



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

ANALÝZA TECHNICKÝCH SPECIFIKACÍ A MOŽNOSTÍ TERAPEUTICKÝCH RTG PRO NENÁDOROVÉ TERAPIE

ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS AND POSSIBILITIES OF THERAPEUTIC X-RAY SYSTEMS
FOR NON-TUMOUR THERAPIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Pospíšil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mézl, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

Student: Milan Pospíšil

ID: 195727

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Analýza technických specifikací a možností terapeutických RTG pro nenádorové terapie

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte problematiku využití rentgenového (RTG) záření pro terapii. Zaměřte se na terapeutické účinky takovéto terapie s rozбором možných nežádoucích jevů na molekulární a buněčné úrovni. 2) Proveďte rešerši a průzkum trhu v oblasti zdrojů RTG záření, které je možné využít v terapii. 3) Navrhněte koncepci pracoviště na ozařování nenádorových onemocnění. 4) Prostudujte a popište procesy kalibrace terapeutických RTG systémů. 5) Proveďte měření dozimetrických veličin u konkrétního terapeutického systému na fantomových přípravcích a v rámci preklinického testování. 6) Proveďte diskuzi navrženého konceptu/realizace s ohledem na jiné dostupné systémy.

Práce je vypracována ve spolupráci s firmou ELEDUS s.r.o.

Konzultant práce: Bc. Lucie Svobodová

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WASHINGTON, Charles M a Dennis T LEAVER. Principles and practice of radiation therapy. Fourth edition. St. Louis, Missouri: Elsevier Mosby, 2016. ISBN 978-032-3287-524.

[2] BUSHBERG, Jerrold T. The essential physics of medical imaging. 3rd ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2012. ISBN 9780781780575.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 24.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Martin Mézl, Ph.D.

Konzultant: Bc. Lucie Svobodová

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá využitím rentgenového záření pro nenádorovou terapii. Popisuje vznik rentgenového záření, jeho účinky na lidský organismus a jak se před ním chránit. Dále je zde shrnuto, jaké nemoci se dají ozařováním léčit a na jakém principu je léčba založena. Přínosem práce je návrh převozního rentgenového pracoviště. Toto pracoviště je v další kapitole srovnáno s rentgenovým pracovištěm na Masarykově onkologickém ústavu, které se nenádorové terapii věnuje již deset let. Nedílnou součástí je také měření útlumu RTG záření různými materiály a popis kalibrace rentgenových systémů.

Klíčová slova

Kalibrace rentgenových systémů, nenádorová terapie, rentgenka, rentgenové pracoviště, účinky ionizující záření.

Abstract

This thesis deals with the use of X-rays for non-tumor therapy. It describes the formation of X-rays, their effects on the human organism and its protection. It also summarizes what diseases can be treated with irradiation and on what principle treatment is based. A part of the work is the design of the transportable X-ray station. This station is, in the next chapter, compared with the x-ray workplace in Masaryk Memorial Cancer Institute with 10 years of experience. In the next part I deal with a measuring of X-ray absorption with various materials, and a description of the calibration of X-ray systems.

Keywords

Calibration of X-ray systems, effects of ionizing radiation, irradiation X-ray workplace, non-tumor therapy, X-ray tube.

Bibliografická citace:

POSPÍŠIL, Milan. Analýza technických specifikací a možností terapeutických RTG pro nenádorové terapie. Brno, 2019. 46s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Mézl, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Analýza technických specifikací a možností terapeutických RTG pro nenádorové terapie jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Martinovi Mészlovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také konzultantce Bc. Lucii Svobodové z firmy ELEDUS, za poskytnutí odborné pomoci a rad v nesnázích. Poděkování patří také MUDr. Tomáši Kazdovi, Ph.D. z Masarykova onkologického ústavu v Brně, za jeho ochotu pomáhat a poskytnutí odborných rad.

V Brně dne 24. května 2019

.....
podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD	11
2. RTG ZÁŘENÍ	12
2.1 Vznik	12
2.1.1 Charakteristické záření	12
2.1.2 Brzdné záření	12
2.2 Rentgenka	13
2.2.1 Katoda	13
2.2.2 Anoda	14
2.2.3 Rozdíl ve využití rotační a stacionární anody.....	16
2.3 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus.....	16
2.3.1 Princip poškození buněk	17
2.3.2 Deterministické účinky	18
2.3.3 Stochastické účinky	20
3. LÉČBA NENÁDOROVÝCH ONEMOCNĚNÍ POMOCÍ RTG	21
3.1 Princip léčby	21
3.2 Indikace k terapeutickému ozařování	22
3.2.1 Onemocnění kostí a kloubních spojů	22
3.2.2 Onemocnění kůže a měkkých tkání	23
3.3 Ostatní zářiče používané v nádorové terapii	24
4. OCHRANA PŘED RTG	26
5. TERAPEUTICKÉ Rentgenky	27
6. NÁVRH PRACOVÍŠTĚ.....	29
6.1 Konstrukce	29
6.2 Rentgenka	30
6.3 Elektroinstalace.....	31
6.4 Převoz kontejneru	33
6.5 Cenová analýza projektu.....	33
7. KALIBRACE RTG	34
8. SROVNÁNÍ TERAPEUTICKÉHO PRACOVÍŠTĚ.....	36
9. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	39
10. ZÁVĚR	42
LITERATURA	43
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK.....	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Spektrum RTG záření při použití wolframové anody. Píky charakteristického záření a spojitě spektrum brzdového záření [5]	13
Obr. 2: Dvě různé velikosti wolframového vlákna na katodě [36].....	14
Obr. 3: Základní schéma stacionární anody [2]	14
Obr. 4: Dříve používaná stacionární anoda [36]	15
Obr. 5: Schéma rotační anody [6]	15
Obr. 6: Dříve používaná rotační anoda [36].....	16
Obr. 7: Ukázka tvorby dvojných zlomů z jednoduchých zlomů [9].....	17
Obr. 8: Příklady expozičních ionizujícím záření [11]	20
Obr. 9: Ukázka ozáření patní ostruhy ve dvou rovinách [19]	22
Obr. 10: Ukázka hloubkových dávek z různých zářičů [18]	25
Obr. 11: Ukázka kolimátorů (napravo) a filtrů (nalevo) na terap. rentgenky [31] .	28
Obr. 12: Ukázka kontejnerového provedení ozařovacího pracoviště [36]	29
Obr. 13: Schéma elektroinstalace rentgenky k jednotlivým komponentům [26]	31
Obr. 14: Ukázka elektroinstalace k rentgence – napravo VN tank na něm VN zdroj, nalevo chlazení a uprostřed odstíněný kryt na kabely [36]	32
Obr. 15: Vyvedená kabeláž k rentgence, umístěné na provizorním stojanu [36]	32
Obr. 16: Ozařovací pracoviště na MOÚ [36]	36
Obr. 17: Rentgen používaný na Masarykově onkologickém ústavu [35]	37
Obr. 18: Rentgenka COMET – MXR-226 [24].....	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Projevy ozáření při různých expozicích [11], [12], [13], [14]	19
Tab. 2: Vypočítané hmotnosti kontejneru pro ocel a hliník [36]	30
Tab. 3: Parametry 225kV rentgenky MXR-225/22 [27]	31
Tab. 4: Odhad výdajů za hardware [36]	33
Tab. 5: Odhad výdajů za mzdy [36]	33
Tab. 6: Homogenita pole [36]	35
Tab. 7: Parametry rentgenky COMET – MXR-226 [24].....	38
Tab. 8: parametry rentgenky použité k měření [36].....	39

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Hloubkové křivky 200kV terapeutické rentgenky do 75 kV [35]	27
Graf 2: Hloubkové křivky 200kV terap. rentgenky od 100 kV do 200 kV [35]	28
Graf 3: Závislost absorbované dávky na velikosti proudu anodou [36]	39
Graf 4: Útlum RTG záření pod nulovým úhlem [36]	40
Graf 5: Útlum RTG záření pod úhlem 30° [36]	40

1. ÚVOD

Rentgenové paprsky byly ihned po jejich objevu v 19. stol. velkou senzací a postupem času se rentgenovalo v podstatě všechno. Dokonce když si chtěl někdo koupit nové boty, zrentgenoval si nohu v nich, aby se podíval, jestli ho nikde neomezují. Lidé totiž nevěděli o negativních účincích rentgenového (RTG) záření a brzy se dostavily příznaky nemoci z akutního ozáření.

Za sto let od objevu, se vyvinuly rentgenky, filtrace, byly zavedeny principy ochrany před RTG zářením, ale hlavně se zlepšil způsob detekce RTG. To vše, aby pacient dostal minimální dávku. Při každém ozáření se totiž zvyšuje riziko vzniku rakoviny. I přesto jej dnes stále používáme, protože přínos převažuje nad riziky – pokud indikujeme nemoc a můžeme ji hned správně léčit a tím zachránit život nebo předejít významnému poškození organismu, je to jistě větší přínos, než riziko vzniku nádoru v odstupu několika let.

Tato práce bude věnována terapeutickým rentgenům a to konkrétně pro nenádorové terapie. Cílem této terapie je úleva od potíží způsobených onemocněním, případně zabránění zhoršování funkce orgánu. Budou zde popsány negativní účinky ionizujícího záření na organismus. Dále, jak se před RTG zářením chránit. Bude popsáno, co je vlastně principem této léčby, a jaké nemoci se pomocí RTG dají léčit. Práce také bude obsahovat, jaké rentgenky se používají pro toto ozařování. Přínosem práce bude návrh konstrukce na převozná ozařovací pracoviště i s ukázkou rozmístění komponentů uvnitř. Pro porovnání, zde bude také popsáno ozařovací pracoviště s dlouholetou praxí. Nebude chybět ani měření útlumu RTG záření pomocí Geiger-Millerova čítače za použití 80kV rentgenky a popis kalibrace RTG systémů.

2. RTG ZÁŘENÍ

Rentgenové záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou 10^{-8} – 10^{-12} m. Díky malé vlnové délce má foton rentgenového záření vysokou energii. Při interakci fotonu s atomem může dojít k ionizaci – vyražení elektronu z obalu atomu. Jedná se tedy o ionizační záření [1].

2.1 Vznik

Ke vzniku RTG záření je nutná vakuová dioda nazývaná rentgenka a vysoké napětí sloužící k urychlování elektronů mezi katodou a anodou. Základem vzniku RTG záření je interakce elektronů uvolněných žhavením katody s atomy anody. Při interakci elektronů s anodou však dochází k 99% přeměně na teplo a pouze 1 % se přemění v rentgenové záření. Rentgenka tedy musí být dobře chlazená. Rentgenové záření vzniká v rentgence dvěma způsoby – jako brzdné a charakteristické záření.

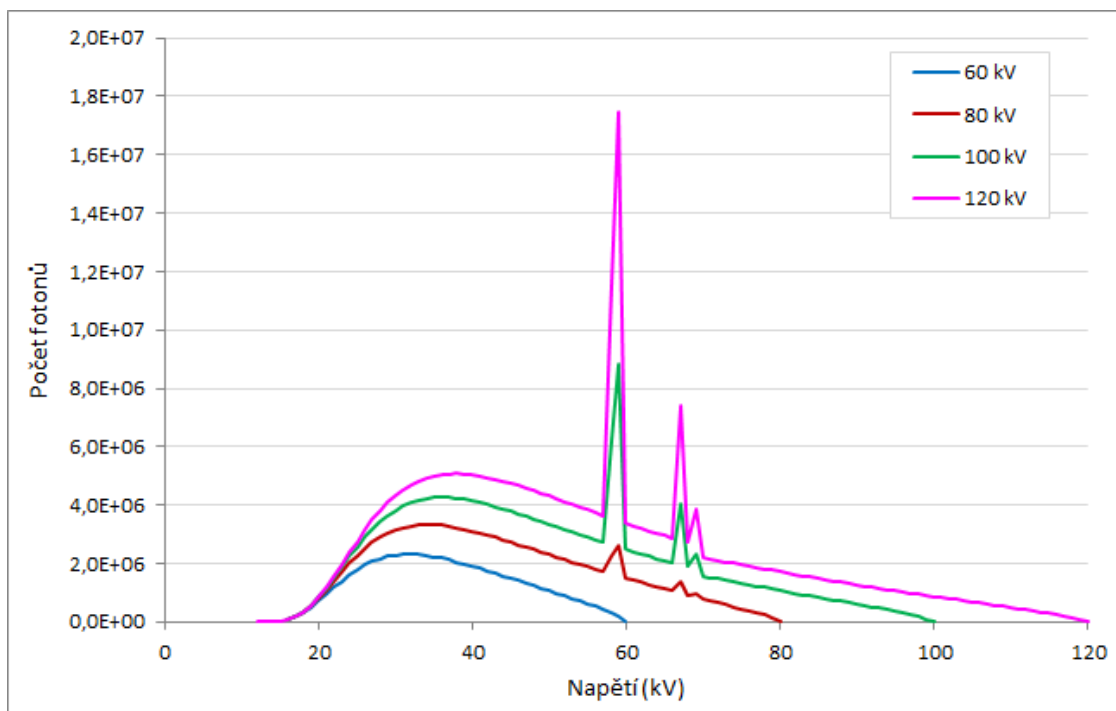
Velikost energie vzniklého fotonu, závisí jednak na použitém napětí mezi anodou a katodou, ale záleží také na použitém materiálu anody. Pokud použijeme materiál s nízkým protonovým číslem, RTG záření nevznikne. Nejčastěji se používá wolfram – kvůli jeho vysokému protonovému číslu a také kvůli celkové stabilitě materiálu při vysokých teplotách [2].

2.1.1 Charakteristické záření

Je důsledkem inverzního fotoelektrického jevu. Letící elektron vyrazí elektron z elektronové slupky např. K (nejbližší slupka k jádru). Tento elektron je nahrazen elektronem z vyšší vrstvy, např. L (druhá nejblíže). Elektrony ve vyšších vrstvách – dál od jádra mají vyšší energii. Rozdíl energií se tedy vyzáří ve formě RTG záření. Ve spektru jej můžeme vidět jako píky (viz obr. 1) [3].

2.1.2 Brzdné záření

Letící elektron neinteraguje s elektrony, ale s jádrem. A to na principu Coulombových sil. Pokud foton letí kolem jádra, je k němu přitahován a brzděn. Úbytek energie způsobený brzděním, je vyzářen formou RTG záření. Brzdné záření má spojité spektrum (obr 1) [4].



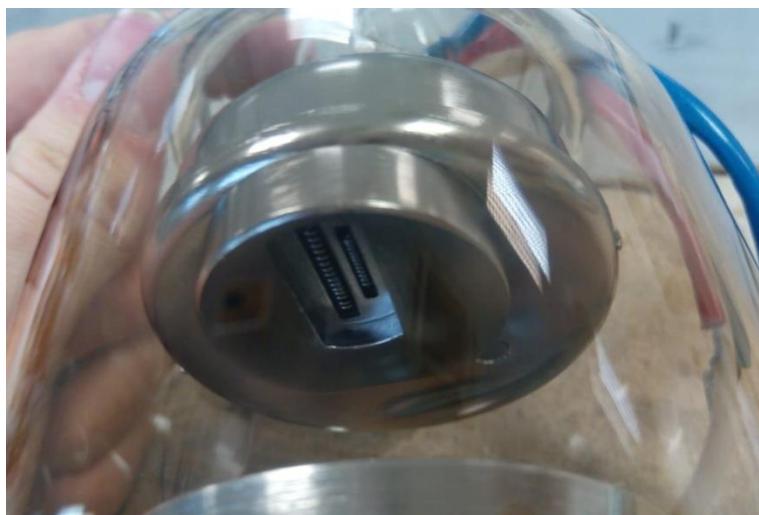
Obr. 1: Spektrum RTG záření při použití wolframové anody. Píky charakteristického záření a spojité spektrum brzdného záření [5]

2.2 Rentgenka

Rentgenka sestává z anody a katody, je zapojena do obvodu s vysokým napětím, až 200 kV. Obal rentgenky je většinou ze skla. Uvnitř je vakuum. Čím vyšší stupeň vakua, tím delší je životnost rentgenky. To proto, že RTG záření ionizuje vzduch a vzniklé radikály poté poškozují části rentgenky – dochází hlavně k oxidaci katody. Rentgenka, ač funguje jako dioda – z hlediska propustnosti proudu v jednom směru – je spíše výbojka [2].

2.2.1 Katoda

Představuje spirálovitě stočené wolframové vlákno, umístěné ve výbrusu z kovu. Na katodu se přivede proud, čím větší proud použijeme, tím více elektronů se z katody uvolní. Průchodem proudu dochází k zahřívání vlákna a termické emisi elektronů, které jsou urychleny rozdílem napětí a dopadají velkou rychlostí na anodu. Lze použít různé velikosti wolframového vlákna – to ovlivní velikost svazku elektronů, které dopadají na anodu a tím velikost ohniska RTG záření (viz obr. 2) [2].

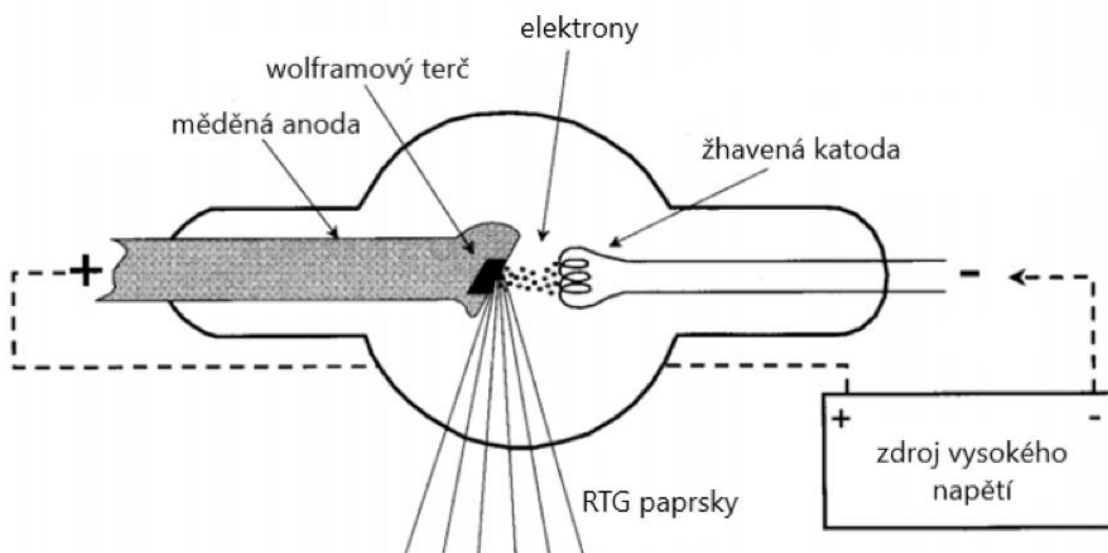


Obr. 2: Dvě různé velikosti wolframového vlákna na katodě [36]

2.2.2 Anoda

Anoda je tvořena slitinou wolframu (90 %) a rhenia (10 %). Wolfram se používá kvůli jeho vysokému bodu tání (3422 °C) a vysokému protonovému číslu ($Z = 74$). Rhenium se používá pro zvýšení odolnosti. Anoda může být buď stacionární, nebo rotační.

Stacionární anoda Je tvořena wolframovou destičkou zapuštěnou do mědi. Schéma je zobrazeno na obr. 3 a ukázka reálného provedení na obr. 4. Měď dobře odvádí teplo, kde je chlazena vodou či olejem. Výhodou je jednoduchost provedení. Nevýhody jsou, že RTG paprsek dopadá pouze na jedno místo, které se brzy opotřebí a anoda se špatně chladí [2].

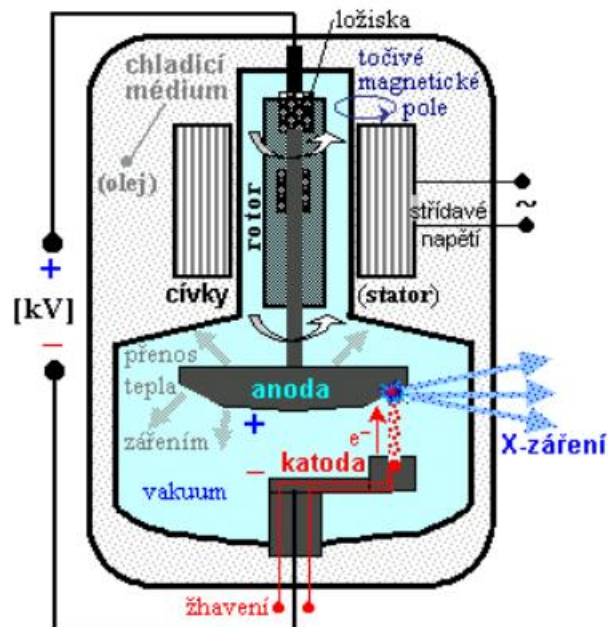


Obr. 3: Základní schéma stacionární anody [2]



Obr. 4: Dříve používaná stacionární anoda [36]

Rotační anoda sestává z rotujícího wolframového disku (schéma je zobrazeno na obr. 5 a ukázka reálného provedení na obr. 6). Disk je připevněn ke hřídeli motoru. Ta je vyrobena z tepelně odolné slitiny molybdenu, aby se motor nepoškodil teplem. Hřídel je pak spojena s rotorem. Vně rentgenky je svazek statorových cívek pro elektromagnetický pohon rotoru. Počet otáček anody může být až 10 000 ot/min. K motoru je rotor připevněn ložisky, která se ale mohou časem opotřebit a nelze je vyměnit. Což je asi jedinou nevýhodou rotační anody. Tím ale, že se anoda otáčí, zvýší se plocha, na kterou dopadají elektrony. Anoda už se neopotřebovává pouze na jednom místě a také je možno použít větší intenzitu generování záření, při kterém by se stacionární anoda už roztavila. Díky rotaci talíře se teplo z ohniska rozděluje po celém obvodu talíře. Chlazení je umožněno pouze tepelným vyzařováním do okolí rentgenky, kde se nachází chladící medium (voda, olej) [2].



Obr. 5: Schéma rotační anody [6]



Obr. 6: Dříve používaná rotační anoda [36]

2.2.3 Rozdíl ve využití rotační a stacionární anody

Rotační anody se nachází v diagnostických rentgenkách. V nich se totiž používají malé velikosti wolframového vlákna na katodě. Je to kvůli tomu, aby ohnisko RTG záření bylo co nejmenší a nedošlo k ozáření nepotřebných míst. Jelikož elektrony z katody dopadají na malé místo na anodu, docházelo by u stacionární anody k výraznému opotřebení materiálu pouze na jednom místě, zatímco zbytek by byl netčen. Proto se používají rotační anody, kdy je opotřebení rozloženo na celý obvod anody. Další výhodou je to, že z rentgenky se lépe odvádí teplo.

Stacionární anody se nachází v terapeutických rentgenkách, kde de wolframové vlákno je už větší, bodové opotřebení materiálu menší a tudíž lze použít stacionární anodu. V této práci se bude dále hovořit pouze o rentgenkách se stacionární anodou.

2.3 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

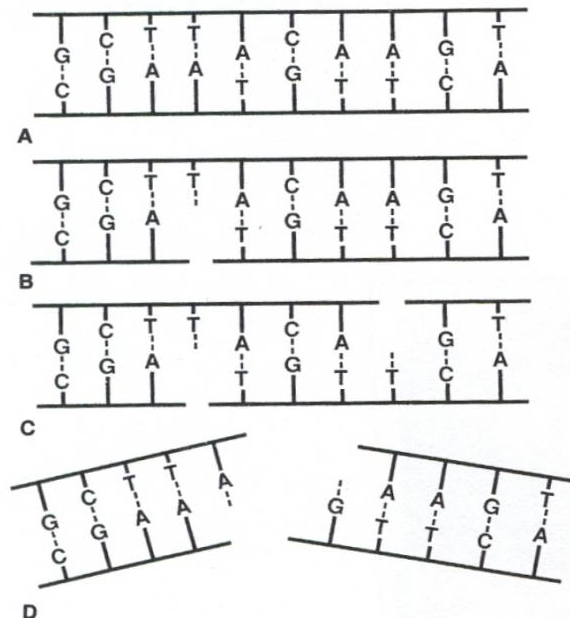
Ionizující záření svým působením zapříčiňuje změny v buňkách, hlavně v buněčných jádrech, kde se nachází DNA. Rozlišujeme dva typy negativních účinků ionizujícího záření – deterministické a stochastické. Navzdory tomu, že je ionizující záření škodlivé, hraje významnou roli při evoluci organismů.

2.3.1 Princip poškození buněk

Letící foton rentgenového záření, se srazí s elektronem v elektronovém obalu, předá mu svou energii a vyrazí ho z atomu, čímž vzniká ion. Tento proces se nazývá ionizace. Kritická pro buňku je právě ionizace vody. Je jasné, že může být ionizována kterákoli molekula, ale cytoplazma buněk je složená hlavně z vody, tudíž k reakci s vodou dochází nejčastěji. Ionizací vody vznikají velice reaktivní hydroxylové, vodíkové a oxidové radikály. Ty interagují s DNA, což vede k narušení prostorové struktury a tak k poškození DNA. Buňka poté sama přejde do apoptózy, jestliže není schopna poškozené DNA opravit, aby dalším generacím nepředávala svou poškozenou genetickou informaci a aby neprodukovala nefunkční geny.

Napadení radikálem způsobuje změnu konformace molekul. Takto může dojít k přerušení fosfodiesterové vazby v DNA nebo k substituci nukleotidů. Při zničení fosfodiesterové vazby na jedné straně dvoušroubovice, vznikne jednoduchý zlom. K přerušení může dojít i na druhém vlákně. Pokud dva jednoduché zlomy na protilehlých vlákněch od sebe oddělí více než 3 páry bází, vodíkové můstky šroubovici udrží ještě pohromadě. Pokud zlomy od sebe dělí méně párů bází (1,2) vznikne dvojný zlom a dvoušroubovice se rozpadne (detailně je vznik rozpadnutí demonstrován na obr. 7).

Bylo zjištěno, že buňka po ozáření dávkou 1 Gy obsahuje: 1000 modifikací bází, 1000 jednoduchých zlomů a 40 dvojných zlomů [7], [8], [9].



Obr. 7: Ukázka tvorby dvojných zlomů z jednoduchých zlomů [9]

A-nepoškozená DNA

B-DNA s jednoduchým zlomem

C-DNA se dvěma jednoduchými zlomy přes tři báze

D-DNA se dvěma jednoduchými zlomy přes jednu bázi

Na celkovém ozáření jedince, se průměrně podílí z 80 % přírodní zdroje (kosmické záření z vesmíru, přirozeně se vyskytující radionuklidy na zemi. Protože s ionizačním zářením přicházíme do styku každý den, každá buňka má reparační mechanismy – proteiny, které opravují zlomy v DNA, nebo které nedovolí zahájit dělení, pokud není vše opraveno (p53). Pokud buňka není schopna poškozené DNA zreparovat, sama přejde do apoptózy. Pokud však byly poškozeny kritická místa v DNA – protoonokogen, supresor, reparační gen, tedy taková místa, která se podílí na kontrole, zastavení dělení a vstup buňky do apoptózy, stane se buňka nádorovou [10], [11].

2.3.2 Deterministické účinky

Jsou to takové účinky, které nastupují, až když expozice přesáhne určitou mez a jejich závažnost pak vzrůstá s dávkou. Obvykle tato mez činí asi 1 Gy. Projev pak závisí na tom, jakou dávkou byl jedinec ozářen a konkrétně, které místa byly ozářeny.

Po celotělovém ozáření se u jedince rozvíjí akutní nemoc z ozáření (projevy jsou popsány v tab. 1). Z času uplynulého od ozáření k prvním symptomům můžeme vyvodit, jakou dávku osoba dostala. Pokud se jedná o mírné ozáření, příznaky syndromu se projeví klidně až za několik dní. Jestliže jedinec dostane velkou dávku (20 Gy), příznaky se projeví už do několika hodin i minut. Projevy ozáření na kůži (budou popsány v akutních lokálních změnách) se objeví v rámci hodin. Podle absorbované dávky rozlišujeme krevní formu (hematopoetickou), střevní (gastrointestinální) a nervovou formu (cerebrovaskulární) [11], [12].

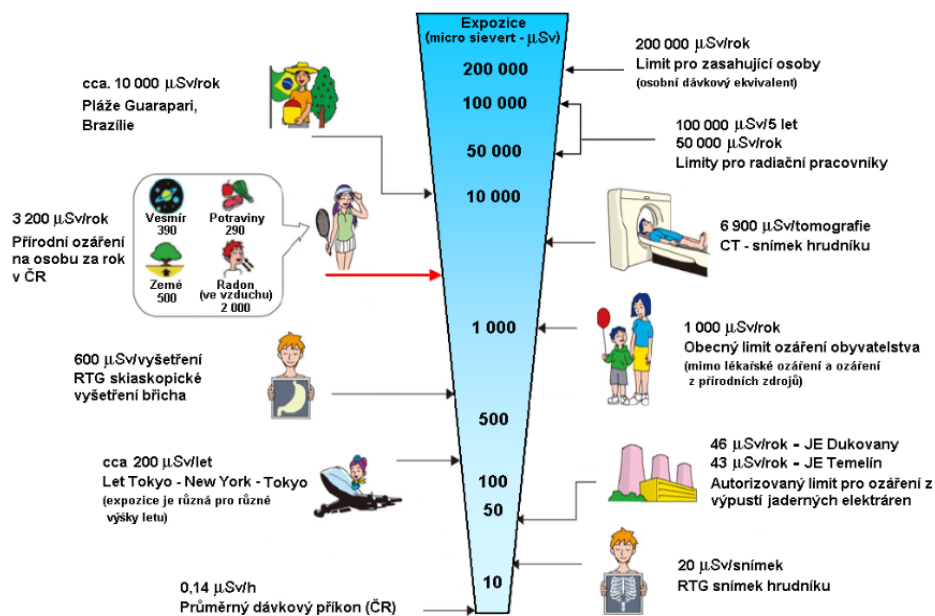
Tab. 1: Projevy ozáření při různých expozičních [11], [12], [13], [14]

absorbovaná dávka [Gy], název syndromu	první projevy	pozdní projevy	Možnost uzdravení
1-10, hematopoetický	Objeví se hned první den, jako dermatitida, nauzea, zvracení	Kmenové buňky v kostní dřeni umírají, proto se sníží počet krevních buněk. Vnitřní krvácení-málo krevních destiček, vyšší teplota, náchylnost k nemocem (nedostatek bílých krvinek)	Pokud nebyly zničeny všechny kmenové buňky v kostní dřeni, pacient se nejdéle do 2 let zotaví sám, případně s podáváním cytokinů a růstových faktorů. Jinak je nutná transplantace kostní dřene
10-20, gastrointestinální	Dostaví se do několika hodin v podobě zvracení a křečí	Zánik střevní výstelky, zástava střevní činnosti, porucha hospodaření s tekutinami. Úmrtí je spojeno s projevy hematopoetického syndromu.	Možnost uzdravení není. Smrt za 2 týdny.
20 a více, cerebrovaskulární	Projeví se ihned. Člověk je zmatený, v psychické dezorientaci, nebo dokonce upadá do bezvědomí. Má pocit hořící kůže.	Edém mozku. Selhává kardiovaskulární a respirační systém. Kóma.	Neočekává se uzdravení Smrt do několika dní, dokonce hodin.

Akutní lokální změny pozorujeme po ozáření citlivých míst. Velmi náchylné jsou gonády a kůže, která je ozářena vždy, když jsme vystavení RTG záření. Změny na kůži se začnou projevovat od přijaté dávky 1Gy, jako zarudnutí kůže a bolestivost. Od 3Gy dochází ke ztrátě ochlupení a od 6Gy může být tato ztráta trvalá. Při dávce 10Gy se pokožka odděluje od pojivového podkladu tekutinou a na kůži vznikají puchýře. Ty se mohou časem odlupovat, čímž se stav dále komplikuje kvůli infekcím. Pokud dojde k těžšímu poškození cév zásobující kůži, dochází k jejich odumření a vzniku vředu. Ten se velmi špatně hojí a nová pokožka je špatně odolná. K poškození pohlavních buněk stačí již malé dávky. U muže dochází ke sníženému počtu spermií už po dávce 0,25Gy a k úplné sterilitě při 8Gy. Ženská vajíčka jsou však náchylnější, protože se během života neobnovují. Ke sterilitě dochází již při 3Gy [11], [12], [13], [14].

2.3.3 Stochastické účinky

Jsou to účinky, které nemají žádný práh, ale během života sbíráme malé množství dávek, ať už z přírodních zdrojů či z diagnostických vyšetření. Ty se v nás akumulují a mohou se projevit po několika letech vznikem rakoviny. Jsou však zcela náhodné. Velikost dávky neurčuje závažnost projevu, ale zvyšuje pravděpodobnost vzniku. Může se projevit buď na těle jedince, nebo až u potomstva. Ukázky ozáření i s dávkami, které může jedinec získat, jsou zobrazeny na obr. 8 [11].



Obr. 8: Příklady expozičních ionizujícího záření [11]

Ionizujícímu záření jsme vystavováni každý den, ať už z přírodních zdrojů nebo umělých. Konkrétně za jeden den, je člověk žijící v České republice ozářen asi 3 µSv, což je za měsíc 90 µSv a za rok 1080 µSv. Lidé žijící u moře nebo na horách jsou ionizujícímu záření vystavováni více, až 3200 µSv za rok. Pokud jde pacient na RTG vyšetření hrudníku, absorbuje 20 µSv. při RTG vyšetření hlavy 100 µSv. CT vyšetření je pro pacienty náročnější, jelikož jen z jednoho CT vyšetření hrudníku dostanou dávku 7 000 µSv. Při celotělovém vyšetření pomocí CT při traumatech, je dávka podobná, protože se provádí s horším rozlišením. Zvýšené dávky ionizujícího záření dostaneme i při přeletu letadlem nad Atlantikem. Ozáření se pohybuje kolem 70 µSv. Z letu Tokio – New York až 200 µSv. U RTG záření můžeme říci, že se ozáření 1 Gy = 1 Sv. Sv na rozdíl od Gy bere v potaz náchylnost jednotlivých tkání na IZ a také biologický účinek konkrétních IZ. Zatímco Gy uvažuje pouze dávku na kilogram hmotnosti [11].

3. LÉČBA NENÁDOROVÝCH ONEMOCNĚNÍ POMOCÍ RTG

V druhé polovině 20. století nebyla radioterapie nezhoubných onemocnění uznávána. Doktoři to považovali za zbytečné vystavení pacienta ionizujícímu záření a obávali se zvýšeného rizika rakoviny, jak pro pacienta, tak pro jeho potomky.

Dnes se ale opět vrací, jako potencionální léčebná metoda. S tím, že s dnešní technologií filtrace je zátěž pro pacienta minimální. Snažíme se ozářit pouze požadované místo, vše jiné musí být odstíněno. Vždy musí být pečlivě posouzen poměr prospěch/risk, zda kladné výsledky převáží ty negativní. Každý pacient, je veden v dokumentaci, a je zaznamenáváno, jaké dávky už dostal.

Cílem této léčby je hlavně zlepšení kvality života – analgetickými a anti-proliferačními účinky. A používá se jen tehdy, pokud už všechny ostatní léčebné postupy selhaly. Kvůli zvýšení vzniku rakoviny, by pacienti mladší čtyřicet let, měli být léčeni jen v ojedinělých případech. Léčba pomocí RTG záření se zaměřuje na příznaky, nikoli však na příčiny. Čili neřeší nemoc jako takovou, ale pouze se snaží potlačit její projevy. A to není úplně cílem medicíny. Cílem dnešní medicíny je snažit se nemocem předcházet a ne je léčit až po vzniku. Samozřejmě ne vždy je to možné [15], [16].

Používají se rentgenky s vysokým napětím (200-300 kV), aby expozice byla co nejmenší. Dávky se podávají tzv. ve frakcích. Přišlo se totiž na to, že pokud tkáň ozáříme více malými dávkami s časovým odstupem, je to přínosnější, než kdybychom tkáň ozářili jednorázově stejnou dávkou. Je to proto, že normální buňky se dokážou zotavit do další fáze ozáření, zatímco více dělicí se náchylné buňky, jsou méně účinné v opravě a stávají se více senzitivní pro další frakci [15], [16].

3.1 Princip léčby

Jak již bylo řečeno, RTG záření je používáno pro jeho anti-proliferační a protizánětlivé účinky.

Protizánětlivé účinky jdou ruku v ruce i s analgetickými účinky, jelikož právě zánět způsobuje bolestivost místa. Hlavně leukocyty hrají velmi významnou roli při patogenezi a progresi zánětlivých onemocnění a tudíž jsou hlavním zájmem ozařování. Nezralé, nebo stále dělicí se lymfocyty jsou velmi náchylné na ozáření, už dávka 0,2 Gy způsobí jejich apoptózu. Na druhé straně lymfocyty už vyzrálé, jako jsou makrofágy a aktivované lymfocyty jsou vcelku radioresistentní. Radiační efekt se u lymfocytů projeví na jejich plazmatické membráně, kde se mohou poškodit aktivační místa a lymfocyty pak nejsou schopny komunikovat s okolím pomocí přirozené reakce protilátka-antigen. Toto se děje především u B-lymfocytů.

Což je pro nás ještě lepší účinek než jen snížení počtu v daném místě, jelikož by zaniklé lymfocyty byly nahrazeny jinými. Další leukocyty, které způsobují zánět, jsou makrofágové. Ozářením mohou ztratit svoji schopnost produkovat oxid dusný, což je vazodilatační látka uplatňující se při zánětu.

Anti-proliferační účinky spočívají v tom, že mitoticky aktivní buňky jsou více radiosenzitivní, než buňky plně diferencované, které se už nedělí [15].

3.2 Indikace k terapeutickému ozařování

Pozitivní účinky nenádorové terapie pozorujeme u degenerativních onemocnění kostí a kloubních spojů, hyperproliferativní onemocnění, zánětlivých onemocnění nebo u poruch funkce orgánu.

V České republice je ozařování nenádorových onemocnění schváleno pro klinické využití, ale ještě není tak zaběhlé, jako v jiných zemích, např. v Německu. Tam se každý rok ozáří asi 50 000 pacientů s nenádorovými onemocněními [15], [16].

3.2.1 Onemocnění kostí a kloubních spojů

Do této skupiny patří nejvíce pacientů, kteří dochází na nenádorové ozařování. Nejčastějšími onemocněními kosterní soustavy jsou artróza a artritida. Léčba je založena na protizánětlivém účinku, a tedy i snížení bolestivosti místa. Ozařují se klouby – kolene, kyčle, ramene, loktu a prstů. Dále patní struhy. Ozáření by se mělo provést alespoň ve dvou rovinách (0° a 90°, ukázka na obr. 9). Kdy místo, kde se paprsky protnou, bude ozářeno s největší intenzitou, zatímco jednotlivé svazky nezpůsobí takové poškození.



Obr. 9: Ukázka ozáření patní ostruhy ve dvou rovinách [19]

Pro ozařování kloubů se používají dávky 2 Gy aplikovaných po 3 po sobě jdoucích dnech nebo 1,5 Gy podaných po 4 po sobě jdoucích dnech. Na konci pozorujeme utlumení bolesti o 60–100 %. Kdy úleva od bolesti trvá většinou 3-12 měsíců. V ojedinělých případech dokonce i 10 let. Poté se ale bolest postupně navrácí. Pacientovi se podávají maximálně tři série ozařování, poté se musí vrátit

ke klasickým léčebným metodám (obstříky, ortopedie), kde se nepoužívá ionizující záření [15], [16], [19].

Dalším problémem pro organismus může být heterotropická osifikace (HO). Jedná se o tvorbu kostní tkáně bez účasti kostitvorných buněk. Takováto přestavba je možná v řadě tkání – svaly, šlachy, vazivo. Je to ochrana organismu na zvýšenou zátěž (přestavba okolo kostí), nebo po náročných chirurgických operacích. Nejčastěji se ozáření provádí po totální náhradě kyčelního kloubu. Kde HO představuje pro endoprotézu závažný problém. Ozáření probíhá tak, že 4 hodiny před operací se aplikuje jedna dávka a 72 hodin po operaci se aplikuje druhá. Obě dávky se pohybují okolo 7-8 Gy. Výsledkem je až 90% prevence HO [15], [16], [19].

3.2.2 Onemocnění kůže a měkkých tkání

Vzniká tak, že se začne rychle dělit vazivová tkáň, která omezuje v pohybu a funkci. Princip léčby je takový, že rychle dělící buňky jsou více náchylné na ozáření. S frakcionací má destrukci na rychle dělící se kmenové buňky, ale menší účinek na normální. Vždy je nutné, aby byl pozitivní účinek co největší, začít ozařovat v brzkém stadiu nemoci, když se buňky dělí. V pozdním stadiu už ozařování nemá takový smysl a pacient musí zvolit jinou léčebnou metodu [15], [16].

Jedním z onemocnění může být Dupuytrenova kontrakce. Na dlani ruky se začnou tvořit vazivové uzly, které sice nebolí, ale znemožňují natažení jednoho nebo více prstů a zůstávají stále v ohnuté pozici. Vzniká tak, že vazivové buňky se začnou rychle dělit a právě to je cílem ozařování. Používají se dávky 5x3 Gy aplikované v jednom týdnu. Poté následuje roční pauza a stejným způsobem se dávka zopakuje. Díky tomu se až 84 % pacientů vyhne chirurgické operaci, a v následujících 8 letech nemoc postoupí pouze o 4 % [15], [16].

Analogie k Dupuytrenovi kontrakci je Morbus Ledderhorse, ale týká se nohy. Používají se stejné dávky, jako u Dupuytrenovi kontrakce a pozorujeme velmi podobné účinky [15], [16].

Peironieho choroba je podobná dvou předchozím. Jedná se o onemocnění mužské populace. Podstatou je proliferace vazivové tkáně na topořivých tělískách penisu. To poté způsobuje zakřivení a bolestivost penisu především při erekci. Aplikují se dávky 2 Gy podané 5x během jednoho týdne. Zde je potřeba pečlivě odstínit gonády [15], [16].

Dalším onemocněním je Graves-Basedowova choroba. Je to autoimunitní onemocnění štítné žlázy. Jedním z projevů je otok tkání a tvorba vaziva za očima, což vede k vyboulení očí. To může zajít až do takového stadia, kdy je utlačen oční nerv, což vede ke slepotě. Léčba RTG je aplikována v důsledku jeho protizánětlivým a anti-proliferačním účinkům. Jelikož je ale oko na RTG hodně citlivé, aplikují se pouze malé dávky. V počáteční zánětlivé fázi se aplikuje pouze 0,2 Gy po 8 frakcích. V pokročilé fázi, kdy už hrozí utlačení očního nervu, se místo ozařuje s dávkou 1 Gy ve 20 frakcích [15], [16].

Setkáváme se také s Keloidní jizvou. Ta se objevuje se v místech, kde došlo k poškození kůže. Je to jizva, která vystupuje nad povrch kůže a přerůstá původní ránu. V průběhu času nemizí. Mohou se projevovat bolestivostí a svěděním. Pokud je pro jedince nepohodlné, aby mu po větší operaci zůstala jizva, je možnost začít místo ozařovat RTG zářením. První ozáření se provádí už 24 hodin od operace. Používají se dávky 2-5 Gy aplikované 4x nebo 5x do týdne. Celková dávka činí 10-20 Gy. zatím nebyla pozorována maligní transformace ani recidiva. Je nutné ale počítat s tím, že se rána bude hojit pomaleji [15], [16].

3.3 Ostatní zářiče používané v nádorové terapii

Kobaltové, cesiové zářiče – Používají se radioizotopy Kobalt (^{60}Co) a Cesium (^{137}Cs), které jsou zdrojem gama záření. Dnes se při terapiích používají jen zřídka a jsou vytlačovány modernějšími terapiemi. Hlavní nevýhodou je, že svazek procházející pacientem je tlumen minimálně, tudíž jsou tkáně poškozeny před i za lézí. Dalším problémem může být, že není možné záření vypnout. Jen vložit ochrannou desku mezi pacienta a zářič. Když, ale vypadla elektřina, musela se ochranná deska vkládat manuálně [17].

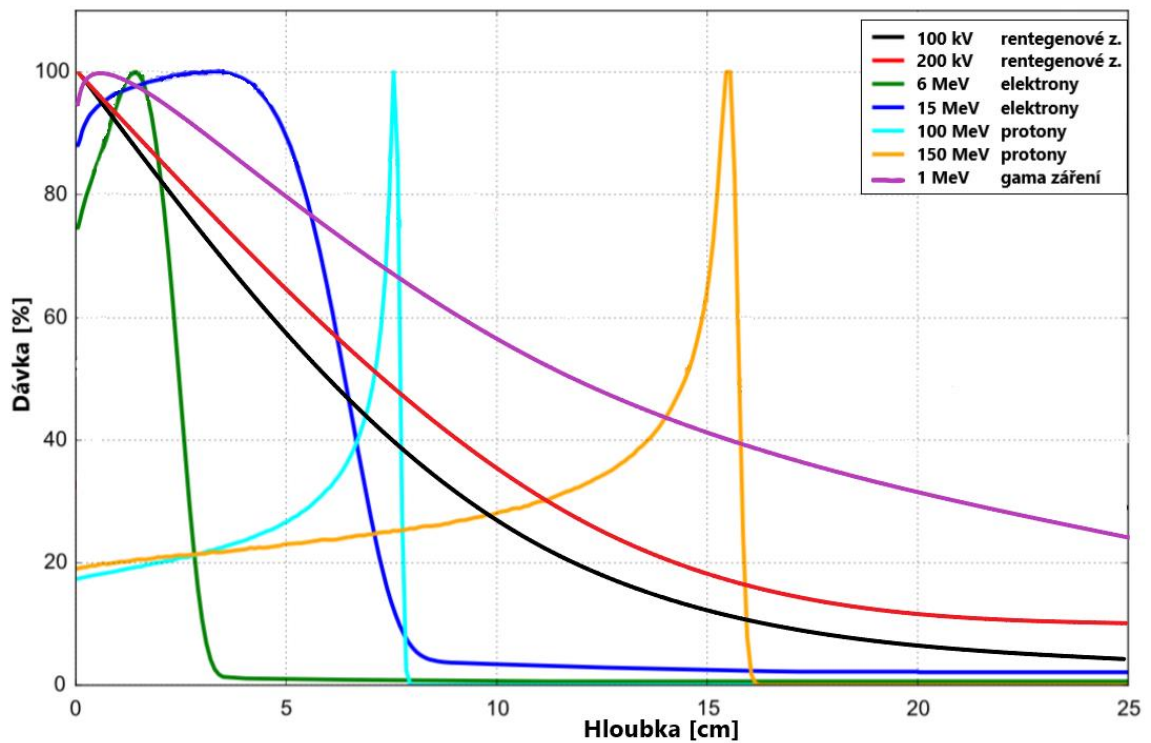
Lineární urychlovač – urychluje elektrony elektrickým polem, které potom inverzním fotoelektrickým jevem reagují s tkání. Účinek je stejný, jako při fotoelektrickém jevu, kdy fotony RTG vyráží elektrony. Tedy u rentgenového ozařovače, což bylo popsáno výše. Výhodou lineárních urychlovačů je, že částice jsou schopny dosáhnout vysokých energií bez použití vysokých napětí. Urychlovač však musí obsahovat dostatek urychlujících segmentů, protože elektron proletí jedním segmentem jen jednou. Lineární urychlovač se používá hlavně na hlubší nádorová ložiska, kam už by IZ z rentgenu těžko pronikalo, či při větších energiích kriticky poškodilo povrchové tkáně. Avšak oproti rentgenu, kde dominuje hlavně rychlost a jednoduchost, se zde musí provádět CT okolo nádoru a komplexněji propočítávat dávka. Lineární urychlovač i při vyšších energiích do větších hloubek nepoškozuje tolik kůži díky svému build up efektu. Je možné si ho představit tak, že ona vysoká energie s sebou strhne radikály vzniklé v kůži víc do hloubky a nádorové ložisko je poškozeno víc než kůže, kterou projde svazek s největší energií [17].

Protonová terapie – Je perspektivní tím, že letící proton předává svou energii z počátku v malé míře a maximum své energie předá při dosažení tzv. Braggova píku. Tento pík je určen energií protonu. Proton se ihned poté, co ztratí svou energii, zastaví. Z tohoto plyne, že před nádorovým ložiskem je dávka minimální, v nádorovém ložisku maximální a za nádorovým ložiskem nulová. Umožňuje léčit nádory, u nichž bylo dosud ozařování složité a rizikové. K terapii se používají kladně nabitá jádra atomu vodíku, které jsou urychlována v cyklotronu [17].

Leksellův gama nůž – Aplikuje se při nádorech v mozku. Jako radioizotop se používá ^{60}Co . Jednotlivé fotonové svazky jsou fokusovány pomocí kolimátorů.

Přesné ozáření je řízeno softwarově, kdy samotné lůžko jezdí s pacientem, poté kolimátory jsou posuvné a nějaké lze uzavřít. Tímto způsobem lze ozářit nádorové ložisko jakéhokoliv tvaru. Nekróza nastává jenom v ohnisku, kam směřují všechny kolimátory, zatímco tkáň, kterou prochází osamocený svazek, je poškozena minimálně. Hlava je během vyšetření fixována stereotaktickým rámem a stereotaktickou helmou [17].

Ukázky utlumení svazků z jednotlivých zářičů jsou zobrazeny na obr. 10. Svazky jsou měřeny ve fantomu, který simuluje lidské tělo. Procento utlumení je závislé na záření a vzdálenosti od zdroje.



Obr. 10: Ukázka hloubkových dávek z různých zářičů [18]

4. OCHRANA PŘED RTG

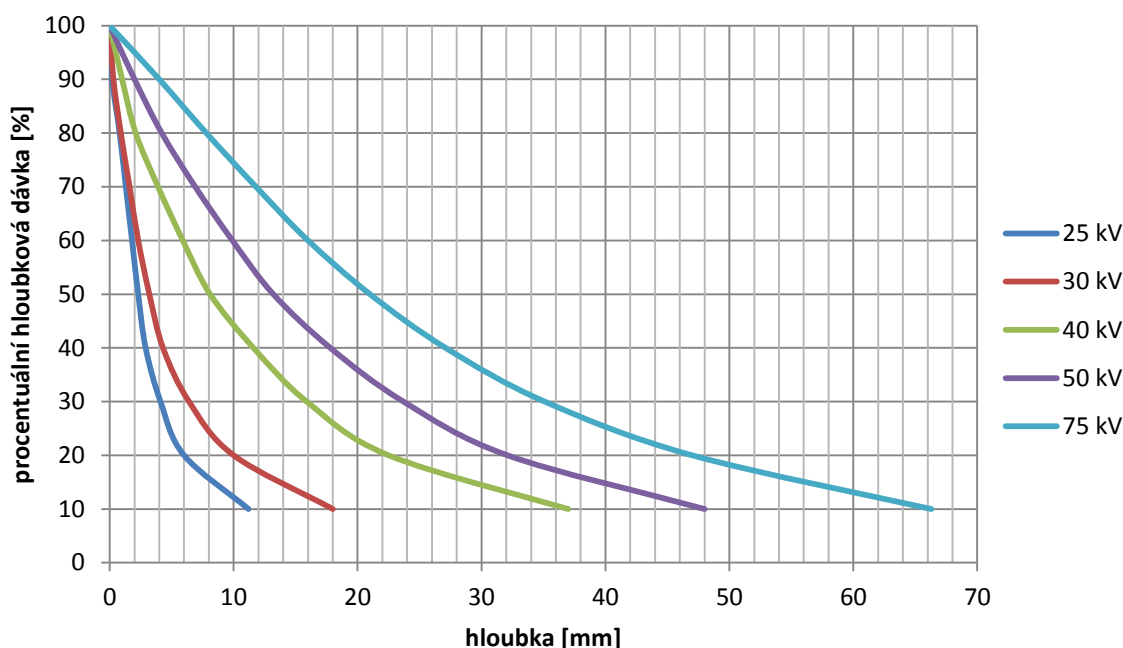
Jelikož je RTG záření škodlivé, je nutné se před ním chránit. Spolehlivá ochrana však není z principu možná. Veškeré ozařování je založeno na principu ALARA (as low as reasonably achievable). To znamená, že se pacientovi snažíme dát co nejmenší možnou dávku, která ale bude dostatečně přínosná buď pro vyšetření, nebo ozáření. Chránit se lze snížením času expozice, vzdáleností od RTG (intenzita RTG klesá se čtvercem vzdálenosti s) a stíněním. Vždy se snažíme ozářit jen to, co je nutné, ostatní odstínit. Toho docílujeme pomocí kolimátorů a ochranných pomůcek. Kolimátory se vyrábí v mnoha tvarech a velikostech (viz obr. 12) – oválné, jehlanové, čtvercové. Slouží k usměrnění svazku RTG záření. Na ochranu těla používáme ochranné zástěry, límce na štítnou žlázu, pomůcky na stínění gonád a další. Zdravotnický personál pracující s ionizujícím zářením, je povinen nosit dozimetry [20], [21], [22].

Další možností je použití radioprotektivních chemických látek. Lze použít radioprotektivní látky způsobující vazokonstrikci. Ty jsou založeny na principu, že pokud se ozařovaná buňka nenachází v přítomnosti kyslíku, je radiobiologický účinek 2x až 3x menší. Je to kvůli tomu, že kyslík reaguje s těmi místy, která byla poškozena radikály, což vede k trvalému poškození. Jinak se poškozené molekuly mohou samovolně vrátit do původního stavu. Čili pokud se cévy zmenší, navodíme ve tkáni hypoxii a tím i možnost radikálů reagovat s poškozenými molekulami. Používají se deriváty serotoninu a mexaminu. Je takto možné zredukovat poškození 1,5x. tyto látky však mají nežádoucí účinky vzniklé hypoxií, které pozorujeme u periferních tkání, jako třeba u varlat. Napadení radikály, lze také zmírnit radioprotektivními látkami obsahujícími síru. A to tak, že SH skupiny inaktivují radikály předtím, než se dostanou k DNA. Za nejúčinnější je považován amifostin. Ten ale sám nevstupuje do buněk, kvůli koncové fosfothiolové skupině. K defosforylaci dochází na povrchu membrány díky enzymu alkalická fosfatáza. Poté normálně difunduje do buňky. Alkalická fosfatáza je přítomna pouze na zdravých buňkách, čili je zajištěna i specifita. Redukce poškození je až dvojnásobná. Jedná se ale o toxickou látku, která navozuje nauzeu a zvracení [20], [21], [22].

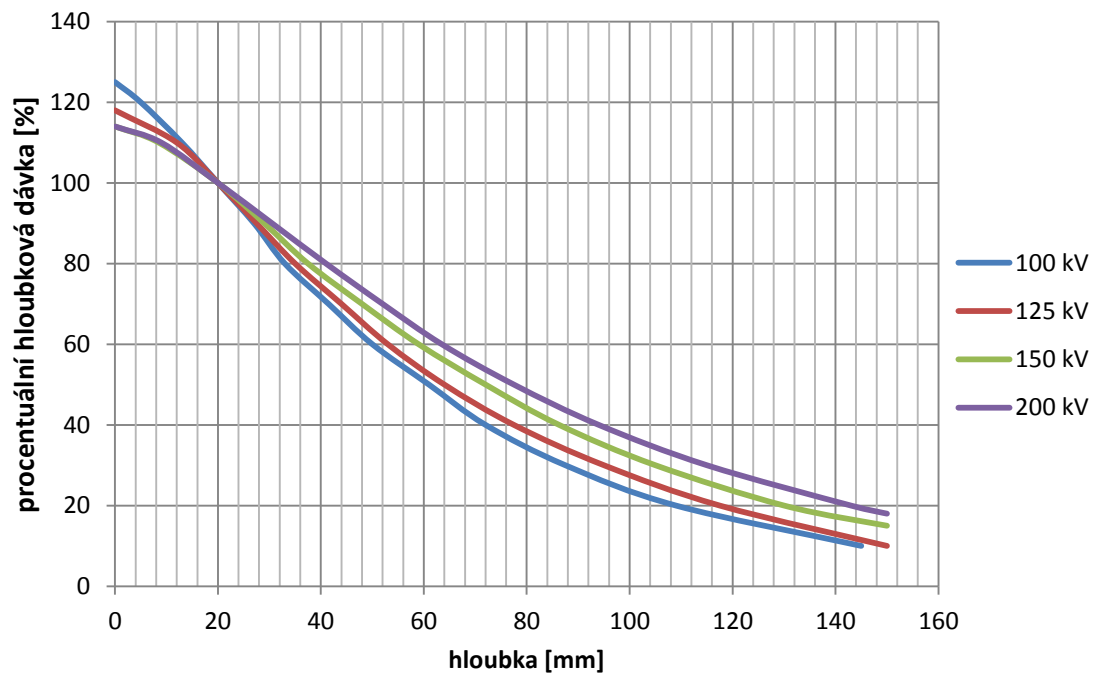
5. TERAPEUTICKÉ RENTGENKY

K terapii se používají rentgenky se stacionární anodou o různých maximálních napětích (100 kV, 200 kV a 225 kV). V České republice se nachází rentgenová pracoviště používající převážně 200kV rentgenky, konkrétně 21 pracovišť. Jen pár používá 100kV a 225kV. Tyto pracoviště jsou totiž vybaveny i lineárním urychlovačem, který má lepší vlastnosti při hloubkových terapiích. Když se totiž podíváme na hloubkové křivky z grafu 1 a grafu 2, tak pokud chceme ozářit např. keloidní jizvu, použijeme pouze 25 kV, kde největší ozáření je na povrchu, kde se jizva nachází a u 1 cm je dávka pouze 10%. Pokud však, ale chceme ozářit nádorové ložisko 8 cm hluboko, je už nevýhodné používat rentgenové záření a je lepší raději pacienta poslat na lineární urychlovač. To proto, že pokud se podíváme na hloubkovou tabulku tak 200 kV má v 8 cm pouze 50% energii a povrchové struktury nad kloubem jsou poškozeny více. 200kV rentgenka se používá ještě na ozáření kyčelních kloubů, které jsou hluboko asi 4 cm u člověka, který není obézní.

Každý terapeutický rentgen má u sebe příslušenství kolimátorů a primárních filtrů. Ty jsou zobrazeny na obr. 11. Kolimátory slouží k usměrnění svazku, jen k místu, které chceme ozářit. Filtry slouží k primární filtraci svazku, kdy se odstíní fotony o malé energii, aby se šetřila kůže.



Graf 1: Hloubkové křivky 200kV terapeutické rentgenky do 75 kV [35]



Graf 2: Hloubkové křivky 200kV terapeutické rentgenky od 100 kV do 200 kV [35]

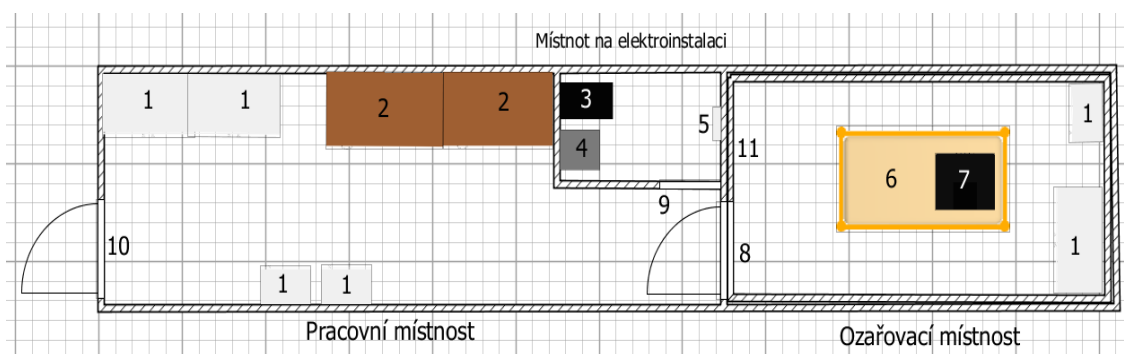


Obr. 11: Ukázka kolimátorů (napravo) a filtrů (nalevo) na terapeutické rentgenky [31]

6. NÁVRH PRACOVISTĚ

Hlavním přínosem této práce, je umístit rentgenové pracoviště do kontejneru – koncept převzat od armády, která používá kontejnery k jednoduchému a rychlému přesunu základny. Stejně tak by se to dalo použít s rentgenovým pracovištěm, aby ho bylo možné kamkoli odvést. Hlavní použití může být v domech pro seniory nebo v oblastech, kde vzdálenost k nejbližšímu RTG pracovišti je příliš velká. Ukázka návrhu pracoviště je na obr. 12.

6.1 Konstrukce



Obr. 12: Ukázka kontejnerového provedení ozařovacího pracoviště [36]

Legenda:

- 1 skříně a skřínky na příslušenství
- 2 stoly pro pracovníky
- 3 VN zdroj rentgenky
- 4 chladič rentgenky
- 5 odstíněné krytí kabelů
- 6 postel pro pacienta
- 7 rentgen + kontrolní jednotka
- 8 olověné dveře
- 9 posuvné dveře k elektroinstalaci
- 10 vchodové dveře
- 11 kamera na pozorování pacienta

Kontejner je rozdělen na dvě části, v jedné – nalevo je pracoviště pro radiční pracovníky, příslušenství a malá místnost na elektroinstalaci (generátor, zdroj, chlazení). V druhé – napravo, je lůžko pro pacienta + rentgen s 200kV rentgenkou.

Podle standartu ISO pro výrobu kontejnerů, jsme vybrali rozměr kontejneru 12,2x2,44x2,90 (délka x šířka x výška). Jako materiál se nejčastěji používá ocel. Použijeme tedy ocel o tloušťce 4mm. Pokud bychom chtěli výrazně snížit hmotnost kontejneru, mohli bychom použít dural (tab. 2). Bylo by to ale mnohem nákladnější a složitější na provedení, jelikož se hliník špatně svařuje a mohl by se pod váhou

olova ohýbat. Při výrobě ocelového kontejneru se stěny zvlíní – kvůli větší odolnosti a pevnosti. Bude také nutné provést povrchové úpravy pomocí pískování a primingu na odstranění rzi, špíny a jiných nečistot. Ozařovací místnost odstíníme 4 mm olova [29], [30].

Tab. 2: Vypočítané hmotnosti kontejneru pro ocel a hliník [36]

	ocel [kg]	dural [kg]
Ozařovací místnost (při tloušťce kovu 0,4 mm + 0,4mm Pb)	6 420	5 089
Pracovní místnost (0,4 mm)	2273	782
Celková hmotnost	8 692	5 870

Pro vchod do ozařovací místnosti budou použity olověné dveře [28]. S tloušťkou olova 5mm. Dveře jsou metr široké, což usnadní průchod méně pohyblivých pacientů. Dveře v sobě budou mít zabudovaný bezpečnostní spínač, bez jehož sepnutí (při zavření dveří) nepůjde spustit rentgenka. Součástí olověných dveří bude olověná zárubeň.

Kontrola pacienta bude zajištěna kamerovým systémem. Lze také použít olověné sklo. To je ale křehké a častými převozy by se mohlo poškodit.

6.2 Rentgenka

V České republice jsou k terapii nejpoužívanější 200kV rentgenky. 200kV rentgenky svými hloubkovými křivkami plně vyhovují na nenádorové ozařování. Oproti 300kV rentgence má omezení akorát na hluboké kostní léze, ale to už je pro pacienta lepší zvolit terapii lineárním urychlovačem. Je to kvůli hloubkovým křivkám na obr. 10.

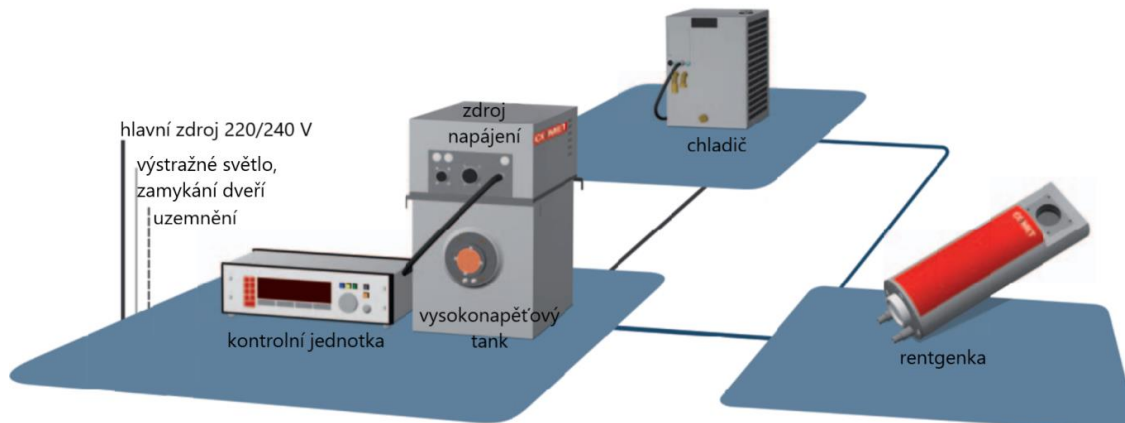
Rentgenku tedy zvolíme nejspíše 225kV se stacionární anodou a chlazenou vodou. Jelikož kryt rentgenky není odstíněn (únikové záření = 10 mSV/h) bude nutné rentgenku ještě dodatečně odstínit – vytvořit kryt, který splní hygienické normy pro lékařské prostředí. Více o parametrech rentgenky v tab. 3.

Tab. 3: Parametry 225kV rentgenky MXR-225/22 [27]

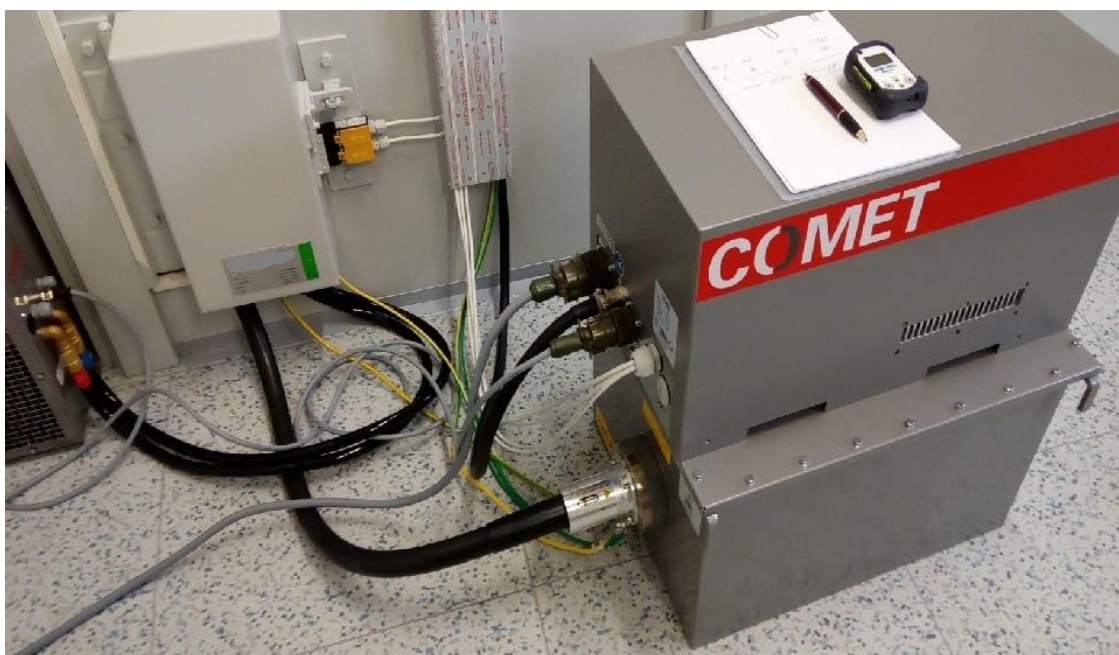
Jmenovité napětí	225 kV
Výkon	640 W/ 3000 W
Ohnisková vzdálenost podle EN 12543	d = 1 mm/ 5,5 mm
Ohnisková vzdálenost podle IEC	0,4 mm/3,0 mm
Proud katodou, max	4,1 A/ 4,2 A
Napětí na katodě	3 V/ 5,5 V
Vlastní filtrace	0,8 +- 0,1 mm Be
Materiál anody	W
Vyzařovací úhel	20°
Radiační pokrytí	40°
Únikové záření, při max. zatížení ve vzdálenosti 1 m	10 mSv/h
Hmotnost	11 kg
Typ konektoru	R24

6.3 Elektroinstalace

Ke správné funkci rentgenky, je potřeba k ní zapojit tyto následující komponenty: vysokonapěťový tank (transformátor + násobič), zdroj napájení, chlazení a kontrolní jednotku. K rentgence povede kabeláž přes zeď ozařovací místnosti. Což musí být odstíněno krytem na kabely. Schéma elektroinstalace je na obr. 13 a reálné provedení elektroinstalace je na obr. 14 a 15.



Obr. 13: Schéma elektroinstalace rentgenky k jednotlivým komponentům [26]



Obr. 14: Ukázka elektroinstalace k rentgence – napravo VN tank na něm VN zdroj, nalevo chlazení a uprostřed odstíněný kryt na kabely [36]



Obr. 15: Vyvedená kabeláž k rentgence, umístěné na provizorním stojanu [36]

6.4 Převoz kontejneru

Přeprava kontejneru by se prováděla pomocí kamionu. V EU je povolena maximální hmotnost soupravy (kamion + přívěs) 40 tun. Tudíž by měl být samotný kontejner co možná nejlehčí, abychom se vyhnuli potížím při přepravě. Hmotnost kamionu se pohybuje okolo 10 tun. Kontejner, při použití oceli bude mít i s komponenty uvnitř taktéž 10 tun. Čili při přepravě, by neměly nastat větší problémy.

6.5 Cenová analýza projektu

Cenová analýza zahrnuje odhad, jak nákladů za materiál, tak i mzdy pro pracovníky. Jednotlivé odhady jsou rozepsány v tab. 4 a 5. Celkový odhad na zprovoznění prvního rentgenového pracoviště i s vývojem činí 10,5 mil. Korun.

Tab. 4: Odhad výdajů za hardware [36]

Hardwarové náklady	
Rentgenka COMET 225kV	1 657 500 Kč
Kryt rentgenky	250 000 Kč
Poziční systém/manipulátor	600 000 Kč
Elektroinstalace	180 000 Kč
Kolimátory s filtry	350 000 Kč
Ovládací pult	250 000 Kč
Kontejner	70 000 Kč
Stínění	600 000 Kč
Vnitřní obložení kontejneru	350 000 Kč
Stůl pro pacienta	250 000 Kč
Bezpečnostní okruhy	100 000 Kč
Záložní zdroj	350 000 Kč
Schody + zvedací plošina	350 000 Kč
Kamery	70 000 Kč
Celkem	5 427 500 Kč

Tab. 5: Odhad výdajů za mzdy [36]

Náklady za práci a mzdy	
Elektro	425 600 Kč
Mechanika	1 260 840 Kč
Software	957 600 Kč
Bezpečnost/certifikace	766 080 Kč
Montáž	638 400 Kč
Celkem	4 048 520 Kč

7. KALIBRACE RTG

Podle nařízení SÚJB (státní úřad pro jadernou bezpečnost) je nutné, používat pouze takový rentgenový přístroj, který úspěšně prošel přijímacími zkouškami, zkouškou dlouhodobé stability a zkouškami provozními stálosti. Pokud RTG přístroj těmito zkouškami neprojde nebo ani nebyly provedeny, nelze takový přístroj používat. Přijímací zkoušky se provádí pouze jednou a to při koupi a následné instalaci nového přístroje. Tu řídí pracovník z dodávající firmy. Zkouška provozní stálosti má tři poddruhy a to denní, měsíční a roční a řídí ji pracovník nemocnice. Nakonec zkouška dlouhodobé stability se provádí jednou za 36 měsíců a řídí ji radiologický fyzik. Kalibrace RTG je zahrnuta právě v těchto zkouškách. Z každé zkoušky se vede dokumentace, která musí být evidována. Při kalibraci rentgenových systémů se proměřuje (se provádí následující testy) [33], [34]:

1. Absorbovaná dávka v referenčním bodě, svazky do 75 kV

Cílem zkoušky je ověření absorbované dávky v referenčním bodě. Jako referenční bod se považuje planparalelní ionizační komora umístěná na hladině vodního fantomu. Pro svazky terapeutického RTG se používá referenční aplikátor o průměru 3 cm a SSD (source-to-skin distance = vzdálenost zdroje od kůže pacienta) 20cm. Při tomto nastavení, za použití 100 MU (monitorovací jednotka), by měla být dávka na referenčním bodě rovna 1 Gy. k vypočítání dávky se používá rovnice 7.1.

$$D_w = M * k_{t,p} * N_{D,w} * k_Q, \quad (7.1)$$

kde M je odezva dozimetrického systému [nC], $N_{D,w}$ je kalibrační faktor dozimetrického systému, pro dávku ve vodě záření referenčního svazku T30 [Gy/C], k_Q korekční faktor na energetickou závislost ionizační komory a $k_{t,p}$ oprava na hustotu vzduchu vypočítaná dle rovnice 2. K tomu potřebujeme ještě naměřit hodnoty barometrem a teploměrem u referenčního bodu.

$$k_{t,p} = p_0 * \frac{273,15+t}{\{(273,15+t_0)*p\}}, \quad (7.2)$$

kde t a p jsou teplota a atmosférický tlak při měření.

Měření se opakuje třikrát pro všechny zbývající svazky do 75 kV a z naměřených hodnot se takto vypočítá dávka na 100 MU. Vypočítané dávky se zapíší do protokolu.

2. Absorbovaná dávka v referenčním bodě, svazky od 100 kV

Měření je stejné, jako předchozí měření svazků do 75 kV. S tím rozdílem, že se jako referenční aplikátor použije 10 cm * 10 cm, se SSD 50 cm. A jako referenční bod se použije cylindrická ionizační komora, ve hloubce 2 cm pod hladinou vodního fantomu. Toto posunutí je možné vidět na grafu 2, kde se 100% dávka měří až od 2 cm.

3. Polotloušťka svazků

Hledáme takovou tloušťku hliníkových filtrů, která sníží, která sníží energii svazku na polovinu. Vhodnou ionizační komoru umístíme 50 cm od zdroje záření. Poprvé stanovíme odezvu bez stínící vrstvy. Poté přikládáme do svazku hliníkové filtry tak dlouho, až je hodnota odezvy ionizační komory nižší, než polovina hodnoty bez stínící vrstvy. Měření provedeme pro všechny napětí rentgenky a s použitím všech filtrů.

4. Homogenita radiačního pole

Při této zkoušce chceme ověřit, zda je pole homogenní. Měří se svazky od 100 kV. Homogenita je poměr maximální dávky k minimální, v oblasti radiačního pole. Oblast je definována podle tabulky 4.

Tab. 6: Homogenita pole [36]

Velikost čtvercového pole F [cm]	Velikost vyhodnocované oblasti
≤10	F-2cm
>10	0,8*F

Měření probíhá opět ve vodním fantomu s vhodnou ionizační komorou ponořenou 2 cm pod hladinou. Na rentgen se nainstaluje aplikátor 10 cm * 10 cm.

5. Polostín radiačního pole

Je vzdálenost mezi 80 % a 20 % z dávky na centrálním paprsku – na středu pole. Ověřuje se pouze u svazků nad 100 kV s kolimátorem 10 cm × 10 cm. Při tomto měření je nutné použít detektor s vysokým rozlišením.

6. Reprodukovatelnost aplikované dávky

Reprodukovatelnost aplikované dávky se hodnotí pomocí variačního koeficientu s , podle rovnice 7.3

$$s = \left(\frac{100}{R}\right) * [\sum(R - R_i)^2 / (n - 1)]^{\frac{1}{2}} \% \quad (7.3)$$

Pro energie do 75 kV se používá kolimátor o průměru 3 cm a SSD 20 cm. Odezva se měří 5x pro 25 MU a 5x pro 100 MU. Variační koeficient s , se stanovuje z planparalelní komory umístěná na hladině vodního fantomu.

Pro energie od 100 kV se používá kolimátor 10 cm * 10 cm a SSD 50 cm. Odezva se měří stejně, ale s nejvyšší energií od 100 kV. Variační koeficient by se neměl lišit víc, jak o 3 %.

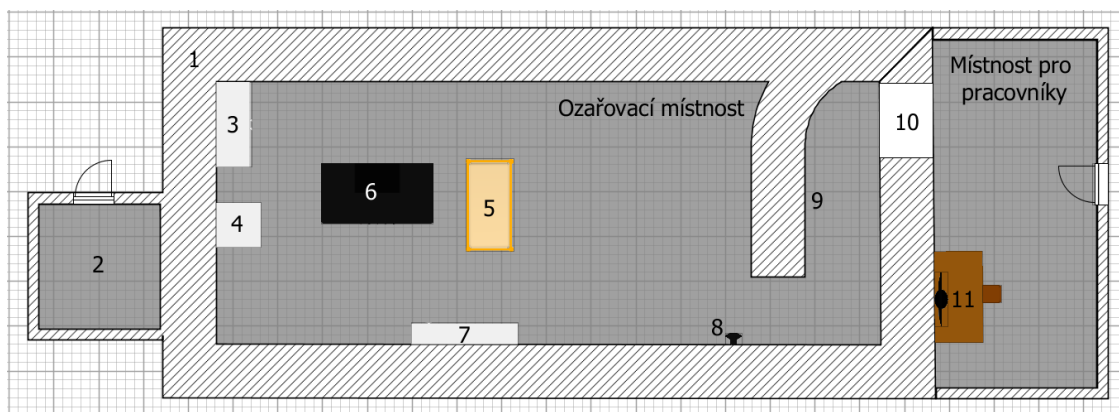
7. Ověření hloubkových dávek

Pro energie do 75 kV se používá kolimátor o průměru 3 cm a SSD 20 cm. Dávky se měří pro 50 MU v 5 mm, 10 mm, 20 mm. Stanovuje z planparalelní komory, umístěné ve fantomu s PMMA materiálem.

Pro energie od 100 kV se používá kolimátor 10 cm * 10 cm a SSD 50 cm. Dávky se měří pro 25 MU v 10 mm, 50 mm, 100 mm. Stanovuje z cylindrické komory, umístěné ve vodním fantomu [35].

8. SROVNÁNÍ TERAPEUTICKÉHO PRACOVISTĚ

Pro srovnání jsem si vybral pracoviště na Masarykově onkologickém ústavu. Na tomto rentgenovém pracovišti se ozařují převážně patní ostruhy, kolena a lokty. V menší míře pak kožní nádory. Věnuje se také paliativní léčbě. Nákres pracoviště je na obr. 16.



Obr. 16: Ozařovací pracoviště na MOÚ [36]

- 1 Barytový beton (120 cm)
- 2 Chlazení rentgenky
- 3 Uložení fantomů a kolimátorů
- 4 Zdroj rentgenky
- 5 Lůžko pro pacienta
- 6 Rentgen
- 7 Polička na kolimátory
- 8 Kamera
- 9 Vstupní labyrint
- 10 Posuvné olověné dveře
- 11 Ovládací centrum

Na vstupu do ozařovací místnosti jsou elektricky ovládané olověné dveře. Ty dokud se nezavřou, tak se rentgenka nespustí. Dál do místnosti vede labyrint, postavený z barytového betonu (120 cm), jako celý obvod ozařovací místnosti. Pokud je v barytové zdi díra na kabely, musí se díra vrtat šikmo. Uprostřed místnosti je terapeutická rentgenka COMET MXR-226 (225 kV). Rentgen má posuvný mechanismus pro posouvání rentgenové hlavy po místnosti. Rentgen zobrazen na obr. 17, rentgenka na obr. 18.



Obr. 17: Rentgen používaný na Masarykově onkologickém ústavu [35]



Obr. 18: Rentgenka COMET - MXR-226 [24]

Jedná se o stacionární rentgenku (parametry rozebrány v tab. 7) chlazenou vodou, s integrovanou radiační ochranou. Obsahuje wolframovou anodu a jedno ohnisko. Průtok chladícího média činí 4 l/min. Doba chlazení po ozáření, je asi 2 min [24].

Tab. 7: Parametry rentgenky COMET – MXR-226 [24]

Jmenovité napětí	225 kV
Výkon	3000 W
Ohnisková vzdálenost podle EN 12543	d = 7.5 mm
Ohnisková vzdálenost podle ASTM E1165-12.	N/A
Proud anodou, max	4.2 A
Napětí na katodě.	5.5 V
Vlastní filtrace	0.8 ± 0.1 mm Be
Materiál anody	W
Vyzařovací úhel	20°
Radiační pokrytí	40°
Únikové záření, při max. zatížení ve vzdálenosti 1 m	10 mSv/h (225 kV; 13 mA)
Hmotnost	11 kg
Typ konektoru	R24
Rozložení pružinového kabelu HV	2 viditelné kroužky (~7 mm)
Zastínění nepružícího kabelu HV	5.5 - 6 mm
Množství maziva pro terminál HV-kabel	1.2 ml

Zdroj rentgenky je hned vedle rentgenu. Zato chlazení je osamoceno v místnosti, kam ale nemá přímý vchod z ozařovací místnosti, ale musí se obcházet. Kolimátory jsou odloženy na stěně na polici. Pacientské lůžko je monitorováno kamerou. Pod kamerou se nachází nouzové tlačítko v případě ohrožení. Ovládací centrum je v místnosti pro pracovníky. Zde se pacient monitoruje, spouští a vypíná rentgenka, zavírají a otevírají dveře.

Před každým ozářením pacienta, musí pracovník pacienta poučit, poté pacient musí podepsat informovaný souhlas. Po vyšetření lékař odhadne hloubku, ve které se nachází bolestivé místo a podle hloubkových tabulek, se aplikuje kolimátor a filtr na odfiltrování primárního svazku a nastaví se kilovoltáž (podle grafu 1 a grafu 2). Poté už pouze stačí zmáčknout tlačítko beam on, pro spuštění rentgenky.

9. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

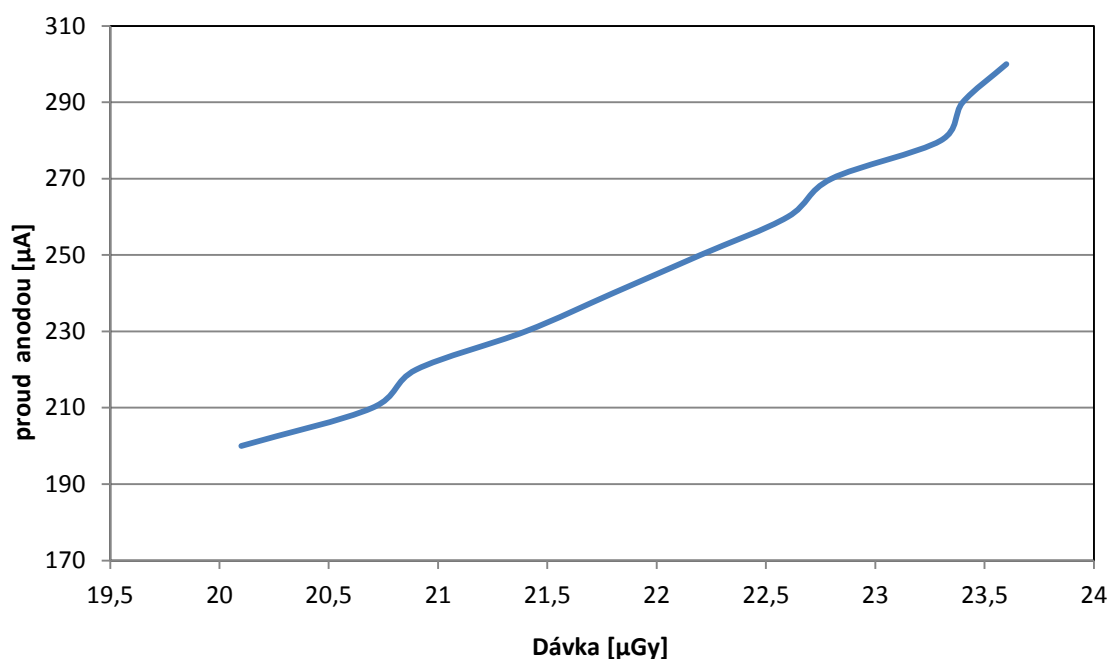
V tomto měření jsem proměřil závislost absorbované dávky na proudu. Poté útlum RTG záření materiály, které se používají na stavbu rentgenů: dural a olovo. Nejprve pod nulovým úhlem v přímém svazku a poté mimo hlavní svazek pod úhlem 30°. Vzdálenost detektoru od zdroje RTG záření byla 45 cm a délka expozice 500 ms.

K měření byl použit Geiger-Müllerův čítač. Na G-M čítač bylo potřeba dát primární stínění, aby nedocházelo k jeho přetečení – 0,5 mm olova kolem komory a 1,5 mm olova zespodu komory.

Výrobce G-M trubice udává parametr 1,5 CPS/mR/h pro kobalt (^{60}Co). Což po převedení jednotek odpovídá 540 pulzů/uGy. CPS je počet pulsů za sekundu. R je rentgen, jako jednotka dávky (1R = 0,01Gy). Parametry rentgenky použité k měření jsou v tab. 8. Graf závislosti mezi proudem anodou a dávkou je na grafu 3.

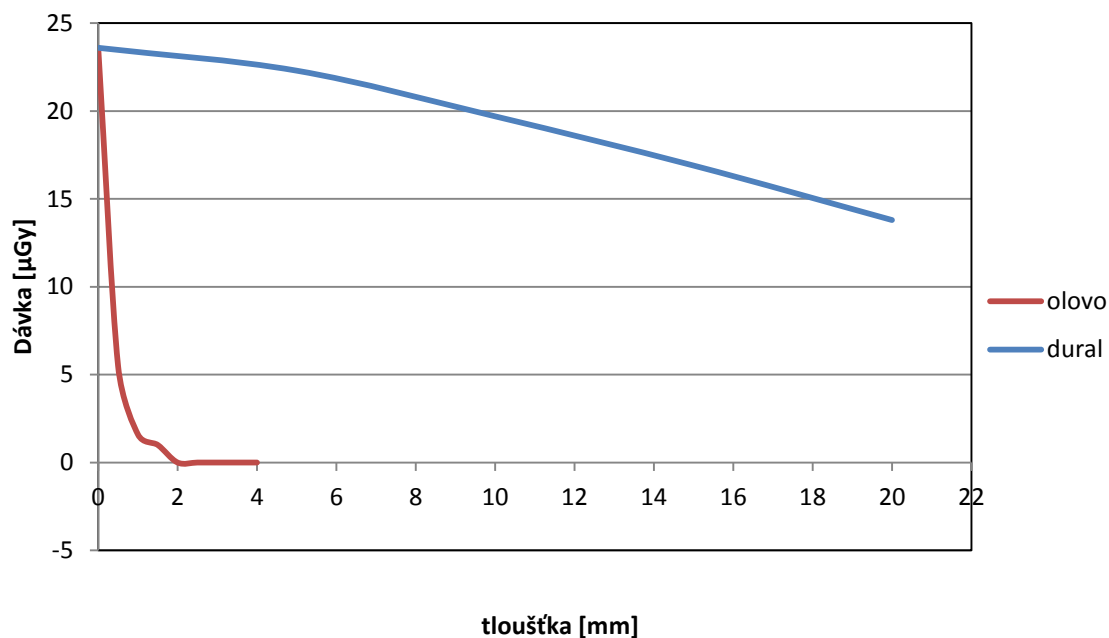
Tab. 8: Parametry rentgenky použité k měření [36]

Anoda	stacionární
Jmenovité napětí	80 kV
Výkon	56 W
Proud katodou, max	300 μA
Vlastní filtrace	1,5mm sklo 2,5mm olej
Materiál anody	Wolfram
Radiační pokrytí	50°
Chlazení	olej

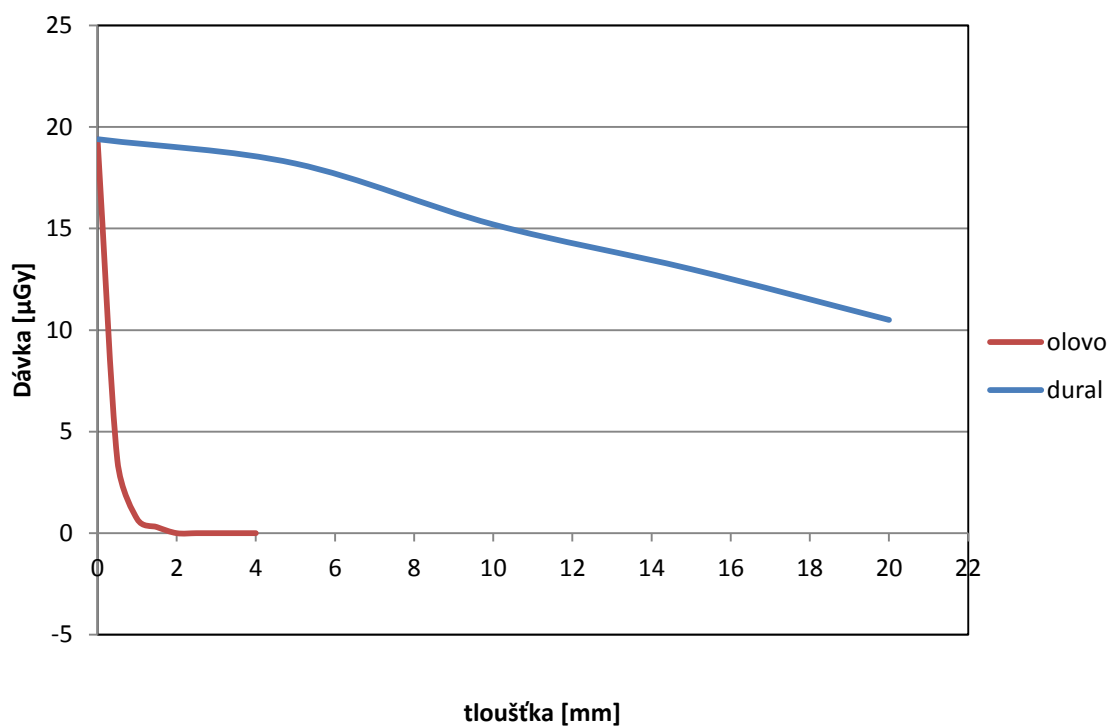


Graf 3: Závislost absorbované dávky na velikosti proudu anodou [36]

Závislost na grafu 3, by měla být lineární. Nelinearity v tomto grafu jsou nejspíše způsobeny chybou měření: nepřesnosti detektoru, rozptýlené záření vlivem Comptonova jevu. Útlum RTG záření po průchodu jednotlivými materiály je dále zobrazen v graf 4 a 5.



Graf 4: Útlum RTG záření pod nulovým úhlem [36]



Graf 5: Útlum RTG záření pod úhlem 30° [36]

Závěr měření: Z grafů 4 a 5 je zřejmé, že už 1 mm olovo odstíní 95 % 80kV rentgenové záření. Slitina hliníku už ovšem takový koeficient útlumu nemá. 2 cm odstínily pouze 60 %. V praxi je 80kV rentgenové záření odstíněno už 2 mm olova. Tímto měřením byla praxe ověřena. V tomto úkolu, jsem měl podle zadání práce, provést měření dozimetrických veličin u konkrétního terapeutického systému na fantomových přípravcích. Projekt převozného rentgenového pracoviště se ale začíná teprve rozbíhat. Nejprve se totiž bude konstruovat kontejnerové pracoviště a až poté se koupí terapeutická rentgenka, která bude muset ještě projít nejrůznějšími hygienickými testy, aby mohla být uvedena do klinického provozu. Po dohodě s vedoucím jsme tedy problém vyřešili takto: na místo terapeutické rentgenky byla použita 80 kV. A místo fantomových přípravků byly proměřeny materiály, které se používají na stavbu rentgenu.

10. ZÁVĚR

Úvodní část této bakalářské práce se soustředila na vznik rentgenového záření. V další části byly popsány účinky ionizujícího záření a princip poškození buněk. Dále bylo shrnuto, že i když je RTG záření škodlivé, dají se tyto negativní účinky použít k léčbě některých onemocnění. Analgetický a anti-proliferační účinek je jasně prokazatelný. Při této léčbě ale vystavujeme pacienta škodlivému rentgenovému záření. Zvyšujeme tedy radiační zátěž pacienta a tím zvyšujeme riziko vzniku nádoru. Používá se tedy až jako poslední alternativa. Léčba pomocí RTG je tedy hlavně pro pacienty, kteří už jsou pokročilejšího věku, nebo se využívá jako paliativní léčba. Zvýšené riziko vzniku rakoviny v odstupu několika let je v tomto případě zanedbatelné. Pacienta zbavíme trápení a zlepšíme mu životaschopnost od onemocnění, které mu škodí více než ono RTG záření.

V závěru této práce byl pomocí Geiger-Müllerova čítače proměřen pokles RTG záření po průchodu materiálu, které se používají na stavbu rentgenů. Tímto způsobem byly proměřeny charakteristiky, které se běžně vyhodnocují při výrobě rentgenů, při přejímacích zkouškách nebo v rámci samotného provozu zařízení. Z měření vyplývá, že 2 mm olova účinně odstíní 80kV rentgenové záření.

Přínosem této práce je také návrh převozného RTG ozařovacího pracoviště, jehož hlavní použití může být v domech pro seniory nebo v oblastech, kde vzdálenost k nejbližšímu RTG pracovišti je příliš velká. Byl navržen základní koncept pracoviště, včetně některých hlavních komponent. Tento návrh je pak v kapitole 8 srovnán s rentgenovým pracovištěm v Masarykově onkologickém ústavu, který se nenádorovému ozařování věnuje již několik let. Díky spolupráci s tímto pracovištěm jsem získal cenné zkušenosti a poznatky týkající se použití kolimátorů a filtrů, lepšího stínění pacienta, využití kamerového systému pro pozorování pacientů, principech kalibrace RTG systémů, plánování ozařování artrózy kolene a mnoho dalšího.

Literatura

- [1] Jaroslav Reichl, Rentgenové záření [online]. 2018 [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/540-rentgenove-zareni>
- [2] Lucie Súpupová. Rentgenka – její stavba a funkce [online]. 2018 [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/rentgenka-a-produkce-rentgenoveho-zareni/>
- [3] Lucie Súpupová, 2013, Produkce rentgenového záření – charakteristické záření [online]. 2018 [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/produkce-rentgenoveho-zareni-charakteristicke-zareni/>
- [4] Lucie Súpupová, 2013, Produkce rentgenového záření – brzdné záření [online]. 2018 [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/produkce-rentgenoveho-zareni-brzdne-zareni/>
- [5] Súpupová Lucie, 2013, Rentgenové spektrum [online]. 2018 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/rentgenove-spektrum-kvalitativne-a-quantitativne/>
- [6] Ullmann Vojtěch, Aplikace ionizujícího záření [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadMetody.htm>
- [7] Halaška Jiří, *MECHANIZMY NA FYZIKÁLNÍ ÚROVNI* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/2-kapitola/21.html>
- [8] Halaška Jiří, *MECHANIZMY NA CHEMICKÉ ÚROVNI* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/2-kapitola/22.html>
- [9] Halaška Jiří, *POŠKOZENÍ DNA* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/2-kapitola/23/231.html>
- [10] Halaška Jiří, *ROZPOZNÁNÍ A SIGNALIZACE POŠKOZENÍ* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/2-kapitola/23/232.html>
- [11] *Stručný přehled biologických účinků záření* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologickyh-ucinku-zareni/>
- [12] Lucie Súpupová, 2013, Akutní nemoc z ozáření [online]. 2018 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologickyh-ucinku-zareni/>

- [13] Acute Radiation Syndrome: A Fact Sheet for Clinicians: 23. 8. 2017 [online]. 1600 Clifton Road Atlanta, USA [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://emergency.cdc.gov/radiation/arsphysicianfactsheet.asp>
- [14] ROZMAN, Jiří, *Elektronické přístroje v lékařství*. Praha: Česká matice technická (Academia) 2006. ISBN 80-200-1308-3
- [15] M. H. Seegenschmiedt, H.-B. Makoski, K.-R. Trott, L. W. Brady: *Radiotherapy for non-malignant disorders*. Springer, Berlin 2008 ISBN 978-3-540-62550-6
- [16] M H Seegenschmiedt, O Micke, R Muecke: 2015. Radiotherapy for non-malignant disorders: state of the art and update of the evidence-based practice guidelines [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4628533/#b5>
- [17] Jiří HALAŠKA. ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ VYUŽÍVANÉ VE ZDRAVOTNICTVÍ [online]. 04. 2000 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/4-kapitola/43/431.html#betatron>
- [18] GRUPEN, Claus. Tumour Therapy with Particle Beams. Comparison of depth-dose curves [online]. Universität Siegen, 04. 2000 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/2165074_Tumour_Therapy_with_Particle_Beams
- [19] NENÁDOROVÁ TERAPIE - TERAPEUTICKÝ RENTGENOVÝ OZAŘOVAČ GULMAY: [online]. 2018 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://www.ftn.cz/nenadorova-terapie-terapeuticky-rentgenovy-ozarovac-gulmay-352/>
- [20] Halaška Jiří, *RADIOPROTEKTIVA S KRÁTKODOBÝM ÚČINKEM* [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/10-kapitola/104/1041.html>
- [21] Lucie Súpupová, 2013, *Ochranné prostředky před zářením* [online]. 2018 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/ochranne-prostredky-pred-zarenim/>
- [22] Lucie Súpupová, 2013, *Správný výběr ochranného stínění* [online]. 2018 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/spravny-vyber-ochranneho-stineni-1/>
- [23] Unipolar and Bipolar Industrial X-Ray Tubes: 2018 [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://www.comet-xray.com/products/x-ray-tubes>
- [24] MXR-226, 2014 [online]. COMET AG, Herrengasse 10 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: https://www.comet-xray.com/CometXRay/media/Content/MXR-226_EN.pdf

- [25] Your Complete X-Ray Source, 2018 [online]. [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: https://www.comet-xray.com/products/x-ray-tubes/tubes/mxr-225-22?selected=15910-16779_15912-0_15914-0_15916-0
- [26] XRS Modules & Generators [online]. [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.comet-xray.com/getmedia/32223a43-db59-4e2a-aa3c-33b511f903b9/XRS-Modules-Generators.aspx>
- [27] MXR-320/26, 2014 [online]. COMET AG, Herrengasse 10 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: https://www.comet-xray.com/CometXRay/media/Content/MXR-320_26_EN.pdf
- [28] OLOVĚNÉ DVEŘE: 2014 [online]. [cit. 2019-1-2]. Dostupné z: <https://www.dvereprofi.cz/olovene-dvere/>
- [29] Lucie Suchopárová: 2018. Jak se vyrábí přepravní kontejnery? [online]. [cit. 2019-1-2]. Dostupné z: <https://www.elogistika.info/jak-se-vyrabi-prepravni-kontejnery/>
- [30] John Pike: 2011. Military containers [online]. [cit. 2019-1-2]. Dostupné z: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/container.htm>
- [31] Xstrahl: 2019. Xstrahl 200 [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://xstrahl.com/medical/xstrahl-200/>
- [32] SROBF: 1. 9. 2018 Seznam pracovišť a vybavení [online]. 12026 Praha 2, [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.srobf.cz/cs/pro-odborniky/radiacni-onkologie-v-cr/seznam-pracovist-a-vybaveni>
- [33] Státní úřad pro jadernou bezpečnost: Používání rentgenů - lékařské ozáření [online]. Praha 1 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/zajimavosti-z-praxe-radiacni-ochrany/pouzivani-rentgenu-lekarske-ozareni/>
- [34] DOCPLAYER: 2019. Stanovení dávky pacienta při nenádorové radioterapii v ČR [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/45617961-Stanoveni-davky-pacienta-pri-nenadorove-radioterapii-v-cr.html>
- [35] Data převzaté od Masarykova onkologického ústavu
- [36] Vlastní zpracování

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Gy	-	Gray
HO	-	Heterotropická osifikace
IZ	-	ionizující záření
RTG	-	Rentgen
SÚJB	-	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
Sv	-	Sievert
VN	-	vysokonapěťový tank
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně