

# **JIHOČESKÁ UNIVERZITA**

**ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA**

**KATEDRA RADIOLOGIE A TOXIKOLOGIE**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**TÉMA : Ověřování dynamického multileaf kolimátoru**

**Autor : Radovan Hrachovec**

**Vedoucí práce : Mgr.Petr Malecha**

**Datum odevzdání : 4.5.2**

**Abstrakt:**

V souvislosti se zaváděním nových technologií na radioterapeutických pracovištích dochází k jejich vybavování lineárními urychlovači s počítačově ovládanými vícelamelovými kolimátory a techniky radioterapie s modulovanou intenzitou svazku záření IMRT. Testy, kterými se ověřují parametry vztahující se k způsobu léčby touto technikou vychází z doporučení SÚJB – Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů záření v radioterapii.

V první části je popsána metodika nezávislé prověrky MLC kolimátoru pro lineární urychlovač CLINAC 2100 C/D tzv. dozimetrická separace lamel, prováděná na radioterapeutickém pracovišti onkologického oddělení nemocnice České Budějovice. Tyto parametry se ověřují měřením pomocí ionizační komory ve vzduchu.

Další část se zabývá samotným měřením ionizační komorou ve vzduchu pro standartní sadu štěrbin MLC kolimátoru a měřením pomocí 2D pole seven 29. Naměřená data jsou u obou metod zpracována a porovnána. Na závěr by metoda stanovení dozimetrické separace lamel pomocí 2D pole seven 29 mohla doplnit zkoušky provozní stálosti lineárního urychlovače CLINAC 2100C/D na radioterapeutickém pracovišti onkologického oddělení nemocnice České Budějovice.

**Abstract:**

In connection with introducing new technologies in therapeutic centres, these are being equipped with linear accelerators featuring computer-controlled multi-lamellar collimators and radiotherapeutic technology with modulated intensity of the IMRT radiation bunch. The tests which verify the parameters related to the method of treatment by this technology are based on recommendation of the State office of Nuclear Safety – Introducing the quality system in using significant sources of radiation in radiotherapy.

In the first part, the methodology of an independent test of the MLC collimator for the CLINAC 2100 C/D linear accelerator is described, so called dosimetric lamellar separation, carried out in the therapeutic centre of the Oncology department of the České Budějovice Hospital. These parameters are tested by measurement using a ionization chamber in the air.

The other parts deals with measurement by the ionization chamber in the air for the standard set of slots in the MLC collimator and by measurement using by the "seven 29" 2D field. The measured data from both methodologies are processed and compared. Finally, the method of determining dosimetric lamellar separation using "seven 29" 2D field could supplement the test of service stability of the CLINAC 2100C/D linear accelerator in the radiotherapeutic centre of the Oncology Department of the České Budějovice Hospital.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Ověřování dozimetrické separace lamel vypracoval 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 své 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 Olomouci, 4. května 2009

.....

Podpis studenta

**Poděkování :**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Mgr. Petru Malechovi za cenné rady, připomínky, trpělivost a odborný dohled poskytnutý při zpracovávání bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Petru Berkovskému za pomoc při získávání a hlavně následném zpracování dat, za zapůjčenou literaturu a poskytnuté konzultace

## Obsah:

<b>Úvod</b>	7
<b>1. Současný stav dané problematiky</b>	7
1.1. Seznam testů pro lineární urychlovač s MLC a techniku IMRT	7
1.1.1. Vícelamelový kolimátor a technika IMRT	11
1.1.2. Dozimetrická separace lamel	12
1.2. Zkoušky dynamického MLC a techniky IMRT	14
1.2.1. Stabilita transmise MLC	14
1.2.2. Stabilita dozimetrické separace lamel	14
<b>2. Cíl práce</b>	17
<b>3. Hypoteza</b>	18
<b>4. Metodika</b>	19
4.1. Navržení postupu pro stanovení dozimetrické separace lamel	19
4.2. Stanovení dozimetrické separace lamel měřením ionizační komorou ve vzduchu	21
4.3. Stanovení dozimetrické separace lamel pomocí 2D pole seven 29	23
<b>5. Výsledky</b>	24
5.1. Hodnoty získané měřením komorou pro energii 6 MeV	24
5.2. Hodnoty získané měřením komorou pro energii 18 MeV	26
5.3. Hodnoty získané měřením detektorem seven 29 pro energii 6 MeV	27
5.4. Hodnoty získané měřením detektorem seven 29 pro energii 18 MeV	28
5.5. Hodnoty získané měřením detektorem seven 29 ze středu pole pro energii 6 MeV	29
5.6. Hodnoty získané měřením detektorem seven 29 ze středu pole pro energii 18 MeV	31
<b>6. Diskuse</b>	33
<b>7. Závěr</b>	34
<b>8. Klíčová slova</b>	35
<b>9. Seznam literatury</b>	36
<b>10. Přílohy</b>	38

**Seznam použitých zkratk:**

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

IMRT – modulovaná intenzita svazku záření

MLC – multileaf kolimátor

3D - trojdimenzionální pohled na objekt

tzv. - takzvaně

tj.-to je

tab.- tabulka

obr.- obrázek

DSL – dozimetrická separace lamel

ZPS – zkoušky provozní stálosti

MU – monitorovací jednotky

## **Úvod:**

Radioterapie se v poslední době v České republice výrazně rozvíjí v souvislosti s významným rozšiřováním ozařovacích technik a se zaváděním nových postupů, spočívajících v přizpůsobení dávkové distribuce tvaru cílového objemu v nádorovém ložisku, při současném šetření okolních zdravých tkání tzv. 3D konformní radioterapie. S tímto způsobem léčby je spojena aplikace modulované intenzity svazku záření tzv. IMRT technika a to buď step and shoot – technika mnoha statických polí, při níž se superpozicí několika rozdílně tvarovaných polí dosáhne požadované modulace svazku. Druhý způsob označovaný sliding windows – technika klouzajících polí spočívá v tom, že se lamely pohybují trvale napříč svazkem a tím opravují danou geometrii svazku.

Správná poloha lamel MLC kolimátoru ve svazku záření se kontroluje pravidelnými testy. Parametry, jejichž kontrola je navržena v rámci zkoušek provozní stálosti a zkoušek dlouhodobé stability, by se měli provádět jedenkrát ročně. Seznam testů z doporučení SÚJB slouží pro radiologické fyziky jako vodítko pro vypracování metodik příslušných testů a pro posouzení úplnosti seznamu zkoušek s ohledem na stávající vybavení pracovišť.

Na tomto tématu mně zaujala možnost práce pod vedením zkušených radiologických fyziků. Dozimetrická separace lamel je zkouška ověřující správné polohování těsně přiléhajících lamel v hlavici lineárního urychlovače přesně podle nastavení. To má zásadní vliv na plné dávky záření z více IMRT polí do cílového objemu nádorového ložiska, aniž by došlo k podzáření v určité oblasti ozařovaného pole. V případě úspěšnosti se dá tento test zavést do praxe v rámci zkoušek provozní stálosti a zkoušek dlouhodobé stability



## **1. Současný stav dané problematiky**

### ***1.1. Seznam testů pro lineární urychlovač s MLC a techniku IMRT***

Minimální seznam testů slouží jako přehled zkoušek, které je třeba provést v rámci zkoušek provozní stálosti, zkoušek dlouhodobé stability pro lineární urychlovače elektronů. Seznam vychází z doporučení SÚJB Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii – Urychlovače elektronů, z Katalogu metodik pro zkoušky v radioterapii a z doporučení SÚJB Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii – Plánovací systémy pro 3D konvenční radioterapii.

Parametry, jejichž kontrola je navržena pro zkoušku provozní stálosti jednou ročně, by se měly kontrolovat jednou při zkoušce provozní stálosti a jednou při zkoušce dlouhodobé stability. Doporučuje se provádět roční zkoušku stálosti zhruba v polovině období mezi dvěma zkouškami dlouhodobé stability, aby se minimalizoval interval, po kterém je parametr ověřován.

Seznam slouží pro radiologické fyziky jako vodítko pro vypracování metodik příslušných testů, jednak pro posuzovatele těchto metodik, aby bylo možné posoudit úplnost seznamu zkoušek s ohledem na stávající vybavení a používané techniky. Seznam pro lineární urychlovače elektronů je rozšířen o zkoušky MLC kolimátoru a zkoušky týkající se techniky IMRT.

Prověřované parametry jsou zaznamenány v následujících tabulkách číslo 1 a 2.

Kontrolovaný parametr	ZPS		ZDS		PZ		Literatura
	Frekvence	Tolerance	Frekvence	Tolerance	Frekvence	Tolerance	
MLC: statický	M (R)	2 mm		2 mm		1 mm	[3 - A.VII.1.6, B.XI.1.4]
				2 mm		2 mm	[3 - B.XI.1.1]
				2 mm		2 mm	[3 - B.XI.1.1]
	M	2 mm		2 mm		2 mm	[3 - A.VII.1.4, B.XI.1.3]
	T	2 mm		2 mm		2 mm	[3 - A.VII.1.4, B.XI.1.3]
	M	2 mm		2 mm		2 mm	
	M (R)	2 mm		2 mm		2 mm	[3 - A.VII.2.3]
						4%	[3 - A.VII.2.4,2]
						F	[3 - A.VII.3.1]
						F	[3 - A.VII.3.2]
					F	[3 - A.VII.3.3]	
					F	[3 - A.VII.3.4]	
					F	[3 - A.VII.3.5]	
MLC: dynamický IMRT	D	1 mm		1 mm		1 mm	[2]
	D	3%		3%		x	[2]
							[2]
	T	F		F			[2]
						2%	[2]

tabulka 1

Kontrolovaný parametr	ZPS		ZDS		PZ		Literatura	
	Frekvence	Tolerance	Tolerance	Tolerance	Tolerance	Tolerance		
MLC dynamický IMRT	M	2% 2 mm, 5 %	2% 2 mm, 5 %	2% 2 mm, 5 %	2% 2 mm, 5 %	2% 2 mm, 5 %	Kap. 3.1 Přílohy 1 tohoto doporučení [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2]	
	M	3%	3%	3%	3%	3%		
	R	3%	3%	3%	3%	3%		
	R	2 mm, 2% 0,5 mm	2 mm, 2% 0,5 mm	2 mm, 2% 0,5 mm	2 mm, 2% 0,5 mm	2 mm, 2% 0,5 mm		2 mm, 2% 0,5 mm
	R	5%	5%	5%	5%	5%		x
	R	2% dle [1]	2% dle [1]	2% dle [1]	2% dle [1]	2% dle [1]		2% dle [1]
	R							
Ověření správného výpočtu MU	A						[7] [10]	
Ověření konkrétních patientských plánů	A						[7] [10]	

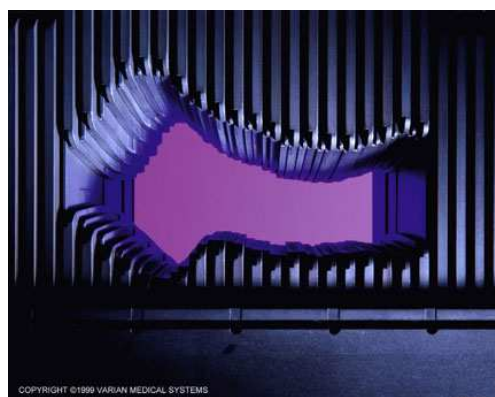
tabulka 2

### ***1.1.1. Vícelamelový kolimátor a IMRT***

Vícelamelový kolimátor je soustava těsně přiléhajících lamel uspořádaných v párech. Celý systém je uložen v hlavici lineárního urychlovače a slouží pro konformní radioterapii tj. dochází k tvarování pole tak, aby co nejlépe odpovídal tvaru cílového objemu z pohledu svazku nebo pro techniku radioterapie s modulovanou intenzitou fotonového svazku.

MLC přesně tvaruje ozařované pole a díky tomu odpadá nutnost využívat vykrývací bloky a klíny. Regulace pohybu lamel se děje digitalizací k zlepšení dávkové distribuce v cílovém objemu a záznamem pozice každých 50 ms. Kromě zobrazení konečné polohy lamely, může uživatel specifikovat i polohu drážky lamely k dosažení požadované polohy pomocí kalibračních souborů.

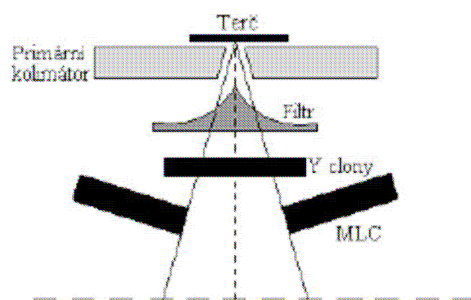
Modifikovaná intenzita svazku záření IMRT využívá dvou základních technik. Technika mnoha statických polí se označuje jako step and shoot, kdy se superpozicí několika dílčích polí tzv. segmentů dosáhne požadované simulace svazku. Nejprve se ozáří první segment, poté se lamely posunou a ozáří se druhý segment a po něm opět další. Po odzáření posledního plánovaného segmentu se změní úhel gantry a proces se opakuje pro další pole. Naproti tomu při technice sliding windows se lamely MLC plynule pohybují napříč svazkem během. Sekvence a rychlost pohybu jednotlivých párů lamel se mění v průběhu ozařování a tím je svazek modulován.



obr.1 MLC Millenium

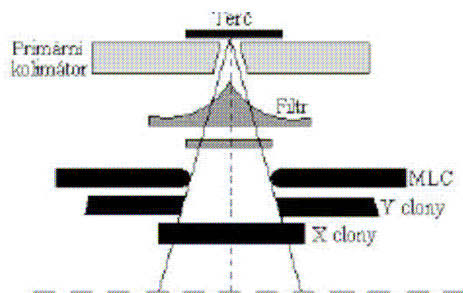
### 1.1.2. Dozimetrická separace lamel

Jedná se o parametr, který představuje korekci na zaoblené konce lamel MLC. Nemá smysl ji zavádět u těch vícelamelových kolimátorů, které mají rovné zakončení lamel ( Siemens ). V České republice jsou v současné době zastoupeni tři výrobci lineárních urychlovačů a jednotlivé kolimační systémy těchto přístrojů se mezi sebou liší.

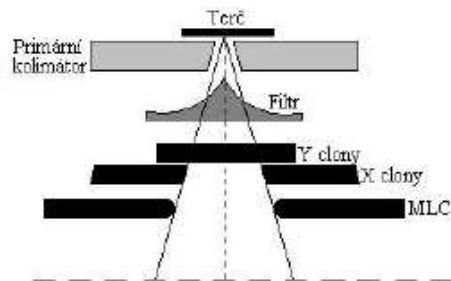


obr.2 Kolimační systém u lineárních urychlovačů Siemens

Siemens má lamel MLC uspořádané tak, že se pohybují do oblouku. Konce lamel MLC jsou rovné a sešikmené tak, že v každém místě odpovídá konec lamely divergenci svazku. Sekundární clony v tomto systému ve směru, ve kterém je umístěn MLC, nejsou. Systém má sekundární clony ve směru kolmém.



obr.3 Kolimační systém u lineárních urychlovačů Varian



obr.4 Kolimační systém u lineárních urychlovačů Elekta

Elekta i Varian mají lamely MLC se zaoblenými konci lamel, které se pohybují po ve vodorovné rovině. Přední část lamel MLC je zaoblena proto, aby byla zachována stejná hodnota polostínu nezávisle na vzdálenosti lamely od střední osy svazku. Důsledkem tohoto zaoblání je zvýšení průchodu ionizujícího záření v prvních několika milimetrech od čela lamely. Dozimetrická separace lamel je parametr, který říká, o kolik by se musely lamely MLC posunout, kdyby byl konec lamel rovný, aby byla získána stejná odezva. Kolimační systémy se liší v umístění lamel MLC. Varian jej má pod sekundárními clonami a Elekta nad nimi.

Sekundární clony u obou systémů zůstaly zachovány v obou směrech. U urychlovačů Elekta jsou ovšem sekundární clony ve směru Y řízeny tak, aby těsně dolehly na pole tvarované MLC, proto v klinickém režimu není možné tyto clony libovolně nastavit.

Hodnota dozimetrické separace lamel je stanovena při přijímací zkoušce a zadána do plánovacího systému, v rámci zkoušky provozní stálosti se ověřuje její stabilita.

Průchod záření přes lamely MLC charakterizuje transmise, která je u techniky IMRT mnohem zásadnější, než ve statickém modu. Při IMRT se využívá mnohonásobně vyšší počet monitorovacích jednotek než v konvenční radioterapii. Dávka dodána do daného bodu v ozařovaném objemu je navíc dána dávkou dodanou přes otevřené pole tvarované MLC a dávkou z toho záření, které proniká přes lamelu po dobu, kdy je ozařovaný bod touto lamelou stíněn.

Transmisi u lamel MLC rozlišujeme trojího typu: Průchod záření přes plnou šířku lamely,

průchod záření v oblasti mezi dvěma sousedními lamelami ( mezilamelová transmise ) a průchod záření přes čela lamel.

Mezilamelové efekty spadají do dvou kategorií. Jednak je to mezilamelová transmise, která je vyšší než transmise přes plnou šířku lamely. Zmírňuje ji tzv. tongue-and-groove systém, což je systém výstupků a žlabků na boku lamel přesně do sebe zapadajících ( podobně jsou spojeny systémem péro-drážka např. parkety ). Tongue-and-groove systém však způsobuje další mezilamelový efekt, kterým může být podzáření určitých oblastí, zejména u takových IMRT polí, ve kterých se lamely pohybují asynchronně ( bývají to oblasti hlavy, plic a krku ).

Transmise je stanovena jako průměrná hodnota mezilamelové transmise a transmise přes plnou šířku lamely. Je stanovena při přijímací zkoušce a zadána do plánovacího systému, v rámci Zkoušek provozní stálosti se ověřuje její stabilita.

## ***1.2. Zkoušky dynamického MLC a techniky IMRT***

Zkoušky dynamického MLC jsou koncipovány pro urychlovače firmy Varian a mezi základní pomůcky používané při testech patří: ionizační komora PTW 30002, ionizační komora CC01, vodě ekvivalentní IMRT fantom ( pro dozimetrické ověření IMRT polí ), elektrometr Unidos, prodlužovací kabel, vodě ekvivalentní plastické desky ( vlastní je SÚRO a zasouvají se s komorou do fantomu s hranolem voděekvivalentního materiálu ).

### ***1.2.1. Stabilita transmise MLC***

Do IMRT fantomu a, do referenční hloubky a středu světelného pole se umístí komora PTW 30002 do vzdálenosti SAD ( SSD ) běžně používané v praxi. Lamely MLC budou maximálně roztažené a provede se ozáření komory takovým počtem monitorovacích jednotek, které odpovídá ozáření dávkou 2 Gy pro otevřené pole 10 x 10 cm<sup>2</sup> vymezené sekundárními clonami. Hodnota odečtená z displeje Unidosu se zaznamená jako  $D_{ref}$ .

Poté se pole zastíní jednou řadou lamel tak, aby se lamely první a druhé řady dotýkaly pod sekundárními clonami. Provede se ozáření takovým počtem monitorových jednotek, které odpovídá dávce 2 Gy. Provede se několik odečtu v různých polohách pod lamelami MLC ( pak posuneme stolem o takovou vzdálenost, abychom umístili komoru do plné šířky lamel ale i

mezilamelových oblastí ). Popsaný postup se opakuje i pro pole zastíněné druhou řadou lamel MLC. Ze všech odečtů pod zastíněný polem oběma řadami lamel MLC se spočítá průměrná hodnota  $D_{trans}$ . Změřená hodnota  $T=D_{trans}/D_{ref}$  by se od hodnoty udané pracovištěm neměla lišit o více než 0,5 %. Transmise by neměla být vyšší, než 4%.

### **1.2.2. Stabilita dozimetrické separace lamel**

Při tomto testu se používají soubory s IMRT poli, kdy se pohybují štěrbinou o různých tloušťkách ( 10 mm, 5 mm, 3 mm, 2mm, 1mm ) zleva doprava. Do IMRT fantomu, do referenční hloubky a středu světelného pole se umístí komora PTW 30002 do vzdálenosti SAD ( SSD ) běžně užívané v praxi.

Sekundární clony se nastaví na velikost pole 10 x 10 cm<sup>2</sup>, provede se ozáření soubory o různých tloušťkách štěrbinou, vždy s nastavením takového počtu monitorových jednotek, které odpovídá ozáření dávkou 2 Gy. Odečtou se relativní hodnoty z displeje Unidosu  $R_x$  odpovídající konkrétní šířce štěrbinou x. Odezvy se korigují na transmisi přes lamely MLC. Transmise je různá pro každou šířku proužku tj. korigovanou odezvu získáme ze vztahu:

$$R_{kor(x)} = R_x - T (100-x/100)$$

kde x je šířka proužku v mm, T je hodnota transmise přes sevřené lamely MLC ( získána v předchozím testu ).

Hodnoty  $R_{kor(x)}$  se vynesou do grafu v závislosti na šířce proužku x. Proveďte se extrapolace křivky k odezvě odpovídající pouze transmisi přes sevřené lamely MLC. Výsledkem je hodnota dozimetrické separace lamel, která je charakteristická pro konkrétní kombinaci urychlovače a vícelamelového kolimátoru.

Dozimetrická separace lamel se porovná s hodnotou udanou pracovištěm ( tj. takovou hodnotu, která je zadaná v plánovacím systému ). Odchylka změřené a uvedené hodnoty by neměla být větší, než 0,5 mm.

Na pracovišti kde nemohou používat dynamický MLC, ale chtějí ozařovat technikou IMRT s MLC v segmentovaném režimu se dá ověření dozimetrické separace lamel provést filmovou metodou. Kolimátor a rameno urychlovače se nastaví na hodnotu 0°, na povrch stolu nebo na povrch plastického fantomu se umístí film do vzdálenosti SAD ( SSD ) běžně užívané v praxi a



překryje se vrstvou build-up materiálu.

Použije se několik polí tvarovaných MLC s šířkami štěrbin 0 až 10 cm. Filmy se ozáří dávkou 0,3 Gy a poté se vyhodnotí denzitometrickým systémem FIPS, stanoví se dávkové profily ve směru pohybu lamel MLC, šířky profilů se vynesou do grafu v závislosti na šířce štěrbin a bude provedena extrapolace odezvy filmu na nulovou odezvu. Z grafu se odečte hodnota dozimetrické separace lamel. Vyhodnocení proběhne jako v předchozím případě, kdy se parametr stanovil měřením ionizační komorou.

## **2. Cíl práce**

Navrhnout a ověřit stanovení dozimetrické separace lamel pomocí 2D pole seven 29.

### **3. Hypoteza**

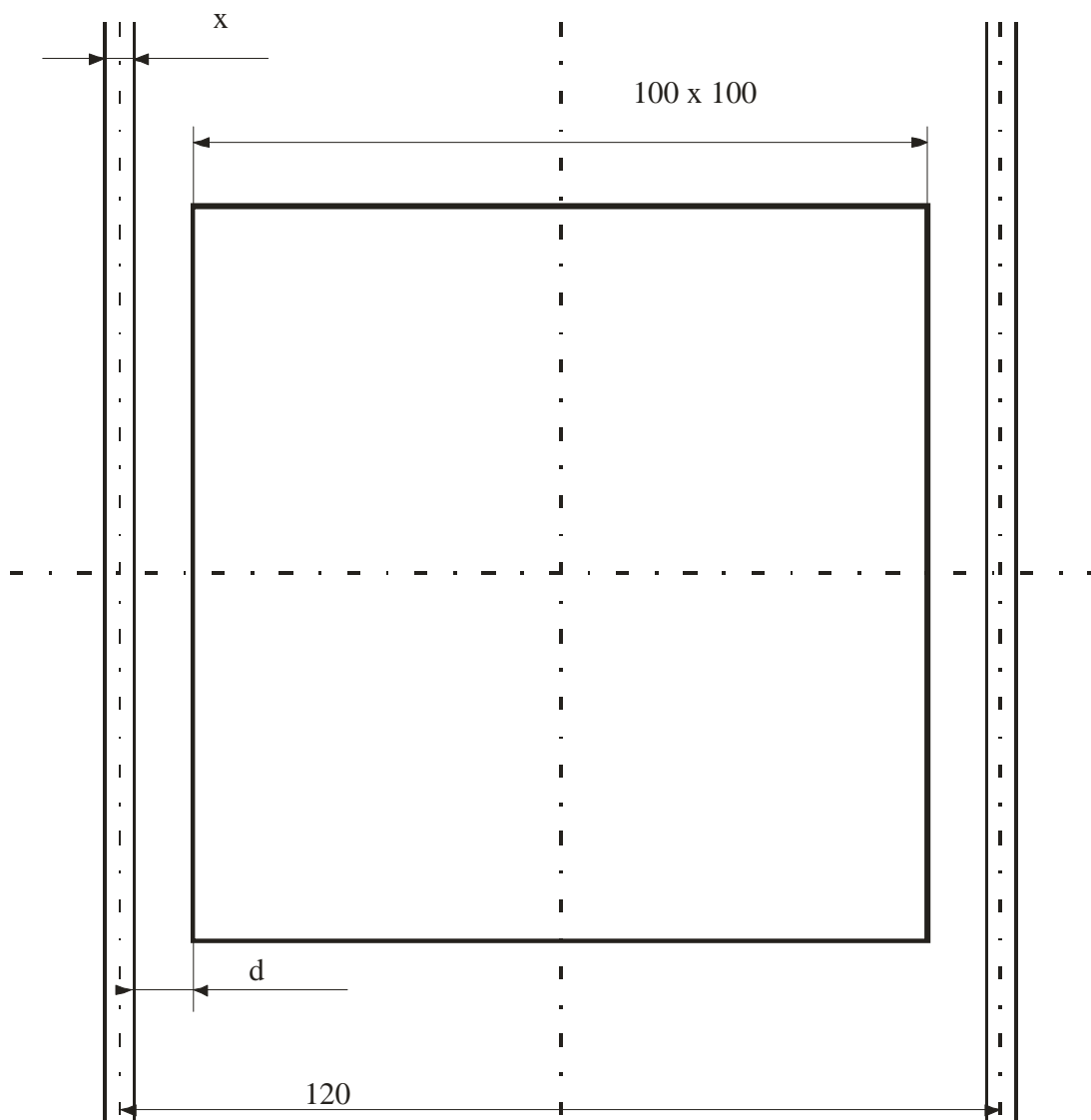
Je možné provádět stanovení a ověřování dozimetrické separace lamel i pomocí 2D pole seven 29.

## 4. Metodika

### 4.1. Navržení postupu pro stanovení dozimetrické separace lamel

#### Dozimetrická separace lamel použitím detektoru seven29- výpočet

obr.5 - sestavení pro měření DLS pomocí plošného detektoru seven29, PTW Freiburg



Měřící pole velikosti 10 x 10cm a výchozí postavení MLC lamel symetricky podle osy ve vzdálenosti 60mm od osy svazku

$x$ - šířka proužku,  $x \in \{1, 2, 3, 5, 10, 20\}$ ,  $\{x\}=[\text{mm}]$ , na počátku i na konci proužek otevřen, záření se spouští a ukončuje s pohybem proužku, pro všechny proužky jedou lamely stejnou rychlostí a ujedou stejnou vzdálenost, pro všechny proužky nastavena stejná dávka  $D=100\text{MU}$

$d_x$ - překrytí proužku, vzdálenost lamel od hrany měřicího pole, vzdálenost, kterou musí lamely ujet, než se proužek objeví v měřicím poli

$$d_x = \left(60 - \frac{x}{2}\right) - 50 = 10 - \frac{x}{2}$$

$D_x$  – dávka (počet monitorovacích jednotek), která se vyzáří než proužek šířky  $x$  najede do měřicího pole

$$D_x = \frac{D}{120} d_x = \frac{D}{120} \left(10 - \frac{x}{2}\right)$$

$k_{Dx}$ - korekce příspěvku od pole zavřeného sevřením lamel detektoru v závislosti na překrytí clonami ( na šířce proužku  $x$ )

$$k_{Dx} = \frac{D - 2D_x}{D}$$

$R_{kor}$  = korigovaný odečet

$$R_{kor} = R_{D,x} - k_x T \left( \frac{100 - x}{100} \right) = R_{D,x} - k_x k_{T,x} T$$

$k_{T,x}$ - korekce dávky od pole zavřeného sevřením lamel v závislosti na šířce proužku

$$k_{T,x} = \frac{100 - x}{100}$$

$R_{D,x}$  – odečet detektoru pro dávku  $D$  a proužek šířky  $x$

$T$ - průměrná hodnota odečtu detektoru pro dávku  $D$  a pole  $10 \times 10\text{cm}$  uzavřené sevřením lamel.

Stejné vztahy platí analogicky i pro průměrný odečet z jednotlivých komor plošného detektoru seven29.

Správně se má DSL měřit miniaturní komorou ve vzduchu, umístěnou pod lamelou MLC kolimátoru.

Měřicí sestava:

1. měření ionizační komorou

dozimetr Multidos T10001, SN 11272, PTW Freiburg

ionizační komora TM 31010, 0,125 ccm, SN 0659, PTW Freiburg

fantom Universal IMRT Verification Phantom, T 40020.1.010, PTW Freiburg

2. měření plošným detektorem

plošný detektor 2D-Array seven29, T10024, SN 00371, PTW Freiburg

SW MartixScan v. 2.2

Sestavy voleny takto záměrně z důvodů:

1. přibližně stejné materiálové poměry při měření, velikost a druh rozptylového materiálu- 2D pole nelze umístit ve vzduchu, proto komora umístěna do fantonu z PMMA, přibližně stejné tloušťky jako má nosná deska 2D pole

2. stejná velikost detektoru, pole má jednotlivé měřící elementa- ionizační komory o velikosti 0,5x0,5x0,5cm=0,125ccm. Komora TM31010 má objem 0,125ccm. Komora i pole jsou umístěny středem na střed svazku, jednak se tato poloha používá na další měření, jednak kolimátor MLC 120 NT má střední lamely užší, šířky 0,5cm v izocentru, krajní pak jsou širší, 1cm v izocentru, takže při umístění na střed užší lamely jsou střední měřící elementy 2D

2D pole je v této pozici používáno pro provádění testů v rámci zkoušek provozní stálosti a pro ověření stálosti DSL není nutné polohu měnit

#### ***4.2. Stanovení dozimetrické separace lamel MLC měřením ionizační komorou ve vzduchu.***

Mezi základní pomůcky užívané při tomto testu patří PTW dozimetr značky Multidos T10001,

ionizační komora TM 31010, vyhodnocovací program Matrix Scan, prodlužovací kabel, fantom Universal Verification Phantom 40020.1010,



obr.6 Multidos T10001



obr.7 Universal Phantom 40020.1010

Do fantomu, do referenční hloubky 1 cm a do středu světelného pole se umístí ionizační komora ve vzdálenosti SAD ( SSD ) běžně užívané v praxi. Rameno a kolimátor lineárního urychlovače se nastaví na hodnotu  $0^\circ$ . Test provádíme za konstantních podmínek tj. teploty v místnosti  $22^\circ\text{C}$ , atmosférického tlaku 96 hPa.

Před prvním měřením provedeme předzáření na pole pro 100 MU, pak nastává měření pro brzdné záření X o energii 6 MeV, lamely MLC ponecháme maximálně roztažené a provedeme odečtení hodnot náboje z displeje dozimetru v Coulombech. Poté se pole zastíní tak, aby se lamely jedné i druhé řady dotýkaly pod sekundárními clonami, roztaženými na velikost pole 10 x 10 cm. Provedeme odečty hodnot z displeje dozimetru pro pole A zastíněné a pak pro pole B zastíněné druhou řadou lamel MLC. Následně se ponechají sekundární clony roztažené na velikost pole 10 x 10 cm a provede se ozáření ionizační komory během pohybu lamel MLC zleva doprava a mezi nimiž je štěrbin velikosti 1 mm. Hodnoty odečteme z displeje dozimetru a tento postup zopakujeme i pro sadu štěrbin velikosti 1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 10 mm a 20 mm.

Druhé měření pro ionizační komoru umístěnou ve fantomu v referenční hloubce 1 cm provedeme pro brzdné záření X o energii 18 MeV. Postup je stejný tzn. nejprve předzáření, odečty pro plně otevřené pole, dále odečty pro pole A zastíněné první řadou lamel i pro pole B zastíněné řadou lamel MLC se sekundárními clonami roztaženými na pole 10 x 10 cm. Naposledy odečet dat

z displeje dozimetru pro pohybující se lamely MLC zleva doprava o tloušťce štěrbin 1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm.

#### **4.3. Stanovení dozimetrické separace lamel pomocí 2D pole seven 29**

2D pole seven 29 je dvourozměrné pole obsahující vzduchem plněné ionizační komůrky o rozměrech 27 x 27 cm tj. 729 ionizačních komůrek uspořádaných do matrice. V prostoru mezi těmito komůrkami je vodě ekvivalentní materiál, pole umožňuje měření dávky záření a dávkového příkonu pro vysoké energie. Pohybem lamel MLC vzniká mezera mezi měřicími ionizačními komůrkami. Aby byla pokryta plná oblast detekce, sloučí se 4 data z jednoho bodu. Celý soubor je složený z 2916 bodů tzn. 4 x 729 ionizačních komůrek = 2916 bodů matrice.



obr.8 2D pole seven 29

Postup celého měření je stejný, nejprve umístíme 2D pole seven 29 do středu světelného pole pod ramenem lineárního urychlovače, do vzdálenosti SAD ( SSD ) běžně užívané v praxi. Rameno a kolimátor urychlovače se nastaví na hodnotu 0°. Test provádíme za konstantních podmínek v místnosti tj. teploty v místnosti 22°C a atmosférického tlaku 96 hPa. Provedeme měření pro energii brzděného záření 6 MeV a poté 18 MeV. Lamely MLC ponecháme plně roztažené a odečtené hodnoty naměřené dozimetrem Multidos se zaznamenají do paměti připojeného počítače, který využívá vyhodnocovací softwar Matrixscan V 2.2. Následují odečty dat pro pole A zastíněné první řadou lamel pod sekundárními clonami roztaženými na velikost 10 x 10 cm,



pak pro pole B zastíněné druhou řadou lamel a změřeni dat pro sadu štěrbin lamel MLC velikosti 1 mm, 2mm, 3 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm. Všechna změřená data se zaznamenají na pevný disk, neboť se jedná o celé soubory dat nutné pro výpočet dozimetrické separace.

## 5. Výsledky

### 5.1. Hodnoty získané měřením ionizační komorou pro energii 6 MeV

Nejprve je nutné spočítat transmisi z příspěvku pro zavřená pole A i B, hodnoty naměřené z jednotlivých šířek štěrbin utvořených lamelami MLC dosadíme do odvozených vzorců a nakonec dostaneme hodnotu dozimetrické separace lamel.00

$$R_{kor} = R_{Dx} - k_{Dx} k_{Tx} \quad T, \quad d_x = 10^{-x/2}, \quad D_x = D/120 d_x, \quad k_{Tx} = 100^{-x/100}, \quad k_{Dx} = D - 2D_x/D$$

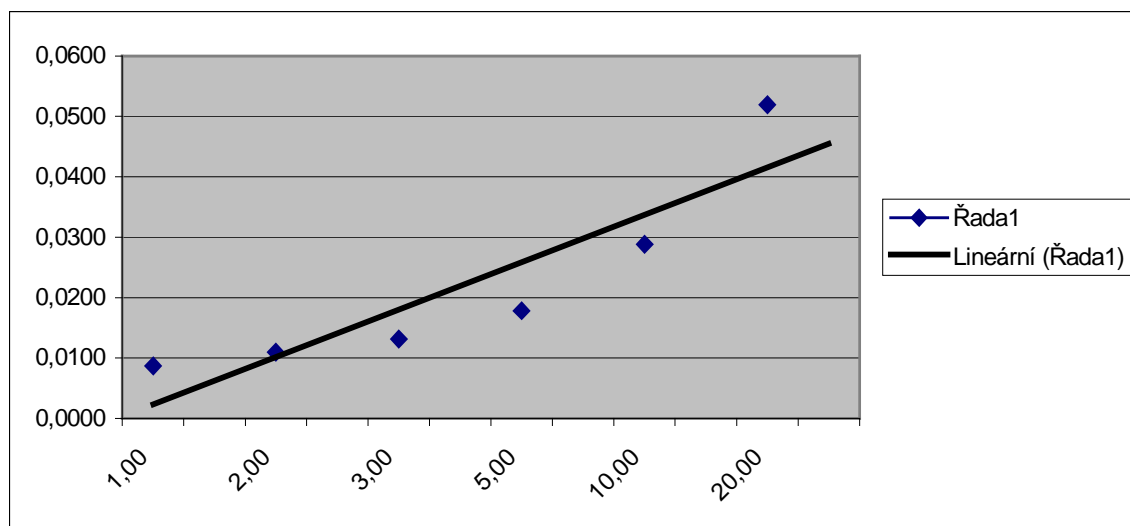
Poté provedeme extrapolaci křivky a to tak, že v spojnicovém grafu vyneseme křivku, na ose X hodnoty  $R_{kor}$  ( charakterizující transmisi přes čela lamel ) a na ose Y šířka proužku ( štěrbin v mm ).

		transmise	
strana A	T <sub>A</sub>	0,0047	0,0047
Strana B	T <sub>B</sub>	0,0047	0,0047
Průměr	T	0,0047	

tab.5

	výpočet DSL pro měření komorou ve fantomu											
	šířka proužku [mm]											
	1,00		2,00		3,00		5,00		10,00		20,00	
R <sub>D,x</sub>	0,0126	0,0126	0,01485	0,01485	0,017	0,0171	0,0217	0,0217	0,03245	0,033	0,0557	0,0557
d <sub>x</sub> [mm]	9,5		9		8,5		7,5		5		0	
D <sub>x</sub> [MU]	7,92		7,50		7,08		6,25		4,17		0	
k <sub>Dx</sub>	0,84		0,85		0,86		0,88		0,92		1	
k <sub>Tx</sub>	0,99		0,98		0,97		0,95		0,90		0,8	
k <sub>Dx</sub> *k <sub>Tx</sub>	0,8333		0,8330		0,8326		0,8313		0,8250		0,8000	
R <sub>kor</sub>	0,0087		0,0109		0,0131		0,0178		0,0288		0,0519	
D [MU]	100											
DSL [mm]	2,78947605											

tab.6



Graf 1 dozimetrické separace lamel pro energii 6 MeV měření komorou

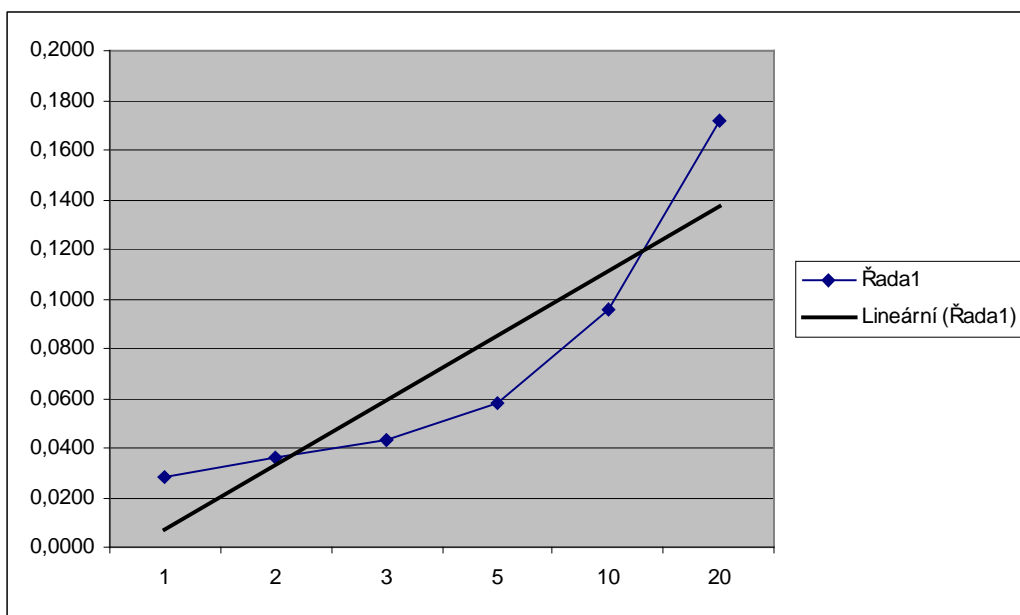
## 5.2. Hodnoty získané měřením ionizační komorou pro energii 18 MeV

		Transmise	
strana A	$T_A$	0,00505	0,0051
strana B	$T_B$	0,0051	0,0051
průměr	$T$	0,0050875	

tab.7

	výpočet DSL pro měření komorou ve fantomu											
	šířka proužku [mm]											
	1		2		3		5		10		20	
$R_{D,x}$	0,0145	0,0145	0,0173	0,01725	0,0201	0,0201	0,0257	0,0256	0,0397	0,0397	0,06764	0,06765
$d_x$ [mm]	9,5		9		8,5		7,5		5		0	
$D_x$ [MU]	7,92		7,50		7,08		6,25		4,17		0	
$k_{Dx}$	0,84		0,85		0,86		0,88		0,92		1	
$k_{Tx}$	0,99		0,98		0,97		0,95		0,90		0,8	
$KDx \cdot kTx$	0,8333		0,8330		0,8326		0,8313		0,8250		0,8000	
$R_{kor}$	0,0103		0,0130		0,0159		0,0214		0,0355		0,0636	
$D$ [MU]	100											
DSL [mm]	2,646600505											

tabulka 8



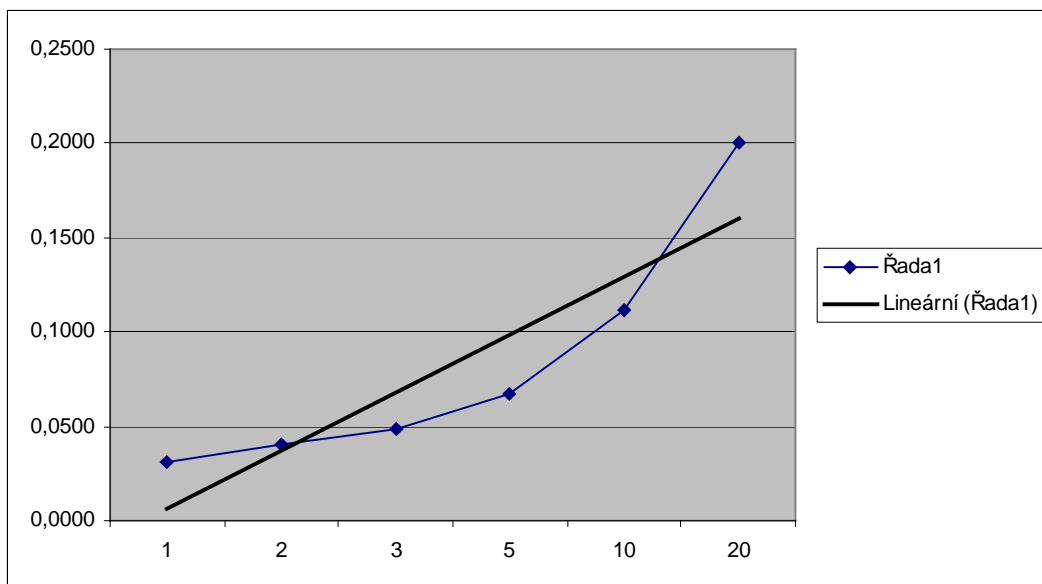
Graf2 dozimetrické separace lamel pro měření komorovou a energii 18 MeV

### 5.3. Hodnoty získané měřením detektorem seven 29 pro energii 6MeV

Tyto hodnoty jsou spočítány, jako průměr ze souboru hodnot pro každý z šesti proužků.

	šířka proužku [mm]					
	1	2	3	5	10	20
$R_{Dx}$	0,05	0,06	0,06	0,08	0,13	0,21
$d_x$ [mm]	9,5	9	8,5	7,5	5	0
$D_x$	7,92	7,50	7,08	6,25	4,17	0,00
$k_{Dx}$	0,84	0,85	0,86	0,88	0,92	1,00
$k_{Tx}$	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,8
$k_{Dx} * k_{Tx}$	0,8333	0,8330	0,8326	0,8313	0,8250	0,8000
$R_{kor}$	0,0313	0,0405	0,0490	0,0668	0,1112	0,200477
D [MU]	100					
DSL [mm]	2,52					

tab. 9

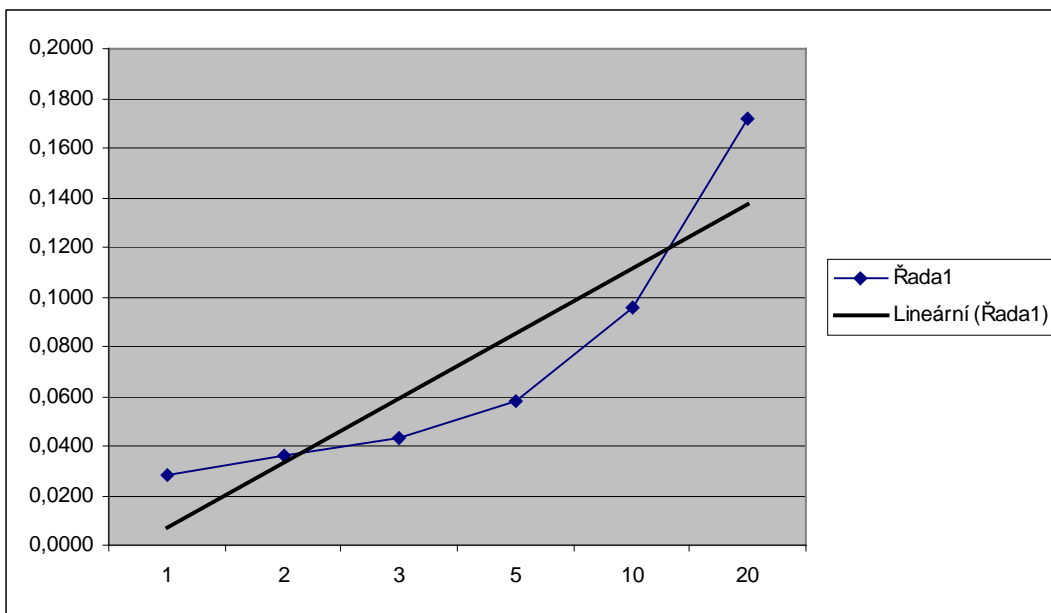


Graf 3 dozimetrické separace lamel pro měření detektorem seven 29 a energii 6 MeV

#### 5.4. Hodnoty získané měřením detektorem seven 29 pro energii 18 MeV

	šířka proužku [mm]					
	1	2	3	5	10	20
$R_{Dx}$	0,05	0,06	0,06	0,08	0,13	0,21
$d_x$ [mm]	9,5	9	8,5	7,5	5	0
$D_x$	7,92	7,50	7,08	6,25	4,17	0,00
$k_{Dx}$	0,84	0,85	0,86	0,88	0,92	1,00
$k_{Tx}$	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,8
$k_{Dx} \cdot k_{Tx}$	0,8333	0,8330	0,8326	0,8313	0,8250	0,8000
$R_{kor}$	0,0280	0,0357	0,0433	0,0583	0,0958	0,171651
DSL [mm]	2,72					

tab. 10



Graf4 dozimetrické separace lamel pro měření detektorem seven 29 a energii 18 MeV

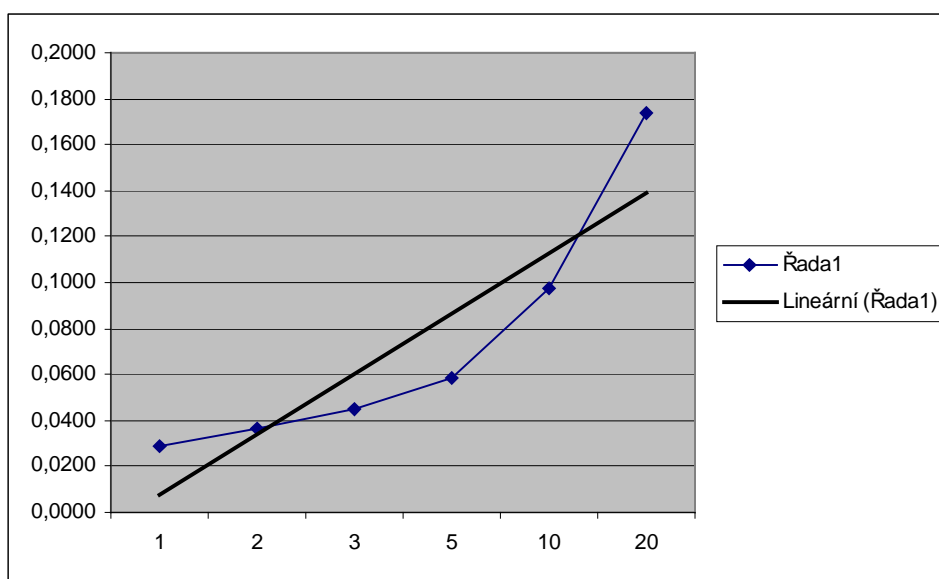
**5.5. Hodnoty měření detektorem seven 29 ze středu pole po energii 6 MeV**

		transmise
strana A	$T_A$	0,01698
strana B	$T_B$	0,0173
průměr	$T$	0,01714

tab.11

výpočet DSL pro měření komorou v e fantomu						
	šířka proužku [mm]					
	1	2	3	5	10	20
$R_{D,x}$	0,043	0,051049	0,0588	0,07255	0,111343	0,187282
$d_x$ [mm]	9,5	9	8,5	7,5	5	0
$D_x$ [MU]	7,92	7,50	7,08	6,25	4,17	0
$k_{Dx}$	0,84	0,85	0,86	0,88	0,92	1
$k_{Tx}$	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,8
$KDx \cdot kTx$	0,8333	0,8330	0,8326	0,8313	0,8250	0,8000
						0,1736
$R_{kor}$	0,0287	0,0368	0,0445	0,0583	0,0972	
$D$ [MU]	100					
DSL [mm]	2,77955					

Tabulka12 dozimetrické separace lamel pro měření detektorem seven 29  
( hodnoty ze středu pole, energie 6 MeV )



Graf5 dozimetrické separace lamel pro měření detektorem seven 29 a energii 6 MeV

**5.6. Hodnoty získané měřením detektorem seven 29 ze středu pole pro energii 18 MeV**

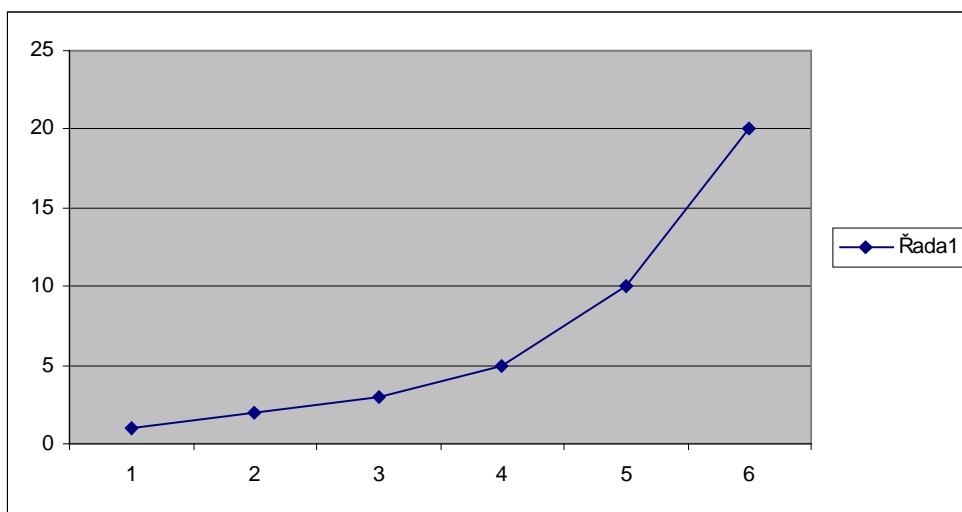
Transmise		
strana A	$T_A$	0,01689
strana B	$T_B$	0,01733
průměr	$T$	0,01711

tabulka 13

výpočet DSL pro měření komorou v e fantomu						
šířka proužku [mm]						
	1	2	3	5	10	20
$R_{D,x}$	0,0464	0,056	0,0641	0,0815	0,126	0,214
$d_x$ [mm]	9,5	9	8,5	7,5	5	0
$D_x$ [MU]	7,92	7,50	7,08	6,25	4,17	0
$k_{Dx}$	0,84	0,85	0,86	0,88	0,92	1
$k_{Tx}$	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,8
$KDx \cdot kTx$	0,8333	0,8330	0,8326	0,8313	0,8250	0,8000
$R_{kor}$	0,0321	0,0417	0,0499	0,0673	0,1119	0,2003
$D$ [MU]	100					
DSL [mm]	2,654249					

Tabulka14 dozimetrické separace lamel pro měření detektorem seven 29  
( hodnoty ze středu pole, energie 18 MeV )





Graf6 dozimetrické separace lamel pro měření detektorem seven 29 a energii 18 MeV

Na následujících hodnotách je vidět, že hodnoty dozimetrické separace lamel jsou vyšší při měření polem seven 29. Příspěvek záření, které dopadá na komoru i pole seven 29, je získán z oblastí pod lamelami, ale i z místa sevření lamel ( spojů ). Největší příspěvek je v oblasti středu ionizačních komůrek a směrem k okrajům, kde je také vysoký počet ionizačních komůrek klesá. Tak že není plně využita celá plocha měřícího pole, což je dáno rozptylem svazku záření. A právě v okrajových částech pole byly zaznamenány největší rozdíly nábojů ionizačních komůrek. K přesnosti měření při kontrole separace lamel MLC dozimetrickou metodou, není potřeba využívat 2D pole seven 29, postačí ionizační komůrka umístěná na střed měřeného pole.

## 6. Diskuse

Hodnota dozimetrické separace lamel představuje korekci na zaoblení konce lamel. Konce lamel jsou rovné a sešikmené tak, že v každém místě odpovídá konec lamely divergenci svazku záření. Lineární urychlovače Clinac od firmy VARIAN mají lamely MLC se zaoblenými konci, které se pohybují po vodorovné rovině. Přední část lamel je zaoblená proto, aby byla zachována stejná hodnota polostínu nezávisle na vzdálenosti lamely od střední osy svazku. Důsledkem tohoto zaoblení je zvýšení průchodu ionizujícího záření v prvních několika milimetrech od čela lamely. Víme, že dozimetrická separace lamel je parametr, který říká, o kolik by se musely lamely MLC posunout, kdyby byl konec lamely rovný, aby byla získána stejná odezva.

Různé způsoby výpočtu umožňují zjistit, jaký je příspěvek záření prosakujícího při pohybu lamel, v přední části zaoblených konců lamel.

Hodnoty z dozimetrické separace lamel měřené polem seven 29 jsou vyšší, než při měření běžnou ionizační komorou. Na měřicí desku dopadá záření z oblastí pod lamelami samotnými i z oblastí sevření lamel. Největší příspěvek je uprostřed pole seven 29 a směrem k okrajům klesá, díky rozptylu svazku záření, není tedy využita celá plocha měřícího pole s velkým počtem ionizačních komůrek. K měření postačí běžná ionizační komůrka umístěná v plastovém fantomu na středu měřeného pole.

Úplně přesná separace lamel tzn. aby konce lamel doléhali co nejtěsněji, není možná téměř nikdy. Každé pracoviště má navíc svůj vlastní soubor, vytvořený pro pohyb lamel, obvykle vypracovaný fyzikem podle specifického přístrojového a technického zázemí na oddělení.

## **7. Závěr**

Dozimetrická separace lamel měřená polem seven 29 jako kontrolní metoda je vhodná pouze k orientačnímu měření při zkouškách provozní stálosti, kdy nás informuje o poklesu příspěvku záření v okrajových měřícího pole. Jako doplněk pro TPS tj. treatment planing systém, ani jako doplněk pro ZPS není vhodná.

**Klíčová slova :**

IMRT, 2D pole seven 29, MLC multileaf colimator, dozimetrická separace lamel,

### **Seznam použité literatury:**

DOPORUČENÍ PRO ZABEZPEČOVÁNÍ JAKOSTI SYSTÉMŮ PRO PLÁNOVÁNÍ RADIOTERAPIE, Návrh textu, Příloha závěrečné zprávy grantu IGA MZČR, Zabezpečování jakosti radioterapie – plánovací systémy 2003

MACHALA S., Program zabezpečování jakosti, Metodiky pro zkoušky provozní stálosti lineárního urychlovače a příslušenství, Radioterapie a.s. Nový Jičín

STEINER M., edice Radiobiologický standart radioterapie IMRT

ŠLAMPA P., PETERA J., Radiační onkologie, nakladatelství Galen 20007 ISBN 978-80-7262-469-0

SÚJB, Radiační ochrana – doporučení Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii, Lineární urychlovače pro 3D konformní radioterapii a IMRT 2006

### **Články:**

E SPEZI., ANGELINI A.L., ROMENI F., Charakterization of 2D ion chamber array for the verification of radiotherapy treatments, 2006

BJOERN POPPE, ARNE BLENSCHMIDT, KAY C. WILHORN, Two dimensional ionization chambers array for the IMRT plan verification, Medical physics volume 33, parts 105-115, April 2006

**Elektronické zdroje:**

[http://www.warian.com/us/radiation oncology/clinac//](http://www.warian.com/us/radiation%20oncology/clinac//)

5.1.2009

<http://www.iop.org/EJ/abstract0031//>

6.44.2008

<http://www-ptw.de/nergeseven29//>

4.4.2009

<http://www.amediscz./med/products//>

5.1.2009

**Přílohy:**

Průměry vypočítané z hodnot naměřených polem seven 29 pro jednotlivé šířky mezilamelových štěrbin 1mm, 2mm, 3mm, 5mm, 10mm, 20 mm ( pro energii 6 MeV ) a průměry hodnot z uzavřených polí A a B pro výpočet transmise.

R <sub>1</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	2,96E-02	3,06E-02	3,12E-02	3,19E-02	3,21E-02	3,19E-02	3,14E-02	3,09E-02	2,97E-02
11	2,93E-02	3,03E-02	3,08E-02	3,22E-02	3,21E-02	3,21E-02	3,14E-02	3,07E-02	2,99E-02
12	2,92E-02	2,98E-02	3,07E-02	3,15E-02	3,16E-02	3,17E-02	3,13E-02	0,030451	2,95E-02
13	3,04E-02	3,12E-02	3,17E-02	0,032377	3,24E-02	0,032477	0,032177	3,10E-02	2,97E-02
14	3,00E-02	3,07E-02	3,16E-02	3,19E-02	3,22E-02	3,23E-02	3,16E-02	0,030589	2,96E-02
15	3,00E-02	3,02E-02	3,09E-02	3,15E-02	3,16E-02	3,18E-02	3,17E-02	3,05E-02	0,029493
16	3,10E-02	3,19E-02	3,25E-02	0,032991	3,32E-02	0,032816	3,26E-02	3,15E-02	3,04E-02
17	3,04E-02	3,10E-02	3,17E-02	3,24E-02	3,22E-02	3,21E-02	0,031869	3,08E-02	2,98E-02
18	2,96E-02	3,10E-02	3,19E-02	3,25E-02	3,27E-02	3,27E-02	3,26E-02	3,19E-02	3,07E-02
	3,13E-02								

R <sub>2</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	3,85E-02	0,03968	4,03E-02	0,041378	4,15E-02	4,15E-02	4,03E-02	3,99E-02	3,85E-02
11	3,80E-02	3,92E-02	4,02E-02	4,18E-02	4,21E-02	4,15E-02	4,06E-02	3,99E-02	3,89E-02
12	3,82E-02	3,91E-02	3,99E-02	4,11E-02	4,12E-02	4,11E-02	4,09E-02	3,93E-02	3,81E-02
13	3,94E-02	4,01E-02	0,041046	4,14E-02	4,22E-02	4,18E-02	4,16E-02	4,00E-02	3,88E-02
14	3,97E-02	3,99E-02	4,07E-02	4,08E-02	0,04171	4,19E-02	4,12E-02	3,98E-02	3,85E-02
15	3,86E-02	3,90E-02	4,03E-02	4,04E-02	4,14E-02	4,14E-02	4,16E-02	3,94E-02	3,85E-02
16	4,05E-02	4,06E-02	4,17E-02	4,20E-02	4,29E-02	4,26E-02	4,21E-02	4,01E-02	3,95E-02
17	3,99E-02	3,99E-02	4,08E-02	4,13E-02	4,20E-02	4,17E-02	4,14E-02	4,05E-02	3,90E-02
18	3,90E-02	4,00E-02	4,09E-02	0,041511	0,041395	4,20E-02	4,21E-02	4,11E-02	0,039665
	0,04049763								

R <sub>3</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	0,04720712	0,04846	0,049182	0,049508	0,049861	0,049532	0,049095	0,048465	0,04734
11	0,0470361	0,048045	0,048864	0,04985	0,050028	0,049946	0,049218	0,048529	0,047726
12	0,04675619	0,047981	0,048937	0,049402	0,049473	0,049396	0,048967	0,048125	0,046932
13	0,04775536	0,049175	0,049804	0,049997	0,050477	0,0503	0,049577	0,048723	0,047595
14	0,04770492	0,048622	0,049496	0,049478	0,049913	0,050061	0,049279	0,048708	0,047259
15	0,0467251	0,047933	0,048717	0,049065	0,049568	0,049733	0,049581	0,048351	0,047185
16	0,04862111	0,049807	0,050147	0,050633	0,051328	0,050801	0,050312	0,049299	0,048048
17	0,04807605	0,048951	0,049624	0,049901	0,050143	0,049817	0,049443	0,048831	0,047737

18	0,04751655	0,048823	0,049727	0,050062	0,050171	0,050403	0,050074	0,049542	0,048487
	0,04902432								

R <sub>5</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	0,06474854	0,066188	0,067119	0,067094	0,067258	0,067022	0,066781	0,066132	0,06503
11	0,06471332	0,066039	0,066669	0,067462	0,067622	0,067494	0,067292	0,066442	0,065386
12	0,06460973	0,0659	0,06641	0,067257	0,067178	0,067329	0,066873	0,065845	0,064929
13	0,06581566	0,066849	0,067597	0,067854	0,068115	0,067778	0,067348	0,066696	0,065489
14	0,06558348	0,066734	0,067496	0,067357	0,067286	0,067389	0,067097	0,066379	0,064944
15	0,06444805	0,065908	0,066808	0,066911	0,067209	0,067034	0,067425	0,066188	0,065029
16	0,06655847	0,067612	0,068234	0,068514	0,069018	0,06832	0,067921	0,066979	0,066131
17	0,06609971	0,066851	0,067476	0,06772	0,06793	0,067631	0,0671	0,066426	0,065655
18	0,06499931	0,066814	0,067402	0,067817	0,067718	0,06783	0,0678	0,067027	0,066
	0,06677992								

R <sub>10</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	0,1087606	0,110678	0,111336	0,111321	0,111176	0,111531	0,110965	0,110589	0,109188
11	0,10878152	0,110557	0,11123	0,112071	0,112069	0,111883	0,111696	0,110698	0,109898
12	0,10878246	0,110133	0,111118	0,111768	0,111593	0,111736	0,111253	0,110492	0,109414
13	0,1100386	0,111439	0,112379	0,11249	0,112283	0,112487	0,111716	0,111278	0,109718
14	0,10945561	0,11109	0,111988	0,111846	0,111564	0,111779	0,11165	0,111059	0,109396
15	0,10862113	0,11016	0,111523	0,111412	0,111321	0,111763	0,111976	0,110569	0,109457
16	0,11070618	0,112329	0,112833	0,113276	0,113644	0,112895	0,112634	0,111579	0,110479
17	0,11008785	0,111741	0,111823	0,112424	0,112382	0,111944	0,111907	0,110952	0,110146
18	0,1087941	0,110965	0,111778	0,112235	0,111607	0,112398	0,111857	0,111143	0,110343
	0,11118614								

R <sub>20</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	0,19710311	0,199804	0,200612	0,200211	0,19992	0,200203	0,200136	0,199909	0,197427
11	0,19786856	0,199827	0,200439	0,201173	0,201409	0,201322	0,201083	0,200645	0,198973
12	0,1980177	0,199454	0,200774	0,201411	0,201159	0,201758	0,200804	0,20014	0,198116
13	0,19889263	0,200652	0,202158	0,201633	0,201622	0,20153	0,20125	0,201078	0,198503
14	0,19765029	0,200579	0,20217	0,200936	0,200341	0,201181	0,20127	0,200766	0,198539
15	0,19670856	0,199586	0,201266	0,200888	0,200657	0,201164	0,202053	0,200496	0,198458
16	0,19957136	0,202003	0,202749	0,203314	0,203188	0,202864	0,202376	0,201611	0,199669
17	0,19890771	0,201248	0,20171	0,201831	0,201861	0,20147	0,201413	0,200784	0,199512



18	0,19678608	0,200317	0,200986	0,201237	0,200339	0,200959	0,20124	0,200349	0,198588
	0,20047665								

CFA		10	11	12	13	14	15	16	17	18
	10	1,48E-02	1,46E-02	1,54E-02	1,67E-02	1,65E-02	1,64E-02	1,53E-02	1,51E-02	1,51E-02
	11	1,52E-02	1,53E-02	1,57E-02	0,016483	1,71E-02	1,67E-02	1,54E-02	1,54E-02	1,51E-02
	12	1,55E-02	0,014936	1,57E-02	1,68E-02	1,73E-02	1,68E-02	1,74E-02	1,54E-02	1,53E-02
	13	1,52E-02	1,52E-02	1,61E-02	1,63E-02	1,69E-02	1,69E-02	1,75E-02	1,58E-02	1,54E-02
	14	1,64E-02	1,51E-02	1,57E-02	1,55E-02	0,01698	1,70E-02	1,74E-02	1,55E-02	1,55E-02
	15	1,69E-02	1,60E-02	1,63E-02	1,63E-02	1,71E-02	1,72E-02	1,73E-02	1,52E-02	1,55E-02
	16	0,016604	1,51E-02	1,64E-02	1,63E-02	1,74E-02	1,70E-02	1,76E-02	1,57E-02	0,015523
	17	1,62E-02	1,52E-02	1,57E-02	1,58E-02	1,71E-02	1,69E-02	1,74E-02	1,69E-02	0,015073
	18	1,83E-02	1,71E-02	0,017334	1,73E-02	1,73E-02	0,017747	1,82E-02	1,76E-02	1,61E-02

CFB		10	11	12	13	14	15	16	17	18
	10	1,56E-02	1,54E-02	1,57E-02	1,70E-02	1,71E-02	1,70E-02	1,59E-02	1,61E-02	1,61E-02
	11	1,48E-02	1,49E-02	1,52E-02	0,016331	1,65E-02	1,64E-02	1,50E-02	1,52E-02	1,50E-02
	12	0,016539	1,60E-02	1,63E-02	1,74E-02	1,76E-02	1,71E-02	0,017893	1,54E-02	1,54E-02
	13	1,54E-02	1,52E-02	1,64E-02	1,65E-02	1,75E-02	1,73E-02	1,81E-02	1,66E-02	1,67E-02
	14	1,63E-02	1,49E-02	0,015722	1,56E-02	1,73E-02	1,71E-02	1,77E-02	1,61E-02	1,62E-02
	15	1,58E-02	1,49E-02	1,56E-02	1,56E-02	1,68E-02	1,68E-02	1,69E-02	1,54E-02	0,015191
	16	0,017379	1,63E-02	1,75E-02	1,79E-02	1,92E-02	1,93E-02	1,97E-02	1,82E-02	1,79E-02
	17	1,62E-02	1,53E-02	1,59E-02	1,62E-02	1,76E-02	1,75E-02	1,75E-02	1,77E-02	1,58E-02
	18	1,65E-02	0,015417	1,60E-02	1,63E-02	1,61E-02	1,70E-02	0,017833	1,73E-02	1,61E-02

(CFA+CFB)/2		10	11	12	13	14	15	16	17	18
	10	0,0152	0,0150	0,0156	0,0168	0,0168	0,0167	0,0156	0,0156	0,0156
	11	0,0150	0,0151	0,0154	0,0164	0,0168	0,0166	0,0152	0,0153	0,0151
	12	0,0160	0,0154	0,0160	0,0171	0,0175	0,0169	0,0177	0,0154	0,0154
	13	0,0153	0,0152	0,0163	0,0164	0,0172	0,0171	0,0178	0,0162	0,0160
	14	0,0164	0,0150	0,0157	0,0156	0,0172	0,0170	0,0175	0,0158	0,0159
	15	0,0163	0,0155	0,0160	0,0159	0,0170	0,0170	0,0171	0,0153	0,0153
	16	0,0170	0,0157	0,0169	0,0171	0,0183	0,0182	0,0187	0,0170	0,0167
	17	0,0162	0,0153	0,0158	0,0160	0,0173	0,0172	0,0175	0,0173	0,0154
	18	0,0174	0,0162	0,0167	0,0168	0,0167	0,0174	0,0180	0,0174	0,0161

Průměry vypočítané z hodnot naměřených polem seven 29 pro jednotlivé šířky mezilamelových štěrbin 1mm, 2mm, 3mm, 5mm, 10mm, 20mm ( pro energii 18 MeV ) a průměry hodnot z uzavřených polí A a B pro výpočet transmise.

R <sub>1</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	2,63E-02	2,71E-02	2,83E-02	2,86E-02	2,86E-02	2,88E-02	2,80E-02	2,74E-02	2,61E-02
11	2,58E-02	2,71E-02	2,83E-02	2,87E-02	2,90E-02	2,91E-02	2,85E-02	2,76E-02	2,65E-02
12	2,62E-02	2,73E-02	2,79E-02	2,82E-02	2,84E-02	2,84E-02	2,84E-02	0,027481	2,64E-02
13	2,73E-02	2,81E-02	2,86E-02	0,02889	2,91E-02	0,028915	0,028572	2,78E-02	2,72E-02
14	2,69E-02	2,77E-02	2,81E-02	2,85E-02	2,86E-02	2,86E-02	2,82E-02	0,02736	2,66E-02
15	2,62E-02	2,71E-02	2,75E-02	2,82E-02	2,84E-02	2,83E-02	2,83E-02	2,77E-02	0,026765
16	2,76E-02	2,85E-02	2,91E-02	0,029055	2,94E-02	0,02915	2,89E-02	2,81E-02	2,69E-02
17	2,69E-02	2,78E-02	2,85E-02	2,88E-02	2,89E-02	2,87E-02	0,0288	2,79E-02	2,65E-02
18	2,62E-02	2,72E-02	2,85E-02	2,89E-02	2,91E-02	2,92E-02	2,89E-02	2,80E-02	2,73E-02
Průměr	2,80E-02								

R <sub>2</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	3,41E-02	0,034859	3,58E-02	0,036442	3,65E-02	3,68E-02	3,59E-02	3,50E-02	3,39E-02
11	3,39E-02	3,50E-02	3,61E-02	3,67E-02	3,70E-02	3,70E-02	3,64E-02	3,56E-02	3,41E-02
12	3,40E-02	3,50E-02	3,57E-02	3,61E-02	3,61E-02	3,61E-02	3,63E-02	3,52E-02	3,40E-02
13	3,50E-02	3,58E-02	0,036627	3,66E-02	3,70E-02	3,68E-02	3,63E-02	3,58E-02	3,48E-02
14	3,47E-02	3,57E-02	3,60E-02	3,62E-02	0,036638	3,64E-02	3,61E-02	3,54E-02	3,43E-02
15	3,37E-02	3,49E-02	3,52E-02	3,57E-02	3,62E-02	3,62E-02	3,61E-02	3,54E-02	3,46E-02
16	3,53E-02	3,62E-02	3,67E-02	3,68E-02	3,73E-02	3,70E-02	3,68E-02	3,58E-02	3,46E-02
17	3,46E-02	3,53E-02	3,61E-02	3,66E-02	3,69E-02	3,67E-02	3,63E-02	3,53E-02	3,42E-02
18	3,40E-02	3,49E-02	3,60E-02	0,03672	0,03678	3,69E-02	3,66E-02	3,55E-02	0,034928
Průměr	0,03573764								

R <sub>3</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	0,04127183	0,042243	0,043359	0,044206	0,043996	0,044246	0,043293	0,04248	0,041309
11	0,0408988	0,042468	0,04355	0,04459	0,044537	0,044662	0,043793	0,043184	0,041742
12	0,04145075	0,042524	0,043164	0,043895	0,043864	0,043845	0,044107	0,042786	0,041346
13	0,04234368	0,043216	0,044032	0,044152	0,044707	0,04447	0,044238	0,043357	0,042201
14	0,04237986	0,042987	0,043508	0,043742	0,044353	0,044284	0,043956	0,042875	0,042078
15	0,04130349	0,042098	0,043067	0,043148	0,044196	0,044103	0,043886	0,042839	0,042115
16	0,04282306	0,043731	0,044367	0,044512	0,04501	0,04478	0,044756	0,043234	0,042053
17	0,04207417	0,042746	0,043676	0,044376	0,04465	0,04443	0,044267	0,043307	0,041418

18	0,04144884	0,042412	0,043513	0,044268	0,04428	0,044618	0,044298	0,043184	0,042063
Průměr	0,0433178								

R <sub>5</sub>	10	11	15	13		15	16	17	18
10	0,0571139	0,05833	0,059012	0,05911	0,05641	0,059118	0,058319	0,057448	0,056111
	0,0574563	0,058826	0,059521	0,059724	0,056444	0,059937	0,059342	0,05845	0,056541
12	0,05790049	0,058413	0,058815	0,058841	0,056466	0,058912	0,058864	0,058077	0,056551
13	0,05720604	0,058761	0,059328	0,059404	0,059483	0,059599	0,059037	0,058742	0,057282
14	0,05680984	0,058473	0,058665	0,058837	0,059168	0,059226	0,058736	0,058334	0,056922
15	0,05575074	0,057579	0,057962	0,058517	0,059104	0,058784	0,058965	0,05845	0,057085
16	0,05733578	0,059043	0,059283	0,059625	0,059875	0,059791	0,05945	0,05874	0,056947
17	0,0565067	0,058055	0,058808	0,059424	0,059426	0,059323	0,059178	0,058096	0,05655
18	0,0553764	0,057162	0,058481	0,059221	0,059052	0,059437	0,058856	0,057998	0,056625
Průměr	0,05827036								

R <sub>10</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	0,09236159	0,094134	0,095804	0,096485	0,096432	0,096901	0,095884	0,094672	0,092575
11	0,09274231	0,095044	0,097026	0,097751	0,097628	0,098117	0,097609	0,096256	0,093897
12	0,09348502	0,095368	0,096479	0,096757	0,096624	0,09694	0,097002	0,096048	0,093889
13	0,09459765	0,096413	0,097384	0,097207	0,097555	0,097619	0,096761	0,096541	0,094888
14	0,09408263	0,096207	0,096427	0,096619	0,09707	0,097194	0,096448	0,09605	0,094398
15	0,09279843	0,095192	0,095503	0,095902	0,096548	0,096592	0,096612	0,096244	0,094297
16	0,09426891	0,096594	0,097187	0,097294	0,097337	0,097249	0,097361	0,096662	0,094281
17	0,09319182	0,095443	0,096741	0,097242	0,097261	0,09709	0,096682	0,095508	0,093664
18	0,09166488	0,093998	0,095706	0,096656	0,096642	0,096641	0,096113	0,094583	0,093081
Průměr	0,095842								

R <sub>20</sub>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
10	0,16591443	0,16898	0,171202	0,172385	0,17257	0,17288	0,171791	0,16974	0,166434
11	0,16717956	0,170988	0,173531	0,174262	0,174331	0,174927	0,174548	0,172653	0,168513
12	0,16833824	0,171733	0,173109	0,173048	0,173099	0,173718	0,173847	0,172989	0,16923
13	0,16944564	0,172578	0,173837	0,173359	0,174014	0,174005	0,173228	0,173489	0,170336
14	0,16864773	0,172192	0,172732	0,17297	0,173441	0,173929	0,172919	0,172924	0,170036
15	0,16730062	0,171126	0,171445	0,172239	0,17312	0,172779	0,173157	0,172708	0,16982
16	0,16888926	0,172784	0,173515	0,173139	0,173442	0,173433	0,174008	0,173225	0,169289
17	0,16733268	0,171152	0,173045	0,173509	0,173693	0,173506	0,173148	0,171213	0,168347

18	0,16470392	0,168535	0,170882	0,171933	0,171841	0,172111	0,17146	0,168976	0,166878
průměr	0,1716507								

CFA		10	11	12	13	14	15	16	17	18
	10	1,50E-02	1,51E-02	1,53E-02	1,66E-02	1,67E-02	1,66E-02	1,55E-02	1,53E-02	1,51E-02
	11	1,57E-02	1,58E-02	1,58E-02	0,016984	1,72E-02	1,67E-02	1,56E-02	1,54E-02	1,54E-02
	12	1,54E-02	0,015272	1,58E-02	1,68E-02	1,69E-02	1,69E-02	1,75E-02	1,57E-02	1,54E-02
	13	1,58E-02	1,57E-02	1,62E-02	1,64E-02	1,71E-02	1,70E-02	1,75E-02	1,60E-02	1,55E-02
	14	1,69E-02	1,54E-02	1,58E-02	1,57E-02	0,017195	1,71E-02	1,71E-02	1,57E-02	1,57E-02
	15	1,73E-02	1,62E-02	1,65E-02	1,61E-02	1,71E-02	1,70E-02	1,73E-02	1,54E-02	1,55E-02
	16	0,016942	1,58E-02	1,62E-02	1,62E-02	1,73E-02	1,71E-02	1,75E-02	1,61E-02	0,015836
	17	1,66E-02	1,56E-02	1,62E-02	1,62E-02	1,72E-02	1,69E-02	1,74E-02	1,70E-02	0,015174
	18	1,85E-02	1,74E-02	0,017454	1,75E-02	1,69E-02	0,017594	1,80E-02	1,74E-02	1,59E-02

CFB		10	11	12	13	14	15	16	17	18
	10	1,54E-02	1,57E-02	1,62E-02	1,72E-02	1,76E-02	1,71E-02	1,62E-02	1,62E-02	1,59E-02
	11	1,48E-02	1,51E-02	1,54E-02	0,016647	1,70E-02	1,66E-02	1,55E-02	1,54E-02	1,53E-02
	12	0,016479	1,62E-02	1,64E-02	1,74E-02	1,76E-02	1,72E-02	0,018001	1,59E-02	1,58E-02
	13	1,55E-02	1,55E-02	1,62E-02	1,65E-02	1,78E-02	1,74E-02	1,81E-02	1,67E-02	1,65E-02
	14	1,65E-02	1,51E-02	0,015695	1,58E-02	1,74E-02	1,75E-02	1,77E-02	1,63E-02	1,63E-02
	15	1,62E-02	1,51E-02	1,57E-02	1,56E-02	1,67E-02	1,68E-02	1,72E-02	1,54E-02	0,015312
	16	0,017581	1,65E-02	1,74E-02	1,75E-02	1,88E-02	1,88E-02	1,96E-02	1,80E-02	1,80E-02
	17	1,67E-02	1,56E-02	1,63E-02	1,62E-02	1,74E-02	1,74E-02	1,80E-02	1,76E-02	1,57E-02
	18	1,68E-02	0,015865	1,63E-02	1,63E-02	1,64E-02	1,72E-02	0,01804	1,75E-02	1,61E-02

(CFA+CFB)/2		10	11	12	13	14	15	16	17	18
	10	0,0152	0,0154	0,0158	0,0169	0,0171	0,0168	0,0159	0,0157	0,0155
	11	0,0152	0,0154	0,0156	0,0168	0,0171	0,0167	0,0156	0,0154	0,0154
	12	0,0159	0,0157	0,0161	0,0171	0,0173	0,0171	0,0178	0,0158	0,0156
	13	0,0156	0,0156	0,0162	0,0164	0,0175	0,0172	0,0178	0,0164	0,0160
	14	0,0167	0,0153	0,0157	0,0158	0,0173	0,0173	0,0174	0,0160	0,0160
	15	0,0167	0,0157	0,0161	0,0158	0,0169	0,0169	0,0172	0,0154	0,0154
	16	0,0173	0,0161	0,0168	0,0168	0,0181	0,0179	0,0186	0,0171	0,0169
	17	0,0166	0,0156	0,0163	0,0162	0,0173	0,0171	0,0177	0,0173	0,0154
	18	0,0176	0,0167	0,0169	0,0169	0,0166	0,0174	0,0180	0,0175	0,0160