Doporučení pro používání gafchromických filmů

Obsah

1 Úvod 2

2 Seznam zkratek 2

3 Filmová dozimetrie využívající gafchromické filmy 3

3.1 Použití gafchromických filmů 3

3.2 Vlastnosti gafchromických filmů 3

3.3 Skenery pro filmovou dozimetrii 9

3.4 Stabilita odezvy skenerů 10

3.5 Nehomogenita odezvy skeneru 11

3.6 Výběr vhodného typu filmu 14

3.7 Výběr vhodného skeneru 14

3.8 Výběr vhodného software 15

4 Různé možnosti vyhodnocení gafchromických filmů 15

4.1 „Multi channel“ dozimetrie 15

4.2 „Scan in one“ protokol 16

5 Doporučený postup práce s gafchromickými filmy 17

5.1 Příprava filmů 17

5.2 Ozáření filmů 18

5.3 Skenování filmů 18

5.4 Kalibrace filmů 19

5.5 Zpracování/vyhodnocení filmů 19

6 Zavedení filmové dozimetrie na pracovišti 20

7 Nejistoty při filmové dozimetrii 21

8 Použití gafchromických filmů pro dozimetrii protonových svazků 22

9 Použití gafchromických filmů pro měření v terapeutických rentgenových svazcích 24

10 Použití gafchromických filmů při zkouškách v rámci ZPS, ZDS a PZ lineárních urychlovačů 26

11 Shrnutí zásad práce s gafchromickými filmy 29

12 Literatura 30

1 Úvod

V poslední době dochází ve světě i u nás k rozmachu používání gafchromických (radiochromických) neboli samovyvolávacích filmů pro dozimetrické účely a naopak se postupně odstupuje od používání klasických radiografických (rentgenových) filmů. Důvodem k tomu je zejména jednodušší způsob použití gafchromických filmů, kdy odpadá nutnost filmy chemicky zpracovávat (vyvolávat) ve vyvolávacím automatu. Gafchromické filmy mají oproti rentgenovým filmům ještě další příznivější vlastnosti, některé jejich vlastnosti jsou ale také nepříznivé.

Vzhledem k rychlému nástupu gafchromických filmů pracoviště většinou nemají dostatečnou zkušenost s jejich používáním, navíc ani v odborné literatuře neexistuje ucelené souhrnné doporučení pro správné zacházení s těmito filmy. Jediný takový dokument, doporučení organizace AAPM (AAPM report No. 63), který se používáním gafchromických filmů zabývá, je z roku 1998 a je v některých aspektech již zastaralý. Proto také AAPM, konkrétně Task Group 235, připravuje nové doporučení pro gafchromické filmy, jež by mělo vyjít do konce roku 2017.

Cílem tohoto doporučení je poskytnout radioterapeutickým pracovištím návod pro zavedení filmové dozimetrie využívající gafchromické filmy. Gafchromické filmy totiž vyžadují specifický způsob zacházení (manipulace, skenování, kalibrace, …) a pro získání reprodukovatelných výsledků s potřebnou přesností je třeba konzistentně dodržovat určité zásady.

Oblast použití gafchromických filmů je široká, toto doporučení se ale zaměřuje pouze na použití těchto filmů v radioterapii, kde je lze použít pro QA ozařovačů v teleterapii i brachyterapii a při verifikaci plánů pro techniky IMRT, VMAT, SRS/SRT a samozřejmě také v dozimetrii malých polí. Doporučení se zabývá také použitím filmů pro protonové svazky.

Doporučení ale není výhradně určeno pro radioterapeutická pracoviště, sloužit může také např. držitelům povolení při provádění ZPS, ZDS a PZ.

Cílem doporučení je také pomoci nastavit na pracovištích správnou praxi použití těchto filmů, neboť odezva gafchromických filmů je ovlivněna více faktory (např. časem mezi ozářením a skenováním, nehomogenitou odezvy skeneru atd.).

2 Seznam zkratek

AAPM	American Association of Physicists in Medicine
IMAT	Rotační radioterapie s modulovanou intenzitou svazku
IMRT	Radioterapie s modulovanou intenzitou svazku
OD	Optická denzita
PZ	Přejímací zkouška
QA	Zabezpečování jakosti (Quality Assurance)
ROI	Oblast zájmu (Region of interest)
SRS/SRT	Stereotaktická radiochirurgie/radioterapie
ZDS	Zkouška dlouhodobé stability
ZPS	Zkouška provozní stálosti

3 Filmová dozimetrie využívající gafchromické filmy

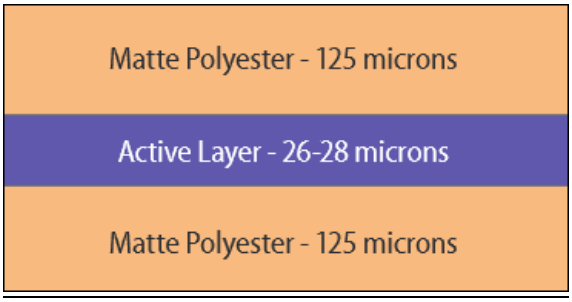
3.1 Použití gafchromických filmů

Gafchromické filmy se používají jak ve výzkumu, tak v klinické praxi. Uplatnění nacházejí nejen v radioterapii externími svazky, ale také v brachyterapii (např. [15]). Jsou vhodné jak pro dozimetrii fotonových a elektronových svazků, tak také pro dozimetrii protonových svazků. Dále jsou vhodné pro dozimetrii malých polí a pro dozimetrii na rozhraní různých materiálů. Jedním z nejčastějších použití gafchromických filmů je stanovení dvourozměrných dávkových distribucí v rámci verifikace terapeutických plánů (IMRT, VMAT, ...).

3.2 Vlastnosti gafchromických filmů

Gafchromické filmy jsou filmy, v nichž po ozáření dochází k barevnému zabarvení (zčernání). Tato barevná změna je důsledkem polymerizace monomerů v citlivé vrstvě filmu a je úměrná absorbované energii ionizujícího záření, a tím i absorbované dávce. Gafchromické filmy jsou relativně málo citlivé na světlo, a proto s nimi lze manipulovat na denním i umělém světle. Avšak i přes relativně nízkou citlivost gafchromických filmů na světlo by se gafchromické filmy měly vystavovat světlu co nejméně. Je doporučeno skladovat tyto filmy v černých obalech na místech bez přístupu světla [2]. Díky vysokému submilimetrovému prostorovému rozlišení jsou výborným nástrojem zejména pro měření velkých dávkových gradientů.

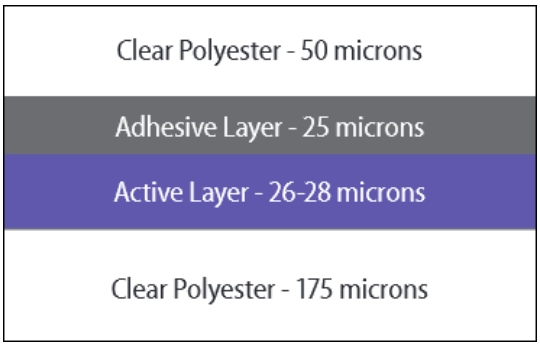
V současnosti jsou jedním z nejčastěji používaných filmů v radioterapii filmy EBT3, které vyrábí firma Ashland (dříve International Specialty Products). Gafchromické filmy EBT3 jsou dle informací výrobce vhodné pro měření dávek přibližně od 10 mGy do 40 Gy. Symetrická struktura gafchromického filmu EBT3 (matná polyesterová vrstva, vrstva aktivní složky, matná polyesterová vrstva) je znázorněna na Obr. 1.



Obr. 1: Struktura gafchromického filmu EBT3 [22]

Aktivní vrstva EBT3 filmu je tvořena mikrokrystaly monomeru citlivými na ionizující záření. Tyto mikrokrystaly jsou umístěny a vázány v syntetickém polymeru. Tloušťka aktivní vrstvy je 26-28 µm. Aktivní vrstva filmu je obklopena polyesterovými vrstvami, jež chrání aktivní vrstvu před mechanickým poškozením.

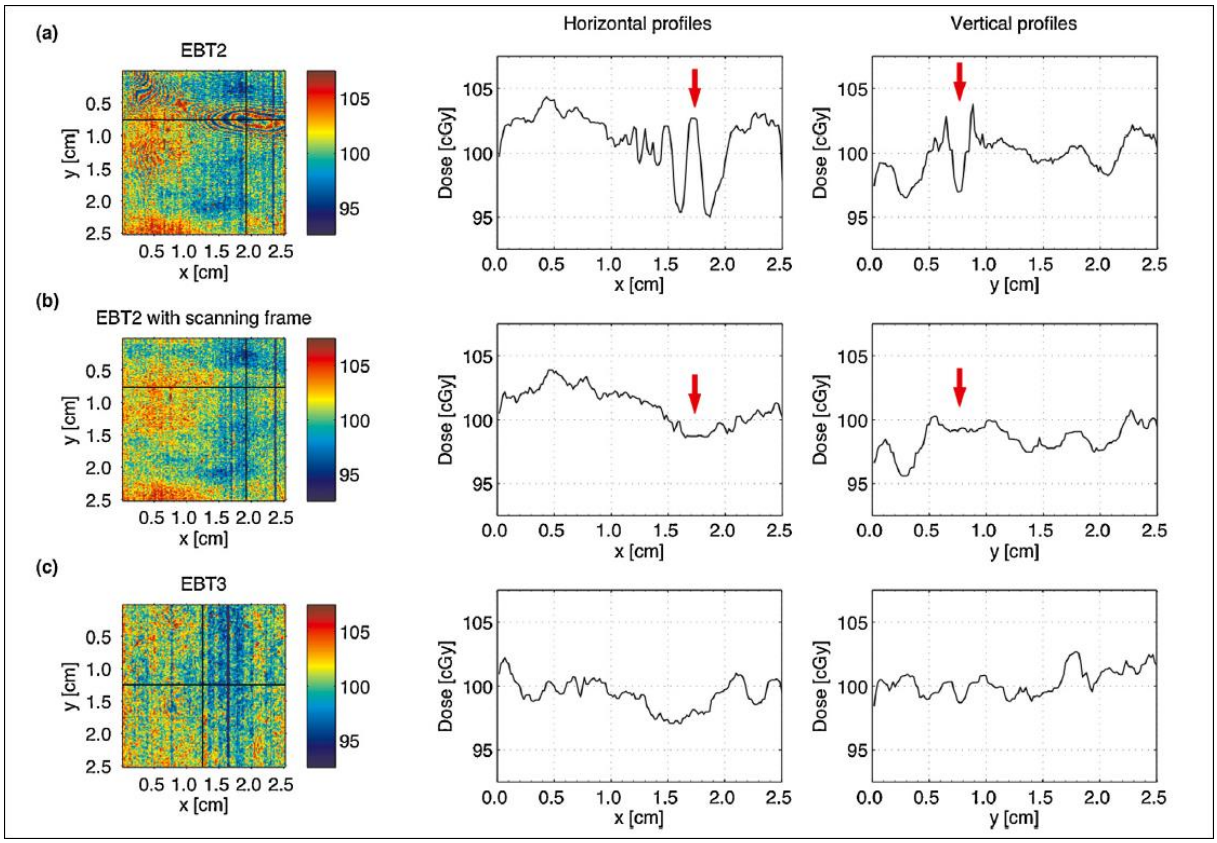
Pro srovnání je na Obr. 2 zobrazena struktura gafchromického filmu EBT2. Nad aktivní vrstvou se nachází adhezní (pojivová) vrstva. Aktivní a adhezní vrstva filmu je obklopena polyesterovými vrstvami.



Obr. 2: Struktura gafchromického filmu EBT2 [22]

Výrobce EBT3 filmů udává, že díky symetrické struktuře filmů se při skenování nemusí rozlišovat přední a zadní strana filmu. To, že odezva EBT3 filmů nezávisí na tom, zda se film při skenování umístí na lůžko skeneru přední nebo zadní stranou potvrdili Dreindl a kol. [3], v jejich práci se změny optické denzity (OD) pro tyto dvě geometrie (přední vs. zadní strana) pro EBT3 filmy pohybovaly od 0,0% do 0,3%. U EBT2 filmů se změny OD pohybovaly od 0,1% do 1,1%.

Díky polyesterové matné vrstvě EBT3 filmy eliminují výskyt Newtonových kroužků, jež nepříznivě ovlivňují odezvu filmu. To potvrdili např. Dreindl a kol. [3], kteří na EBT3 filmech nezaznamenali žádné artefakty způsobené Newtonovými kroužky, na EBT2 filmech ale ano (viz Obr. 3). Výskyt Newtonových kroužků lze u EBT2 filmů eliminovat skenováním s vloženým tenkým rámečkem (tzv. „scanning frame“), díky němuž filmy neleží přímo na skleněném lůžku skeneru, ale např. 1 mm nad ním a interferenční Newtonovy kroužky by tak neměly vznikat.

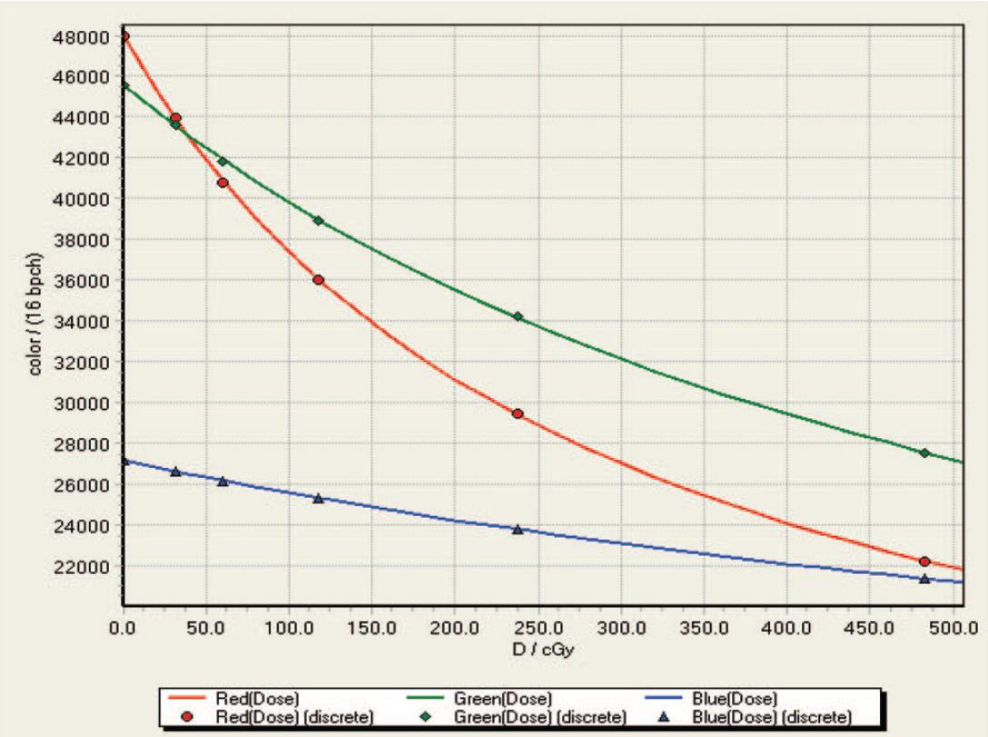


Obr. 3: Porovnání horizontálních a vertikálních dávkových profilů EBT2 a EBT3 filmů ilustrující vliv Newtonových kroužků [3]. V horní řadě (a) je vidět výskyt Newtonových kroužků při skenování EBT2 filmů, uprostřed (b) je výskyt Newtonových kroužků u EBT2 filmů eliminován skenováním na tenkém rámečku a v dolní řadě (c) se Newtonovy kroužky u EBT3 filmů taktéž nevyskytují. Oblast výskytu Newtonových kroužků je označena červenou šipkou.

Odezva filmů při vyhodnocení v různých barevných kanálech

Pokud se gafchromické snímky oskenují (digitalizují) jako RGB snímky, lze pak vyhodnocovat jejich odezvu v jednotlivých barevných kanálech, konkrétně v červeném, zeleném nebo modrém. Ukázka odezvy gafchromických filmů je zobrazena na Obr. 4, kde je ukázána závislost odezvy filmů (hodnot pixelů – svislá osa) na dávce (vodorovná osa) pro červený, zelený a modrý kanál. Pro dozimetrické účely je použitelný červený a zelený kanál. Nejčastěji se používá červený kanál, v mnoha případech ale zelený kanál pro dávky přibližně do 10 Gy dává srovnatelné výsledky. Zelený kanál se doporučuje použít pro měření vyšších dávek, přibližně od 10 Gy do 40 Gy.

Odezvu filmů lze vyjádřit vedle hodnot pixelů také v optické denzitě.



Obr. 4: Odezva gafchromických filmů EBT3 v červeném, zeleném a modrém kanálu [23]

Energetická závislost gafchromických filmů

Jednou z nejpříznivějších vlastností gafchromických filmů je v porovnání s radiografickými filmy jejich nižší energetická závislost. Fuss a kol. [8] udávají, že energetická závislost gafchromických filmů EBT ve fotonových svazcích s nominální energií 6 až 18 MV je minimální. Filmy EBT byly první z tzv. řady filmů EBT, dále do této řady patřily filmy EBT2. V současné době tuto řadu zastupují filmy EBT3. Dle Sarfehnia a kol. [14] je EBT3 film energeticky nezávislý v rozsahu od megavoltážních (MV) energií až do energie 400 keV. Zanedbatelnou energetickou závislost gafchromických filmů EBT2 uvádějí Casanova Borca [16], pro různé energie zmiňují rozdíly v optických denzitách do 1%. Energetickou nezávislost gafchromických filmů EBT2 ve svazcích s nominální energií 4 MV, 6 MV a 18 MV potvrdila práce [1], průměrné hodnoty pixelů pro tyto tři energie se shodovaly do 0,4%.

Nehomogenita gafchromických filmů

Velkou pozornost při používání gafchromických filmů je třeba věnovat jejich nehomogenitě, která je výraznější než u radiografických filmů. Výraznou nehomogenitou se vyznačovaly rané šarže gafchromických filmů EBT2 (např. šarže F03110903 [9]), novější šarže EBT2 filmů mají již nižší nehomogenitu. Hartmann a kol. [9] stanovili nehomogenitu (v hodnotách pixelů) EBT2 filmu ±3,7% a uvádí, že tato nehomogenita filmu může vést k nejistotě stanovení dávky až ±8,7% pro EBT2 film ozářený dávkou 1 Gy. Stejným způsobem stanovili nehomogenitu filmu EBT (v dávce) ±1,1%. Nehomogenitu filmu stanovili tak, že film rozstřihali na 12 menších kousků o velikosti 6,4 x 6,8 cm^2 a tyto filmy skenovali ve středu skenovací plochy skeneru. U každého filmu stanovili průměrnou odezvu ve středu filmu pro oblast zájmu (ROI) 1,4 x 1,4 cm^2. Nehomogenitu filmu stanovili jako podíl

maximální, resp. minimální odezvy a průměrné odezvy. Nehomogenitu stanovovali pro čtyři filmy šarže F03110903.

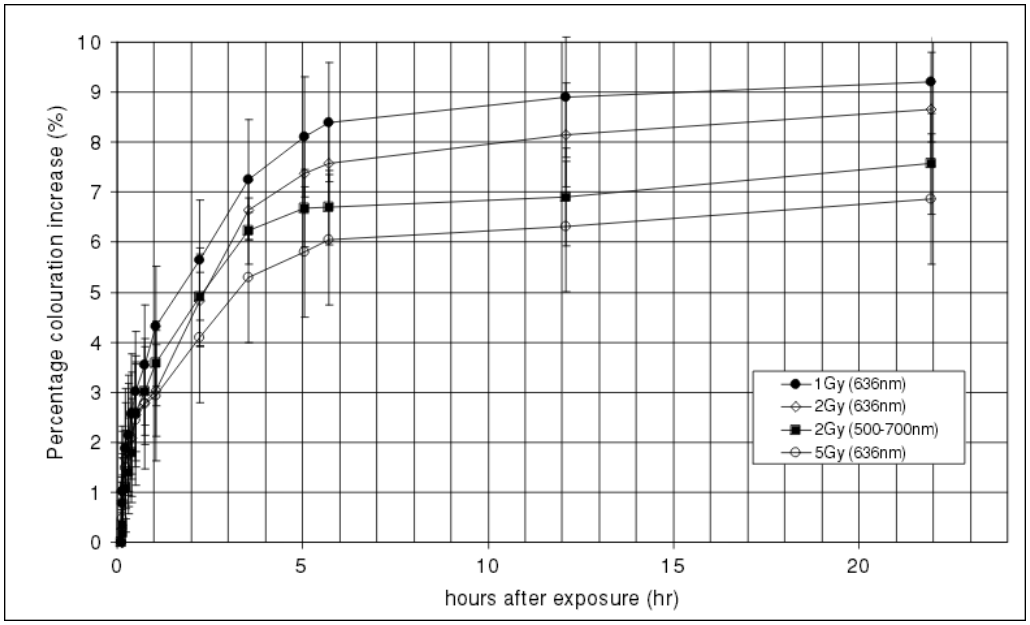
Richley a kol. [35] pro transmisní mód skenování zmiňují nehomogenitu jednoho EBT2 filmu („intra sheet uniformity“) 2,4% v hodnotách pixelů, jež odpovídá nehomogenitě 4,8% v dávce pro film ozářený dávkou 2 Gy. Titíž autoři uvádějí nehomogenitu několika filmů (tzv. „inter sheet uniformity“) 1,2% v hodnotách pixelů, jež odpovídá nehomogenitě 2,4% v dávce. „Intra sheet“ nehomogenitu stanovili pro film rozstříhaný na 15 menších kousků, ROI byla 0,5 x 0,5 cm^2. „Inter sheet“ nehomogenitu stanovili na základě odezev deseti filmů změřených ve středu filmů. Použili filmy šarže F02060902B. Nehomogenitu stanovovali jako dvojnásobek směrodatné odchylky průměrných hodnot pixelů.

Nehomogenita EBT2 a EBT3 filmů je dle [3] pro rozpětí dávek 0 až 8 Gy a pro energie 6 MV, 10 MV a 18 MV nižší než ±1,5% (v hodnotách pixelů). Nehomogenitu v práci [3] stanovili jako směrodatnou odchylku hodnot pixelů pro malé oblasti zájmu od 0,5 x 0,5 cm^2 až do 2,5 x 2,5 cm^2 a vztáhli ji k průměrným hodnotám pixelů v daných ROI. Nehomogenitu stanovili pro EBT3 filmy šarže A101711-03 a EBT2 filmy šarže A06271102 a F03181001B.

Nehomogenita pro gafchromické filmy není definována jednoznačně, záleží, jak si ji autoři článků nadefinují. Je třeba být si vědom toho, zda se jedná o nehomogenitu v hodnotách pixelů, v optické denzitě nebo v dávce.

Stabilita odezvy filmů v čase („Post irradiation darkening“)

Při vyhodnocení gafchromických filmů hraje významnou roli změna zčernání filmu s časem po ozáření, tzv. „post irradiation darkening“. Změna zčernání gafchromického filmu je nejvýraznější prvních několik hodin po ozáření (např. [10, 11]), viz Obr. 5. Interval mezi ozářením a skenováním filmů bývá v praxi často přibližně 24 hodin.



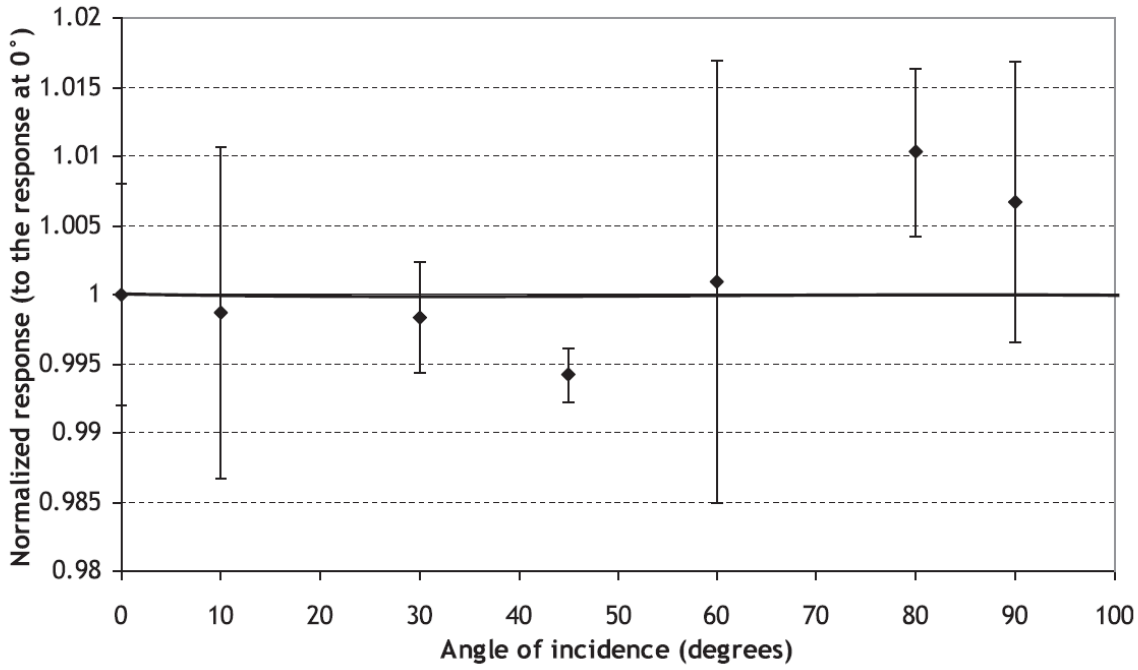
Obr. 5: Procentuální nárůst odezvy (optické denzity) pro EBT film ozářený různými dávkami [10]

Závislost odezvy filmů na dávkovém příkonu

Obecně je odezva gafchromických filmů v oblasti klinicky používaných dávkových příkonů 2 až 4 Gy za minutu nezávislá na dávkovém příkonu [2]. Casanova Borca a kol. [16] potvrdili nezávislost gafchromických filmů EBT3 na dávkovém příkonu od 100 do 600 MU/min, pro jednotlivé dávkové příkony uvádějí rozdíly v optických denzitách do 1%.

Úhlová závislost gafchromických filmů

Úhlovou nezávislost gafchromických filmů potvrdili Huet a kol. [36] (viz Obr. 6).



Obr. 6: Úhlová závislost gafchromických filmů EBT3 uvedená v práci [36]. Chybové úsečky jsou zobrazeny pro k=1. Úhel 0° odpovídá kolmému dopadu svazku na film.

Kairn a kol. [37] uvádějí minimální úhlovou závislost gafchromických filmů EBT2. Van Battum a kol. [34] pro filmy EBT uvádí přibližně 1% nárůst optické denzity pro úhly blízké paralelnímu umístění filmů vůči svazku.

Výhody a nevýhody gafchromických a radiografických filmů

Výhody a nevýhody gafchromických a radiografických filmů jsou shrnuty na Obr. 7.

	radiografické filmy	gafchromické filmy
výhody	• dlouholetá zkušenost • vyšší citlivost na ionizující záření • nižší nehomogenita filmu • vysoké prostorové rozlišení • dlouhodobá stabilita naexponovaných a vyvolaných filmů	• jednoduchá manipulace (filmy téměř necitlivé na světlo, není nutné chemické zpracování, lze s nimi pracovat na světle) • jednoduchá úprava velikosti filmů (filmy lze střihat na menší části) • téměř tkáňově ekvivalentní • nižší energetická závislost • vysoké prostorové rozlišení • lze je použít při měření ve vodě
nevýhody	• komplikovaná manipulace (nutnost chemického zpracování, filmy citlivé na světlo, manipulace v temné komoře) • nutnost mít funkční vyvolávací automat • filmy nejsou tkáňově ekvivalentní • výrazná energetická závislost • problematická úprava velikosti filmů • drahé	• relativně krátká zkušenost • nižší citlivost na ionizující záření • nutno počítat i s nehomogenitou odezvy skeneru (závislou také na velikosti nazářené dávky) • nelinearita odezvy s dávkou • vyšší nehomogenita filmu • velká variabilita citlivosti mezi šaržemi • energetická závislost v kV energiích • vysoké nároky na čistotu práce (nutné rukavice) • drahé

Obr. 7: Výhody a nevýhody gafchromických a radiografických filmů

3.3 Skenery pro filmovou dozimetrii

V současné době se pro dozimetrické účely gafchromické filmy téměř výhradně skenují na stolních skenerech. Oproti profesionálním skenerům (např. Vidar Dosimetry Pro) jsou totiž výrazně levnější. V těchto skenerech se k prosvětlování filmů používají různé zdroje světla, nejčastěji bílá fluorescenční lampa nebo xenonová lampa. Ke snímání množství světla prošlého skrz filmy se nejčastěji používají CCD detektory. Výrobce gafchromických filmů řady EBT (EBT, EBT2 a EBT3) doporučuje ke skenování používat skenery Epson 11000XL nebo 10000XL (velikost skenovací plochy A3), Epson V750 nebo Epson V700 (velikost skenovací plochy A4).

Obr. 8: Skenery Epson V750 (vlevo) a Epson 11000XL (vpravo)

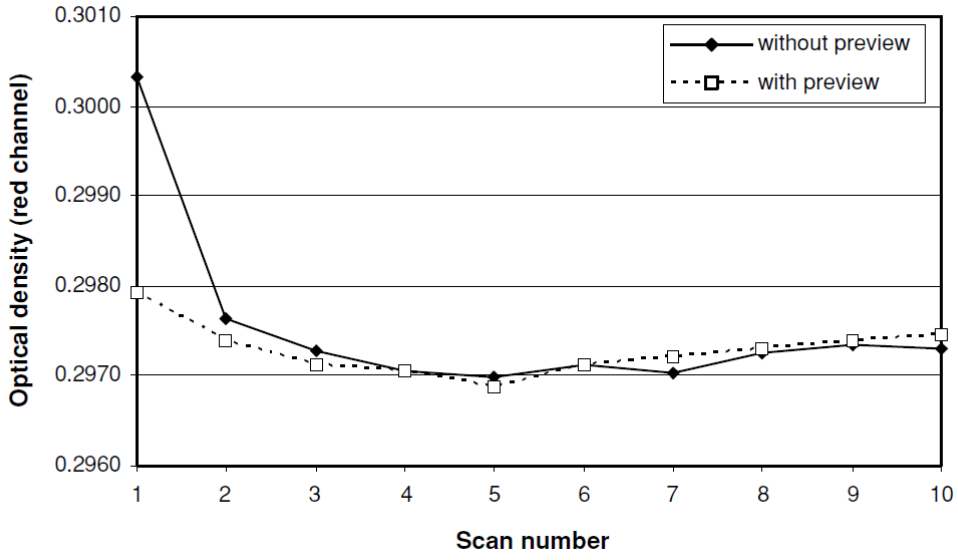
Skenování v transmisním a reflexním módu

Filmy se nejčastěji skenují na stolních skenerech v transmisním módu, lze použít ale také reflexní mód. Při transmisním módu se lampa skeneru nachází nad nebo pod filmem, kolimovaný svazek světla prochází gafchromickým filmem umístěným na skleněném skenovacím lůžku a pomocí detektoru umístěného na opačné straně od filmu než je lampa se detekuje množství prošlého světla. Při reflexním módu se lampa a detektor nachází na stejné straně od filmu, film přiléhá k reflexní podložce. Svazek světla vychází z lampy, prochází filmem, odráží se od podložky, opět prochází filmem a dopadá na detektor.

Porovnáním transmisního a reflexního módu pro vyhodnocení gafchromických filmů se zabývá např. práce [35]. Pro skenování gafchromických filmů typu EBT je doporučeno používat transmisní mód (např. [39]).

3.4 Stabilita odezvy skenerů

Na Obrázku 9 je znázorněna krátkodobá stabilita odezvy skeneru Epson 1680 Pro stanovená v práci [12]. V grafu jsou vyneseny odezvy (optické denzity) filmu EBT pro deset po sobě jdoucích skenů.



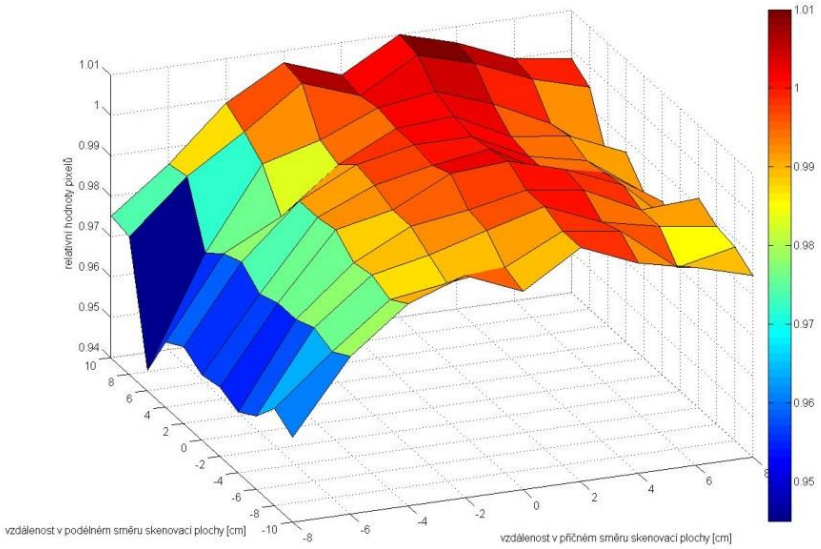
Obr. 9: Krátkodobá stabilita odezvy skeneru Epson 1680 Pro [12]

Matney a kol. [38] skenovali desetkrát po sobě EBT filmy ozářené různými dávkami na skeneru Epson V700. Směrodatné odchylky průměrných hodnot pixelů byly vždy menší než 0,2%. Dufek [40] stanovoval krátkodobou stabilitu odezvu skenerů Epson 10000XL a Epson V750 jako poměr maximální a minimální odezvy (hodnot pixelů) EBT2 filmu pro dvacet skenů po sobě. Pro skener Epson 10000XL, resp. Epson V750 byla stabilita menší než 0,2%, resp. 0,3%.

Vzhledem k tzv. „warm-up“ efektu se doporučuje před skenováním gafchromických filmů provést několik skenů naprázdno pro zahřátí elektroniky skeneru. Někteří autoři též vyhodnocují až druhé a další skeny.

3.5 Nehomogenita odezvy skeneru

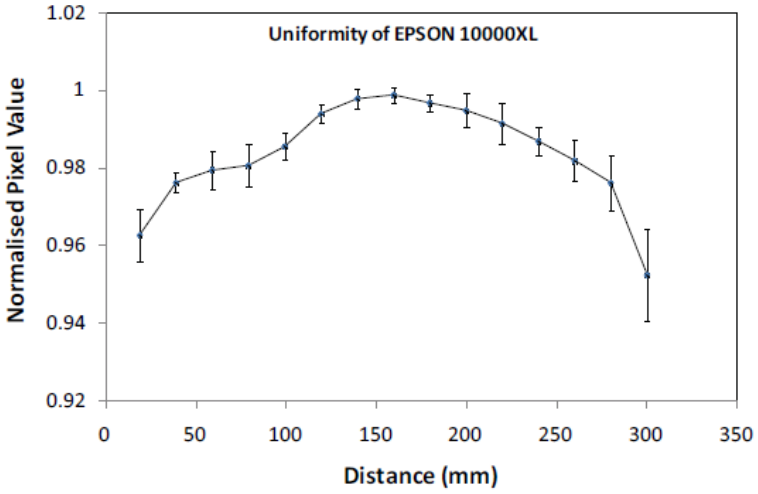
Jednou z nejdůležitějších vlastností skenerů pro provádění filmové dozimetrie pomocí gafchromických filmů je nehomogenita odezvy skeneru. Na Obr. 10 je zobrazena nehomogenita odezvy skeneru Epson V750 z práce [39]. Nehomogenita je vyjádřena v relativních hodnotách pixelů (vzhledem k odezvě ve středu skenovací plochy) pro skenování malého filmu 2 x 2 cm^2 ozářeného dávkou 4 Gy v různých pozicích skenovací plochy skeneru. Na Obr. 10 je vidět více nehomogenní oblast na levé straně v podélném směru skenovací plochy, kde je odezva skeneru přibližně o 3 až 5% nižší než uprostřed skenovací plochy.



Obr. 10: Nehomogenita odezvy skeneru Epson V750 při skenování malého filmu 2 x 2 cm^2 ozářeného dávkou 4 Gy [39]

Na Obr. 11 je ilustrována nehomogenita odezvy skeneru Epson 10000XL vyjádřená v hodnotách pixelů ve směru kolmém ke směru pohybu lampy skeneru. Hodnoty pixelů jsou znormalizovány ke středu skenovací plochy. Je vidět, že směrem od středu skeneru k jeho okrajům v laterálním směru se nehomogenita odezvy skeneru zvětšuje. Obecnou vlastností skenerů je, že nehomogenita odezvy skenerů ve směru kolmém k pohybu lampy je výraznější než ve směru rovnoběžném s pohybem lampy (viz „scan direction“ např. na Obr. 13).

Nehomogenita odezvy skeneru závisí na velikosti nazářené dávky, s rostoucí nazářenou dávkou se nehomogenita odezvy skeneru zvětšuje. Např. dle Lewise a kol. [23] se při vyhodnocení filmů v červeném kanále nehomogenita odezvy skeneru Epson 10000XL a Epson V700 pohybuje do 2% pro centrální oblast skeneru (vzdálenosti přibližně do 5 cm od středu skeneru) a pro dávky do 2 Gy.



Obr. 11: Ukázka laterální nehomogenity skeneru Epson 10000XL [31]

Huet a kol. [36] stanovili nehomogenitu odezvy (v hodnotách pixelů) skeneru Epson V700 pomocí skenovaní neozářeného filmu EBT3 v různých pozicích skenovací plochy 1,2% a rozhodli se filmy vyhodnocovat pouze z centrální oblasti skeneru o velikosti 12 x 12 cm^2.

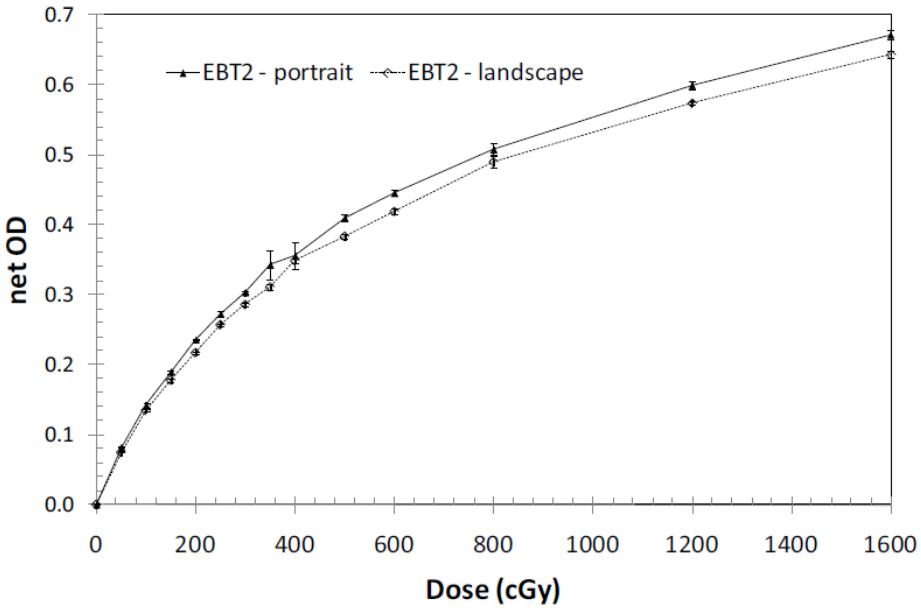
Geometrické zkreslení skeneru

Skenery nemusí digitalizovat snímky přesně v poměru 1:1, proto je nutné ověřit jejich geometrickou přesnost. Např. u jednoho skeneru Epson V700 bylo zjištěno, že v příčném směru zvětšuje rozměry o 0,41 % (tzn. u radiačního pole velikosti 10 cm je zkreslení cca 0,4 mm). U stejného skeneru ale v podélném směru zkreslení rozměrů zjištěno nebylo. Případné geometrické zkreslení by se mělo při vyhodnocování (větších) dávkových distribucí a při vyhodnocování velikostí radiačních polí korigovat.

Závislost odezvy filmů na jejich orientaci při skenování na skeneru

Odezva gafchromických filmů závisí na umístění těchto filmů na skeneru. Dreidl a kol. [3] porovnávali změnu odezvy EBT2 a EBT3 filmů při skenování v orientaci „portrait“ (0° a 180°) a „landscape“ (90° a 270°) a pro tyto orientace zjistili rozdíly v optické denzitě větší než 3,9%, přičemž největší rozdíly byly u nízkých dávek (0,5 Gy).

Pro EBT2 filmy je porovnání odezev filmů při skenování v orientaci „portrait“ a „landscape“ znázorněno na Obr. 12 [24]. Obě výše zmíněné orientace se vztahují ke skenování celého filmu. Při stříhání filmů na menší kousky je nutné nastřihané kousky filmů označit např. v rozích, aby byla zřejmá jejich orientace vůči původnímu celému filmu. Filmy (jak celé, tak menší nastříhané kousky) by se měly skenovat konzistentně v jedné vybrané orientaci.



Obr. 12: Porovnání odezev filmů EBT2 při skenování v orientaci „portrait“ a „landscape“ [24]

3.6 Výběr vhodného typu filmu

Výběr vhodného typu filmu by se měl odvíjet od toho, pro jaké energie svazků (megavoltážní nebo kilovoltážní) se zamýšlí filmy používat spolu s předpokládaným rozsahem měřených dávek.

Pro měření dávek a dávkových distribucí v radioterapii lze pro megavoltážní fotonové svazky, svazky elektronů a svazky protonů použít filmy EBT2, EBT3 a EBT3+. Tyto filmy jsou vhodné k měření dávek přibližně od 10 mGy až ke 40 Gy. Pro měření vyšších dávek jsou vhodné filmy MD-V3 (2 Gy až 100 Gy) a HD-V2 (10 Gy až 400 Gy) [17]. Pro měření dávek v kilovoltážních svazcích lze použít filmy XR-RV3 (50 mGy až 15 Gy) a XRQA2 (1 mGy až 200 mGy) [17].

Pro měření nedozimetrických charakteristik radiačních polí pro megavoltážní svazky fotonů, elektronů a protonů lze použít vedle filmů řady EBT take filmy RTQA2 (20 mGy až 8 Gy), pro kilovoltážní svazky se doporučuje použít filmy XRQA2 (1 mGy až 200 mGy), XRCT2 (1 mGy až 200 mGy) a XRM2 (1 mGy až 200 mGy).

Ještě existují speciální filmy určené přímo pro ozařovač CyberKnife (např. Ballcube II EBT3, AQA EBT3).

3.7 Výběr vhodného skeneru

V současné době se pro filmovou dozimetrii doporučuje používat skenery Epson. Mezi nejčastěji používané skenery pro filmovou dozimetrii patří tyto skenery: Epson 11000XL, Epson 10000XL, Epson V750, Epson V700, Epson 1680. Pomocí skenerů Epson 110000XL a Epson 10000XL lze skenovat filmy o velikosti A3, ostatní uvedené skenery slouží ke skenování filmů o velikosti A4.

3.8 Výběr vhodného software

Software pro skenování gafchromických filmů je ve většině případů součástí dodávky skeneru (např. software EpsonScan pro skenery Epson).

Pro kalibraci a vyhodnocení gafchromických filmů lze použit placené komerční programy, mezi které patří např. OmniPro I´mRT (IBA), Verisoft (PTW) nebo FilmQA Pro (Ashland). Výhodou těchto komerčních programů je přívětivé uživatelské rozhraní s množstvím různých funkcí pro kalibraci a vyhodnocení filmů. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. Levnější variantou je použití programu Matlab, filmy lze též kalibrovat a vyhodnocovat v programu Microsoft Excel, zdarma je k dispozici program ImageJ. V současné době je FilmQA Pro jediným komerčním programem, kde je implementována „multi channel“ dozimetrie.

4 Různé možnosti vyhodnocení gafchromických filmů

Možností, jak vyhodnotit gafchromické filmy, tzn. skenovat je a převést jejich odezvu na dávku, je několik. Nejdříve je potřeba zvolit, zda se bude vyhodnocovat odezva filmů pouze z jednoho barevného kanálu (červeného nebo zeleného), v tomto případě se jedná o tzv. „single channel“ dozimetrii nebo zda se využije odezva filmů ve všech třech kanálech (tzv. „multi channel“ dozimetrie nebo „triple channel“ dozimetrie).

Dále je potřeba zvolit, zda se filmy budou skenovat jeden po druhém nebo se bude skenovat více filmů najednou. V případě skenování více filmů najednou se mluví o „scan in one“ protokolu (viz kap. 4.2)

Dále je potřeba rozhodnout, zda se budou od odezev změřených filmů odečítat odezvy pozaďových neozářených filmů. Při „multi channel“ dozimetrii se neozářené filmy neodečítají.

V neposlední řadě je třeba rozhodnout, zda se při kalibraci bude odezva filmů (hodnoty pixelů) převádět přímo na dávku nebo se hodnoty pixelů nejdříve převedou na optickou denzitu a až poté se optická denzita převede na dávku. Zatím nepanuje všeobecná shoda na tom, který ze dvou výše uvedených způsobů by se měl používat.

Postup vyhodnocení filmů využívající optickou denzitu a odečtení neozářeného filmu je uveden např. v práci [33].

4.1 „Multi channel“ dozimetrie

V poslední době se začíná prosazovat dozimetrie, při níž se při vyhodnocení filmů využívá odezva filmů ve všech třech kanálech (tzv. „multi-channel“ nebo „triple-channel“ dozimetrie) [4-7] oproti standardnímu vyhodnocení, jež využívá odezvy buď pouze z červeného nebo pouze ze zeleného kanálu (tzv. „single-channel“ dozimetrie). V současné době je „multi channel“ dozimetrie implementována pouze v jediném komerčním software pro skenování a vyhodnocení filmů, tímto softwarem je FilmQA Pro.

Pomocí „multi channel“ dozimetrie je možné kompenzovat jednak nehomogenitu odezvy skeneru a jednak odchylky způsobené kolísáním tloušťky citlivé vrstvy filmu přes celý film a významně tím přispět k přesnějšímu měření dávkové distribuce [4].

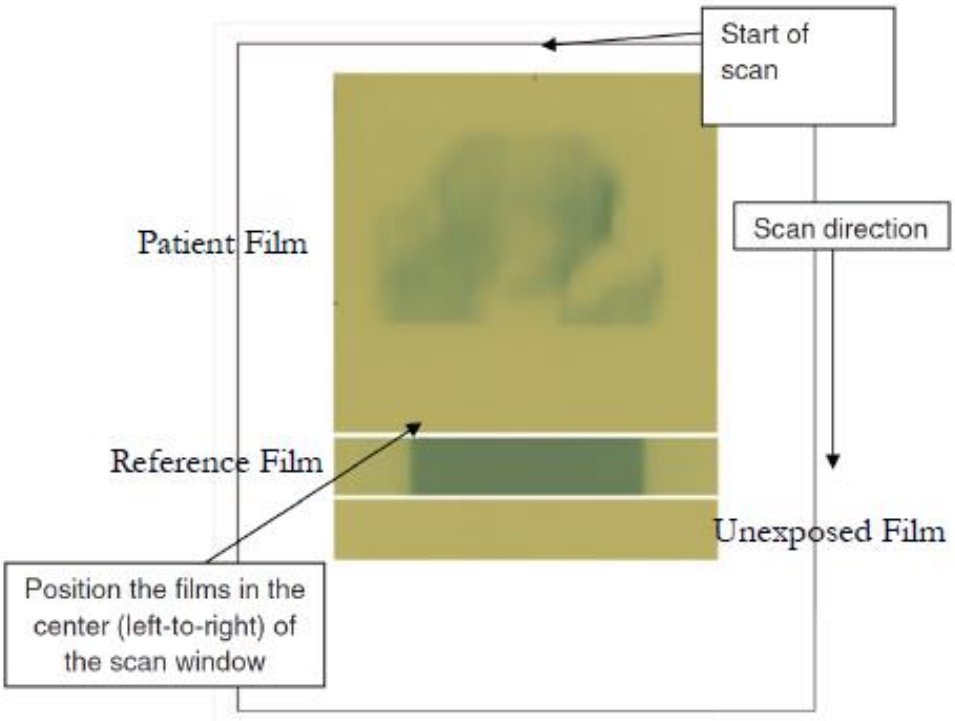
4.2 „Scan in one“ protokol

Filmy lze skenovat na skeneru postupně jeden za druhým nebo lze současně skenovat více filmů, současné skenování více filmů bývá v literatuře označováno např. jako „scan in one“ protokol nebo „single scan“ protokol.

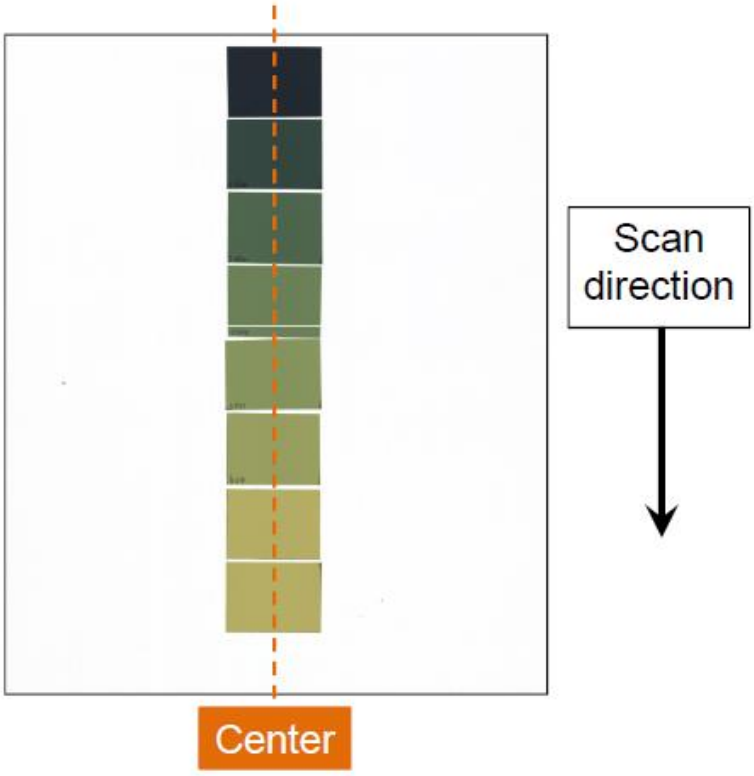
Při „scan in one“ protokolu se na lůžko skeneru umístí měřicí film, referenční film a neozářený film (viz Obr. 13). Referenční film je ozářen polem se známou hodnotou dávky (přibližně 80% až 100% z maximální dávky na filmu). Referenční film se použije k přeškálování kalibrační křivky. Lewis a kol. [23] doporučují, aby měřicí a referenční film byly ozářeny s co nejmenší časovou prodlevou (např. 5 minut) a aby se čas mezi ozářením a skenováním rovnal minimálně čtyřnásobku časové prodlevy mezi ozářením měřicího a referenčního filmu (v tomto případě tedy minimálně 20 minut).

Při „scan in one“ protokolu se také kalibrační filmy skenují všechny současně (viz Obr. 14). Filmy by měly být umístěny laterálně ve středu skenovací plochy (kvůli snížení vlivu nehomogenity odezvy skeneru).

Výhodou „scan in one“ protokolu oproti klasickému skenování filmů jeden po druhém je kratší doba skenování a také se při něm nemusí dodržovat časový odstup mezi ozářením a skenováním přibližně 24 hodin. Další výhodou je eliminace „interscan variability“.



Obr. 13: Uspořádání při skenování filmů pomocí „scan in one“ protokolu [23]



Obr. 14: Uspořádání při skenování kalibračních filmů v rámci „scan in one“ protokolu [17]

5 Doporučený postup práce s gafchromickými filmy

Gafchromické filmy vyžadují speciální způsob zacházení. Při použití gafchromických filmů k dozimetrickým účelům je třeba (např. pro získání reprodukovatelných výsledků a potřebné přesnosti stanovení dávky) dodržovat následující zásady.

5.1 Příprava filmů

- Filmy by se měly správně skladovat zabalené v černých obálkách nebo fóliích na temném místě.
- Filmy by se měly skladovat při teplotách do cca 50°.
- Filmy by se neměly vystavovat UV světlu.
- S filmy by se mělo manipulovat v rukavicích.
- Dotýkat se pouze okrajů filmů.
- Před použitím by se filmy měly vizuálně prohlédnout, zda na nich nejsou artefakty.
- Filmy lze stříhat na menší kousky pomocí nůžek nebo řezačky.
- Nastřihané kousky filmů by se měly označit např. v rozích, aby byla zřejmá jejich orientace vůči původnímu filmu (orientace „landscape“ vs „portrait“).
- Filmy lze na jejích okrajích popisovat např. pomocí permanentní fixy nebo propisovací tužky. Dobře odzkoušené jsou pro tento účel permanentní fixy s tenkým (0,3 mm) hrotem.
- Filmy by měly být označeny tak, aby bylo zřejmé, z jaké jsou šarže.

- Filmy by měly být čisté, nečistoty lze setřít hadříkem.

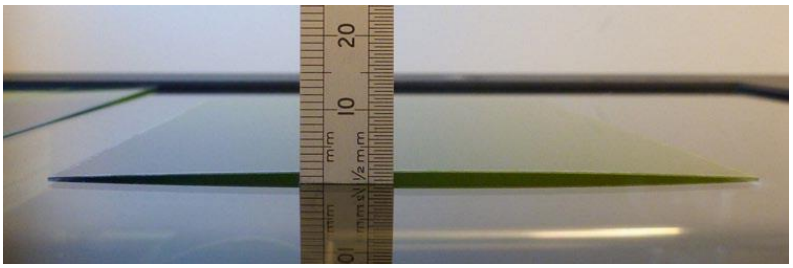
5.2 Ozáření filmů

- Neozařovat filmy příliš nízkými dávkami, např. u EBT3 filmů by vyhodnocovaná dávka měla být nejlépe alespoň 1 Gy.
- S filmy lze měřit ve vodním fantomu, neměly by být ale ve vodě ponořeny příliš dlouho. V práci [27] je zmíněno, že půlhodinové ponoření filmů EBT2 vede k zanedbatelné změně optické denzity.
- Pro měření na zakřiveném povrchu lze filmy ohýbat.

5.3 Skenování filmů

- Udržovat filmy a skener čisté (k čištění lze použít líh a papírové ubrousky).
- Neskenovat filmy hned po zapnutí skeneru (počkat alespoň 20 min pro zahřátí elektroniky).
- Před skenováním se doporučuje také zahřát skener několika „prázdnými“ skeny. Při skenování totiž může kolísání teploty lampy skeneru vést ke změně změřené optické denzity filmu až o 3% [12].
- Je možné každý film skenovat několikrát po sobě a výslednou odezvu stanovit jako průměr z několika skenů, např. tří. Nedoporučuje se do průměrování zahrnout první sken, protože jeho odezva se nejvíc odlišuje od ostatních skenů. Lze také pořizovat vždy dva skeny každého filmu a vyhodnocovat pouze druhý sken.
- Rozlišení 72 dpi (cca 0,35 mm na pixel) je ve většině případů dostatečné. S rostoucím rozlišením roste šum ve snímcích.
- Skenovat by se mělo v režimu 48bitových barev (to je 16 bitů na jeden barevný kanál).
- Snímky by se měly ukládat jako bezztrátové TIFF soubory.
- Při „single channel“ dozimetrii by se měla odezva filmů vyhodnocovat v červeném nebo zeleném kanále. Porovnáním odezev filmů v červeném a zeleném kanále se zabývala např. práce [8].
- Filmy lze skenovat postupně jeden za druhým nebo lze současně skenovat více filmů současně (tzv. „ scan in one“ protokol).
- Při skenování je nutné vypnout automatické softwarové úpravy snímku (např. barevné korekce), neboť tyto úpravy jsou nežádoucí pro dozimetrické účely.
- Umisťovat filmy do středu skenovací plochy skeneru. Pro tento účel se doporučuje vytvořit si šablonu (např. z tenké fólie).
- Skenovat gafchromické filmy konzistentně:
  - dodržovat geometrii filmu vzhledem ke skeneru (portrait vs landscape)
  - rozlišovat přední a zadní stranu filmů (není třeba u EBT3 filmů)
  - dodržovat stejný časový odstup mezi ozářením a skenováním filmů (ale ne méně než cca 5 hodin), tento časový odstup by měl být stejný jako při kalibraci. Požadavek na dodržování časového odstupu neplatí pro „scan in one“ protokol.
- Při skenování by měl film ležet rovně na podložce skeneru. Je třeba zamezit výraznému prohnutí filmů (viz Obr. 15), neboť ovlivňuje transmisi světla, a tím odezvu filmu. Prohnutí

filmů lze eliminovat např. přilepením okrajů filmů k podložce skeneru nebo lze na film položit tenkou skleněnou destičku.



Obr. 15: Ukázka prohnutí gafchromického filmu na skenovací ploše skeneru [25]

- Výrobce gafchromických filmů řady EBT (EBT, EBT2 a EBT3) doporučuje ke skenování používat skenery Epson 11000XL nebo 10000XL (velikost skenovací plochy A3), Epson V750 nebo Epson V700 (velikost skenovací plochy A4).
- Pro skenování gafchromických filmů typu EBT je doporučeno používat transmisní mód (např. [39]).

5.4 Kalibrace filmů

- Pro kalibrační ozáření filmů je vhodné filmy umístit do vodě-ekvivalentního deskového fantomu (např. RW3 desek) do referenční hloubky a ozářit sadou několika (např. čtyř nebo pěti) kalibračních dávek. Ozářeným filmům by se měly přiřadit hodnoty dávek stanovené měřením ionizační komorou.
- Velikost kalibračních filmů a vyhodnocovaná oblast zájmu (ROI) pro stanovení průměrné odezvy při kalibraci by neměla být příliš malá (kvůli lokální nehomogenitě filmu). Oblast zájmu by měla zachytit „průměrné chování filmu“. Proto by velikost kalibračních filmů měla být minimálně 5 x 5 cm^2 a oblast zájmu by měla být minimálně 4 x 4 cm^2.
- Ověřovat, že rozmezí dávek měřených pomocí gafchromických filmů se nachází v rozmezí dávek použitých ke kalibraci.
- Kalibrace filmů je platná pouze pro dané nastavení systému film a skener (bitová hloubka, rozlišení, orientace filmu, …) a pro danou šarži filmů.

5.5 Zpracování/vyhodnocení filmů

- Doporučuje se gafchromické filmy ještě před ozářením oskenovat a odečíst jejich odezvy od odezev stejných, ale ozářených filmů. V práci [27] se uvádí, že to vede ke zpřesnění filmové dozimetrie.

- Je nutné rozlišovat měření relativních dávek a měření absolutních dávek. Pro měření relativních dávek není nutné dodržovat stejný časový odstup mezi skenováním a ozářením filmů.
- Vzhledem k vyššímu šumu dat změřených pomocí gafchromických filmů (oproti datům změřených pomocí radiografických filmů) by se data změřená pomocí gafchromických filmů měla vyhladit, např. použitím mediánového filtru 5x5 bodů.
- K vyhodnocení filmů nepoužívat oblast u krajů filmů a také oblast u krajů skenovací plochy.

6 Zavedení filmové dozimetrie na pracovišti

Před zavedením filmové dozimetrie by mělo pracoviště dodržovat následující zásady:

- Stanovit si, k jakému účelu se budou gafchromické filmy používat (např. ke stanovení dvourozměrné dávkové distribuce, k ověření shody radiačního a světelného pole, …).
- Provést rešerši literatury pro daný účel použití filmů a seznámit se s vlastnostmi filmů a skenerů. Základní informace lze nalézt v tomto doporučení.
- Konzultovat danou problematiku s pracovištěm, jež s ní má zkušenosti, případně absolvovat stáž na tomto pracovišti.
- Na základě účelu použití vybrat vhodný typ filmu (viz kapitola 3.6).
- Vybrat vhodný typ skeneru (např. na základě provedené rešerše literatury).
- Předběžně navrhnout způsob vyhodnocení gafchromických filmů (vyhodnocení odezvy filmů v jednom kanále, vyhodnocení filmů na základě odezvy filmů ve všech třech barevných kanálech, skenování filmů jeden po druhém, skenování více filmů najednou, odečtení nebo neodečtení pozaďového neozářeného filmu, převedení nebo nepřevedení odezvy filmu na optickou denzitu).
- Vybrat vhodný software (viz kapitola 3.8).
- Rozhodnout se, zda budou filmu použity pro měření absolutních dávek nebo relativních dávek. Pro měření relativních dávek není nutné dodržovat stejný časový odstup mezi skenováním a ozářením filmů.
- Navrhnout vhodnou metodiku pro použití gafchromických filmů (vhodné rozlišení, bitová hloubka, …).

Po zavedení filmové dozimetrie by mělo pracoviště dodržovat následující zásady:

- Dodržovat navrženou metodiku pro použití gafchromických filmů.
- Navrženou metodiku pro použití gafchromických filmů otestovat a optimalizovat následovně:
  - Pilotně otestovat skener a filmy, ověřit, zda vlastnosti/parametry skeneru a filmů odpovídají údajům publikovaným v literatuře. Mezi nejdůležitější parametry, kterým je třeba věnovat pozornost, patří nehomogenita odezvy skeneru a nehomogenita filmů.
  - Ověřit geometrickou přesnost skeneru (zda skener digitalizuje snímky v poměru 1:1).
  - Porovnat výsledky filmové dozimetrie s jinými metodami. Např. porovnat dávkové distribuce změřené pomocí gafchromických filmů s dávkovými distribucemi změřenými jinými detektory (např. ionizačními komorami, diodami nebo polem detektorů).

- Pokud se budou provádět korekce, např. korekce na nehomogenitu odezvy skeneru, tak ověřit, že korekce povede k lepším výsledkům (větší shodě).
- Odhadnout nejistotu stanovení dávky pomocí filmové dozimetrie.

7 Nejistoty při filmové dozimetrii

Mezi nejvýznamnější zdroje nejistot při filmové dozimetrii patří:

- nehomogenita odezvy skeneru – tuto nejistotu lze snížit skenováním filmů pouze v relativně malé středové oblasti skeneru při „single channel“ dozimetrii nebo použitím „multi channel“ dozimetrie, v druhém případě není nutné snižovat velikost skenované oblasti. Richley a kol. [35] uvádějí nejistotu nehomogenity odezvy skeneru 3% v dávce pro k=1 pro transmisní režim (již po aplikaci korekce na nehomogenitu odezvy skeneru). Dle práce [13] je přesnost měření dávky pro velikost pole do 15 x 15 cm^2 lepší než 4% (bez korekce na laterální nehomogenitu) pro skenery Epson 10000XL a Epson 1680 a pro film EBT).

- Nehomogenita filmu – tuto nejistotu lze snížit použitím „multi channel“ dozimetrie nebo odečtením odezvy neozářeného filmu od odezvy měřicího filmu při „single channel“ dozimetrii. Např. práce [35] uvádí pro transmisní režim skenování nehomogenitu filmu 2,4% v dávce pro k=1.

- změna zčernání filmů s časem po ozáření („post irradiation darkening“) – nehraje významnou roli při relativním vyhodnocení gafchromických filmů. Při měření absolutních dávek lze tuto nejistotu snížit skenováním filmů s delším časovým odstupem od ozáření (např. 24 nebo 48 hodin). Dle práce [35] je pro skenování filmů v rozmezí od 6 do 24 hodin od ozáření nejistota nižší než 2% (v dávce).

- Proložení (fit) kalibrační křivky jednotlivými kalibračními body – práce [34] uvádí nejistotu 0,5% pro fit z optické denzity na dávku, Arjomandy a kol. [19] zmiňují nejistotu 0,7% pro k=1.

  Mezi další zdroje nejistot filmové dozimetrie patří:

- energetická závislost gafchromických filmů - tuto nejistotu lze snížit použitím stejné energie svazku při kalibraci i při měření. Práce [34] uvádí pro EBT film nejistotu 0,5%.

- úhlová závislost gafchromických filmů - práce [34] uvádí pro EBT film nejistotu 0,5%.

- stabilita výstupu svazku ozařovače - nehraje roli při relativním vyhodnocení gafchromických filmů.

- krátkodobá stabilita odezvy skeneru – práce [34] uvádí nejistotu 0,3% pro k=1.

- fluktuace odezvy v oblasti zájmu (ROI)

- opakované skenování filmů – zanedbatelná nejistota

Dle Girarda a kol. [30] je možné provádět absolutní (referenční) dozimetrii pomocí gafchromických filmů s nejistotou ±2% pro k=1 pro dávky od 0,2 do 3,5 Gy. Takováto přesnost je dostatečná např. pro použití filmů při provádění QA testů nebo při „commissioningu“. Pro dosažení takového nejistoty je ale nutné zajistit:

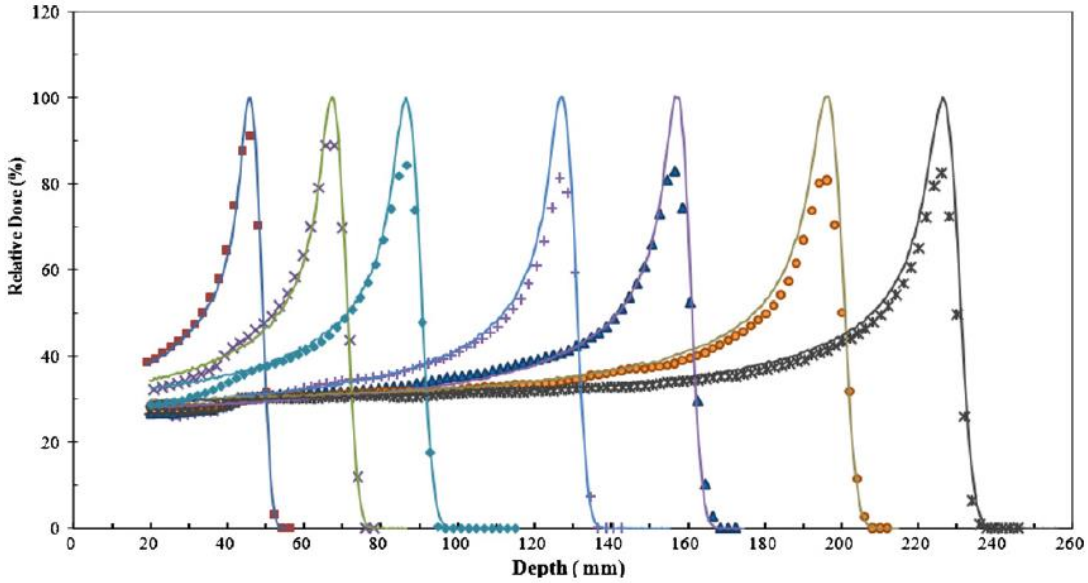
- konzistentní skenování (orientace „portrait“ vs „landscape“).
- stejnou energii svazku pro kalibraci i měření.
- dodržovat konstantní dobu mezi ozářením a skenováním filmů, tato doba by měla být dostatečně dlouhá pro stabilizaci odezvy filmu.
- odezva filmu by se měla zkorigovat dle nehomogenity odezvy skeneru.
- teplota filmu při skenování a při kalibraci by se měla lišit maximálně o 1°.
- film by se měl skladovat v prostředí o konstantní vlhkosti a při nízkých teplotách, aby se redukovalo samovolné zčernání filmů.

Van Battum a kol. [34] uvádějí, že pomocí filmů EBT jsou schopni stanovit absolutní dávku s celkovou nejistotou 1,3% pro k=1, za předpokladu, že se vyhodnocuje odezva filmu pouze z centrální oblasti skeneru a dva filmy byly použity pro zprůměrování výsledku.

8 Použití gafchromických filmů pro dozimetrii protonových svazků

Gafchromické filmy lze v protonových svazcích použít pro stanovení dosahu. Zhao a Das [26] uvádějí, že pomocí gafchromických filmů EBT lze měřit dosah protonových svazků s nejistotou 0,5 mm.

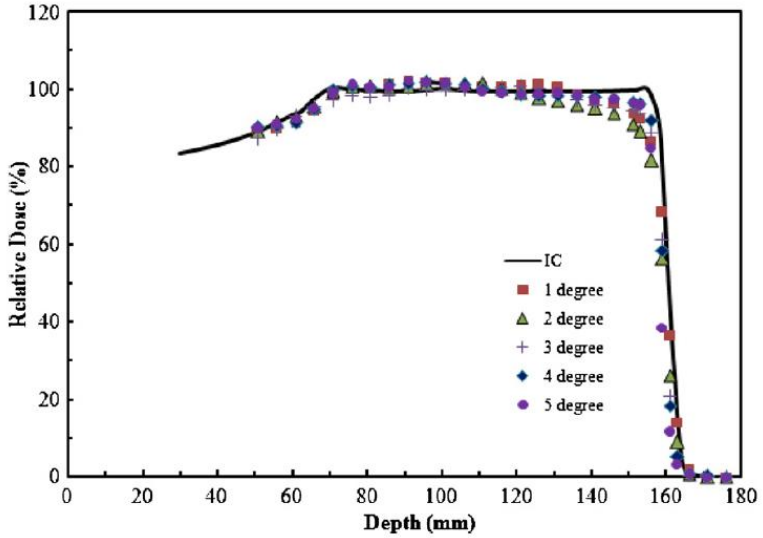
Gafchromické filmy při měření procentuálních hloubkových dávek nemodulovaných protonových svazků (tzv. „pristine peak“) podhodnocují v oblasti Braggova píku dávku. Zhao a Das [26] uvádějí v závislosti na energii svazku podhodnocení o přibližně 10 až 20% (viz Obr. 16). Podobné podhodnocení uvádějí také Arjomandy a kol. [28].



Obr. 16: Procentuální hloubkové dávky pro nemodulované protonové svazky změřené pomocí gafchromických filmů EBT (diskrétní body) a ionizační křivky změřené komorou Markus (plné čáry) [26]

Podhodnocení je způsobeno tzv. „quenching“ efektem, který nastává v Braggově píku a v distální části rozšířeného Braggova píku a je závislý na lineárním přenosu energie (LET). Tento efekt může souviset s rekombinací volných radikálů v aktivní vrstvě filmu [32].

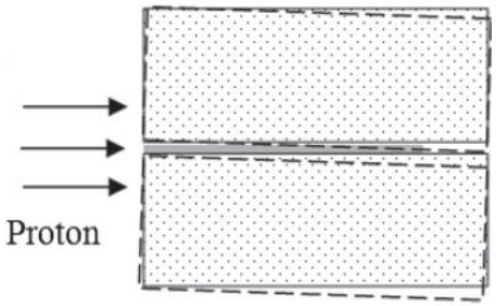
Zhao a Das [26] také zjistili, že vzduchové mezery mezi filmem a deskami fantomu při umístění filmu paralelně s osou protonového svazku způsobují výrazné artefakty ve změřené procentuální hloubkové dávce. Zjistili, že tyto artefakty lze redukovat nakloněním fantomu s filmem vůči ose svazku o malý úhel (viz Obr. 17).



Obr. 17: Procentuální hloubkové dávky změřené gafchromickými filmy EBT pro protonové svazky při různém naklonění fantomu o 1° až 5° vůči paralelní orientaci k ose svazku. Černá linka značí hloubkovou dávku změřenou ionizační komorou Markus [26].

Zásady použití gafchromických filmů pro dozimetrii protonových svazků:

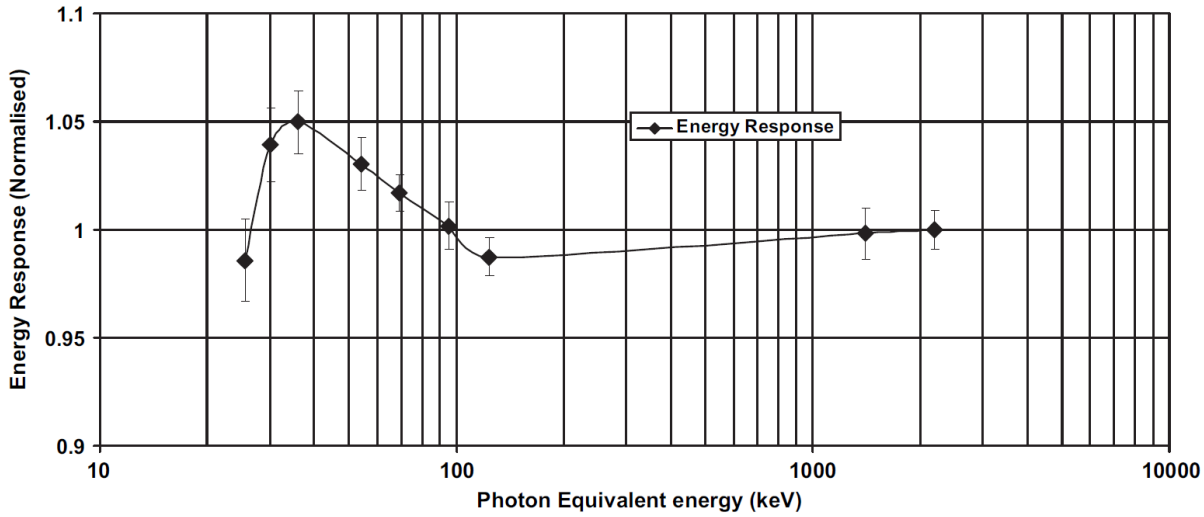
- Při měření umisťovat filmy nejlépe kolmo vůči protonovému svazku.
- Vyvarovat se toho, aby byl film umístěn rovnoběžně se svazkem, doporučuje se fantom o malý úhel (např. 3° nebo 5°) naklonit (viz Obr. 18).
- Pokud se film vkládá mezi desky/vrstvy fantomu, snažit se minimalizovat vzduchovou mezeru mezi filmem a deskami.
- Gafchromické filmy by se neměly umisťovat do oblasti Braggova píku, případně do oblasti distální části rozšířeného Braggova píku (oblast s částicemi s vysokým LET).
- Filmy lze použít pro měření dávkové distribuce v proximální a středové oblasti rozšířeného Braggova píku, kde je příspěvek částic s vysokým LET k dávce relativně malý [26].



Obr. 18: Ukázka naklonění fantomu, aby film nebyl umístěn rovnoběžně se svazkem protonů [26]

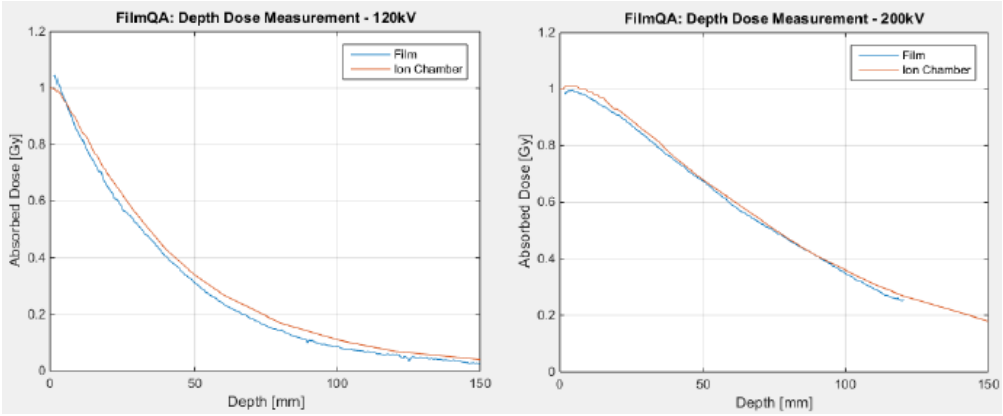
9 Použití gafchromických filmů pro měření v terapeutických rentgenových svazcích

Limitujícím faktorem pro použití filmů pro dozimetrii v terapeutických rentgenových svazcích je jejich poměrně velká energetická závislost pro kilovoltážní energie fotonů. Massillon a kol. [18] uvádějí, že energetická závislost EBT3 filmů pro kilovoltážní svazky (např. pro napětí rentgenky 50 kV) je vyšší než 11%. Arjomandy a kol. [19] zmiňují o 9% vyšší citlivost EBT2 filmů pro energii 75 kV vůči megavoltážním energiím. Lindsay a kol. [20] zjistili u některých šarží EBT2 filmů až o 20% vyšší citlivost pro energii 105 kV (napětí rentgenky) vůči energii 6 MV (nominální energie svazku). Energetická závislost EBT2 filmů změřená v práci [21] je pro energie od 50 kV do 10 MV ukázána na Obr. 19. V tomto grafu představuje odezva optickou denzitu na jednotku dávky. Energetická závislost je v tomto případě 6,5%.



Obr. 19: Energetická závislost gafchromických filmů EBT2 publikovaná v práci [21]. Odezva představuje optickou denzitu na jednotku dávky.

Měřením procentuálních hloubkových dávek v kilovoltážních svazcích pomocí EBT3 filmů se zabývali v práci [22]. Na Obr. 20 je znázorněno porovnání procentuálních hloubkových dávek změřených pomocí filmu EBT3 (modrá křivka) a pomocí ionizační komory (červená křivka) pro 120 kV svazek (obrázek vlevo) a 200 kV svazek (obrázek vpravo). Vyšší odchylky dávek změřených pomocí filmů od dávek změřených ionizační komorou jsou patrné zejména pro 120 kV svazek.



Obr. 20: Porovnání procentuálních hloubkových dávek změřených pomocí EBT3 filmu (modrá křivka) a pomocí ionizační komory (červená křivka) pro svazek s napětím rentgenky 120 kV (obrázek vlevo) a 200 kV (obrázek vpravo) [22]

U kilovoltážního svazku s napětím rentgenky 75 kV Arjomandy a kol. [28] zjistili větší odchylky ve větších hloubkách při srovnání hloubkových dávek změřených pomocí EBT2 filmů a ionizační komory CC04.

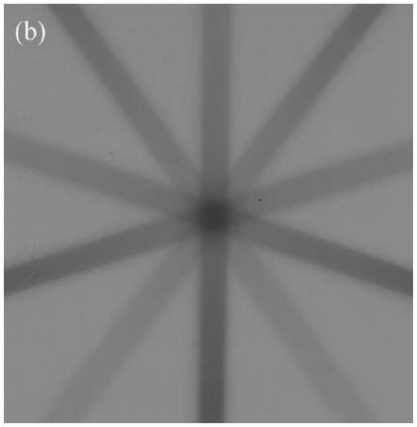
Gafchromické filmy typu EBT lze použít pro stanovení procentuálních hloubkových dávek v terapeutických rentgenových svazcích, je ale třeba nejdříve hloubkovou dávku změřenou

gafchromickým filmem ověřit srovnáním s hloubkovou dávkou změřenou jiným vhodným detektorem, např. ionizační komorou nebo s výpočtem metodou Monte Carlo.

V terapeutických rentgenových svazcích lze gafchromické filmy použít dále např. ke stanovení velikosti radiačního pole a ke stanovení shody osy radiačního pole a středu tubusu, jenž vymezuje svazek.

10 Použití gafchromických filmů při zkouškách v rámci ZPS, ZDS a PZ lineárních urychlovačů

Gafchromické filmy lze v rámci provádění zkoušek lineárních urychlovačů v radioterapii použít např. pro provádění testů vícelamelového kolimátoru (MLC), konkrétně pro měření transmise MLC, pro test paralelní proužky („picket fence“ test) a pro ověření radiačního izocentra (viz Obr. 21) [41]. Pro výše uvedené testy není nutné gafchromické filmy dávkově kalibrovat.



Obr. 21: Ověření radiačního izocentra pomocí gafchromického filmu EBT2 [29]

Gafchromické filmy se často využívají při nabírání dat do plánovacího systému a při „commissioningu“ např. k měření dávkových profilů a dávkových distribucí při ověření modelu svazku. V tomto případě je nutné provést dávkovou kalibraci filmů, jež převádí odezvu filmů na absorbované dávky.

Časté uplatnění nacházejí gafchromické filmy pro stanovení velikosti radiačního pole a pro ověření shody radiačního a světelného pole. Pomocí gafchromických filmů je též možné ověřit homogenitu a symetrii fotonových svazků. V tomto případě může být problematické stanovit homogenitu a symetrii zejména pro větší velikosti polí, protože se tady více projevuje nehomogenita odezvy skeneru a nehomogenita filmu. Pro stanovení nehomogenity a symetrie se doporučuje aplikovat korekci na nehomogenitu odezvy skeneru. Nehomogenita a symetrie stanovená pomocí gafchromických filmů

by se měla porovnat s nehomogenitou a symetrií stanovenou jinou vhodnou metodou (např. měřením pomocí ionizační komory).

Použitelnost gafchromických filmů pro měření procentuálních hloubkových dávek pro svazky různých energií prokázali Arjomandy a kol. [28]. Pro svazky gama záření ^{60}Co, megavoltážní svazek s nominální energií 18 MV, elektronové svazky s nominální energií 7 a 20 MeV ukázali výbornou shodu mezi hloubkovými dávkami změřenými pomocí EBT2 filmů a pomocí ionizačních komor.

Při měření hloubkových dávek se gafchromické filmy umisťují typicky do vodě-ekvivalentních desek paralelně s osou svazku. Filmy je potřeba umístit tak, aby se mezi nimi a deskami fantomu minimalizoval výskyt vzduchových mezer.

Dále lze gafchromické filmy použít např. pro test „skládání polí“ (homogenita radiačního pole) [41] a pro ověření pacientských plánů realizovaných pokročilými technikami, jako jsou např. IMRT nebo VMAT. Také v tomto případě je nutné provést dávkovou kalibraci filmů.

Možné využití gafchromických filmů v radioterapii je přehledně uvedeno v Tabulce 1.

Většímu rozšíření rutinního používání gafchromických filmů v klinické praxi brání zejména vyšší časová náročnost filmové dozimetrie.

Tabulka 1: Možné použití gafchromických filmů v radioterapii

Účel použití filmů	Nutné skenování filmu	Nutná dávková kalibrace	Nutná korekce na nehomogenitu filmu a skeneru	Manipulace s filmy se zvýšenou pečlivostí*
Kontrola správného umístění ion. komory při měření polotloušťky rtg svazku	ne	ne	ne	ne
Kontrola separace polí při ozařování kraniospinální osy	ne	ne	ne	ne
Kontrola přesnosti polohy zdroje v brachyterapii	ne	ne	ne	ne
Stanovení velikosti radiačního pole na terapeutickém rentgenu[1]	ne	ne	ne	ne
Orientační stanovení velikosti radiačního pole[1]	ne	ne	ne	ne
Test "Paralelní proužky"[2]	ne (pro orientační vyhodnocení)	ne	ne	ne
Test "Záření pronikající kolimačním systémem"[3]	spíše ano	ne	ne	ne
Test "Unikající záření vně maximálního radiačního pole"[3]	spíše ano	ne	ne	ne
Měření transmise MLC	ano	ne	ne	ne
Ověření radiačního izocentra	ano	ne	ne	ne
Měření dávky v bodě	ano	ano	ne	ano
Měření faktorů velikosti pole	ano	ano	ne	ano
Test "Souhlas světelné osy a osy svazku záření"	ano	ano	ne nezbytně	ano
Ověření přesnosti polohování lamel MLC ("test skládní polí" - Elekta)	ano	ano	ne nezbytně	ano
Ověření shody radiačního a světelného pole	ano	ano	spíše ano	ano
Stanovení velikosti radiačního pole	ano	ano	spíše ano	ano
Stanovení polostínu radiačního pole	ano	ano	spíše ano	ano
Měření dávkových profilů	ano	ano	ano	ano
Měření hloubkových dávek	ano	ano	ano	ano
Měření 2D dávkových distribucí	ano	ano	ano	ano
Ověření přesnosti dodání 2D dávkové distribuce při přerušeném ozáření	ano	ano	ano	ano
Stanovení homogenity a symetrie fotonových svazků	ano	ano	ano	ano

* Zvýšenou pečlivostí se rozumí: manipulovat s filmy v rukavicích, dotýkat se pouze okrajů filmů, udržovat skener a filmy čisté

[1] Film není nutné skenovat, velikost pole se změří pravítkem přímo na ozářeném filmu.

[2] Test lze vyhodnotit orientačně měřením s pravítkem přímo na filmu. Denzitometrické vyhodnocení pomocí naskenovaného filmu je přesnější.

[3] Filmem se stanoví místo maximálního unikajícího záření.

11 Shrnutí zásad práce s gafchromickými filmy

- Filmy by se měly správně skladovat zabalené v černých obálkách nebo fóliích na temném místě.
- S filmy by se mělo manipulovat v rukavicích.
- Před použitím by se filmy měly vizuálně prohlédnout, zda na nich nejsou artefakty.
- Nastřihané kousky filmů by se měly označit např. v rozích, aby byla zřejmá jejich orientace vůči původnímu filmu (orientace „landscape“ vs „portrait“).
- Neozařovat filmy příliš nízkými dávkami, např. u EBT3 filmů by vyhodnocovaná dávka měla být nejlépe alespoň 1 Gy.
- S filmy lze měřit ve vodním fantomu, neměly by být ale ve vodě ponořeny příliš dlouho.
- Filmy by se měly skenovat v režimu 48bitových barev (to je 16 bitů na jeden barevný kanál).
- Při skenování filmů je rozlišení 72 dpi (0,35 mm na pixel) ve většině případů dostatečné.
- Je možné každý film skenovat několikrát po sobě a výslednou odezvu stanovit jako průměr z několika skenů, např. tří. Nedoporučuje se do průměrování zahrnout první sken, protože jeho odezva se nejvíce odlišuje od ostatních skenů. Lze také pořizovat vždy dva skeny každého filmu a vyhodnocovat pouze druhý sken.
- Při „single channel“ dozimetrii by se měla odezva filmů vyhodnocovat v červeném nebo zeleném kanále.
- Filmy lze skenovat postupně jeden za druhým nebo lze současně skenovat více filmů současně (tzv. „ scan in one“ protokol).
- Při skenování je nutné vypnout automatické softwarové úpravy snímku (např. barevné korekce).
- Při skenování filmů dodržovat geometrii filmu vzhledem ke skeneru („portrait“ vs „landscape“).
- Při skenování měřicích filmů dodržovat stejný časový odstup jako mezi ozářením a skenováním kalibračních filmů (ale ne méně než cca 5 hodin), tento časový odstup by měl být stejný jako při kalibraci. Požadavek na dodržování časového odstupu neplatí pro „scan in one“ protokol.
- Při skenování by měl film ležet rovně na podložce skeneru. Je třeba zamezit výraznému prohnutí filmů.
- Výrobce gafchromických filmů řady EBT (EBT, EBT2 a EBT3) doporučuje ke skenování používat skenery Epson 11000XL nebo 10000XL (velikost skenovací plochy A3), Epson V750 nebo Epson V700 (velikost skenovací plochy A4).
- Kalibrace filmů je platná pouze pro dané nastavení systému film a skener (bitová hloubka, rozlišení, orientace filmu, …) a pro danou šarži filmů.
- Doporučuje se gafchromické filmy ještě před ozářením oskenovat a odečíst jejich odezvy od odezev stejných, ale ozářených filmů.

12 Literatura

[1] Dufek V, Horáková I, Ekendahl D. Použitelnost gafchromických filmů EBT2 pro stanovení dávkových profilů malých polí. Bezpečnost jaderné energie 2013;21(59),3/4:117-21, ISSN: 1210-7085.

[2] Niroomand-Rad A, Blackwell CR, Coursey BM, et al. Radiochromic film dosimetry: Recommendations of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 55. Med Phys 1998;25(11):2093-115.

[3] Dreindl R, Georg D, Stock M. Radiochromic film dosimetry: Considerations on precision and accuracy for EBT2 and EBT3 type films. Z Med Phys 2014;24:153-63.

[4] Micke A, Lewis DF, Yu X. Multichannel film dosimetry with nonuniformity correction. Med Phys 2011;38(5):2523-34.

[5] Mayer RR, Ma F, Chen Y, et al. Enhanced dosimetry procedures and assessment for EBT2 radiochromic film. Med Phys 2012;39(4):2147–55.

[6] Van Hoof SJ, Granton PV, Landry G, et al. Evaluation of a novel triple-channel radiochromic film analysis procedure using EBT2. Phys Med Biol 2012;57(13):4353–68.

[7] Hayashi N, Watanabe Y, Malmin R, et al. Evaluation of triple channel correction acquisition method for radiochromic film dosimetry. J Radiat Res 2012;53:930–5.

[8] Fuss M, Sturtewagen E, De Wagter C, et al. Dosimetric characterization of GafChromic EBT film and its implication on film dosimetry quality assurance. Phys Med Biol 2007;52:4211–25.

[9] Hartmann B, Martisikova M, Jakel O, et al. Technical Note: Homogeneity of Gafchromic EBT2 film. Med Phys 2010;37(4):1753-56.

[10] Cheung T, Butson MJ, Yu PKN. Post-irradiation colouration of Gafchromic EBT radiochromic film. Phys Med Biol 2005;50:N281-5.

[11] Hu Y, Ahmad S, Ali I, et al. Evaluation of optical density growth and sensitivity of EBT1 and EBT2 gafchromic films on the dosimetry for IMRT quality assurance. Med Phys 2011;38:3529.

[12] Paelinck L, De Neve W, De Wagter C. Precautions and strategies in using a commercial flatbed scanner for radiochromic film dosimetry. Phys Med Biol 2007;52:231-43.

[13] Chung H, Lynch B, Samant S. High-precision GAFCHROMIC EBT film-based absolute clinical dosimetry using a standard flatbed scanner without the use of a scanner non-uniformity correction. J Appl Clin Med Phys 2010;11(2):101-15.

[14] Sarfehnia A, Stewart K, Seuntjens J. An absorbed dose to water radiation standard for 192Ir HDR brachytherapy sources based on water calorimetry: Numerical and experimental proof-of-principle. Med Phys 2007;34(12):4957-61.

[15] Palmer AL, Bradlez D, Nisbet A. Evaluation and implementation of triple-channel radiochromic film dosimetry in brachytherapy. J Appl Clin Med Phys 2014;15(4):280-96.

[16] Casanova Borca V, Pasquino M, Russo G, et al. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification. J Appl Clin Med Phys 2013;14(2):158-71.

[17] Lewis DF. A Guide to Radiochromic FilmDosimetry with EBT2 and EBT3 (přednáška) 2014.

[18] Massillon-JL G, Chiu-Tsao ST, Domingo-Munoz I, et al. Energy Dependence of the New Gafchromic EBT3 Film: Dose Response Curves for 50 KV, 6 and 15 MV X-Ray Beams. International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology 2012;1(2):60-5..

[19] Arjomandy B, Tailor R, Anand A, et al. Energy dependence and dose response of Gafchromic EBT2 film over a wide range of photon, electron, and proton beam energies. Med Phys 2010;37(5):1942-47.

[20] Lindsay P, Rink A, Ruschin M, et al. Investigation of energy dependence of EBT and EBT-2 Gafchromic film. Med Phys 2010;37, 571-6.

[21] Butson M J, Yu PKN, Cheung T, et al. Energy response of the new EBT2 radiochromic film to x-ray radiation. Rad Meas 2010;45:836-9.

[22] Hossein Z. Radiochromic Film Dosimetry in Kilovoltage X-ray Beams: A Pre Investigation for In Vitro Studies of Bystander Effects. 2015 Master thesis, Lund University.

[23] Lewis D, Micke A, Yu X. An efficient protocol for radiochromic film dosimetry combining calibration and measurement in a single scan. Med Phys 2012;39(10):6339-50.

[24] Williams M, Metcalfe P. Radiochromic film dosimetry and its applications in radiotherapy. 4th SSD Summer School: Concepts and Trends in Medical Radiation Dosimetry 2011;75-99, Wollongong: AIP.

[25] Palmer AL, Bradley DA, Nisbet A. Evaluation and mitigation of potential errors in radiochromic film dosimetry due to film curvature at scanning. J Appl Clin Med Phys 2015;16(2):425-31.

[26] Zhao L., Das IJ. Gafchromic EBT film dosimetry in proton beams. Phys Med Biol 2010;55:N291–301.

[27] Aldelaijan S, Devic S, Mohammed H, et al. Evaluation of EBT-2 model GAFCHROMIC™ film performance in water. Med Phys 2010;37(7), 3687-93.

[28] Arjomandy B, Tailor R, Zhao L, et al. EBT2 film as a depth-dose measurement tool for radiotherapy beams over a wide range of energies and modalities. Med Phys 2012;39(2), 912-21.

[29] Depuydt T, Penne R, Verellen D, et al. Computer-aided analysis of star shot films for high-accuracy radiation therapy treatment units. Phys Med Biol 2012;57(10):2997-3011.

[30] Girard F, Bouchard H, Lacroix F. Reference dosimetry using radiochromic film. J Appl Clin Med Phys 2012;13(6):339:53.

[31] Hae S J., Youngyih H, Oyeon K, et al. Pixel-Based Correction Method for Gafchromic EBT Film Dosimetry. Nuclear Engineering and Technology 2010;42(6):670-9.

[32] Charlie Ma C-M, Lomax T. Proton and Carbon Ion Therapy (Imaging in Medical Diagnosis and Therapy) 1st Edition. 2012, CRC Press.

[33] Devic S, Seuntjens J, Sham E, et al. Precise radiochromic film dosimetry using a flat-bed document scanner. Med Phys 2005;32(7):2245-53.

[34] Van Battum L J, Hoffmans D, Piersma H, et al. Accurate dosimetry with GafChromic™ EBT film of a 6MV photon beam in water: What level is achievable? Med Phys 2008;35(2):704-16.

[35] Richley L, John AC, Coomber H, et al. Evaluation and optimization of the new EBT2 radiochromic film dosimetry system for patient dose verification in radiotherapy. Phys Med Biol 2010;55:2601–17.

[36] Huet C, Dagois S, Derreumaux S, et al. Characterization of the gafchromic EBT3 films for dose distribution measurements in stereotactic radiotherapy, Rad Meas - Proceedings of the 17th Solid State Dosimetry Conference 2014;71:364-8.

[37] Kairn T, Hardcastle N, Kenny J, et al. EBT2 radiochromic film for quality assurance of complex IMRT treatments of the prostate: micro-collimated IMRT, RapidArc, and TomoTherapy. Australas Phys Eng Sci Med 2011;34(3):333-43.

[38] Matney JE, Parker BC, Neck DW, et al. Evaluation of a commercial flatbed document scanner and radiographic film scanner for radiochromic EBT film dosimetry. J Appl Clin Med Phys 2010;11(2):198-208.

[39] Chiu-Tsao ST. Patient Specific Quality Assurance for IMRT and VMAT (přednáška), First AFOMP online symposium, 27.-28.6.2011.

[40] Dufek V. Gafchromické filmy – použitelnost v praxi a naše zkušenost s nimi (přednáška), Kurz radiační ochrany, SÚRO, v. v. i., 24.9.2015.

[41] Doporučení SÚJB. Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii – Lineární urychlovače. SÚJB, 2015.

Autor:

Ing. Vladimír Dufek, Ph.D.