOVÁ ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST
INFINIA/HAWKEYE - MEGP
1024x1024**

| D1 | X | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 16,393 | 9,016 | 29,907 | 16,449 |
| | 16,868 | 9,277 | 30,755 | 16,915 |
| | 16,410 | 9,026 | 29,899 | 16,444 |
| 2.profil | 16,839 | 9,261 | 30,127 | 16,570 |
| | 16,609 | 9,135 | 30,322 | 16,677 |
| | 16,510 | 9,081 | 30,078 | 16,543 |
| průměr | | 9,133 | | 16,600 |
| SD | | 0,114 | | 0,177 |

| D1 | Y | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 16,134 | 8,874 | 29,669 | 16,318 |
| | 17,015 | 9,358 | 28,848 | 15,866 |
| | 16,056 | 8,831 | 28,846 | 15,865 |
| 2.profil | 16,898 | 9,294 | 29,111 | 16,011 |
| | 16,944 | 9,319 | 29,353 | 16,144 |
| | 16,780 | 9,229 | 29,034 | 15,969 |
| průměr | | 9,151 | | 16,029 |
| SD | | 0,235 | | 0,175 |

| D2 | X | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 16,748 | 9,211 | 29,127 | 16,020 |
| | 16,837 | 9,260 | 29,377 | 16,157 |
| | 16,591 | 9,125 | 29,566 | 16,261 |
| 2.profil | 16,824 | 9,253 | 29,789 | 16,384 |
| | 16,610 | 9,136 | 29,674 | 16,321 |
| | 16,026 | 8,814 | 29,170 | 16,044 |
| průměr | | 9,133 | | 16,198 |
| SD | | 0,166 | | 0,149 |

| D2 | Y | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 16,769 | 9,223 | 29,025 | 15,964 |
| | 17,346 | 9,540 | 28,839 | 15,861 |
| | 17,193 | 9,456 | 29,634 | 16,299 |
| 2.profil | 16,401 | 9,021 | 29,320 | 16,126 |
| | 16,740 | 9,207 | 29,433 | 16,188 |
| | 17,131 | 9,422 | 29,436 | 16,190 |
| průměr | | 9,312 | | 16,105 |
| SD | | 0,194 | | 0,162 |

POLOHOVÁ ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST
INFINIA - LEHR
1024x1024

| D1 | X | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 14,805 | 8,143 | 24,812 | 13,647 |
| | 14,694 | 8,082 | 24,500 | 13,475 |
| | 14,890 | 8,190 | 24,860 | 13,673 |
| 2.profil | 15,100 | 8,305 | 23,646 | 13,005 |
| | 14,277 | 7,852 | 24,385 | 13,412 |
| | 14,723 | 8,098 | 24,489 | 13,469 |
| průměr | | 8,111 | | 13,447 |
| SD | | 0,150 | | 0,240 |

| D1 | Y | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 14,191 | 7,805 | 24,401 | 13,421 |
| | 14,039 | 7,721 | 24,676 | 13,572 |
| | 14,450 | 7,948 | 24,857 | 13,671 |
| 2.profil | 14,035 | 7,719 | 24,655 | 13,560 |
| | 14,465 | 7,956 | 24,710 | 13,591 |
| | 14,299 | 7,864 | 25,441 | 13,993 |
| průměr | | 7,836 | | 13,635 |
| SD | | 0,105 | | 0,193 |

| D2 | X | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 15,500 | 8,525 | 24,704 | 13,587 |
| | 15,072 | 8,290 | 24,129 | 13,271 |
| | 14,610 | 8,036 | 24,548 | 13,501 |
| 2.profil | 14,895 | 8,192 | 26,007 | 14,304 |
| | 15,100 | 8,305 | 25,216 | 13,869 |
| | 14,660 | 8,063 | 25,454 | 14,000 |
| průměr | | 8,235 | | 13,755 |
| SD | | 0,181 | | 0,374 |

| D2 | Y | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 14,131 | 7,772 | 24,943 | 13,719 |
| | 14,476 | 7,962 | 24,684 | 13,576 |
| | 14,028 | 7,715 | 25,585 | 14,072 |
| 2.profil | 14,363 | 7,900 | 26,383 | 14,511 |
| | 14,108 | 7,759 | 25,343 | 13,939 |
| | 14,576 | 8,017 | 25,798 | 14,189 |
| průměr | | 7,854 | | 14,001 |
| SD | | 0,123 | | 0,336 |

POLOHOVÁ ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST
MB 9200 - LEHR
1024x1024

| D1 | X | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 19,125 | 7,172 | 34,871 | 13,077 |
| | 18,623 | 6,984 | 33,954 | 12,733 |
| | 19,981 | 7,493 | 36,431 | 13,662 |
| 2.profil | 18,889 | 7,083 | 34,441 | 12,915 |
| | 19,277 | 7,229 | 35,147 | 13,180 |
| | 19,176 | 7,191 | 34,963 | 13,111 |
| průměr | | 7,192 | | 13,113 |
| SD | | 0,172 | | 0,313 |

| D1 | Y | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 19,838 | 7,439 | 36,171 | 13,564 |
| | 20,146 | 7,555 | 36,731 | 13,774 |
| | 19,897 | 7,461 | 36,278 | 13,604 |
| 2.profil | 19,205 | 7,202 | 35,016 | 13,131 |
| | 19,197 | 7,199 | 35,002 | 13,126 |
| | 18,616 | 6,981 | 34,031 | 12,762 |
| průměr | | 7,306 | | 13,327 |
| SD | | 0,215 | | 0,383 |

MB 9200 - LEGP
1024x1024

| D1 | X | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 24,261 | 9,098 | 44,235 | 16,588 |
| | 24,650 | 9,244 | 44,944 | 16,854 |
| | 24,846 | 9,317 | 45,302 | 16,988 |
| 2.profil | 25,228 | 9,461 | 45,997 | 17,249 |
| | 25,567 | 9,588 | 46,616 | 17,481 |
| | 25,296 | 9,486 | 46,122 | 17,296 |
| průměr | | 9,366 | | 17,076 |
| SD | | 0,180 | | 0,328 |

| D1 | Y | | | |
|----------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| | FWHM (px) | FWHM (mm) | FWTM (px) | FWTM (mm) |
| 1.profil | 25,232 | 9,462 | 46,005 | 17,252 |
| | 25,016 | 9,381 | 45,612 | 17,105 |
| | 25,358 | 9,509 | 46,235 | 17,338 |
| 2.profil | 24,647 | 9,243 | 44,938 | 16,852 |
| | 25,030 | 9,386 | 45,636 | 17,114 |
| | 24,923 | 9,346 | 45,442 | 17,041 |
| průměr | | 9,388 | | 17,117 |
| SD | | 0,093 | | 0,169 |