



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Odhad průměrných dávek obyvatelstva ČR z lékařských zdrojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: **OCHRANA OBYVATELSTVA**

Autor: Bc. Aneta Šípová

Vedoucí práce: prof. Dr. rer. nat. Friedo Zölzer

České Budějovice 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem *Odhad průměrných dávek obyvatelstva ČR z lékařských zdrojů* jsem vypracoval(a) samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to – v nezkrácené podobě – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných fakultou – elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 9.5. 2023

.....

(Bc. Aneta Šípová)

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce prof. Dr. rer. nat. Friedo Zölzerovi za odborné vedení, poskytnuté informace, cenné rady, které mi poskytl k zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat své rodině za podporu a trpělivost, kterou mi projevila během celého magisterského studia.

Odhad průměrných dávek obyvatelstva ČR z lékařských zdrojů

Abstrakt

Záměrem mé diplomové práce bylo odhadnout efektivní dávky z různých vyšetření v oblasti nukleární medicíny a radiodiagnostiky a zjistit, jaké jsou počty těchto vyšetření v České republice. V teoretické části jsem pracovala s odbornou literaturou, platnými právními předpisy a internetovými odkazy.

Diplomová práce na téma „Odhad průměrných dávek obyvatelstva ČR z lékařských zdrojů“ je rozdělena na dvě části.

Úvodní část teoretické práce je věnována důležitosti lékařského ozáření v rámci radiologických metod a lehkému popisu celé práce. V další části práce jsou shrnuty informace o ionizujícím záření – o jeho historii, druzích, zdrojích, interakcích s prostředím a biologických účincích na organismus. V další části práce, která je věnována radiační ochraně, je uvedena základní česká legislativa, která se vztahuje k danému tématu. Dále jsou v této práci v rámci radiační ochrany uvedeny její cíle, koncepce, principy, metody ochrany před zářením, radiační monitorování a základní sledované veličiny, které jsou důležité z hlediska radiační ochrany. V poslední části teoretické práce je uvedeno lékařské ozáření a možnosti využití tohoto záření v lékařství.

V práci byly stanoveny tři cíle.

Prvním cílem bylo odhadnout průměrné efektivní dávky u různých vyšetření v nukleární medicíně a radiodiagnostice. U zvolených vyšetření byla vypočítána průměrná efektivní dávka u pacientů, kteří zvolené vyšetření podstoupili v lednu roku 2022. V rámci nukleární medicíny se jednalo o scintigrafii skeletu (96 pacientů), perfuzní scintigrafii myokardu (51 pacientů), perfuzní a ventilační scintigrafii plic (166 pacientů) a dynamickou scintigrafii ledvin (12 pacientů). Výsledky u těchto vyšetření byly porovnány s údaji uvedenými v UNSCEAR Report 2020/2021. V rámci radiodiagnostiky se jednalo o CT mozku nativně (226 pacientů), CT břicha nativně (91 pacientů), CT hrudníku nativně (33 pacientů) a CT bederní páteře nativně (46 pacientů).

Výsledky u těchto vyšetření byly porovnány s údaji uvedenými v UNSCEAR Report 2020/2021 a výsledky uvedené v dokumentu „Hodnocení lékařského ozáření“ vydané SÚJB v roce 2021.

Druhým cílem bylo zjistit, jaké jsou počty výše zmíněných vyšetření v České republice a odhadnout roční efektivní dávky českého obyvatelstva z lékařských zdrojů. K tomuto účelu mi byla poskytnuta data od ÚZIS (Ústav zdravotnických informací a statistiky).

V rámci tohoto cíle byly odhadnuty kolektivní efektivní dávky.

Třetím cílem bylo odhadnout relativní pravděpodobnost vzniku stochastických účinků (rakoviny). K tomuto účelu byl použit program X-ray risk.

Klíčová slova

Ionizující záření, zdroje záření, nežádoucí účinky záření, nukleární medicína, radiodiagnostika, CT vyšetření, radiační ochrana, efektivní dávka, ekvivalentní dávka, průměrná dávka, medicínské vyšetření.

Estimation of average doses of the population of the Czech Republic from medical sources

Abstract

The intention of my diploma thesis was estimate the effective doses from different examinations in the area of the nuclear medicine and radiodiagnosis and find out what numbers are of the examinations in the Czech republic. In the theoretical part I worked with the professional literature, the applicable legal regulations and the internet links. The diploma thesis on the topic „Estimation of average doses of the population of the Czech republic from medical sources“ is partition to the two parts.

The introductory part of the theoretical work is dedicated to the importance of medical radiation within radiological methods and to the brief description the whole thesis. In the other part of the thesis are summarized the informations about the ionizing radiation – about his history, species, sources, interactions with the environment and biological effects on the organism. In the other part of the thesis which is devoted to radiation protection is listed the basic czech legislation which relates on the given topic. Further are in this thesis within the radiation protection listed her objectives, conception, principles, radiation protection methods, radiation monitoring and basic monitored quantities which are important in terms of the radiation protection. In the last part of the theoretical thesis is listed the medical radiation and his possibilities of use in the medical.

In this thesis were to established three objectives.

The first objective was to estimate the average effective doses in various examinations in the nuclear medicine and the radiodiagnosis. For selected examinations was calculated the average effective dose for patients who underwent the selected examination in January 2022. In the framework of nuclear medicine, it was an skeletal scintigraphy (96 patients), myocardial perfusion scintigraphy (51 patients), perfusion and ventilation lung scintigraphy (166 patients) and dynamic renal scintigraphy (12 patients). The results of these examinations were compared with data listed in UNSCEAR Report 2020/2021. In the framework of the radiodiagnosis, it was an CT

brain natively (226 patients), abdominal CT natively (91 patients), CT chest native (33 patients) and CT of the lumbar spine natively (46 patients). The results of these examinations were compared with data listed in UNSCEAR Report 2020/2021 and the results listed in the document „Medical radiation assessment“ released by the SÚJB in the year 2021.

The second objective was to find out how are numbers of examinations mentioned above in Czech republic. For this purpose I was provided with data from ÚZIS. Within this objective were estimated the collective effective doses.

The third objective was estimated the relative probability of emergence of stochastic effects (the cancer). For this purpose was used the program named X-ray risk.

Key words

Ionizing radiation, radiation sources, radiation side effects, nuclear medicine, radiodiagnostics, CT scan, radiation protection, effective dose, equivalent dose, average dose, medical examination.

Obsah

1	Teoretická část	18
1.1	Ionizující záření.....	18
1.1.1	Historie.....	18
1.1.2	Druhy ionizujícího záření	18
1.1.2.1	Záření alfa.....	19
1.1.2.2	Záření beta	20
1.1.2.3	Záření gama	21
1.1.2.4	Neutronové záření	21
1.1.3	Zdroje ionizujícího záření	22
1.1.3.1	Přírodní zdroje	22
1.1.3.2	Umělé zdroje	25
1.1.4	Interakce ionizujícího záření s prostředím.....	27
1.1.5	Interakce nepřímo ionizujícího záření	27
1.1.6	Biologické účinky ionizujícího záření	29
1.1.6.1	Účinky záření na buňku a tkáň	29
1.1.6.2	Účinky záření na lidský organismus.....	30
1.1.6.3	Epidemiologie.....	38
1.2	Radiační ochrana.....	40
1.2.1	Základní česká legislativa.....	40
1.2.2	Cíle radiační ochrany	43
1.2.3	Koncepce radiační ochrany.....	43

1.2.4	Principy radiační ochrany	44
1.2.4.1	Princip zdůvodnění	44
1.2.4.2	Princip optimalizace	44
1.2.4.3	Princip limitování	46
1.2.4.4	Princip zajištění bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření	49
1.2.5	Metody ochrany před ionizujícím zářením	49
1.2.5.1	Ochrana před vnějším ozářením	49
1.2.5.2	Ochrana před vnitřním ozářením	51
1.2.6	Radiační monitorování	52
1.2.6.1	Monitorování pracoviště	52
1.2.6.2	Monitorování výpustí	53
1.2.6.3	Monitorování okolí	53
1.2.6.4	Osobní monitorování	54
1.2.7	Základní sledované veličiny při radiačním monitorování	57
1.2.7.1	Absorbovaná dávka (D)	57
1.2.7.2	Ekvivalentní dávka (H_T)	58
1.2.7.3	Efektivní dávka (E)	58
1.2.7.4	Dávkový ekvivalent (H)	59
1.3	Lékařské ozáření	60
1.3.1	Nukleární medicína	60
1.3.1.1	Základní nejčastější vyšetření v nukleární medicíně	61
1.3.2	Radiodiagnostika	64

1.3.2.1	Ultrazvuk	64
1.3.2.2	Rentgenové vyšetření	65
1.3.2.3	Skiografie.....	66
1.3.2.4	Skioskopie.....	66
1.3.2.5	Výpočetní tomografie (CT)	66
1.3.2.6	Magnetická rezonance	67
1.3.2.7	Intervenční radiologie.....	68
1.3.3	Radioterapie	69
2	Praktická část	70
2.1	Cíle práce	70
2.2	Výzkumné otázky.....	70
2.3	Metodika výzkumu.....	70
2.4	Metodika odhadu efektivních dávek	72
2.5	Metodika odhadu pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků.....	75
2.6	Výsledky	78
2.6.1	Scintigrafie skeletu	78
2.6.2	Perfuzní scintigrafie myokardu.....	81
2.6.3	Perfuzně-ventilační scintigrafie plic	84
2.6.4	Dynamická scintigrafie ledvin	87
2.7	Radiodiagnostika.....	90
2.7.1	CT mozku nativně.....	90
2.7.2	CT břicha nativně.....	93

2.7.3	CT hrudníku nativně	96
2.7.4	CT LS páteře nativně	99
2.8	Výsledky 2	102
2.8.1	Scintigrafie skeletu	102
2.8.2	Perfuzní scintigrafie myokardu.....	104
2.8.3	Dynamická scintigrafie ledvin	106
2.8.4	Perfuzní a ventilační scintigrafie plic	108
2.8.5	CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní	111
2.8.6	CT vyšetření bez použití kontrastní látky do 30 skenů.....	113
2.8.7	CT vyšetření s větším počtem skenů (nad 30), bez použití KL	115
2.9	Výsledky 3	118
2.9.1	Nukleární medicína.....	118
2.9.2	Radiodiagnostika	119
3	Diskuze	121
4	Závěr	129
5	Zdroje.....	131
6	Seznam grafů	138
7	Seznam obrázků.....	140
8	Seznam tabulek.....	141

Seznam použitých zkratek

- °C – stupeň Celsia
- ^{209}Bi – izotop bismutu
- ^{214}Bi – izotop bismutu
- ^{214}Pb – izotop olova
- ^{218}Po – izotop polonia
- ^{226}Ra – radium
- ^{232}Th – thorium
- ^{235}U – izotop uranu
- ^{238}U – uran
- ^{40}K – izotop draslíku
- $^4\text{He}_2$ – helium
- Aj. – a jiné
- ALARA – As Low As Reasonably Achievable
- Angl. – anglicky
- ANO – akutní nemoc z ozáření
- Apod. – a podobně
- Atd. – a tak dále
- B_{12} – kobalamin
- BeO – oxid berylnatý
- $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ – průměrná koncentrace
- CaF_2 – fluorid vápenatý
- cm – centimetr
- CNS – centrálně nervový systém
- CT – výpočetní tomografie
- č. – číslo
- ČR – Česká republika
- D – absorbovaná dávka
- d – hloubka
- DLP – Dose Length Parameter

DNA – deoxyribonukleová kyselina
E – efektivní dávka
 e^+ - pozitron
EANM – Evropská asociace nukleární medicíny
 E_{DLP} – normalizované hodnoty DLP
ERPF – Effective renal plasma flow
EU – Evropská unie
eV – elektronvolt
GF – glomerulární filtrace
GIT – gastrointestinální systém
GM – Geiger-Müllerův
Gy – gray
H – dávkový ekvivalent
H – vodík
HRCT – High resolution Computed Tomography
 H_T – ekvivalentní dávka
Hz – hertz
ICRP – International Commission on Radiological Protection
 $J.kg^{-1}$ – joule na kilogram
keV – kiloelektronvolt
kg – kilogram
kHz – kilohertz
 km^2 – kilometr čtverečný
LD – letální dávka
LiF – fluorid lithný
LS – lumbosakrální
 m_0 – klidová hmotnost
max. – maximum
MBq – megabecquerel
MeV – megaelektronvolt

mGy – miligray
mm – milimetr
MR – magnetická rezonance
mSv – milisievert
MZČR – Ministerstvo zdravotnictví České republiky
 n^0 – neutron
Např. – například
NDRÚ – Národní diagnostická referenční úroveň
nm – nanometr
Obr. – obrázek
OH – hydroxid
 p^+ - proton
PET/CT – pozitronová emisní tomografie + výpočetní tomografie
PET/MR – pozitronová emisní tomografie – magnetická rezonance
pm – pikometr
Popř. – popřípadě
Resp. – respektive
RL – radioaktivní látka
RNA – ribonukleová kyselina
RO – radiační ochrana
RTG – rentgenový
s – sekunda
Sb. – sbírka zákonů
Si – křemík
SPECT – Single Photon Emission Computed Tomography
SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRO – Státní ústav radiační ochrany
Sv – Sievert
t – čas
TAČR – Technologická agentura České republiky

Tj. – to je

TL – termoluminiscenční

Tzn. – to znamená

Tzv. – takzvaný

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

USA – United States of America

ÚZIS – Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR

VZP – Všeobecná zdravotní pojišťovna

Úvod

Diplomová práce s názvem „Odhad průměrných dávek obyvatelstva ČR z lékařských zdrojů“ se zabývá sledováním dávek obyvatelstva z lékařského ozáření a obecným popisem ionizujícího záření, jeho účinků a radiační ochrany. Práce je zpracována ve formě teoreticko – praktické.

V současné době je lékařské ozáření v rámci radiologických metod velmi důležité k diagnostice a léčbě různých onemocnění. Díky prudkému rozvoji máme stále novější a modernější možnosti lékařského ozáření. Je ale nutné k němu přistupovat s určitými rezervami, protože lékařské ozáření je spojeno s určitými expozicemi, což znamená pro pacienta určité riziko. I když přímý důkaz zdravotních rizik zatím existuje jen pro efektivní dávky nad cca 50 mSv, předpokládá se, že riziko může extrapolovat do malých dávek pomocí bezprahového lineárního modelu, tak že i dávky menších lékařských vyšetření nosí určité riziko. Tato diplomová práce pojednává o lékařském ozáření na oddělení nukleární medicíny a oddělení radiodiagnostiky.

Teoretická část diplomové práce se zaměřuje na ionizující záření, jeho historii, druhy, zdroje, interakce s hmotou a biologické účinky. Dále se zaměřuje na radiační ochranu, zejména na základní legislativu, cíle, koncepci, principy, metody ochrany před ionizujícím zářením, radiační monitorování a veličiny. Poslední částí teoretické části je zmíněno lékařské ozáření a krátce popsána nukleární medicína, radiodiagnostika a radioterapie.

Praktická část této práce se zaměřuje na výpočet efektivních dávek u zvolených vyšetření z oblasti nukleární medicíny a z oblasti radiodiagnostiky (CT vyšetření). Z oblasti nukleární medicíny jsou zvoleny čtyři vyšetření, u kterých se vypočítá průměrná aplikovaná aktivita a ta se porovnává s údaji v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a s NDRÚ. Dále se vypočítá průměrná efektivní dávka a ta se poté porovnává také s údaji uvedenými v Reportu UNSCEAR 2020/2021. Z oblasti radiodiagnostiky jsou zvolena čtyři CT vyšetření, u kterých se vypočítá průměrná hodnota DLP a průměrná efektivní dávka, která se porovnává s údaji uvedenými v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a s údaji uvedenými v dokumentu „*Hodnocení lékařského ozáření*“ zpracované Státním úřadem pro jadernou bezpečnost v roce 2021.

Dále se v praktické části zjišťuje, jaké jsou roční počty zvolených vyšetření v České republice a odhadují se roční efektivní dávky českého obyvatelstva. Pro tuto část jsou využity údaje od ÚZIS a jsou zvoleny roky 2018 a 2021.

V poslední části praktické části je odhadována pravděpodobnost vzniku stochastických účinků (rakoviny) po ozáření. Výsledky tohoto šetření jsou pouze odhadem a nelze je brát závazně.

Celkovým cílem této práce je přinést čtenářům informace o ionizujícím záření a o jeho využití v medicíně a zároveň ukázat, jaké efektivní dávky lze z daných vyšetření obdržet.

1 Teoretická část

1.1 Ionizující záření

1.1.1 Historie

Roku 1895 objevil Wilhelm Conrad Roentgen nový typ záření, které nazval paprsky X a které mohlo být využito k pohledu do lidského těla. Tento objev byl předzvěstí využití tohoto záření v lékařství, které se od té doby široce a rychle rozšiřovalo. Roentgenovi byla roku 1901 udělena Nobelova cena za fyziku. Jeden rok po Roentgenovu objevu položil náhodně francouzský vědec Henri Becquerel několik fotografických desek do zásuvky, kde byly úlomky minerálu obsahujícího uran. Když je poté vyvolal, zjistil, že byly vystaveny ozáření. Tento objev byl potom pojmenován radioaktivitou, která se projevuje tím, že energie se z určitých atomů uvolňuje spontánně při jejím rozpadu. Radioaktivita je dnes měřena v jednotkách, které nazýváme becquerely (Bq). Brzy poté mladá chemička Marie Curie-Sklodowska pokračovala ve výzkumech. Roku 1898 ona a její manžel Pierre Curie objevili, že vydávání záření uranem je spojené s jeho přeměnou v jiné prvky, z nichž jeden nazvali polonium po rodné zemi manželky a jiný nazvali radium, tedy „zářící“ prvek. Marie Curie roku 1903 obdržela spolu s Pierrem Curiem a Henri Becquerelem Nobelovu cenu v oboru fyziky. (UNEP, 2016)

1.1.2 Druhy ionizujícího záření

V různých zdrojích je definice ionizujícího záření trochu jinak popsána, v závěru ale všechny zdroje uvádí jednu stejnou důležitou informaci – ionizující záření je takové záření, jehož kvanta mají tak vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím vyvolávat ionizace, při nichž vznikají ionty. (Rosina, Kolářová a Staněk, 2006)

Pro účely zákona č. 263/2016 Sb. (atomový zákon) je „ionizujícím zářením přenos energie v podobě částic nebo elektromagnetických vln vlnové délky nižší nebo rovnající se 100 nm s frekvencí vyšší nebo rovnající se 3×10^{15} Hz, který je schopen vytvářet ionty“. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Pro základní druhy ionizujícího záření, jako je např. fotonové, elektronové nebo záření alfa, se za energetickou hranici ionizujícího záření uvádí energie 5 keV.

Rozlišuje se záření přímo ionizující (elektrony, protony, deuterony, částice alfa, těžké ionty) a nepřímo ionizující (záření rentgenové a gama, neutrony). (Hušák, 2009).

Záření přímo ionizující je ionizující záření, jehož kvanta mají elektrický náboj, a proto přímo vyrážejí nebo vytrhávají Coulombickými elektrickými silami elektrony z atomů. Záření nepřímo ionizující je takové záření, jehož kvanta nejsou elektricky nabitá, svou kinetickou energii předávají v látce nejprve nabitým částicím (většinou elektronům, někdy protonům nebo atomovým jádrům) a ty teprve svými přímými účinky na atomy látku ionizují. (Ullmann, 2002)

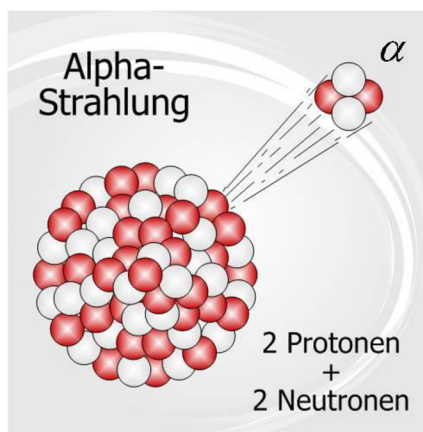
Jak bylo zmíněno, ionizující záření je buď charakteru částicového (korpuskulárního) nebo elektromagnetického.

Záření vlnové, kdy $m_0 = 0$, je takové záření, jehož kvanta nemají klidovou hmotnost, jsou to kvanta vlnění, která se pohybují rychlostí světla (pokud je zabrzdíme, odevzdají veškerou svoji energii a zaniknou). V jaderné fyzice do této skupiny řadíme pouze elektromagnetické záření, jehož kvanta jsou fotony. Záření korpuskulární, kdy $m_0 > 0$, je takové záření, jehož kvanta mají nenulovou klidovou hmotnost, jde o proud hmotných částic, které se pohybují rychlostí menší než rychlost světla a které si zachovávají svou existenci i po zastavení pohybu. Řadíme sem záření alfa, beta, protonové záření, proud deuteronů a těžších jader, neutronové záření, neutrinové záření a řada dalších druhů záření vznikajícího při vysokoenergetických srážkách elementárních částic. (Ullmann, 2002)

1.1.2.1 Záření alfa

Záření alfa je proud rychle letících héliových jader ${}^4\text{He}_2$ ($2 p^+$, $2 n^0$) a vyznačuje se tím, že ze všech běžných kvant záření mají alfa částice největší hmotnost, a hlavně také největší elektrický náboj. Při radioaktivní přeměně alfa vylétá z radionuklidu částice alfa a uvolňuje se energie. Záření alfa je pohlcováno již listem papíru a ve vzduchu se pohltí na dráze asi 4 cm. Dolet je velmi malý, při energii řádu jednotek MeV je dolet cca 0,1 mm v látkách hustoty vody. Před zářením alfa se lze snadno chránit. Zářič alfa může být nebezpečný při vdechnutí či požití, kdy bude působit uvnitř organismu. Záření

alfa se vychyluje jednak v poli elektrickém, tak i v poli magnetickém. Částice alfa letí velkou rychlostí, mají kinetickou energii v rozmezí $<2, 8>$ MeV a silné ionizační účinky. (Ullmann, 2002; Reichl a Všeticka, 2006)



Obrázek 1 Schéma záření alfa

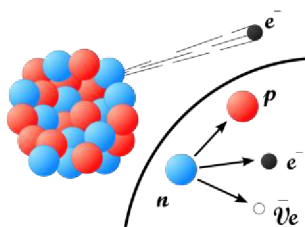
Zdroj: wikiskripta.eu

1.1.2.2 Záření beta

Záření beta je tvořeno velmi rychlými elektrony, které vyletují z jader radionuklidů. Původní prvek se v častějším případě přemění v prvek s protonovým číslem o 1 větší. Podrobnější studium radioaktivního záření ale objasnilo, že záření beta je dvojího druhu. U některých radionuklidů (uměle vytvořených), se při radioaktivních přeměnách uvolňují z jádra kladné elektrony e^+ , které nazýváme pozitrony. Radionuklid se přemění v nuklid prvku s protonovým číslem o 1 menší. Rozlišujeme tedy záření β^- (pokud se z jádra uvolňují elektrony) a záření β^+ (pokud se z jádra uvolňují pozitrony). (Šidlíková) Záření β^- vzniká rozpadem neutronu. Záření β^+ je tvořeno kladně nabitými pozitrony (antičástice elektronu), které vznikají v jádru rozpadem protonu a vzájemně se ovlivňují s atomovým obalem. Atomy, se kterými dojde ke srážce s částicí beta, jsou při této interakci excitovány nebo ionizovány. Záření beta má ale menší zpomalovací schopnost než záření alfa, a proto je dráha, na níž částice beta ztratí svoji energii, ve srovnání s částicemi alfa, delší. (Reichl a Všeticka, 2006)

K odstínění záření β^- postačí lehké materiály (jako je plexisklo nebo hliník) tloušťky cca 5-10 mm. Pro tvrdší záření beta pak nejlépe v kombinaci s následnou tenkou vrstvou olova k odstínění brzděného elektromagnetického záření, které vzniká zabrzděním

elektronů β ve stínícím materiálu. Olovo samotné není optimálním stínícím materiálem pro energetické záření beta, protože v něm vzniká tvrdé a intenzivní brzdné záření, k jehož odstínění se musí použít zbytečně silná vrstva olova. (Ullmann, 2002)



Obrázek 2 záření beta

Zdroj: Atomová, jaderná a kvantová fyzika, publi.cz

1.1.2.3 Záření gama

Záření gama je tvořeno proudem fotonů. Jedná se o elektromagnetické záření, které má velmi krátké vlnové délky (méně než 300 pm). Toto záření se obvykle nevyskytuje samo, často ho doprovází záření alfa nebo beta. Samotné gama záření pouze snižuje energii jádra, nemá vliv na jeho složení. S látkou interaguje vždy celý foton (může být pohlcen nebo rozptýlen). Gama záření nemá náboj, proto se nevychyluje v magnetickém ani elektrickém poli. Je velmi pronikavé, ve vzduchu uletí stovky metrů, ve vodě několik desítek centimetrů a v kovech několik centimetrů. (Morbacherová)

Pro záření gama jsou nejúčinnějšími stínícími materiály látky, které mají velkou měrnou hmotnost (hustotu) a protonové číslo. Jde především o olovo a wolfram. Používají se olověné kontejnery pro přepravu a skladování zářičů, zástěny z olověného plechu, tvarované olověné cihly apod. (Ullmann, 2002)

1.1.2.4 Neutronové záření

Neutronové záření je tvořeno proudem neutronů a neutrony nemají náboj. Neutrony se brzdí pouze vzájemnými srážkami s protony nebo lehkými atomy. Neutronové záření je velmi pronikavé, nenese elektrický náboj a není u něj možná ztráta energie přímou ionizací atomů. Vzájemné působení s elektronovými obaly atomů je tedy minimální,

reaguje pouze s atomovými jádry. Pro člověka je nebezpečné. (Morbacherová; Reichl a Všetická, 2006)

V současné době je významné neutronové záření, které nevzniká u přírodních radionuklidů nebo umělých radionuklidů, ale lze jej vyvolat uměle v jaderných reaktorech nebo při jaderné explozi. K ochraně před neutrony je třeba zvolit materiály obsahující vodík a jádra lehkých prvků – voda, parafin, beton apod. Takové materiály totiž neutrony dobře pohlcují. (Reichl a Všetická, 2006)

1.1.3 Zdroje ionizujícího záření

Zdroje ionizujícího záření dělíme na zdroje přírodní a na zdroje umělé.

1.1.3.1 Přírodní zdroje

Přírodní ozáření je způsobeno dvěma různými přírodními zdroji záření. Kosmické záření dopadá na Zemi z vesmíru a ozařuje člověka zejména externě v závislosti na nadmořské výšce a poloze na Zemi. Tu část záření, dopadající na zemskou atmosféru, nazýváme primární složku kosmického záření. Primární záření se skládá zejména z protonů (86 %), částic alfa (11 %) a elektronů (2 %), zbytek tvoří těžká jádra (1 %). Primární záření interaguje s vyšší atmosférou, a tak vzniká sekundární záření.

„Průměrná roční efektivní dávka obyvatele České republiky pouze od kosmického záření se odhaduje na 0,3 mSv“. (Hušák, 2009)

Přírodní radionuklidy, které se vyskytují v našem životním prostředí, se rozdělují do tří skupin. První skupinu tvoří kosmogenní radionuklidy, které vznikají průběžně jadernými reakcemi při interakci kosmického záření se stabilními prvky zejména ve vnějším obalu Země. Druhou skupinu tvoří původní primordiální radionuklidy, které vznikly v raných stádiích vesmíru a díky velmi dlouhému poločasu přeměny se stále vyskytují na Zemi v zásadním množství (např. ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K). Třetí skupinu tvoří radionuklidy, které se vytváří sekundárně z původních radionuklidů, které vytváří přeměnové řady. V uran-radiové řadě začínající ^{238}U je nejvýznamnější ^{226}Ra . Ze čtyř možných přeměnových řad uran-radiové, thoriové, aktiniové a neptuniové se v přírodě vyskytují pouze první tři, protože poločasy rozpadu u nuklidů čtvrtého řadu (kromě předposledního ^{209}Bi) jsou velmi krátké.

Vnější expozice člověka je zapříčiněna zejména terestriálními radionuklidy, které emitují záření gama a nachází se ve svrchních vrstvách půdy a hornin. Tyto radionuklidy pozemského původu se v různých koncentracích nacházejí ve všech látkách na Zemi. Vnější expozice lidského těla je vyvolána zejména gama zářením radionuklidů z thoriové a uran-radiové rozpadové řady a ^{40}K . Tyto radionuklidy se mohou nacházet i ve stavebních materiálech. Průměrná roční dávka z vnějšího záření v půdě a ve stavebních materiálech je v České republice kolem 0,4 mSv.

Další možností ozáření člověka je vnitřní ozáření. Jedná se o případ, kdy je živý organismus ozářen ionizujícím zářením, které je vysíláno radionuklidy přítomnými v organismu. Může tedy jít o vnitřní kontaminaci, která vznikla po příjmu umělých nebo přírodních radionuklidů. Radionuklidy se mohou dostat do těla více cestami – ingescí (ústy do zažívacího traktu), inhalací (vdechnutím ve formě aerosolu, páry, plynu), poraněnou kůží nebo absorpcí přes kůži neporaněnou. (SÚJB, 2005)

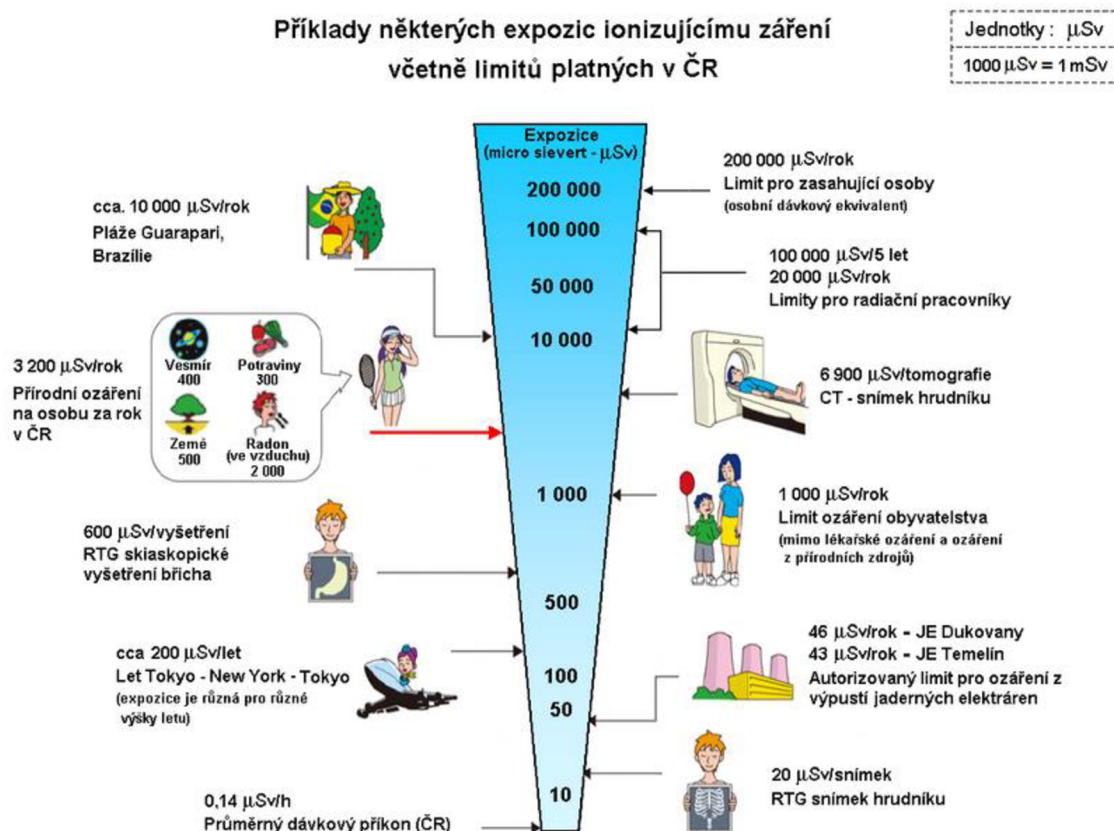
Výše uvedené radionuklidy z thoriové a uran-radiové rozpadové řady a ^{40}K se také přirozeně nachází v lidském těle a ozařují vnitřní orgány. Jsou přijímány potravou a vodou. Uvolnění terestriálních radionuklidů do vod je způsobeno na základě složitých fyzikálních, geochemických a hydrologických vztahů mezi horninou a vodou. (Klener, 2000; Zákon č. 263/2016 Sb.)

Průměrná roční dávka z ingescí včetně vody je kolem 0,3 mSv.

Důležitou součástí ozáření z přírodních zdrojů je radon a jeho rozpadové řady. Radon se přirozeně nachází v životním prostředí a může se podílet až na 50 % celkové radiační zátěže z přírodních zdrojů. Ve volné atmosféře je koncentrace radonu obvykle okolo 5-10 Bq.m⁻³. Průměrná koncentrace radonu v budovách se ale pohybuje kolem 56 Bq.m⁻³. Radon je plynný radioaktivní produkt rozpadu izotopu radia. Příčinou zdravotních problémů není však vdechování radonu, ale vdechování jeho rozpadových produktů. Mezi tyto produkty řadíme zejména ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi nebo ^{214}Po . (IAEA, 1996)

Ozáření z přírodních zdrojů způsobuje největší část celkového ozáření obyvatel. Jeho regulace je velmi obtížná, a často prostě nemožná. Přírodní ozáření je nerovnoměrné – některé skupiny osob na Zemi jsou ozářeny dávkami, které jeden až dva řády mohou převýšit světový průměr a ve výjimečných případech se mohou ocitnout na samé hranici

dávek pro deterministické účinky záření. Průměr ozáření podle jednotlivých zdrojů záření ukazuje následující obrázek. (Hušák, 2009; SÚJB)



Obrázek 3 Průměrné expozice obyvatel podle zdrojů záření

Zdroj: SÚJB

Průměrná roční efektivní dávka z přírodního ozáření (kosmického záření a přírodních radionuklidů) je u každého obyvatele České republiky přibližně 3,5 mSv (nejvíce přispívá k této hodnotě inhalace radonu a jeho dceřiných produktů). Průměr efektivní dávky z přírodního ozáření ve světě činí 2,4 mSv. V řadě evropských zemí je efektivní dávka z přírodního ozáření vyšší než u nás, např. 6,3 mSv/rok v Norsku, 5 mSv/rok v Itálii, 4,8 mSv/rok v Německu – zde se jedná o relativně vysoké dávky v určitých regionech, ne o národní průměr. Přírodní ozáření člověka je stálá, relativně málo variabilní významná složka, která se přidružuje k ozáření člověka z umělých zdrojů ve všech oblastech lidské činnosti. (Hušák, 2009)

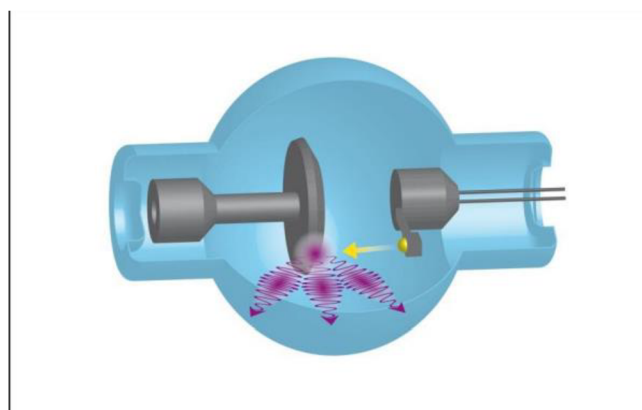
1.1.3.2 Umělé zdroje

Hlavní rozdíl mezi přírodními a umělými zdroji je, že umělé zdroje byly vytvořeny nebo uvolněny lidskou činností. Nejvýznamnější ozáření obyvatelstva z umělých zdrojů (rentgenových přístrojů, radionuklidů, urychlovačů) vzniká při používání ionizujícího záření v medicíně. Hlavní podíl na tom má rentgenová diagnostika, příspěvek nukleární medicíny je o něco nižší, obdobně je tomu i u příspěvku z radioterapie. Lékařské ozáření představuje více než 90 % celkové efektivní dávky člověka z umělých zdrojů. (Hušák, 2009)

Generátory ionizujícího záření vytváří při jejich činnosti ionizující záření o energii větší než 5 keV. Mezi generátory záření patří zejména urychlovače nabitých částic, jejichž nejjednodušším a hlavním představitelem je rentgenka. Rentgenka je speciální vakuovaná elektronka. Princip rentgenky je jednoduchý. Z rozžhavené katody, která je záporná, vyletují elektrony směrem k anodě, která je kladná. Mezi katodou a anodou je připojeno vysoké napětí, které umožňuje elektronům letět vysokou rychlostí. Při dopadu elektronů na anodu se většina jejich energie mění v teplo. Část energie dopadajících elektronů se mění na energii rentgenového záření, které vystupuje z anody. Takto vzniklé RTG záření je dvojího druhu: brzdné a charakteristické záření. (Podzimek, 2013)

Brzdné záření, které vzniká v rentgence, je převažující typ RTG záření. Vznikne zpomalením letícího elektronu, který se nachází blízko jádra atomu. Jádro atomu má kladný náboj a přitahuje elektron, který změni směr letu a zpomalí se. Čím blíže se elektron nachází u jádra a čím větší má energii, tím větší bude energie vznikajícího kvanta RTG záření. (Seidl, 2012)

Charakteristické záření se vytvoří při srážce letícího elektronu a elektronu, který se nachází v elektronovém obalu atomu na katodě. Původní elektron je vyražen pryč z atomu. Vytvoří se „díra“, která je ale hned zaplněna elektronem z jedné z hladin, která je vzdálenější od jádra, a dojde k uvolnění značného množství energie ve formě fotonu RTG záření. Energie záření je stejná jako energetický rozdíl mezi elektronovými hladinami, mezi kterými byl uskutečněn přeskok elektronu. Čím je protonové číslo kovu anody vyšší, tím je vyšší energie vzniklého charakteristického záření. (Seidl, 2012)



Obrázek 4 schéma rentgenky s rotující anodou

Zdroj: Podzimek, 2013

Mezi umělé zdroje záření také patří určité radionuklidy. Jedná se hlavně o nuklidy tzv. „indukované“ radioaktivity. To znamená, že pomocí bombardování neaktivních nuklidů s vysokoenergetickým zářením jsou vytvořeny nové, tedy aktivní nuklidy, které obvykle mají krátké poločasy, a proto se v přírodě nenachází. Při rozpadech těchto radionuklidů se uvolňuje různé ionizující záření. Při přeměnách jádra atomů některých radionuklidů jsou emitovány částice alfa. Zářiče alfa se v rutinní praxi nukleární medicíny nevyužívají. V posledních letech jsou ale snahy o jejich aplikaci v imunoterapii nebo pro terapii metastáz v kostech. Částice beta emitované při přeměnách protonů a neutronů v jádře mají záporný nebo kladný náboj. Některé beta zářiče se používají v léčbě nádorových a dalších onemocnění v nukleární medicíně. Pozitronové zářiče se používají pro diagnostické účely v nukleární medicíně pomocí metod pozitronové emisní tomografie. (Hušák, 2009)

Dalším typem umělých zdrojů jsou urychlovače nabitých částic. Podle tvaru trajektorie částic dělíme urychlovače na lineární a kruhové. V lineárních urychlovačích jsou trajektorie pohybu velmi blízké přímce, v kruhových urychlovačích jsou trajektorie kružnice nebo spirály. K urychlení lze použít přímou, indukční nebo rezonanční metodu. U přímé metody je využíváno elektrické statické pole (lineární urychlovače), indukční metoda využívá vířivé elektrické pole, které je vyvolané změnou magnetického pole (betatron) a rezonanční metoda využívá vysokofrekvenční elektrické pole (cyklotron). (Podzimek, 2013)

Posledním typem zdroje ionizujícího záření jsou jaderné reaktory, v nichž probíhají řízená štěpení jader atomů a jsou významným zdrojem neutronů a záření gama.

Reaktory se používají k výrobě elektrické energie v jaderných elektrárnách.

V urychlovačích a jaderných reaktorech, hlavně ve výzkumných, se také vyrábějí radionuklidy (výše zmíněná „indukovaná“ radioaktivita) pro použití v lékařství a dalších oborech. (Hušák, 2009)

1.1.4 Interakce ionizujícího záření s prostředím

Předávání energie látce, kterou má nabitá částice, probíhá zejména ionizací a excitací jejich atomů. Je to způsobeno působením Coulombovských sil nabitých částic a orbitálních elektronů. Proces ionizace je způsobený tak, že pokud je energie předaná elektronu větší než jeho vazebná energie, elektron se vzdálí a dojde k ionizaci atomu, rozdělí se na záporný a kladný iont. Uvolněný elektron může mít dostatek energie na to, aby vyrazil další elektron nebo další elektrony z jeho vazby a tím dojde k sekundární ionizaci. Tím se vytvoří celá kaskáda ionizací. Protože pro jednu ionizaci potřebujeme energii jen pár eV, zatímco typický rentgenový foton má 200 000 eV, může jeden foton způsobit několik set nebo tisíce ionizací (větší část energie, jak bylo zmíněno, se ztratí ve formě tepla).

V případě, že předaná energie není dostačující k ionizaci, dojde pouze ke změně polohy elektronu na některou vyšší energetickou hladinu. Atom se velmi krátce nachází ve vybuzeném stavu, poté při návratu zpět na své místo se energie vyzáří ve formě fotonu. Tento proces se nazývá excitace. (Podzimek, 2013; Kuna, 2005; Kolektiv autorů)

1.1.5 Interakce nepřímo ionizujícího záření

Do této skupiny patří záření gama, neutronové a rentgenové záření. Všechny tyto druhy záření nemají elektrický náboj, svou kinetickou energii předávají v látce elektricky nabitým částicím, které svými účinky látku dále ionizují. (Kuna, 2005)

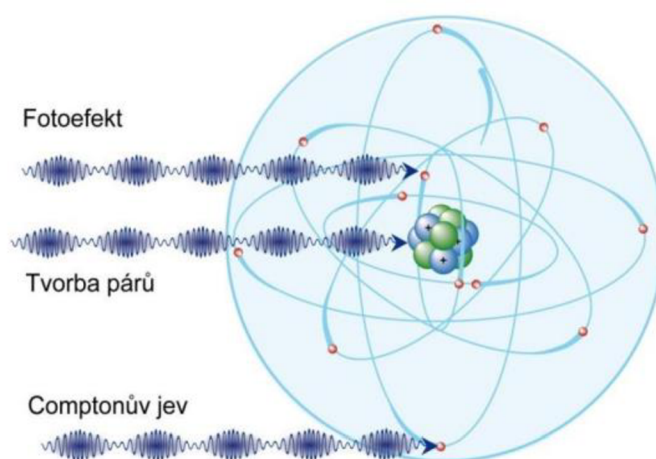
Záření gama i RTG záření má stejný charakter a je rozděleno podle způsobu jejich vzniku, ne podle energie nebo druhu částic. Záření gama vzniká při jaderných procesech v jádře a rentgenové záření vzniká vně atomového jádra.

Fotoelektrický jev (fotoefekt) – dojde ke střetu fotonu s elektronem, který se nachází v elektronového obalu na vnitřní sféře. Jestliže má foton menší energii, než je vazebná energie elektronu, nelze k fotoelektrickému jevu dojít. Emitovaný elektron uvolní místo ve vnitřní slupce, které se zaplní elektronem z vyšší slupky a zároveň se vyzáří foton charakteristického záření.

Comptonův rozptyl – dojde k rozptylu fotonu na volném elektronu nebo valenčním elektronu (slabě vázaném), při kterém foton přenáší část své energie na volný nebo téměř volný elektron. Foton se může rozptýlit do libovolného směru.

Tvorba elektron - pozitronového páru – tento jev vzniká zejména v Coulombovském poli jádra. Při tomto procesu foton mizí a je vyměněn párem částic pozitron – elektron. Energie fotonu přejde jen částečně na klidovou hmotnost obou částic, částečně na jejich kinetickou energii. Zbývající energie obou částic ubývá ze svazku postupně.

(Podzimek, 2013)



Obrázek 5 Umístění interakcí elektromagnetického záření

Zdroj: Podzimek, 2013

Neutronové záření – jaderné reakce s neutrony probíhají odlišně než s nabitými částicemi. Nejjednodušší reakcí je pružný rozptyl. Nejdůležitější interakce lze rozdělit do pěti skupin.

1. Přímá jaderná reakce, při které neutron vniká do jádra, poté se vlivem jaderných sil odkloní ze svého směru a s nesníženou energií jádro opouští.

2. Při nepružném rozptylu dojde k excitaci jádra do vyššího energetického stavu a dojde ke srážce neutronu s jádrem a tomuto jádru je předána část kinetické energie.
3. Radiační záchyt neutronu je nejvýznamnější neutronovou reakcí, hlavně při nízkých energiích.
4. Další možností je jaderná reakce s emisí nenabitých částic.
5. Poslední možností je interakce štěpení jader. (Podzimek, 2013)

1.1.6 Biologické účinky ionizujícího záření

Při průchodu záření živou hmotou nastává absorpce záření podobným způsobem jako při jeho průchodu neživým prostředím. K tomuto průchodu dochází zejména mechanismem ionizace a excitace molekul prostředí. I malé dávky záření však mají na organismus velice zhoubné účinky, protože zvané kaskády ionizací mohou způsobit komplexní poškození DNA, které je špatně opravitelné. Proto je potřeba dbát na to, aby byly dávky záření co nejmenší. (Rosina a kol., 2006; Hudzietzová, 2015)

Přímý účinek záření je spojený s absorpcí záření v živých strukturách organismu (DNA, RNA, bílkoviny, enzymy apod.). Tento způsob může postihnout především buňky, které mají nízký obsah vody. Dojde k porušení chemické vazby a tyto změny vedou k inaktivaci nebo až rozpadu molekul. Z celkového účinku záření připadá asi 20-30 % na přímý účinek na živé struktury.

Nepřímý účinek je způsoben produkty, které vznikají při ionizaci vody. Primárními produkty ionizace jsou volné radikály (H, OH), které ovlivňují sekundárně biomolekuly. Volné radikály jsou velice reaktivní, mají vliv na různé oxidoredukční systémy a způsobují jejich blokádu. Z celkového účinku záření připadá asi 70-80 % na nepřímý účinek pomocí tzv. volných radikálů vody. (Rosina a kol., 2006)

1.1.6.1 Účinky záření na buňku a tkáň

Nejdůležitější biologickou molekulou je molekula DNA. Ionizující záření způsobuje ve vysoké míře zlomy DNA. Obecně jsou však změny DNA velmi různorodé. Existují zlomy jednoduché a dvojité, dále může dojít také k poškození bází, cross-linky uvnitř

DNA, lokální denaturace DNA apod. Často tato poškození vznikají společně s jednoduchými nebo dvojitými zlomy. (Klener, 2000)

Účinky záření na buňku můžeme rozdělit do dvou skupin.

Prvním typem je smrt buňky – buněčná deplece. K usmrcení buňky může dojít již v klidovém období, tzv. interfázi. Interfáze je interval mezi dvěma buněčnými děleními – mitózami. Avšak významnějším typem buněčné smrti je zánik, který je vázaný na mitózu, tedy buněčné dělení. Poškození buňky se ale neprojeví hned, ale až tím, že buňka již nemá dál možnost se dělit. Tato tzv. mitotická smrt buňky se objevuje již při menších dávkách, které ale nestačí na vyvolání smrti v interfázi. Lze tedy brát v úvahu, že smrtící účinek záření se projeví ve tkáních, ve kterých dochází k rychlému buněčnému dělení (krvetvorné orgány, výstelka střeva, vyvíjející se zárodek). Smrt v interfázi a mitotická smrt se projeví převážně u vyšších dávek, ale u lymfocytů i při malých dávkách. Jedna forma interfázni smrti je apoptóza. Apoptóza je programovaná buněčná smrt, při které kontrolní mechanizmy zajišťují, že poškozené buňky nebo buňky, které již splnily svůj úkol, umírají a uvolňují místo buňkám novým. Druhou formou interfázni smrti je autofagie. Autofagie je proces, při kterém dojde k lysozomální degradaci organel v buňkách. Může způsobit dlouhodobé přežití buněk ve stresových podmínkách, nebo také může způsobit smrt buněk. (SÚJB; Linkos, 2023) Druhým typem je změna cytogenetické informace. Dochází ke změnám, které přímo narušují průběh buněčného dělení. Jde o změny v genetické informaci buňky, která je uložena v jejím jádře (chromozomech). Záření může způsobit mutace, které mohou být bodové, genové nebo chromozómové. Podle dalšího dělení se odlišují mutace gametické a mutace somatické. (SÚJB)

1.1.6.2 Účinky záření na lidský organismus

Působení záření na živou hmotu se řídí obecnými zákony, které platí i pro látky neživé. Dochází k ionizaci a excitaci a při těchto dějích dochází k absorpci energie. Na tento fyzikální děj navazuje řada dalších dějů, které jsou podmíněné složitou organizací živé hmoty. (SÚJB; Podzimek, 2013)

Hlavní typy účinků záření na člověka jsou shrnuty v následující tabulce (obr. 6).

Časné	Pozdní		Genetické
Somatické			
<ul style="list-style-type: none"> • akutní nemoc z ozáření • akutní lokální změny • akutní radiodermatitis • poškození fertility 	<ul style="list-style-type: none"> • nenádorová pozdní poškození • chronická radiodermatitis • zákal oční čočky 	<ul style="list-style-type: none"> • zhoubné nádory 	<ul style="list-style-type: none"> • genetické účinky u potomstva
poškození vývoje plodu			
nestochastické			stochastické

Obrázek 6 Účinky záření na lidský organismus

Zdroj: SÚJB

Lidský organismus lze pro popis účinků záření na člověka chápat jako souhrn sebeobnovných buněčných populací. Sebeobnovné buněčné populace jsou plně rozvinuty v organismu plodu a novorozence, později se diferencují a plně jsou zachovány po celý život jen v některých tkáňových buněčných systémech. Ozáření člověka může způsobit některé chorobné změny projevující se průběhu dnů až týdnů, jiné v průběhu roků a desetiletí. Tím došlo k rozlišování časných a pozdních následků ozáření. Účinky ionizujícího záření se z hlediska integrovaného savčího organismu dělí na deterministické (při dosažení určité dávky ionizujícího záření efekt zákonitě nastává) a stochastické (se stoupající dávkou stoupá pravděpodobnost poškození). (Podzimek, 2013)

Deterministické účinky jsou podmíněny buněčnými ztrátami v buněčných populacích. Klinické projevy deterministických účinků u člověka jsou velmi rozmanité, neboť proces deplece buněčných populací se realizuje v závislosti na geometrii ozáření v různých částech těla. Deterministické účinky jsou takové, kdy účinek roste s růstem obdržené dávky záření. Projevují se jako důsledek letálního poškození buněk ozářených vysokou dávkou záření (od 100 mGy). Tyto účinky lze vyloučit, pokud nedojde k překročení určité prahové hodnoty. Závažnost účinku závisí na dávce. Kvantitativním ukazatelem, pomocí něhož lze odhadnout možné následky ozáření, je prahová dávka pro ten účinek, popřípadě hodnota 50 % efektivity vztažená ke zvolené referenční době po ozáření, tedy např. LD 50/30. Důležitým rysem této skupiny účinků je měnící se

klinický obraz se stoupající dávkou, jinak řečeno, intenzita projevů a jejich zdravotní závažnost závislá na dávce. Patří sem akutní nemoc z ozáření nebo radiační poškození kůže. S ohledem na existenci dávkového prahu jsou z hlediska času akutní, výjimku tvoří katarakta. (Klener, 2000; Zölzer, 2007; Davídková; SURO, 2023)

1. Akutní nemoc z ozáření (ANO)

Jedná se o nejvýraznější projev časného účinku ozáření, které se rozvíjí po ozáření celého těla nebo jeho převážné části dávkou v oblasti jednotek až desítek grayů.

V závislosti na stupni ozáření převládají v klinickém obraze příznaky od poškození krvetvorných orgánů a trávicího ústrojí až k poškození centrálního nervového systému. ANO zahrnuje tři základní syndromy, jejichž výskyt je závislý na absorbované dávce ionizujícího záření.

Hematologická (dřeňová) forma se může projevit už při dávkách kolem 1-2 Gy, typický obraz ale odpovídá dávkám 3-4 Gy. Míra poškozených buněk je úměrná dávce záření.

Při dávce 1 Gy přežívá 37 % kmenových buněk, při dávce 5 Gy 1 %. První den po ozáření se projeví nespecifické příznaky – skleslost, bolesti hlavy, apatie, nauzea, dehydratace organismu, zvýšená teplota. Následuje období, kdy ANO přechází do fáze vlastního onemocnění s projevy sepse, krvácení do sliznic a orofaryngeálního syndromu. Z bílých krvinek jsou nejcitlivější lymfocyty. Klesá i počet krevních destiček a červených krvinek. V závislosti na dávce nastupují po šesti až osmi týdnech známky uzdravování. (Podzimek, 2013; SÚJB; Kelner, 2000; Zölzer, 2007; Hušák, 2009)

Střevní (gastrointestinální) forma akutní nemoci z ozáření nastává při celotělové dávce vyšší než 6 Gy, časné příznaky jsou výraznější a závažné potíže se dostaví již 4.-7. den po ozáření. Jedná se o krvavé průjmy, příznaky ileu nebo střevní perforace.

Patogeneticky jde o nekrózu buněk střevní výstelky s obnažením povrchu střeva a výraznou poruchou vodního a minerálního hospodářství. Přežije-li postižený 7-10 dní, projeví se v i příznaky poškození krvetvorných orgánů. Rozmezí poškození GI systému a plic je 5-15 Gy. V dávkové oblasti nad 20 Gy jsou příznaky časného období do té míry akcentovány, že vznikne metabolický rozvrat, srdeční selhání a postižený upadne do kómatu. (Hušák, 2009; Klener, 2000)

Neurovaskulární forma má dvě podformy – vaskulární a mozkovou. Nastává při dávkách vyšších než 80 Gy. Jejím následkem je vždy smrt. Při dávce do 100 Gy během několika dnů, při dávce 500 Gy během dvou hodin a dávky vyšší než 1 000 Gy smrtí okamžitě. Poškození tkáně je nereparabilní. Při dávkách nad 50 Gy nastupují výrazně akcentované prodromální příznaky přecházející v psychickou dezorientaci a zmatení, křeče, bezvědomí a smrt. (Zölzer, 2009; Hušák, 2009)

2. Akutní lokální změny

Z lokálních účinků je třeba věnovat největší pozornost kůži. Jde ale také o nejčastější typ poškození při nehodách se zdroji zevního záření. Stupeň poškození kůže je závislý na dávce, druhu záření, velikosti ozářeného pole a na lokalizaci. Práh poškození je asi 3 Gy. Podle závažnosti projevů se rozlišují tři stupně akutních popálenin vyvolaných ionizujícím zářením. (SÚJB; Podzimek, 2013; Klener, 2000)

Erytematózní dermatitis (první stupeň) se rozvíjí po dávce v kůži asi 2 až 4 Gy.

Bezpříznakové období latence trvá podle velikosti dávky 2-4 týdny, poté se objeví zarudnutí spojené se zánětlivou exudací v korigiu. Přechodná epilace se objeví kolem třetího týdne po dávce 3 Gy. Po ozáření dávkou 6-12 Gy vzniká časný erytém již v prvních 24 hodinách a v období epilace je doprovázen pozdním erytémem. Od 3. týdne kůže ztmavne. Ztráta vlasů je úplná do 3-4 týdnů. (Hušák, 2009; Radiobiologie)

Deskvamativní dermatitis (druhý stupeň) vzniká po ozáření dávkou kolem 20 Gy.

Nastupuje časný erytém, který se objevuje v prvních hodinách po ozáření, nejpozději do 2 dnů. Pokožka se odděluje od pojivového podkladu tekutinou, vystupující z cév a vznikají puchýře. Jejich odlučováním a infekcí ložiska se stav dále komplikuje.

V příznivějším případě nastává po 2-4 týdnech obnova pokožky z okrajů defektů. Pokud dojde k těžšímu poškození cév, dochází k jejímu odumření a vzniku vředu. (Hušák, 2009; SÚJB)

Nekrotická forma dermatitidy (radiační dermatitis třetího stupně) se projevuje jako vřed.

Velmi špatně se hojí, a i po zhojení je další osud postiženého okrsku kůže nejistý.

Dochází k postižení hlubších vrstev kůže. Nová pokožka je tenká a špatně odolává zátěži i infekci. Rozvojem degenerativních změn může i po letech vzniknout tzv. pozdní vřed vyžadující chirurgický zákrok. (SÚJB; Hušák, 2009)

Léčba je v rukou profesionální dermatologie a plastické chirurgie. (Univerzita Karlova)

3. Poškození fertility

Dalším významným lokálním poškozením může být postižení fertility (plodnosti) po ozáření pohlavních žláz. K poškození fertility může docházet jak u mužů, tak u žen. U mužů dochází k dočasnému poškození fertility již při nižších dávkách. Při běžném terapeutickém frakcionovaném režimu byla přechodná oligospermie pozorována již při dávkách 0,1-0,3 Gy. Trvalá ztráta je při dávce nad 3 Gy. Dávky 2,5-8 Gy, v závislosti na typu frakcionace, způsobují u mladších žen sterilitu v 60-70 %, u starších žen ve 100 %. Rozdíly jsou zde proto, že vajíčka, která ubývají z vaječníků během jednotlivých měsíčních cyklů ženy nejsou nahrazována, zatímco ve varlatech je zásoba spermií během dospělého věku průběžně doplňována. U žen mohou být postiženy i sekundární pohlavní znaky. (Hušák, 2009, Podzimek, 2013)

4. Chronická radiační dermatitida

Chronická radiační dermatitida byla v první polovině tohoto století poměrně častým nálezem u rentgenujících lékařů. Atrofický typ tohoto onemocnění se projevuje suchou, tenkou, hladkou pokožkou. Křehkost takové kůže vede k trhlinám a pozdním vředovitým defektům. Hypertrofický typ má pokožku zhrubělou, kožní záhyby výraznější. U osob postižených chronickými kožními změnami je třeba předpokládat celkovou lokální dávku alespoň 30-50 Gy. (Klener, 2000)

5. Katarakta

Může vzniknout po jednorázovém ozáření dávkou vyšší než 1,5-2 Gy nebo po dlouhodobé profesionální expozici. Radiační poškození epiteliálních buněk vede k neefektivní diferenciaci dceřiných elementů ve vlákne čochky. V průběhu migrace nedosáhnou vlákna potřebné průhlednosti, později se jejich trosky hromadí subkapsulárně a v dalším kroku se zanořují hlouběji. Dlouhá doba latence souvisí s pomalým proliferačním obratem epiteliálních buněk. Pro řídicí ionizující záření je prahová dávka 2 Gy a doba latence je 3-5 let. Byla provedena studie, do které bylo zahrnuto 59 intervenčních radiologů ve věku 29-62 let. Vyplnili dotazník týkající se pracovních podmínek a potenciálních kataraktogenních účinků. Výsledkem bylo, že z 59 zkoumaných mužů a žen bylo 31 bez jakýchkoli zákalů oční čočky radiogenního

původu. 21 jedinců vykazovalo malé paracentrální tečkovité zákaly v zadní subkapsulární oblasti čočky, což je v souladu s časnými známkami radiačního poškození. Zadní kapsulární katarakta byla zdokumentována u 9 očí 5 jedinců. (Klener, 2000; Hušák, 2009; Junk a kol., 2004)

Stochastické účinky jsou důsledkem změn v buňkách přeživších ozáření. Změněná buňka se může, po značném časovém odstupu, vyvinout v nádor. Obranné a reparační schopnosti organismu činí tento vývoj při malých dávkách velmi nepravděpodobným, nicméně nejsou známy žádné dávky, pod nimiž by ke vzniku nádoru nemohlo dojít.

Kancerogenní účinek záření byl prokázán v epidemiologických studiích u různých ozářených populací. Existuje dostatek důkazů o tom, že působení ionizujícího záření zvyšuje pravděpodobnost kvantitativnímu popisu. (SÚRO, 2023; Klener, 2000)

Kancerogenní transformace buněk jako takové se vyskytují i spontánně v populaci, aby bylo prokázáno, že působení ionizujícího záření zvyšuje výskyt těchto transformací.

Klinické příznaky nádoru vzniklých spontánně nejsou odlišitelné od klinických příznaků nádorů vzniklých v důsledku ozáření. (Súkupová, 2022)

Stochastické účinky, nebo také pravděpodobnostní, mohou vzniknout již při absorpci jediného fotonu nebo elektronu. Může dojít k poškození DNA v buněčném jádru, a i nízká dávka záření, jak bylo zmíněno, představuje několik stovek nebo tisíců ionizací. Předpokládá se proto, že pro stochastické účinky neexistuje dávkový práh. Každé zvýšení dávky je spojeno s úměrným zvýšením pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků. Také lze říci, že lze předpovědět vzestup těchto účinků v ozářené populaci, ale není možné rozpoznat v každém jednotlivém případě, zda se jedná o následek ozáření (nádory a genetická poškození se neliší od obdobných poruch zdraví spontánně vznikajících v neozářené populaci). Dále platí, že účinek opakovaných dávek je aditivní, tj. stochastické účinky spojené s jednotlivými dávkami obdrženy v různých časech např. během jednoho roku se sčítají. (Hušák, 2009)

Zhoubné nádory jsou nezávažnější pozdní somatické účinky ionizujícího záření.

Společným rysem představ o vzniku rakoviny je vícesložkový charakter tohoto onemocnění. Jednou složkou je existence buněk, které nesou modifikovanou (mutovanou) informaci a přenášejí tuto atypii na své potomstvo, druhou složkou vzniku

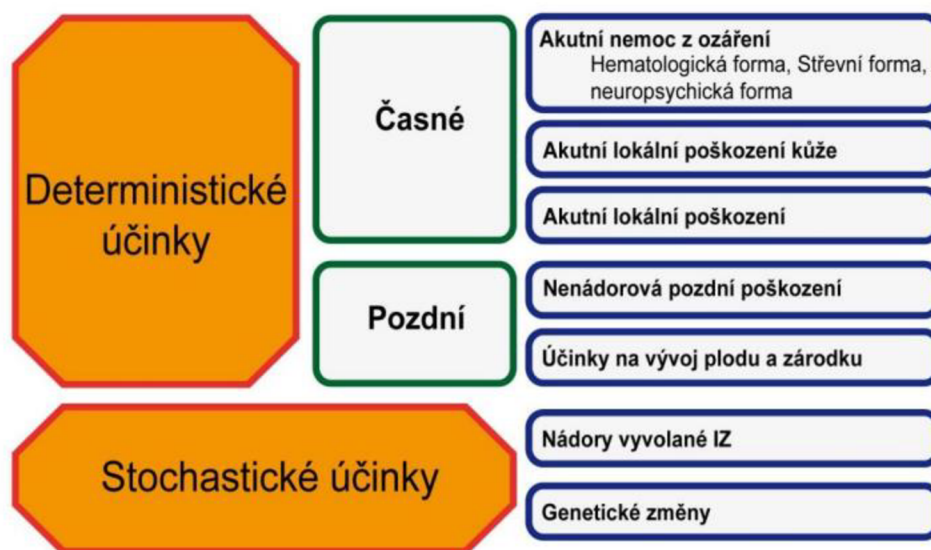
nádoru je soubor podmínek, které působí proti tendenci eliminovat atypické buňky nebo potlačit jejich růst. Je známa řada činitelů, které způsobují v jedné nebo druhé jmenované fázi děje. Jsou to viry, dehtové karcinogeny aj. Ve druhé fázi se uplatňují zejména změny v produkci hormonů nebo oslabení imunitní obrany organismu. Ionizující záření může podle současných poznatků působit na různých stupních procesu vývoje rakoviny. (SÚJB; SÚRO, 2023)

Jednotlivé tkáně a orgány jsou různě vnímavé na vznik nádorů po ozáření. Mezi nejvnmavější patří kostní dřeň, žaludek, tlusté střevo a plíce, nově i mléčná žláza. Číslo, které charakterizuje celoživotní riziko úmrtí na zářením vyvolanou rakovinu, se jmenuje koeficient rizika. Koeficient rizika zahrnuje různou radiosenzitivitu, ale i léčitelnost jednotlivých nádorů. Celkový koeficient rizika úmrtí na zářením vyvolané zhoubné nádory byl stanoven pro pracovníky $4,1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (tzn., že ze 100 pracovníků ozářených efektivní dávkou 1 Sv bude pravděpodobně u 4 osob příčinou smrti zhoubný nádor). Koeficient rizika smrti pro celkovou populaci je vyšší – $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (jsou zde zahrnuti i děti). Frekvenci možná indukovaných nádorů musíme srovnávat s celkovou frekvencí nádorů v populaci (tzn. spontánních nádorů, alespoň nádorů, jehož příčinu neznáme). Populační riziko rakoviny je asi 25 %, na rakovinu tedy zemře prakticky každý čtvrtý člověk bez přídatného ozáření. Důležitou charakteristikou je časový průběh výskytu zhoubných nádorů po ozáření. Po ozáření nevznikne nádor bezprostředně, ale až po několikaletém období latence, která je např. u leukémie 5-20 let, u nádoru plíce 10-40 let. Děti a mládež jsou až 3-10 krát citlivější na ozáření ve srovnání s dospělými. Je to dáno tím, že u nich probíhá ve větší míře dělení buněk a současně je u nich delší doba života, který mají před sebou. Např. 70letý člověk pravděpodobně již nemá tak dlouhou dobu života před sebou jako 5leté dítě. (SÚJB; ICRP, 2007; Súčupová, 2022)

Významnou skupinou pozdních účinků záření je postižení potomstva ozářených osob. Podkladem těchto tzv. „genetických“ změn je mutace, tj. změna v genetické informaci buňky. Za dědičné účinky je odpovědná gametická mutace, což je mutace v jádře zárodečných buněk pohlavních žláz. Genetický účinek záření spočívá ve zvýšené frekvenci mutací v porovnání s mutacemi vznikajícími spontánně. Mutovaný gen je schopen reprodukce při dělení buňky, a tak je mutace předávána do dalších generací.

Základ budoucího jedince, vzniklý splynutím mužské a ženské zárodečné buňky, může v důsledku své nepříznivé genetické skladby velmi časně zaniknout, tzn. v období před nebo krátce po vnoření se do děložní sliznice matky. Tento typ poškození se projeví jako neúspěšné oplození. V jiném případě dojde k vývoji zárodku, ale těhotenství končí potratem, předčasným porodem, úmrtím novorozence brzy po porodu nebo porodem dítěte s hrubou vrozenou vadou. (Podzimek, 2013)

Existují dva druhy radiačně indukovaného genetického poškození. První možností jsou genové mutace spočívající v alteraci elementární jednotky dědičnosti, tj. genu, realizovaného molekulou DNA nebo její podstatnou částí. Druhou možností jsou hrubé chromosomové aberace vyjádřené změnou struktury nebo počtu chromosomů. Mutace může být dominantní, kdy se důsledky projeví v první generaci potomstva. Efekt recesivních mutací se projeví, je-li táž genová mutace zděděna od každého z rodičů. Pohlavně vázané mutace se vyskytují na pohlavním chromosomu X a projevují se důsledky u mužských potomků, kteří nesou pohlavní chromosomy XY. Mutace na jiných chromosomech než X se označují jako autosomální mutace. (Klener, 2000)



Obrázek 7 Deterministické a stochastické účinky

Zdroj: Podzimek, 2013

Dále je podstatné zmínit účinky záření na vývoj lidského plodu a zárodka. V období preimplantace a blastogeneze (do 3. týdne) platí pravidlo „vše nebo nic“ – ozáření

zygota či blastocysta buď přežije bez vlivu na další vývoj zárodku, nebo uhynie jako celek. V období embryogeneze (od 3. týdne do 8. týdne) hrozí kromě rizika uhynutí zárodku též zpomalení jeho vývoje či některých jeho částí a různé deformity jako např. rozštěpy patra. V ranně fetálním období (od 8. týdne do konce 2. trimestru) bývá ohroženo především vyzrívání centrálního nervového systému. Hrozí mentální trvalá retardace. V pozdně fetálním období (3. trimestr) dominuje riziko indukce malignit u dítěte, které se projeví do 10 let věku. Riziko indukce fatální malignity se odhaduje na $1,12 \times 10^{-1} \text{ Sv}^{-1}$ po celé prenatální období. Při ozáření zárodku či plodu efektivní dávkou nižší než 20 mSv nebyl statisticky prokázán žádný vliv na další nepříznivý vývoj dítěte. Biologické účinky ozáření plodu jsou tedy jak charakteru deterministického – ke vzniku malformací, abnormalit CNS, zpomalení růstu, katarakty aj. dochází po překročení dávkového prahu, který leží kolem 100 mGy, tak i charakteru stochastického – doprovázeného bezprahovým výskytem malignit po ozáření in utero v průběhu dětství narozeného jedince. (Zoul a kol., 2020; Hušák, 2009)

Lineární bezprahová teorie - předpokládá lineární vztah mezi dávkou a stochastickými účinky způsobenými ionizujícím zářením. Důsledkem odhadů této teorie byl přijat návrh úvazku efektivní dávky, který byl zaveden počátkem 60. let minulého století. Úvazek byl v tomto smyslu chápán jako časový integrál dávkového příkonu za nekonečné časové období. Později UNSCEAR zavedl úvazek efektivní dávky za určité časové období, obvykle za 50 let. Lineární bezprahový model je ve své podstatě založen na principu škodlivosti jakéhokoliv množství ionizujícího záření na biologický organismus a je dnes uplatňován v převážné většině standardů a doporučení týkajících se radiační ochrany. Pro přijetí definice úvazku efektivní dávky a kolektivní dávky bylo tedy nutné akceptovat následující předpoklady: lineární bezprahový vztah mezi absorbovanou dávkou a individuálním rizikem, škodlivost záření v jakémkoli množství a časovou nerozlišitelnost dávky. (Třípól, 2014; Mohan, 2016)

1.1.6.3 Epidemiologie

Epidemiologické studie jsou standardním nástrojem k tomu, jak prokázat škodlivé působení nějakého vnějšího vlivu na člověka. Stejně tak tomu je i u ionizujícího záření.

Poznatky o vlivu ionizujícího záření na vznik nádorů u člověka a podklady k odvození kvantitativních ukazatelů takového rizika se získávají ze skupinových šetření (epidemiologických studií), jak odpovídá stochastickému charakteru těchto účinků. (Klener, 2000)

Příkladem jednoho epidemiologického šetření je studie přeživších bombardování v Hirošimě a Nagasaki. Epidemiologické studie, která se týkají ozáření, nezpochybnitelně prokázaly účinky ozáření na lidský organismus v oblasti vysokých dávek (nad 100 mSv). V případě nízkých dávek (pod 100mSv) taková studie, která by prokázala ozáření, chybí. Pomocí těchto analýz byly odvozeny koeficienty objektivní zdravotní újmy, do které jsou zahrnuty koeficienty rizika úmrtí na nádor, koeficienty charakterizující význam vyléčených nádorů a koeficienty dědičných poškození, a to všechno zvláště pro obecnou populaci a zvláště pro pracovníky. (Tomášek, 2001; SÚJB, SÚRO, 2023)

V posledních letech byly vydány dvě poměrně rozsáhlé studie. Jedna z nich byla založena na 180 tisících Britů do 21 let a byla vydána v roce 2012. Tato studie uvádí rizika pro leukémii a rakovinu mozku. U obou těchto možností bylo riziko ve vztahu k dávce statisticky významné do 50 mSv. Druhá a mnohem rozsáhlejší studie, kde bylo pozorováno 11 miliónů australských dětí do 19 let, byla vydána v roce 2013. Obě tyto studie ovšem vyvolaly řadu kritických reakcí, hlavně proto, že odhadnutá rizika z CT vyšetření nerozlišují indikaci k vyšetření. (Tomášek, 2001)

Proto je jistě zapotřebí dalších epidemiologických studií, aby bylo možné spolehlivě stanovit stochastické riziko při dávkách v rozmezí pod 100 mSv.

Dále se odhaduje, že v roce 2007 se ve světě provedlo kolem 3,1 miliardy vyšetření pomocí rentgenového záření a asi 37 milionů diagnostických vyšetření metodami nukleární medicíny. V České republice, která se poskytovanou zdravotnickou péčí řadí mezi přední země ve světě, bylo v roce 2012 provedeno celkem kolem 14,2 milionu vyšetření na odděleních či pracovištích radiologie a nukleární medicíny. Oblast radiační ochrany se postupně vyvíjela a v důsledku nových poznatků a zkušeností se některé přístupy aktualizovali a modernizovali. (Kubinyi a kol., 2018)

1.2 Radiační ochrana

Radiační ochrana je „systém technických a organizačních opatření k omezení ozáření fyzické osoby a k ochraně životního prostředí před účinky ionizujícího záření“. (Zákon č. 263/2016)

Dozor nad radiační ochranou vykonává Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB). SÚJB vykonává ze zákona řadu činností v oblasti radiační ochrany, tj. ochrany zdraví a životního prostředí před nepříznivými účinky ionizujícího záření. Jedná se zejména o:

- Státní správu a dozor v oblasti radiační ochrany, a to v celé škále pracovišť se zdroji ionizujícího záření,
- Sledování, posuzování a usměrňování ozáření osob, včetně ozáření z radonu a dalších přírodních zdrojů a ozáření za havarijních situací,
- Koordinaci činnosti celostátní radiační monitorovací sítě, včetně zabezpečení mezinárodní výměny dat o aktuální radiační situaci,
- Celostátní evidenci zdrojů ionizujícího záření a celostátní evidenci profesního ozáření, tedy ozáření, kterému jsou pracovníci vystaveni v rámci výkonu svého povolání,
- Prosazování předpisů radiační ochrany, včetně ukládání opatření k nápravě a také pokut. (SÚJB)

Státní ústav radiační ochrany (SÚRO) je odborná a výzkumná základna systému radiační ochrany v České republice. Hlavní činnosti SÚRO zahrnují monitorování obsahu a distribuce umělých radionuklidů v životním prostředí a v potravních řetězcích, dále lékařská expozice (používání zdrojů ionizujícího záření v radiodiagnostice a radioterapii) a přírodní zdroje (sledování a hodnocení ozáření obyvatelstva z přírodních radionuklidů). (Seidl, 2012)

1.2.1 Základní česká legislativa

Atomový zákon č. 18/1997 Sb. (starý atomový zákon) byl přijat v roce 1997 a byl to první zákon, který shrnul a upravil systémové právo, které se týká jak jaderné energie, jaderné bezpečnosti, tak i nakládání s radioaktivními odpady. (Zákon č. 18/1997 Sb.)

Atomový zákon č. 263/2016 Sb. dne 1.1. 2017 nahradil dosavadní atomový zákon č. 18/1997 Sb. a byl přijat dne 14. července 2016. Dosavadní zákon č. 18/1997 Sb. byl změněn zákonem č. 264/2016 Sb. (zákon, kterým se mění některé zákony v souvislosti s přijetím atomového zákona).

Předmětem úpravy zákona č. 263/2016 Sb. je:

- „*Podmínky mírového využívání jaderné energie,*
- *Podmínky vykonávání činností v rámci expozičních situací,*
- *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem,*
- *Schvalování typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky přepravy radioaktivní nebo štěpné látky, radioaktivního odpadu nebo vyhořelého jaderného paliva,*
- *Monitorování radiační situace,*
- *Zvládání radiační mimořádné události,*
- *Podmínky zabezpečení jaderného zařízení, jaderného materiálu a zdroje ionizujícího záření,*
- *Požadavky k zajištění nešíření jaderných zbraní,*
- *Výkon státní správy v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření“.* (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Vyhláška č. 422/2016 Sb. (vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje) byla přijata dne 23.12. 2016 a je účinná od 1.1. 2017.

Předmětem úpravy vyhlášky č. 422/2016 Sb. je:

- Zpracovává příslušné předpisy Euratomu,
- Stanoví požadavky na zajišťování radiační ochrany v expozičních situacích,
- Stanoví způsob zabezpečení radionuklidového zdroje, včetně radionuklidového zdroje 1. až 3. kategorie zabezpečení. (Vyhláška č. 422/2016 Sb.)

Atomový zákon je prováděn následujícími právními předpisy:

- Vyhláška č. 379/2016 Sb. – vyhláška o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky.

- Vyhláška č. 378/2016 Sb. – vyhláška o umístění jaderného zařízení.
- Vyhláška č. 377/2016 Sb. – vyhláška o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie.
- Vyhláška č. 376/2016 Sb. – vyhláška o položkách dvojího použití v jaderné oblasti.
- Vyhláška č. 375/2016 Sb. – vyhláška o vybraných položkách v jaderné oblasti.
- Vyhláška č. 374/2016 Sb. – vyhláška o evidenci a kontrole jaderných materiálů a oznamování údajů o nich.
- Vyhláška č. 362/2015 Sb. – vyhláška o podmínkách poskytnutí dotace ze státního rozpočtu v některých existujících expozičních situacích.
- Vyhláška č. 361/2016 Sb. – vyhláška o zabezpečení jaderného zařízení a jaderného materiálu.
- Vyhláška č. 360/2016 Sb. – vyhláška o monitorování radiační situace.
- Vyhláška č. 359/2016 Sb. – vyhláška o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události.
- Vyhláška č. 358/2016 Sb. – vyhláška o požadavcích na zajišťování kvality a technické bezpečnosti a posouzení a prověřování shody vybraných zařízení.
- Nařízení vlády č. 347/2016 Sb. – nařízení vlády o sazbách poplatků na odbornou činnost Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.
- Vyhláška č. 408/2016 Sb. – vyhláška o požadavcích na systém řízení.
- Vyhláška č. 409/2016 Sb. – vyhláška o činnostech zvláště důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, zvláštní odborné způsobilosti a přípravě osoby zajišťující radiační ochranu registranta.
- Vyhláška č. 21/2017 Sb. – vyhláška o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.
- Vyhláška č. 162/2017 Sb. – vyhláška o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona.
- Vyhláška č. 329/2017 Sb. – vyhláška o požadavcích na projekt jaderného zařízení.

- Vyhláška č. 266/2019 Sb. – vyhláška o koncepci nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem.
- Vyhláška č. 250/2020 Sb. – vyhláška o způsobu stanovení rezervy na vyřezování z provozu jaderného zařízení a pracoviště III. kategorie a pracoviště IV. kategorie. (SÚJB)

Základní zákonná norma související s radiační ochranou je - EU: směrnice rady EU 97/43/EURATOM (Medical Exposure Directive). (Seidl, 2012)

1.2.2 Cíle radiační ochrany

Základním cílem radiační ochrany je vyloučení deterministických účinků a snížení pravděpodobnosti stochastických účinků na rozumně dosažitelnou úroveň. Riziko z ionizujícího záření je přídatné k ostatním rizikům, kterým jsme během života vystaveni – škodliviny v životním prostředí a potravinách, kouření, genetické vlivy, infekční a jiné nemoci atd. (Ullman)

K tomu, aby byly správně plněny cíle radiační ochrany, je důležité uplatnit čtyři základní principy ochrany proti stochastickým účinkům záření – zdůvodnění činnosti vedoucí k ozáření, optimalizace ochranných opatření, dodržení individuálních limitů rizika stochastických účinků, tj. limitů efektivní dávky a zajištění bezpečnosti zdrojů záření. (SÚJB)

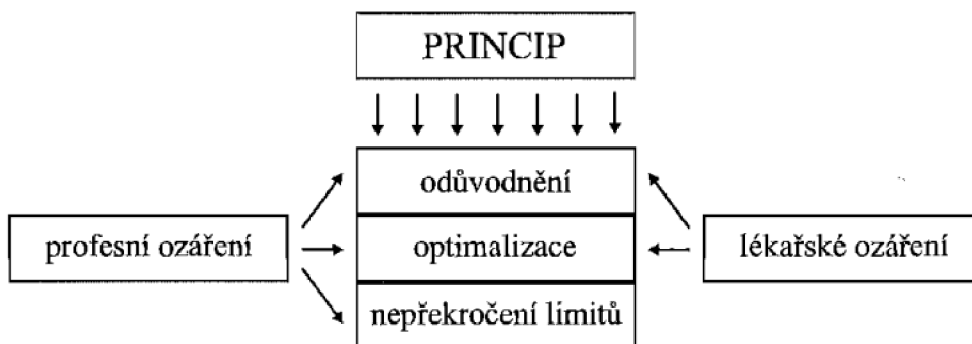
1.2.3 Koncepce radiační ochrany

Krátce po objevení rentgenového záření a radioaktivity se objevily první příznaky poškození zdraví těch, kteří s těmito zdroji záření experimentovali nebo je později využívali zejména v lékařských použitích. Na počátku mohly být zaznamenány výlučně viditelné účinky ozáření, např. zarudnutí kůže. Teprve na začátku 50. let minulého století byly k dispozici systematické znalosti o stochastických účincích. Oblast radiační ochrany prošla několika etapami, než se došlo k současné filozofii ochrany před škodlivými účinky ionizujícího záření ve smyslu jak externího, tak i vnitřního ozáření. K udržení ozáření na přijatelné úrovni bylo nutné vyvinout také metody jeho měření, resp. monitorování. Současná éra radiační ochrany začala základními doporučeními ICRP v roce 1977 a potom jejich postupnou aktualizací v roce 1990 a nakonec v roce

2007. Poslední doporučení ICRP se zahrnula do směrnice EU v podobě základních bezpečnostních standardů EU BSS (Basic Safety Standards). (Kubinyi, 2018)

1.2.4 Principy radiační ochrany

V souladu s obecnými principy je cílem radiační ochrany zabezpečit dostatečnou úroveň ochrany zdraví a umožnit při tom přínos z využití zdrojů ionizujícího záření a jaderné energie. (SÚRO, 2023)



Obrázek 8 Principy radiační ochrany

Zdroj: Hušák, 2009

1.2.4.1 Princip zdůvodnění

Princip zdůvodnění říká, že žádná činnost, která vede k ozáření osob nesmí být provedena, pokud z ní neplyne dostatečný prospěch ozářeným jedincům nebo společnosti, který vyrovnává případnou újmu, která je způsobena ozářením. Každá činnost musí být odůvodněna přínosem, který vyváží rizika, jež při těchto činnostech vznikají nebo mohou vzniknout. Takový způsob rozhodování používáme i v každodenním životě – věci děláme tak, aby přinesly více užitku než škody. (SÚJB; Hušák, 2009)

1.2.4.2 Princip optimalizace

Princip optimalizace říká, že všechna ozáření musí být udržována na co nejnižší rozumně dosažitelné úrovni s uvážením hospodářských a společenských faktorů. Tento princip optimalizace radiačního ozáření se někdy označuje zkratkou ALARA („As Low As Reasonably Achievable“), to znamená dosažení tak nízkých dávek, jaké

jsou adekvátní objektivním možnostem a potřebám. Princip optimalizace je velmi důležitou a rozumnou střední cestou mezi nedoceňováním rizika na jedné straně a na druhé straně neodůvodněnými požadavky na zajištění naprosté ochrany a nulových dávek. (Ullman)

Optimalizace radiační ochrany se uskutečňuje především na základě odborného odhadu a zkušeností bez použití přesných kvantitativních metod, opírá se o rozbor výsledků monitorování ve vztahu k operacím, které se provádějí se zdroji záření. (Podzimek, 2013)

„Každý, kdo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen při optimalizaci radiační ochrany zohlednit rozsah ozáření, jeho pravděpodobnost a počet fyzických osob vystavených ozáření. Každý, kdo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen provést optimalizaci radiační ochrany:

- a) Před zahájením činnosti v rámci plánované expoziční situace posouzením variant řešení radiační ochrany, které přicházejí v úvahu, s ohledem na nutné náklady, kolektivní dávku, dávky reprezentativních osob a správnou praxi,*
- b) Při vykonávání činnosti v rámci plánované expoziční situace pravidelným rozbohem vztahu obdržovaných dávek k prováděným úkonům, s uvážením dalších opatření ze zajištění RO a porovnáním s podobnou provozovanou a společensky přijatelnou činností,*
- c) Před uskutečněním opatření k zajištění RO v rámci existující a nehodové expoziční situace a před zahájením uvolňování RL z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření posouzením možných variant opatření a volbou takové, která svým způsobem provedení, rozsahem a dobou trvání přinese co největší čistý přínos,*
- d) Při uskutečňování opatření k zajištění RO v rámci existující a nehodové expoziční situace rozbohem obdržovaných dávek ve vztahu k prováděným opatřením a uvážením změny zvolených opatření a postupů“.* (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Při optimalizaci radiační ochrany musí každý, kdo provádí činnosti v rámci expozičních situací, stanovit varianty zajištění radiační ochrany a z nich vybrat optimální variantu

zajištění ochrany v příslušné expoziční situaci. Výběr optimální varianty zajištění radiační ochrany musí být proveden porovnáním možností snížení plánovaných a potenciálních dávek fyzickým osobám nebo skupinám obyvatelstva. Opatření přijímá k ochraně fyzických osob nebo skupin obyvatelstva proti vlivu zdroje ionizujícího záření, v prostředí mezi zdrojem ionizujícího záření a fyzickou osobou, nebo u fyzické osoby. (Vyhláška č. 422/2016)

1.2.4.3 Princip limitování

Každý, kdo provádí činnosti, které vedou k ozáření osob, je povinen omezit ozáření tak, aby bylo celkové ozáření nepřesáhlo v součtu stanovené limity. Základní limity jsou stanoveny pro obyvatelstvo, pro radiační pracovníky, pro učně a studenty. Jsou vyjádřeny efektivní dávkou za příslušné období. (Vyhláška č. 214/1997 Sb.)

Pro zajištění radiační ochrany má podstatný význam systém limitů pro omezování ozáření osob, které jsou vystaveni ionizujícímu záření. Tento systém zahrnuje limity ozáření jako závazné kvantitativní ukazatele pro celkové ozáření z radiačních činností, jejichž přesažení není ve stanovených příkladech přijatelné. Pro profesní ozáření se nepřekročení limitů ozáření pokládá za uspokojivě prokázané, pokud nejsou překročeny stanovené odvozené limity. (Kubinyi a kol., 2018)

Odvozené limity jsou limity, které omezují shodně jako limity základní ozáření pracovníků, ale jsou vyjádřené v snadno měřitelných veličinách. (Podzimek, 2013)

„Limitem ozáření je kvantitativní ukazatel pro omezení celkového ozáření fyzické osoby z činností v rámci plánovaných expozičních situací. Autorizovaný limit je kvantitativní ukazatel, který je výsledkem optimalizace radiační ochrany pro jednotlivou radiační činnost nebo jednotlivý zdroj ionizujícího záření a je zpravidla nižší než dávková optimalizační mez. Autorizované limity stanoví Úřad v povolení k činnostem v rámci expozičních situací, nepřekročení autorizovaných limitů prokazuje nepřekročení limitů ozáření. Pokud se při optimalizaci radiační ochrany zjistí, že nelze pro určitou činnost dodržet limit pro radiační pracovníky stanovený pro určité období, může Úřad na základě posouzení úrovně radiační ochrany a rizik plynoucích z ozáření rozhodnutím schválit jiný způsob čerpání tohoto limitu v čase. Limitům záření nepodléhá lékařské ozáření“. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Tabulka 1 Obecné limity

Obecné limity (obyvatelstvo)	Hodnota limitu [mSv]
Efektivní dávka za kalendářní rok	1
Efektivní dávka v oční čočce za kalendářní rok	15
Ekvivalentní dávka v 1 cm² kůže za kalendářní rok	50

Zdroj: Vyhláška č. 422/2016 Sb.

Obecné limity se vztahují na průměrné ozáření v kritické skupině obyvatel, a to pro všechny možnosti cest ozáření ze všech zdrojů ionizujícího záření a všechny činnosti, které vedou k ozáření a které přicházejí v úvahu. (Podzimek, 2013)

Tabulka 2 Limity pro radiační pracovníky

Limity pro radiační pracovníky	Hodnota limitu [mSv]
Efektivní dávka za dobu 5 po sobě jdoucích kalendářních let	100/5 let
Efektivní dávka za kalendářní rok	20
Ekvivalentní dávka v oční čočce za kalendářní rok	100
Ekvivalentní dávka v 1 cm² kůže za kalendářní rok	500
Ekvivalentní dávka na končetiny za kalendářní rok	500

Zdroj: Vyhláška č. 422/2016 Sb.

Limitem pro radiačního pracovníka je pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření 20 mSv za kalendářní rok, nejvýše však 100 mSv za 5 po sobě jdoucích kalendářních let a současně 50 mSv za jeden kalendářní rok. To znamená, že pokud radiační pracovník obdrží za 1 kalendářní rok efektivní dávku 50 mSv, za další 4 roky dohromady smí dostat nejvýše 50 mSv.

Dále limitem pro radiačního pracovníka je pro ekvivalentní dávku v oční čočce 100 mSv za 5 po sobě jdoucích kalendářních let a současně 50 mSv v jednom kalendářním roce.

Pro průměrnou ekvivalentní dávku na každý 1 cm² kůže je limitem 500 mSv za kalendářní rok a to platí bez ohledu na velikost ozářené plochy.

Ekvivalentní dávka na končetiny zahrnuje ekvivalentní dávku na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky. Limitem pro radiačního pracovníka 500 mSv za jeden kalendářní rok. (Vyhláška č. 422/2016 Sb.)

Odvozenými limity pro zevní ozáření jsou:

- Pro osobní dávkový ekvivalent v hloubce 0,07 mm hodnota 500 mSv za kalendářní rok,
- Pro osobní dávkový ekvivalent v hloubce 10 mm hodnota 20 mSv za kalendářní rok. (Podzimek, 2013)

Tabulka 3 Limity pro učně a studenty

Limity pro učně a studenty	Hodnota limitu [mSv]
Efektivní dávka za kalendářní rok	6
Efektivní dávka v oční čočce za kalendářní rok	15
Ekvivalentní dávka v 1 cm² kůže za kalendářní rok	150
Ekvivalentní dávka na končetiny za kalendářní rok	150

Zdroj: Vyhláška č. 422/2016 Sb.

U těhotných žen, které pracující na pracovištích se zdroji ionizujícího záření se ozáření ihned poté, co žena těhotenství zjistí a oznámí zaměstnavateli, omezuje upravením podmínek práce tak, aby bylo nepravděpodobné, že součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření plodu, nejméně po zbývajících dobu těhotenství, překročí 1 mSv. (Podzimek, 2013)

V případě lékařského ozáření je míra ozáření optimalizována, není však limitována, protože záleží na typu vyšetření, které je potřeba provést, a proto není možné limity celistvě nastavit.

Zvláštní limity jsou určeny pro ozáření dobrovolníků, kteří pečují o pacienty, dále návštěvníků či osob žijících v jedné domácnosti – 1 mSv u osob do 18 let a 5 mSv u ostatních za dobu vyšetřování nebo léčení pacienta a pro ozáření plodu. (Podzimek, 2013)

1.2.4.4 Princip zajištění bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření

Součástí radiační ochrany je také zaručení fyzické bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření, které by měly být zabezpečeny tak, aby nemohlo dojít k neovladatelnému ozáření nebo kontaminaci prostředí – aby byly zdroje patřičně skladovány a evidovány, aby nedošlo ke ztrátě či odcizení zdroje, aby zářiče byly svěřovány jen osobám a organizacím, které jsou pro příslušné činnosti vyškoleny a mají povolení. (Ullman) Jde o požadavky zabránění odcizení a přístupu nepovolaných osob a nepřetržité sledování zdrojů a hlášení ztrát. Provozovatel zdroje musí mít platné povolení, vše vést a inventarizovat v řádné evidenci. Na typově technickou bezpečnost dohlíží SÚJB, který kontroluje zkoušky dlouhodobé stability a krátkodobé stability a stabilitu z technického stavu zdroje ionizujícího záření. Primárním cílem radiační ochrany je dosáhnout a udržovat přijatelně bezpečné podmínky pro činnost zahrnující expozici člověka. (Vyhláška SÚJB č. 307/2002)

1.2.5 Metody ochrany před ionizujícím zářením

Dávka záření, které je osoba vystavena, je stanovena několika základními faktory: intenzitou, druhem a energií emitovaného záření s nímž pracujeme, dobu expozice a geometrickými podmínkami (vzdálenost, stínění). (Ullman)

1.2.5.1 Ochrana před vnějším ozářením

1. Ochrana vzdáleností

Ochrana vzdáleností se uskutečňuje tak, že dávka, resp. dávkový příkon záření gama nebo rentgenového záření, ubývají s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje. Zvětší-li

se vzdálenost od zdroje např. na dvojnásobek, dávka se sníží na čtvrtinu prvotní hodnoty. To samé platí i o dávkovém příkonu. Naopak, pokud se vzdálenost od zdroje zmenší na polovinu, dávka se zvýší 4x. Pro ochranu před vnějším ozářením je tedy žádoucí pracovat co nejdále od zdroje záření a používat pomůcky (pinzety, manipulátory, chemické kleště) tam, kde je to možné. (Hušák, 2009; Ullman)

2. Ochrana časem

Ochrana časem se realizuje tak, že radiační zátěž pracovníka roste s dobou, po kterou se nachází v blízkosti zdroje ionizujícího záření. Platí vztah dávka = dávkový příkon \times doba pobytu ($D = D \cdot t$). Zmenší-li se doba pobytu t , bude menší i dávka záření D . Pracovník nesmí zůstat v blízkosti zdroje záření v těch časových úsecích, kdy jeho přítomnost není nezbytně nutná. Při zvláště rizikových pracích lze dosáhnout podstatného snížení dávek pečlivým střídáním pracovníků. Radiační ochrana pacientů se uskutečňuje tak, že vyšetření se zkracuje na minimum a používá se pulsní režim. (Hušák, 2009; Ullman)

3. Ochrana stíněním

Ochrana stíněním se provádí tak, že mezi zdroj záření a pracovníka se umístí vrstva vhodného materiálu, která významně zeslabuje svazek záření a tím i dávku. Pro záření gama v případě tzv. geometrie úzkého svazku, kdy se berou v úvahu jen fotony, které prošly absorbatorem a nebyly v něm rozptýleny, lze vyjádřit dávku za stíněním výrazem $D = D_0 e^{-\mu d}$, kde D_0 je dávka měřená bez přítomnosti stínící vrstvy, e je základ přirozených logaritmů ($e = 2,7183$), μ je lineární součinitel zeslabení záření gama (cm^{-1}), který závisí na energii záření a hustotě materiálu, d je tloušťka stínící vrstvy v cm. Obdobný vztah platí přirozeně i pro dávkový příkon. (Hušák, 2009)

Pro jednotlivé druhy ionizujícího záření je vhodný jiný stínící materiál. Tloušťka nezbytného stínění záleží na materiálu stínění, na druhu a na energii ionizujícího záření a na požadovaném zeslabení. Umístíme-li tedy záření do cesty vhodný stínící materiál, můžeme dosáhnout významného snížení intenzity záření, někdy dokonce úplného odstínění záření. Stínění by se mělo nacházet co nejbližší zdroji záření, popř. ho obklopovat (např. lahvička s radioaktivní látkou se umístí do olověného kontejneru). (Ullman)



Obrázek 9 Stínící zástěra

Zdroj: quirumed.com

1.2.5.2 Ochrana před vnitřním ozářením

Ke vnitřní kontaminaci může dojít zejména pomocí otevřených radionuklidových zářičů, protože se používají ve formě roztoků, suspenzí, aerosolů nebo plynů (např. v nukleární medicíně). Při práci s těmito zářiči vzniká velké riziko kontaminace těmito radioaktivními látkami. Může jít o povrchovou kontaminaci kůže nebo vnitřní kontaminaci. Vnitřní kontaminace je závažnější, protože je při ní organismus ozařován dlouhodobě a zevnitř.

Ochrana před vnitřním ozářením při práci s otevřenými zářiči vyžaduje dodržování zásadních radiohygienických zásad, které se zpravidla nachází v pracovním a havarijním plánu pracoviště. Mezi nejdůležitější zásady řadíme:

- Používání gumových rukavic, ochranného oděvu a přezůvek při práci s těmito zářiči,
 - Používání stínících pomůcek (olověná pouzdra),
 - Práce s manipulačními pomůckami (pinzety),
 - Práce v digestořích,
 - Manipulace s kapalnými radioaktivními látkami na podložních tácech,
 - Zákaz jíst a pít na pracovišti s těmito zdroji,
 - Dekontaminace nástrojů a nádob hned po skončení práce,
 - Kontrola možného zamření osob a pracovních povrchů po skončení práce.
- (Podzimek, 2013)

1.2.6 Radiační monitorování

Uskutečnění požadavků omezování/limitování ozáření osob, dokazování optimalizace radiační ochrany, jakož i zaručení dalších požadavků na bezpečný provoz pracovišť se zdroji ionizujícího záření, především včasného zajištění odchylek od normálního provozu, se provádí pomocí radiačního monitorování. Monitorováním se rozumí nejen měření veličin, které charakterizují radiační pole a dozimetrické veličiny, ale i interpretace a hodnocení ozáření pracovníků se zdroji ionizujícího záření a dalších osob. Monitorování musí bezprostředně varovat při eventuálním vzniku mimořádné události. Program monitorování obsahuje zpravidla tyto části:

- Monitorování pracoviště,
- Monitorování osobní,
- Monitorování výpustí,
- Monitorování okolí. (Podzimek, 2013)

Program monitorování, který musí mít vypracován každé pracoviště, kde se pracuje s ionizujícím zářením, obsahuje obvykle tyto části: monitorování pracoviště (pracovního prostředí), osobní monitorování, na pracovišti nukleární medicíny k tomu přistupuje i monitorování výpustí (odpadních vod obsahujících radioaktivní látky). V programu monitorování, které je určeno jak k měření veličin, tak i k jejich interpretaci, se uvádějí následující položky:

- Monitorované veličiny (např. dávkový ekvivalent (dávka) resp. příkon dávkového ekvivalentu (dávkového příkonu), osobní dávkový ekvivalent (dávka), plošná aktivita povrchů kontaminovaných radioaktivními látkami aj.),
- Způsob, rozsah a frekvence měření,
- Stručné návody pro vyhodnocování výsledků měření,
- Hodnoty referenčních úrovní a opatření při jejich překročení,
- Použité měřicí metody a jejich parametry. (Hušák, 2009)

1.2.6.1 Monitorování pracoviště

Monitorování pracoviště umožňuje trvalou a úplnou informaci o příkonu ekvivalentních dávek a o objemové aktivitě radionuklidů v ovzduší, znalost těchto údajů je nezbytnou

podmínkou pro uplatňování principu optimalizace radiační ochrany. Celý systém radiačního monitorování musí zahrnovat detailní údaje o typech používaných měřidel, jejich umístění, rozsazích měření a odolnosti měřidel, technickém řešení přenosu dat z těchto měřidel a metodách zpracování a vyhodnocení těchto dat. (Klener, 2000)

Na pracovištích s ionizujícím zářením se monitorují:

- a) Parametry, které charakterizují pole záření, zejména příkon dávkového ekvivalentu,
- b) Přítomnost radionuklidů na pracovišti s otevřenými zářiči, tj. radioaktivní kontaminace povrchů, případně objemová aktivita radionuklidů v ovzduší. (Hušák, 2009)

1.2.6.2 Monitorování výpustí

Monitorování výpustí se realizuje sledováním, měřením, hodnocením a zaznamenáváním veličin a parametrů, které charakterizují výpusti radionuklidů do okolí pracoviště, především celkových aktivit a objemových aktivit výpustí. Zavádí se na všech pracovištích, kde dochází k likvidaci látek, které jsou znečištěné radionuklidy, jejich řízeným vypouštěním nebo kde je možnost úniku závažného množství radionuklidů do okolí. Využívá se ke kontrole dodržování povolených výpustí a brzkému zjištění a vyhodnocení eventuálních úniků a jejich důsledků na obyvatelstvo v okolí pracoviště a na životní prostředí. (Vyhláška č. 307/2002 Sb.)

Monitorování výpustí se uskutečňuje pouze na pracovištích s otevřenými zářiči, která se schválením SÚJB vypouští do životního prostředí radioaktivní odpady, které vznikají obzvláště v důsledku jeho provozu – v lékařství jsou to oddělení nukleární medicíny. Všeobecně platí, že monitorované látky musí být vypouštěny tak, aby se aktivita radionuklidu mohla srovnat s vymezeným limitem (uvolňovací úrovní). (Hušák, 2009; Venclík, 2012)

1.2.6.3 Monitorování okolí

Je součástí programu monitorování a využívá se zejména v okolí zdrojů ionizujícího záření, pracovišť, nebo jiných míst, u kterých může dojít k nežádoucímu úniku radionuklidů do životního prostředí nebo ohrožení obyvatelstva. Monitorování okolí se

zajišťuje sítě pozorovacích a monitorovacích bodů a tras. Výsledky monitorování výpustí a okolí daných zdrojů, či pracovišť s těmito zdroji, se obvykle vyjadřují ve veličině aktivita radionuklidů vypouštěných do ovzduší a vodotečí, které jsou obsažené ve zvolených složkách životního prostředí, eventuálně ve veličině dávkový ekvivalent v daných kontrolních bodech v okolí daného zdroje. (Venclík, 2012; Klener, 2000)

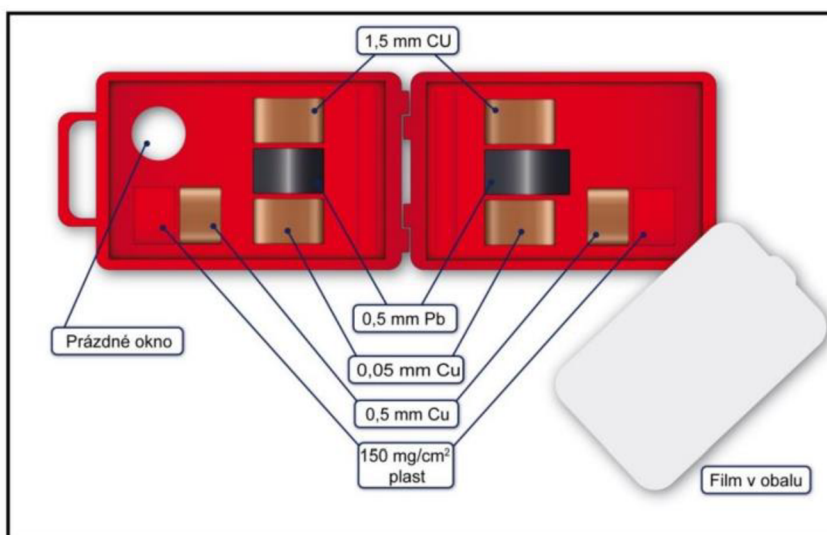
1.2.6.4 Osobní monitorování

Osobní monitorování tkví v měření osobních dávek záření radiačních pracovníků a jedná se zevní ozáření, nebo eventuálně o vnitřní ozáření z radioaktivní kontaminace. Monitorování zevního ozáření se uskutečňuje pomocí osobních dozimetrů, které radiační pracovníci nosí během všech prací s ionizujícím zářením a při pobytu v kontrolovaném pásmu. Tyto dozimetry jsou pravidelně vyhodnocovány (zpravidla za 1 měsíc) a výsledkem jsou hodnoty dávek v mSv. (Ullman)

Osobní monitorování se provádí u všech radiačních pracovníků kategorie A, pro pracovníky kategorie B se nepožaduje. Osobní dozimetr musí měřit všechny druhy záření podílející na zevním ozáření radiačního pracovníka. Osobní dozimetr musí být umístěn na standardním místě, zevně na pracovním oděvu vpředu vlevo na hrudníku. Toto místo se nazývá místo referenční. Pokud pracovník používá ochrannou zástěru, musí být umístěn vně zástěry. V případě nehody a podezření, že došlo k jednorázovému ozáření pracovníka, se provádí vyhodnocení osobního dozimetru ihned. (Seidl, 2012) Základním typem osobního dozimetru v polích záření gama je **filmový dozimetr** (obr. 10). Dozimetrický film je oboustranně překryt sadou filtrů, které jsou tvořené většinou z mědi (Cu), hliníku (Al), olova (Pb), cínu (Sn) apod. Filtry o různé tloušťce a z různého materiálu umožňují stanovení energie, druhu i směru ozáření ionizujícím zářením. (Prouza, 2006)

Filmové dozimetry jsou založeny na fotochemických účincích ionizujícího záření. Filmový dozimetr se skládá z dozimetrické kazety, která obsahuje kompenzační filtry a dozimetrického filmu. Základem filmového dozimetru je políčko fotografického filmu, který je světlotěsně zabalený do černého papíru. Ionizující záření prochází obalem filmu a ve fotoemulzi vytvoří latentní obraz, který se vyvoláním zviditelní. Podává informace o osobním dávkovém ekvivalentu fotonového záření a elektronů, druhu a energii záření,

směru a časovému rozložení ozáření a o eventuální kontaminaci. Filmový dozimetr umožňuje také zjistit, z které strany došlo k ozáření a zda bylo ozáření jedno či vícenásobné. (Podzimek, 2013; Seidl, 2012)



Obrázek 10 Filmový dozimetr

Zdroj: Podzimek (2013)

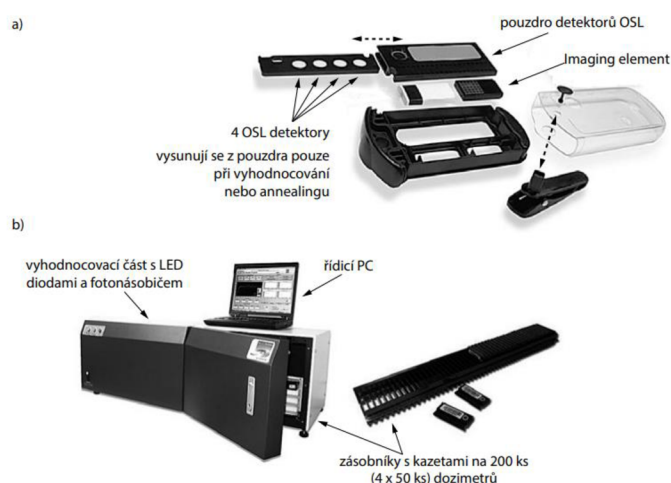
Termoluminiscenční dozimetry (obr. 11) jsou vhodné krystalické látky, ve kterých ionizující záření vyvolává excitace a záchyt elektronů v energeticky vyšších stavech. Při zahřátí dochází k uvolňování zachycených elektronů. Látka vyzařuje světlo, jehož celková energie je úměrná energii ionizujícího záření, které bylo pohlceno v látce. Detekce vyzařené energie je především prováděna scintilačními detektory. Používají se různé druhy TL-materiálu, mezi nejznámější řadíme různými stopovými prvky dopované LiF, CaF₂, MgBeO₄, BeO apod. Výhodami termoluminiscenčních dozimetrů jsou: vysoká citlivost, možnost přesného měření odezvy, poměrně široká oblast lineární závislosti mezi dávkou a odezvou dozimetru, možnost opětovného použití dozimetru a také možnost použití látek, které lze pokládat za tkáňově ekvivalentní. (Podzimek, 2013; Kubinyi, 2018)



Obrázek 11 Termoluminiscenční dozimetr

Zdroj: Kubinyi, 2018

Dalším typem jsou **elektronické osobní dozimetry** (obr. 12). Pracují na bázi GM – detektorů nebo v poslední době polovodičových např. Si-detektorů. Pracují na principu opticky stimulované luminiscence (OSL), kde ozářením viditelným světlem dochází k deexcitaci a elektrony se vrací zpátky na nižší energetické hladiny. Uvolněná excitační energie se vyzařuje ve formě fotonů viditelného světla – dochází k luminiscenci materiálu, převážně v modrozeleném světle. Elektronické dozimetry lze použít jak pro měření dávky, tak i dávkového příkonu. Nejprve se používaly jako operativní dozimetry především v jaderných elektrárnách, v poslední době se jejich použití rozšiřuje a začínají se používat dozimetrickými službami i jako legální dozimetry. Jejich přednosti jsou vysoká citlivost a rychlé vyhodnocení s možností automatizace. (Podzimek, 2013; Kubinyi, 2018)



Obrázek 12 OSL dozimetr

Zdroj: Kubinyi, 2018

1.2.7 Základní sledované veličiny při radiačním monitorování

Základními sledovanými veličinami jsou dávka a dávkový příkon. Jejich měření se provádí pomocí již výše zmíněných dozimetrů. Hodnoty těchto veličin se udávají v jednotkách Gray (Gy) nebo Sievert (Sv).

1.2.7.1 Absorbovaná dávka (D)

Absorbovaná dávka charakterizuje působení ionizujícího záření na látku. Je definována jako poměr střední energie sdělené látce o určité hmotnosti:

$$D = \Delta E / \Delta m$$

Kde ΔE je střední energie ionizujícího záření absorbovaná v objemu látky a Δm je hmotnost objemového elementu.

Jednotkou je joule na kilogram ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), pro který byl zaveden název Gray (Gy).

Absorbovaná dávka je snadno stanovitelná veličina, avšak absorbovaná dávka D sama o sobě nestačí k předpovědi důležitosti ani pravděpodobnosti biologických účinků záření za neurčených podmínek. Proto byly v radiační ochraně zavedeny další veličiny, které mohou lépe popisovat významnější škodlivé účinky záření, zejména pozdní stochastické účinky. (Seidl, 2012)

1.2.7.2 Ekvivalentní dávka (H_T)

Ekvivalentní dávka představuje součin radiačního váhového faktoru w_R a střední absorbované dávky D_{TR} v orgánu nebo tkáni T pro druh ionizujícího záření R :

$$H_T = \sum(w_R \cdot D_{TR})$$

Jednotkou je $J \cdot kg^{-1}$, nazván Sievert (Sv).

Radiační váhový faktor w_R charakterizuje vliv energie ionizujícího záření na újmu. Radiační váhové faktory jsou v podstatě dohodnuté hodnoty relativní biologické účinnosti pro účely radiační ochrany v oblasti stochastických účinků a nízkých dávek. (Seidl, 2012)

Tabulka 4 Hodnoty radiačního váhového součinitele w_R

Druh záření, případně energie	Radiační váhový součinitel w_R
fotony	1
elektrony	1
neutrony, < 10 keV	5
neutrony, 10 keV-100 keV	10
protony, > 2MeV (mimo odražené)	5
částice α , těžká jádra	20

Zdroj: Seidl, 2012

1.2.7.3 Efektivní dávka (E)

Efektivní dávka je součet součinů tkáňových váhových faktorů w_T a ekvivalentní dávky H_T v ozářených tkáních a orgánech T . Je vyjádřena vztahem:

$$E = \sum w_T \cdot H_T$$

Kde H_T je ekvivalentní dávka v dané tkáni T a w_T je tkáňový váhový faktor.

Jednotkou je Sievert (Sv).

Výhodou efektivní dávky je možnost posuzovat míru stochastických účinků i při nehomogenním ozáření člověka, protože je definována tak, aby měla hodnotu ekvivalentní dávky H_T , která by při rovnoměrném ozáření celého těla vyvolala stejnou zdravotní újmu jako dané nerovnoměrné ozáření. (Seidl, 2012)

Efektivní dávka byla zavedena s úmyslem, aby se využívala jako veličina ochrany. Základní použití efektivní dávky je prospektivní hodnocení dávek pro plánování a optimalizaci radiační ochrany a důkaz nepřekročení dávkových limitů pro potřeby

orgánů dozoru. Efektivní dávka se nedoporučuje pro epidemiologická hodnocení, ani by se neměla používat k podrobnému retrospektivnímu prozkoumání expozice a rizika konkrétních jednotlivců. (Podzimek, 2013)

Tkáňové váhové faktory (w_T) představují relativní příspěvky tkání nebo orgánů k celkové újmě ze stochastických účinků při rovnoměrném ozáření celého těla, tzn. vyjadřují radiosenzitivitu jednotlivých orgánů a tkání ke vzniku stochastických účinků. Platí, že součet tkáňových faktorů je rovno jedné. (Seidl, 2012)

Tabulka 5 Hodnoty tkáňového váhového faktoru

Tkáň, orgán	Tkáňový váhový součinitel w_T
gonády	0,20
červená kostní dřeň	0,12
střevo	0,12
pľíce	0,12
žaludek	0,12
močový měchýř	0,05
mléčná žláza	0,05
játra	0,05
jícen	0,05
štítná žláza	0,05
kůže	0,01
povrchy kostí	0,01
ostatní orgány a tkáně	0,05
$\sum w_T$	1,00

Zdroj: Seidl, 2012

1.2.7.4 Dávkový ekvivalent (H)

Dávkový ekvivalent je součinem absorbované dávky D_T v uvažovaném bodě tkáně nebo vzduchu a bezrozměrného jakostního činitele Q vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření. Je vyjádřen vztahem:

$$H = D_T \cdot Q$$

Jednotkou dávkového ekvivalentu je Sievert (Sv).

Na dávkovém ekvivalentu jsou založeny tři operační veličiny pro praktické měření jak při monitorování osob, tak i prostředí. Jedná se o osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$, prostorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$ a směrový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$.

Jakostní faktor Q je bezrozměrné číslo, které má na zřeteli působení mikroskopického rozdělení energie předané tkáni na zdravotní újmu. Jeho hodnoty jsou závislé na lineárním přenosu energie nabitých částic, které v daném místě ve tkáni přispívají k dávce D .

Osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$ je určen k monitorování osob a je to dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v měkké tkáni v hloubce d . Pro nepronikavé záření a ozáření kůže se většinou uvažuje hodnota $d = 0,07$ mm, pro ozáření oka $d = 3$ mm. Pro pronikavé záření je nejčastěji použita hodnota $d = 10$ mm. Prakticky lze měření $H_p(d)$ provést dozimetrem, který se nosí na povrchu těla a je překrytý odpovídající vrstvou materiálu odpovídající měkké tkáni. (Seidl, 2012; Podzimek, 2013)

1.3 Lékařské ozáření

Lékařské ozáření se popisuje jako vystavení pacientů ionizujícímu záření v rámci diagnostiky a léčby. Lékařské ozáření je podřízeno principům zdůvodnění a optimalizace v rámci radiační ochrany. (Hušák, 2009)

Pojem lékařské ozáření bylo dříve definováno jenom jako vystavení pacientů ionizujícímu záření v rámci jejich lékařského vyšetření nebo léčby. Současná legislativa (Zákon č. 263/2016 Sb.) zařazuje do lékařského ozáření také ozáření osob, které poskytují pomoc fyzické osobě, která podstupuje lékařské ozáření, dále také ozáření osob, které se dobrovolně účastní lékařského ověřování nezavedené metody, která je spojená s lékařským ozářením a ozáření v rámci pracovních-lékařských služeb a preventivní zdravotní péče. (SÚRO, 2023)

1.3.1 Nukleární medicína

Nukleární medicína se definuje jako lékařský obor, který se zabývá diagnostikou a léčbou pomocí otevřených radioaktivních zářičů, které jsou ve formě radiofarmak. Novější definice poukazuje na využití indikátorového principu (angl. tracer principle, stopovací princip), ze kterého metody nukleární medicíny vycházejí a který dává možnost neinvazivně sledovat radiofarmaka v těle pacienta. Nukleární medicína je interdisciplinární obor na rozhraní preklinických a klinických lékařských disciplín

(normální a patologické fyziologie, farmakologie, vnitřního lékařství – především kardiologie a endokrinologie, onkologie, neurologie atd.) a nelékařských oborů (radiofarmacie, fyziky, radiobiologie, radiační ochrany a výpočetní techniky). (Kupka a kol., 2015)

Smyslem a cílem nukleární medicíny je využití ionizujícího záření, které je emitováno vhodnými radionuklidy a ty jsou do organismu vpraveny ve formě radiofarmak. Hlavní náplň této oblasti medicíny obsahuje především jedinečné diagnostické zobrazovací metody a také specifické terapeutické postupy, které jsou založené na aplikaci otevřených radioaktivních zářičů. (Kubinyi, 2018)

Typickým rysem metod nukleární medicíny je jejich neinvazivnost a velmi nízká pravděpodobnost alergické reakce (téměř nulová). Radiační zátěž je srovnatelná nebo nižší než u radiodiagnostických metod. Základem nukleárně medicínských metod je jejich funkční charakter, získávané výsledky jsou pokaždé sekundární v závislosti na funkci. Zobrazuje se buď probíhající v čase (např. vylučování ledvin), nebo se sleduje rozložení funkčně aktivní tkáně v orgánech, nebo se hledávají místa s odchýlnou metabolickou aktivitou nebo porušenou perfúzí. Zobrazovací metody se provádí jednak na běžných scintigrafických kamerách s použitím radionuklidů, které emitují gama záření, jednak na pozitronových kamerách (PET – pozitronová emisní tomografie), které k diagnostice používají pozitronové zářiče a speciální přístrojovou techniku. (Seidl, 2012)

Metody nukleární medicíny lze z obecného hlediska využít k detekci patologických ložisek při celotělovém vyšetření (kostní přestavba, nádory a jejich metastázy, průkaz a lokalizace zánětu, průkaz ektopické tkáně), k zobrazení regionálních poruch perfuze (mozku, myokardu, plic), k diagnostice poruch funkce orgánů (ledvin, myokardu) nebo k prokázání poruch toku, drenáže nebo motility (lymfatické cesty, dutý systém ledvin, jícen). (Seidl, 2012)

1.3.1.1 Základní nejčastější vyšetření v nukleární medicíně

1. Nukleární kardiologie
 - Perfúzní scintigrafie myokardu,

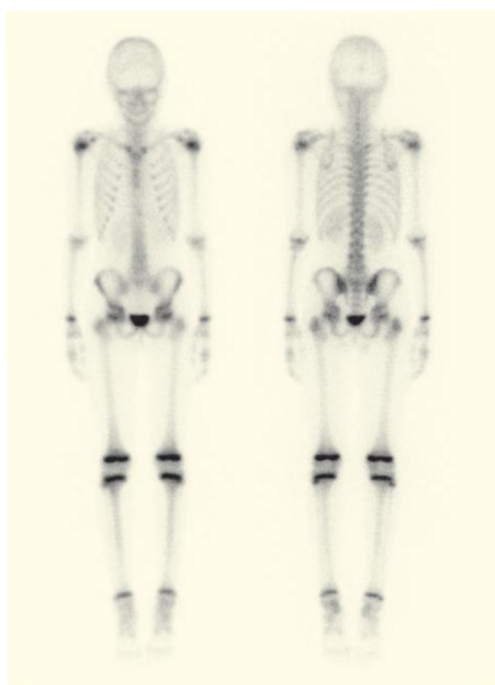
- Radionuklidová ventrikulografie.
2. Vyšetření cévního systému
 - Radionuklidová flebografie.
 3. Zobrazení lymfatického systému
 - Lymfoscintigrafie,
 - Detekce sentinelové uzliny.
 4. Radionuklidová diagnostika v pneumologii
 - Perfúzní plicní scintigrafie,
 - Ventilační plicní scintigrafie.
 5. Vyšetření skeletu
 6. Zobrazení distribuce kostní dřeně
 7. Nukleární medicína v onkologii
 - PET/CT,
 - Diagnostika zánětů,
 - Imunoscintigrafie.
 8. Lokalizační diagnostika zánětu
 9. Nukleární medicína a endokrinologie
 - Scintigrafie štítné žlázy,
 - Vyšetření příštítných tělísek.
 10. Nukleární neurologie
 - Průtok krve mozkom,
 - Receptorová diagnostika.
 11. Vyšetření ledvin a močových cest
 - Statická scintigrafie ledvin,
 - Dynamická scintigrafie ledvin,
 - Radionuklidová cystografie.
 12. Scintigrafie varlat a skrota
 13. Diagnostika chorob zažívacího ústrojí
 - Vyšetření slinných žláz,

- Vyšetření transportu potravy jícnem a detekce gastroezofageálního refluxu,
- Vyšetření evakuace žaludku,
- Lokalizace místa krvácení v GIT,
- Průkaz ektopické žaludeční sliznice Meckelova divertiklu,
- Diagnostika onemocnění jater a žlučových cest.

14. Vyšetření sleziny pomocí radionuklidů

15. Radionuklidová diagnostika v hematologii

- Měření objemu erycytární masy a plazmy,
- Přežívání a lokalizace místa zvýšené destrukce erytrocytů,
- Přežívání a lokalizace zvýšené destrukce trombocytů,
- Vyšetření kinetiky železa,
- Vyšetření střevní resorpce vitamínu B₁₂. (Kupka a kol., 2015; Seidl, 2012; Kubinyi, 2018)



Obrázek 13 Příklad - scintigrafie skeletu

Zdroj: Kupka a kol., 2015

1.3.2 Radiodiagnostika

1.3.2.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk je akustické vlnění, stejné fyzikální podstaty jako zvuk, jehož frekvence leží nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha (cca 20 kHz), tím pádem je pro lidské ucho neslyšitelný. Ultrazvuk tedy není metoda využívající ionizující záření. (Seidl, 2012)

Diagnostická ultrazvuková vyšetření se stala nejčastěji používanými vyšetřeními mezi zobrazovacími metodami. Za několik desítek let jejich existence se díky minimálním vedlejším účinkům metody, její dostupnosti a nízké ceně diagnostického výkonu ve srovnání s vyšetřeními pomocí CT nebo MR rozšířila tato vyšetření do většiny odborných specializací. Vybavení ultrasonografických přístrojů je podřízeno jejich specializaci. Specifické přístroje jsou pro kardiologii, jiné nároky jsou kladeny na oftalmologická, neurologická, urologická či porodnicko-gynekologická diagnostická vyšetření nebo přístrojové vybavení pro novorozenecké či pediatrické indikace. (Vomáčka a kol., 2012)

Existují dva základní typy ultrasonografie.

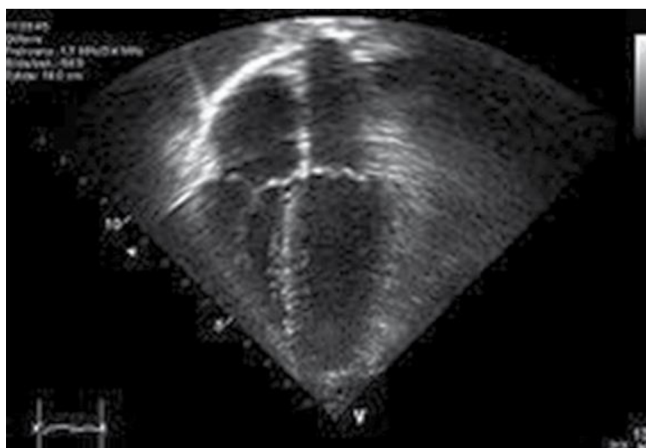
a) Konvenční ultrasonografie

- A mód – je jednorozměrné zobrazení, při kterém jsou na stínítku patrné amplitudy odražených signálů.
- B mód – je jednorozměrné zobrazení, při kterém se amplitudy odražených signálů převádějí do stupňů šedi.
- M mód – je způsob jednorozměrného zobrazení umožňující zachycení pohybujících se struktur, nejčastěji srdce.
- 3D mód – moderním zobrazením je trojrozměrná rekonstrukce řady dvojrozměrných snímků.

b) Dopplerovská ultrasonografie

- CW mód – je jednodušší na technické řešení, dává však informaci pouze o průměrné rychlosti podél ultrazvukového paprsku.

- PW mód – umožňuje měřit navíc změnu frekvence mezi vysílaným a přijímaným signálem, ale i dobu, za jakou se odražený signál vrátil k sondě. (Seidl, 2012)



Obrázek 14 Příklad - ultrazvuk srdce v M módu

Zdroj: Seidl, 2012

1.3.2.2 Rentgenové vyšetření

Jedná se o bezpečnou a bezbolestnou diagnostickou metodu, jejíž podstatou je průchod a pohlcování rentgenového záření tkáněmi. Čím hustější tkáň je, tím více záření pohltí a na výsledném snímku je tak světlejší (např. kost). Pro přesnější zobrazení některých orgánových systémů, hlavně trávicího a vylučovacího traktu, je občas nutné podání kontrastní látky. (MOÚ)



Obrázek 15 Příklad RTG ruky

Zdroj: Vomáčka a kol., 2012

1.3.2.3 Skiografie

Skiografie je diagnostická zobrazovací metoda, která používá rentgenové záření pro zobrazení struktur lidského těla (měkké i tvrdé tkáně). Pracuje na principu rozdílné hodnoty pohlcení svazku RTG záření, který prochází různými tkáněmi. Výsledný obraz je zachycován na rentgenový film nebo detekční systém přístroje. Ze získaného obrazu je možné odhadnout vnitřní stavbu nebo poranění vyšetřovaného orgánu nebo struktury. Tato metoda má nejčastější využití při vyšetřování kostí, zubů a kloubů. Je ale i možné zobrazit měkké tkáně, jako jsou např. svaly nebo plíce. (Wikiskripta, 2018)

1.3.2.4 Skiaskopie

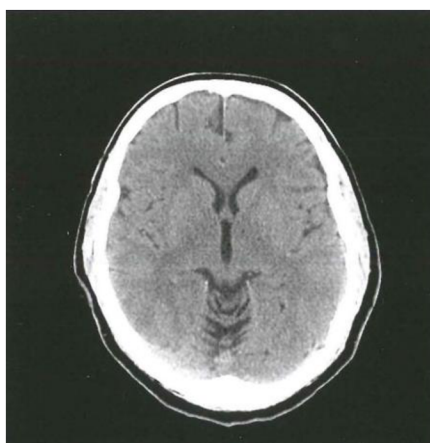
Skiaskopie je diagnostická a intervenční radiologická metoda, která umožňuje dynamické zobrazení RTG obrazu. Touto metodou lze zachytit např. peristaltiku jícnu, žaludku, střev, dále je možné pozorovat dýchací pohyby nebo pulzaci srdce. Tato metoda umožňuje zobrazení lidského těla v reálném čase. Často se využívá kontrastní látka a díky ní můžeme sledovat dynamické procesy v tkáních, které jinak nejsou odlišitelné od ostatních tkání. Z důvodu využívání RTG záření, nese toto vyšetření při nadměrném opakování rizika pro lidský organismus, proto je velmi důležitá správná indikace ošetřujícím lékařem. (Wikiskripta, 2022)

1.3.2.5 Výpočetní tomografie (CT)

Výpočetní tomografie záhy po svém objevu ke konci sedmdesátých let 20. století ovládla radiologii. Její využití v diagnostice je velmi širokého spektra, významné je využití také k terapeutickým výkonům. Jedná se radiologickou vyšetřovací metodu, která pomocí rentgenového záření umožňuje zobrazení vnitřních orgánů člověka. Přístroj, který takové vyšetření umožňuje, se nazývá výpočetní tomograf. (Seidl, 2012) Jde o dynamickou metodu s excelentní prostorovou rozlišovací schopností umožňující provádět virtuální 3D nebo dynamická 4D vyšetření (např. kardiovaskulární diagnostika). (Vomáčka a kol., 2012)

Základní princip této metody zobrazení závisí na tom, že využívá vlastností RTG záření, především jeho schopnosti se absorbovat v tkáních s různým složením. Oslabené RTG záření dopadne na detektory, kde je zaregistrováno a převedeno na elektrický

signál a ten je poté odeslán ke zpracování do výkonného počítače. CT umožňuje zobrazit intenzitu absorpce RTG záření, a to pomocí hodnot denzity v Hounsfieldových jednotkách (HU). Hounsfieldova škála nám umožní stanovit denzity tkání, které jsou zobrazovány nebo materiálů, které mohou mít různé složení. (Vomáčka a kol., 2012) CT se uplatňuje jako metoda první volby u akutních polytraumat, v řadě případů pak při vyšetřování mozku z mnoha indikačních kritérií. CT páteře se provádí zejména v rámci traumat. V obecné rovině se pomocí CT diagnostikuje čerstvé krvácení, abscesy kdekoli v těle, ale i řada nádorových onemocnění především parenchymových orgánů včetně průkazu případných metastáz. (Vomáčka a kol., 2012)



Obrázek 16 Příklad - nativní CT mozku

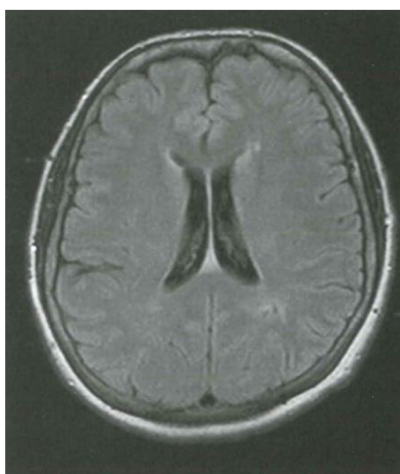
Zdroj: Vomáčka a kol., 2015

1.3.2.6 Magnetická rezonance

Magnetická rezonance je založena na jiném principu, než je zobrazování RTG zářením. Nevyžaduje proto žádná opatření ve smyslu radiační ochrany. Pacient je uložen do velmi silného magnetického pole, poté je vyslán krátký radiofrekvenční impulz a po jeho skončení se snímá magnetický signál, který vytvářejí jádra atomů vodíku v pacientově těle. Signál se potom měří a využívá k rekonstrukci obrazu. Magnetická rezonance má tyto zásadní přednosti: umožňuje podrobné detailní zobrazení měkkých částí, primárně provádí vyšetření ve třech rovinách, je možné zobrazení mozkových tepen bez podání kontrastní látky a jedná se o neionizující typ vyšetření. Speciálními

vyšetřovacími postupy jsou mozková difuze, funkční MR, MR spektroskopie a PET-MR. (Vomáčka a kol., 2012)

Z fyzikálního hlediska jsou samozřejmě nejlépe zobrazitelné části, které obsahují nejvíce protonů vodíku, a zvláště tkáně obsahující velké procento vody – tedy hlavně parenchymatózní orgány, měkké tkáně (chrupavka, svaly, vazy, kostní dřeň), dále fluidní struktury, jako je likvor, moč, žluč, a samozřejmě proudící krev. Nevhodné k zobrazení jsou např. kompakta skeletu, kalcifikace, kovy, kde procento volných protonů vodíku je minimální. (Vomáčka a kol., 2012)



Obrázek 17 Příklad - MR mozku

Zdroj: Vomáčka a kol., 2012

1.3.2.7 Intervenční radiologie

Angiografie je diagnostické vyšetření cév a jedná se o zobrazovací metodu, která využívá RTG záření. Intervenční radiologie a intervenční kardiologie jsou metody, díky kterým lze nahradit chirurgický výkon. Jde o více nebo méně invazivní zákroky.

Intervenční radiologické metody jsou vaskulární a nevaskulární.

Vaskulární intervence jsou léčebné mini-invazivní postupy, které se uskutečňují na cévním systému nebo skrze něj. Řadíme se všechny výkony intervenční kardiologie, perkutánní transluminální angioplastiku, použití stentů a stentgraftů apod.

Nevaskulární intervence se uskutečňují mimo cévní systém a řadíme mezi ně např. intervence na žlučových cestách. (SÚJB, 2021)

1.3.3 Radioterapie

Radioterapie je léčba ozařováním. Jedná se o využití ionizujícího záření k léčbě nádorů. Cílem ozařování je zničení nádorových buněk. V ideálním případě by se ozařoval pouze nádor, ale ve skutečnosti se nelze vyhnout ozáření okolních tkání, zejména těch, které jsou v dráze záření před nádorem. Radioterapie se zpravidla neaplikuje na oblast celého těla. Může být využita jako samostatná metoda onkologické léčby nebo spolu s chemoterapií k posílení jejího efektu (chemoradioterapie). Dle umístění zdroje záření rozlišujeme teleradioterapii a brachyterapii. U teleradioterapie je zdroj ionizujícího záření umístěn mimo tělo pacienta. Nejčastějším ozařovacím přístrojem je lineární urychlovač, který ozařuje pomocí gama záření. U brachyradioterapie se zdroj záření umísťuje do blízkosti nádoru nebo přímo do postižené tkáně. Hlavním smyslem brachyradioterapie je možnost zvýšení dávky záření bez většího ozáření zdravých tkání a orgánů a tím snížit riziko nežádoucích účinků. (MOÚ)

Praktická část této práce se bude zabývat vyšetřeními v rámci nukleární medicíny a CT vyšetřeními.

2 Praktická část

2.1 Cíle práce

Stanovila jsem 3 základní cíle práce:

1. Provést odhad průměrných dávek z lékařského ozáření na oddělení nukleární medicíny a na oddělení radiodiagnostiky.
2. Odhadovat průměrné roční dávky českého obyvatelstva z lékařských zdrojů.
3. Stanovit riziko možných stochastických účinků.

2.2 Výzkumné otázky

Na základě vytyčených cílů byly stanoveny následující výzkumné otázky:

1. Jaké jsou efektivní dávky z lékařského ozáření různých typů vyšetření?
2. Jaké jsou roční počty jednotlivých vyšetření v ČR?
3. Jaká je pravděpodobnost vzniku stochastických účinků způsobených lékařským ozářením?

2.3 Metodika výzkumu

Výchozím bodem realizovaného výzkumu je snaha odhadnout, jaké efektivní dávky obdrželi pacienti při lékařském diagnostickém ozáření na oddělení nukleární medicíny (např. scintigrafie skeletu, myokardu) a na oddělení radiodiagnostiky (např. CT mozku, CT břicha). Výsledky budou kombinované se statistickými daty o tom, kolik osob (muži/ženy, v různých věkových kategoriích) podstoupilo takové vyšetření za rok a z toho bude odhadována průměrná efektivní dávka obyvatelstva.

Při hledání odpovědi na výzkumnou otázku č. 1 byl proveden kvantitativní výzkum a sběr dat z oddělení nukleární medicíny a radiodiagnostiky. V rámci nukleární medicíny je do výzkumu zahrnuto diagnostické vyšetření skeletu, myokardu (perfúzní scintigrafie myokardu), plic (perfúzně-ventilační scintigrafie plic) a ledvin (dynamická scintigrafie ledvin). V rámci radiodiagnostiky se jedná o CT mozku nativně, CT břicha nativně, CT hrudníku nativně a CT LS páteře nativně. Jsou to vyšetření, které se na oddělení nukleární medicíny a na oddělení radiodiagnostiky provádějí nejčastěji. Do tohoto výzkumu byl zahrnut následující počet pacientů: 96 pacientů – scintigrafie skeletu, 51

pacientů – perfuzní scintigrafie myokardu, 166 pacientů – perfuzní a ventilační scintigrafie plic, 12 pacientů – dynamická scintigrafie ledvin, 226 pacientů – CT mozku nativně, 91 pacientů – CT břicha nativně, 33 pacientů – CT hrudníku nativně a 46 pacientů – CT LS páteře nativně.

Jedním z cílů této práce byl odhad průměrných dávek z lékařského ozáření na oddělení nukleární medicíny a na oddělení radiodiagnostiky. V oblasti nukleární medicíny jsem musela vypočítat průměrnou aplikovanou aktivitu u pacientů, kteří výše zmíněná vyšetření absolvovali. Pro odhad těchto dávek jsem si vybrala pacienty, kteří toto vyšetření absolvovali v měsíci lednu roku 2022. Odhad efektivní dávky E z vyšetření v nukleární medicíně jsem provedla výpočtem E z aplikovaného radiofarmaka. Při všech vyšetřeních jsem také provedla odhad ekvivalentní dávky H_T na nejvíce zatížený orgán.

U pacientů, kteří podstoupili CT vyšetření, jsem také provedla odhad efektivní dávky E. U těchto CT vyšetření jsem musela vypočítat průměrnou hodnotu DLP u pacientů, kteří zmíněná vyšetření absolvovali. Pro odhad dávek CT vyšetření, jsem si také vybrala pacienty, kteří podstoupili daná vyšetření v lednu roku 2022. Odhad efektivní dávky E z CT vyšetření jsem provedla výpočtem E z příslušné hodnoty DLP.

Pro porovnání jsem použila údaje z Reportu UNSCEAR 2020/2021. Porovnávala jsem u scintigrafií průměrné aplikované aktivity a efektivní dávky, ekvivalentní dávky UNSCEAR neuvádí. V rámci CT vyšetření jsem porovnávala průměrné efektivní dávky. Hodnoty DLP UNSCEAR neuvádí. Dále jsem průměrné efektivní dávky porovnávala s hodnotami SÚJB uvedené v dokumentu s názvem „*Hodnocení lékařského ozáření*“ z roku 2021. Analýza uvedená v tomto dokumentu je zpracována z údajů, které byly poskytnuty od zdravotních pojišťoven.

U všech vyšetření v rámci nukleární medicíny i CT vyšetření jsem pacienty rozdělila na muže a ženy, vypočítala jejich průměrnou váhu, výšku a věk.

Dalším cílem této práce bylo zjistit, jaké jsou roční počty vyšetření v ČR a odhadnout roční dávky českého obyvatelstva z lékařského ozáření. K tomuto účelu mi byla

poskytnuta data od ÚZIS. Zdroj těchto poskytnutých dat je Národní registr hrazených služeb (NRHVS). Výstup od ÚZIS zahrnuje počet vykázaných zdravotních výkonů a počet osob, u kterých byly výkony vykázaný. Data neobsahují informace o pacientech mimo veřejné zdravotní pojištění (část cizinců, přímo placená péče).

V datech jsou obsaženy následující výkony:

- 47219 – scintigrafie ledvin dynamická včetně stanovení GF resp. ERPF,
- 47241 – scintigrafie skeletu,
- 47257 – scintigrafie plic perfúzní,
- 47261 – scintigrafie plic ventilační dynamická,
- 47269 – tomografická scintigrafie – SPECT (perfuze myokardu),
- 89611 – CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní,
- 89613 – CT vyšetření bez použití kontrastní látky do 30 skenů,
- 89615 – CT vyšetření s větším počtem skenů (nad 30), bez použití kontrastní látky.

V rámci této analýzy se jedná o pacienty, kteří daná vyšetření podstoupili v letech 2018 a 2021. Tyto roky jsem mezi sebou porovnála a odhad efektivní dávky jsem provedla výpočtem z počtu vyšetření a průměrné efektivní dávky, které byly zjišťovány v rámci první výzkumné otázky.

2.4 Metodika odhadu efektivních dávek

V rámci vyšetření v nukleární medicíně jsem provedla odhad efektivní dávky E a ekvivalentní dávky H_T na nejvíce zatížený orgán vynásobením aktivity podaného radiofarmaka a koeficientu pro přepočítání těchto dávek. Tyto koeficienty najdeme ve Věstníku Ministerstva zdravotnictví České republiky z roku 2016.

Příklad:

Scintigrafie skeletu

Pacientovi o hmotnosti 75 kg aplikujeme aktivitu radiofarmaka pro scintigrafii skeletu 730 MBq. Hodnotu aplikované aktivity 730 MBq vynásobíme s koeficientem uvedeným ve Věstníku MZČR z roku 2016. Hodnota tohoto koeficientu pro scintigrafii skeletu pro

dospělého člověka je 0,0057 mSv/MBq. Vynásobením těchto dvou hodnot získáme hodnotu efektivní dávky $E = 4,161$ mSv.

Pro výpočet ekvivalentní dávky H_T na nejvíce zatížený orgán potřebujeme opět koeficient uvedený ve Věstníku MZČR z roku 2016. Tzn., aplikovanou aktivitu 730 MBq vynásobíme koeficientem 0,063 mGy/MBq a získáme hodnotu ekvivalentní dávky H_T na nejvíce zatížený orgán (povrchy kostí) = 45,99 mSv.

V rámci CT vyšetření jsem provedla odhad efektivní dávky E z hodnot DLP (Dose Length Parameter) a normalizovaných hodnot E_{DLP} . Normalizované hodnoty E_{DLP} (uváděné v jednotkách $mSv \cdot mGy^{-1} \cdot cm$) jsou pro oblast hlavy 0,0021, oblast hrudníku 0,014 a oblast břicha 0,015 (uvedeno v UNSCEAR Report 2020/2021).

Efektivní dávka z CT vyšetření se vypočítá pomocí vztahu $E = E_{DLP} \cdot DLP$.

Hodnota DLP se vypočítá jako součin kermy a délky v jednotkách mGy.cm. Pro odhad efektivní dávky jsem získala hodnoty DLP z protokolů vyšetřených pacientů.

Příklad:

CT břicha nativně

Z protokolu pacienta, kterému bylo provedeno CT břicha nativně, jsem si zjistila hodnotu DLP – 321 mGy.cm. Tuto hodnotu DLP vynásobíme normalizovanou hodnotou E_{DLP} pro oblast břicha – 0,015 $mSv \cdot mGy^{-1} \cdot cm$. Výsledná efektivní dávka pro tohoto pacienta je $E = 4,815$ mSv.

Výsledné hodnoty aplikované aktivity, hodnoty DLP, efektivní dávky E z nukleárních vyšetření, efektivní dávky E z CT vyšetření a ekvivalentní dávky H_T pro nejvíce zatížené orgány jsou aritmetickým průměrem ze souboru zkoumaných pacientů pro jednotlivá vyšetření.

Dále jsem v rámci druhé výzkumné otázky provedla odhad kolektivních efektivních dávek za roky 2018 a 2021. V rámci nukleární medicíny byl proveden odhad kolektivní efektivní dávky z počtu vyšetření a průměrné efektivní dávky na jedno vyšetření, zjišťované v rámci první výzkumné otázky (rozděleno na muže a ženy).

Pro odhad kolektivních efektivních dávek z CT vyšetření, jsem nejprve musela provést odhad počtu daných vyšetření za roky 2018 a 2021. SÚJB uvádí celkový počet vyšetřených pacientů 1 208 100 za rok 2019. Z této hodnoty jsem provedla výpočet, kolik procent z celkového počtu vyšetřených pacientů tvoří CT vyšetření mozku, břicha, hrudníku a LS páteře. Pro výpočet kolektivních efektivních dávek za roky 2018 a 2021 jsem uvažovala přibližně stejné procentuální zastoupení počtu provedených vyšetření a z toho následně vypočetla kolektivní efektivní dávku z počtu vyšetření a průměrné efektivní dávky zjištěné v rámci první výzkumné otázky. Server „*Statista*“ uvádí celkový počet CT vyšetření 1 178 430 za rok 2018 a 1 155 940 vyšetření za rok 2021. Z těchto celkových hodnot byl proveden odhad počtu jednotlivých CT vyšetření. Odhad je proveden u mužů a žen dohromady. Podle údajů SÚJB lze předpokládat, že procentuální zastoupení jednotlivých CT vyšetření je každý rok velmi podobné a z toho jsem také vycházela.

Postup odhadu:

Pro odhad podílů vyšetření CT hlavy, břicha, hrudníku a LS páteře jsem použila informace, které mi byly poskytnuty z nejmenované nemocnice, ve které jsem prováděla sběr dat. Za rok 2018 bylo provedeno 8 647 CT vyšetření a za rok 2021 bylo provedeno 8 580 vyšetření. V tomto případě procentuální zastoupení jednotlivých CT vyšetření přibližně sedí s údaji SÚJB a serveru „*Statista*“ (viz níže). Nejedná se o víceletou statistiku, v tomto případě jde o analýzu náhodného vzorku.

Dle SÚJB bylo za rok 2019 provedeno 1 208 100 vyšetření. Z toho jsem provedla procentuální odhad, kolik bylo z celkového počtu provedeno CT vyšetření hlavy, břicha, hrudníku a LS páteře nativně. Výsledkem je, že z celkového počtu (100 %) tvoří CT vyšetření hlavy 40 % (487 tis.), hrudníku 15 % (187 tis.), páteře 5 % (63 tis.) a břicha 11 % (134 tis.).

Dle serveru „*Statista*“ bylo za rok 2018 provedeno 1 178 430 vyšetření a za rok 2021 1 155 940 vyšetření. Podle předchozího procentuálního odhadu jsem předpokládala, že procentuální zastoupení počtu CT vyšetření hlavy, břicha, hrudníku a LS páteře je přibližně stejné, a proto za rok 2018 z celkového počtu (100 %) je výsledkem cca 40 %

CT hlavy (cca 471 tis.), cca 15 % CT hrudníku (cca 176 tis.), cca 5 % CT LS páteře (cca 58 tis.) a cca 11 % CT břicha (cca 129 tis.). Za rok 2021 jsem postupovala úplně stejně, a proto je výsledkem cca 40 % CT hlavy (cca 462 tis.), cca 15 % CT hrudníku (cca 173 tis.), cca 5 % CT LS páteře (cca 57 tis.) a cca 11 % CT břicha (cca 127 tis.).

Jedná se pouze o odhadované počty, pro přesné počty daných CT vyšetření nejsou nikde statistiky dostupné.

2.5 Metodika odhadu pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků

V dnešní době se odhadu pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků po lékařském ozáření věnuje velké množství institucí. Pravděpodobnost rakoviny indukované lékařským diagnostickým ozářením je odhadována na základě výsledků epidemiologických studií, zvláště „life span study“ (LSS) v Hirošimě a Nagasaki. Tuto pravděpodobnost není možno brát za absolutní, protože indukci rakoviny může ovlivnit celá řada faktorů, jako je např. věk, pohlaví, možná individuální radiosenzitivita, radiační expozice kombinovaná s expozicí dalším enviromentálním faktorem atd. U souboru pacientů, kteří podstoupili vyšetření v rámci nukleární medicíny a CT vyšetření v rámci radiodiagnostiky, byl proveden výpočet relativní pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků (rakoviny). Výpočet byl proveden v programu „X-ray risk“, který má k dispozici modely pro odhad vzniku rakoviny a velkou databázi zaznamenaných vyšetření. Pro výpočet odhadu pravděpodobnosti tento program vyžaduje zadání pohlaví, věku, počtu výkonů a efektivní dávku. U CT vyšetření je vhodné vyplnit i hodnotu DLP (vzorově ukázáno na obr. č. 18). U tohoto programu je stanoveno celkové celoživotní riziko vzniku rakoviny 37,5 % (1 ze 3) u žen a 44,9 % (1 ze 2) u mužů a není zohledňována doba, která uběhla od absolvovaného lékařského ozáření. Tento program nebere v úvahu jednotlivé rizikové faktory, jako je životní styl (kouření, strava, cvičení), dále rodinnou zátěž (genetika) nebo radiační expozice mimo lékařského ozáření. Většina nádorových onemocnění se vyskytuje až později v životě a průměrné celoživotní riziko úmrtí na rakovinu je 25 % (1 ze 4). Nedávná studie naznačuje, že ozáření z lékařského zobrazování může být zodpovědné za 1-3 % rakovin na celém světě. (X-ray risk) Bohužel ale jinak neexistují žádné publikované studie,

kteře by prokázaly přímou souvislost výskytu rakoviny po absolvování lékařského ozáření.

Risk Calculator



Plain Films (x-rays)
CT Scans
Brain CT (Standard)
Brain and Neck CTA/CTP
Neck CT
Thoracic Spine CT
Lumbar Spine CT
Chest CT (Low Dose Screening)
Chest CT (PE Study)
Chest CT (Standard)
Cardiac CT (Coronary CTA)
Cardiac CT (Calcium Scoring)
Abdomen CT
Abdomen CT (Dedicated Liver)
Abdomen and Pelvis CT
Chest, Abdomen and Pelvis CT
Pelvis CT
Sinus CT
Virtual Colonoscopy CT
Dental CT
Fluoroscopy
Nuclear Medicine
Interventional Procedures
MRI and Ultrasound

Please see [Glossary](#) for description of different

Study:	Abdomen CT
Gender:	Male <input checked="" type="radio"/> Female <input type="radio"/>
Age at Time of Study:	<input type="text"/> (years)
Number of Exams:	<input type="text" value="1"/>
Effective Dose:	<input type="text" value="8.000"/> (mSv)
DLP (Optional for CT):	<input type="text" value="Optional"/> (mGy · cm)
<input type="button" value="Calculate"/>	

Total Effective Dose:	<input type="text" value="0"/> (mSv)
Additional Cancer Risk:	<input type="text" value="0.000000"/> (%)
Baseline Cancer Risk:	<input type="text"/> (%)
Baseline + Additional Risk:	<input type="text"/> (%)

To learn more about how these calculations are made, see the [About](#) page.

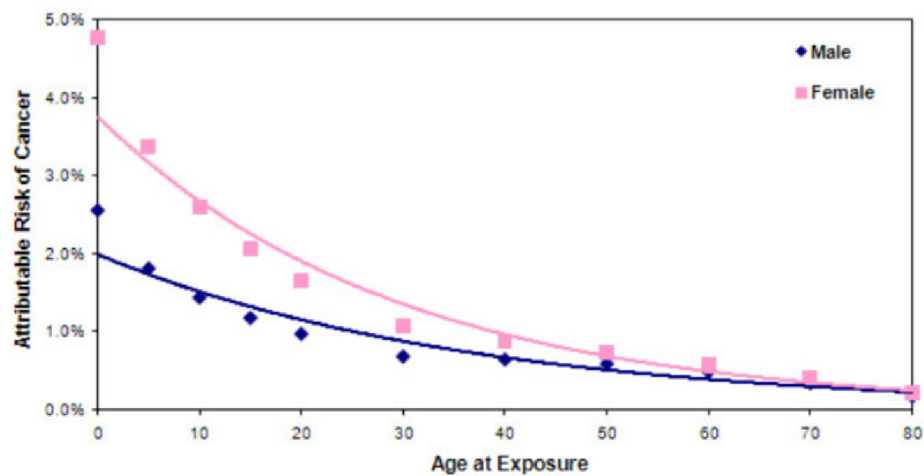
Obrázek 18 X-ray risk calculator

Zdroj: *X-ray risk.com*

V rámci mého výzkumu jsem provedla odhad rizika pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků pro skupinu vyšetřených pacientů v rámci každého vyšetření. Pro výpočet jsem použila jejich průměrný věk a průměrnou efektivní dávku na jedno vyšetření. U CT vyšetření ještě průměrnou hodnotu DLP. Výsledky ale nelze brát závazně, neboť riziko pro pacienta průměrného věku není nutně průměrné riziko všech pacientů. A protože věk je v tomto případě nejdůležitější faktor, je dobré si pro představu ukázat graf věkové závislosti (obr. č. 19).

Graph 1: Lifetime Attributable Risk of Cancer from Exposure to Radiation

Number of cases per 100,000 persons exposed to a single dose of 0.1 Gy



Adapted from the National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. BEIR VII Phase 2. Washington, DC: National Academies Press; 2006.

Obrázek 19 Graf věkové závislosti pravděpodobnosti vzniku rakoviny

Zdroj: X-ray risk.com

2.6 Výsledky

2.6.1 Scintigrafie skeletu

Tabulka 6 Rozdělení mužů a žen - scintigrafie skeletu

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	46	89,1	175,7	69,8
Ženy	50	79,2	164,1	63,9

Zdroj: vlastní výzkum

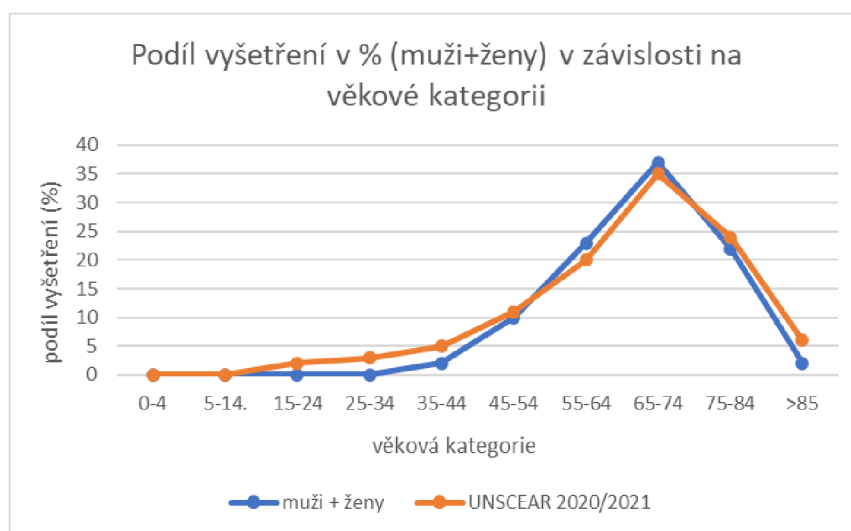
V tabulce č. 6 najdeme počet, kolik bylo provedeno scintigrafií skeletu za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhлено na jedno desetinné místo).



Graf 1 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - scintigrafie skeletu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 1 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 1 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 71-80 let (22 z celkového počtu 46) a nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 61-70 let (16 z celkového počtu 50). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkových kategoriích 0-10, 11-20, 21-30 a 91 a více let.

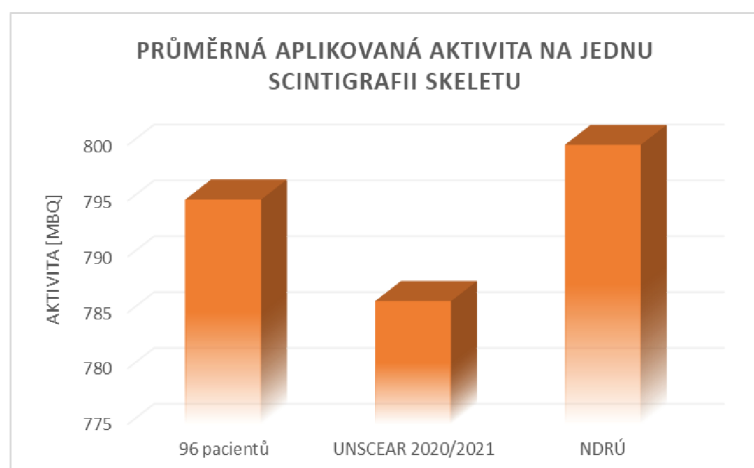


Graf 2 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) – scintigrafie skeletu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 2 najedeme porovnání věku vyšetřených mužů a žen dohromady v závislosti na věkové kategorii (scintigrafie skeletu). UNSCEAR Report z let 2020/2021 uvádí, že vyšetření v nukleární medicíně se provádí nejčastěji u pacientů ve věkovém rozmezí 65-74 let. Z grafu č. 2 vyplývá, že nejvíce vyšetřených mužů a žen je ve stejné věkové kategorii, což je se shoduje s údaji UNSCEAR. Pro porovnání s údaji UNSCEAR jsem použila věkové kategorie, které uvádí v Reportu 2020/2021.

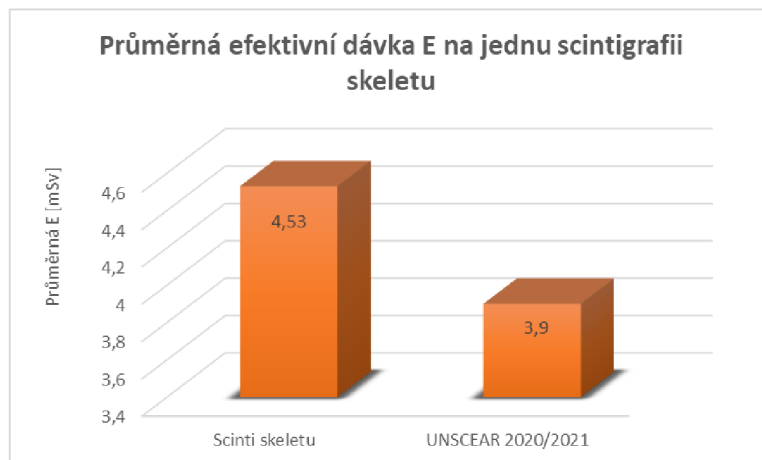
Pro výpočet průměrné aplikované aktivity na jedno vyšetření jsem pracovala se souborem 96 pacientů. Aplikovaná aktivita na jednu scintigrafii skeletu (HDP) je průměrně 795,09 MBq. Ze zkoumaného souboru pacientů byla nejvyšší aplikovaná aktivita 1080 MBq a nejmenší aplikovaná aktivita 520 MBq. Průměrná aplikovaná aktivita na jednu scintigrafii skeletu u mužů (46 mužů) je 824,24 MBq a u žen (50 žen) je 768,28 MBq. Efektivní dávka E z aplikovaného radiofarmaka je 4,7 mSv u mužů a 4,38 mSv u žen. Ekvivalentní dávka H_T pro povrchy kostí je 51,95 mSv u mužů a 48,42 mSv u žen.



Graf 3 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu scintigrafii skeletu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 3 najdeme porovnání průměrné aplikované aktivity souboru 96 pacientů, průměrnou aplikovanou aktivitou uvedené v Reportu 2020/2021 a s NDRÚ (Národní diagnostická referenční úroveň). Z grafu č. 3 vyplývá, že průměrná aplikovaná aktivita souboru 96 pacientů je o 1,14 % vyšší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu 2020/2021 a zároveň je o 0,6 % nižší, než stanovují NDRÚ (800 MBq).



Graf 4 Průměrná efektivní dávka E na jednu scintigrafii skeletu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 4 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 96 pacientů a průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021. Z grafu č. 4 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 96 pacientů je lehce vyšší než uvedená v Reportu 2020/2021.

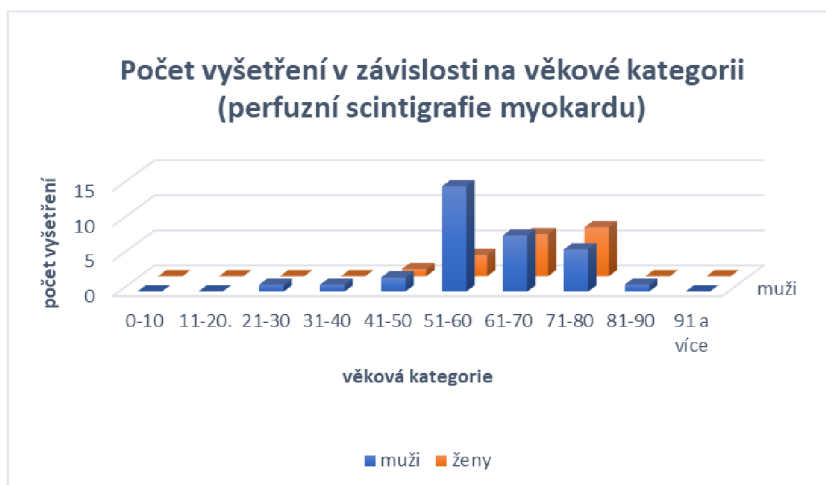
2.6.2 Perfuzní scintigrafie myokardu

Tabulka 7 Rozdělení mužů a žen - perfuzní scintigrafie myokardu

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	34	96,6	177,6	69,8
Ženy	17	74,5	165,8	66,2

Zdroj: vlastní výzkum

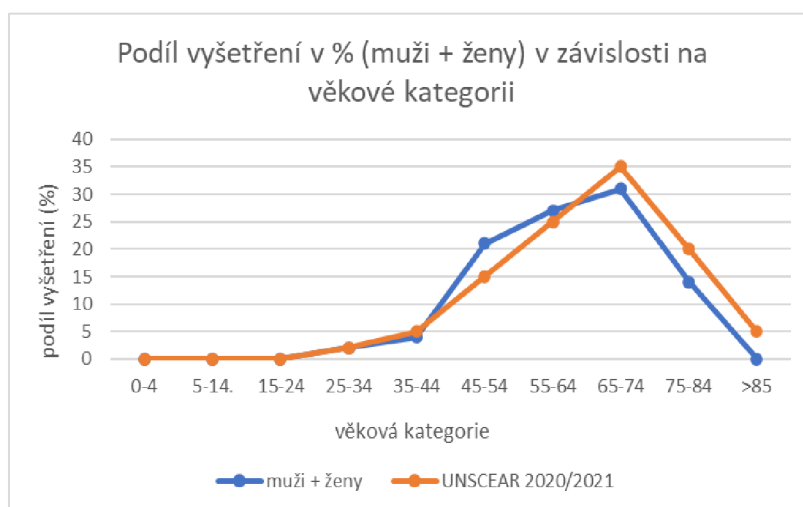
V tabulce č. 7 najdeme počet, kolik bylo provedeno perfuzních scintigrafií myokardu za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhлено na jedno desetinné místo).



Graf 5 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii – scintigrafie myokardu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 5 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 5 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 51-60 let (15 z celkového počtu 34) a nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 71-80 let (7 z celkového počtu 17). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkových kategoriích 0-10, 11-20 a 91 a více let.

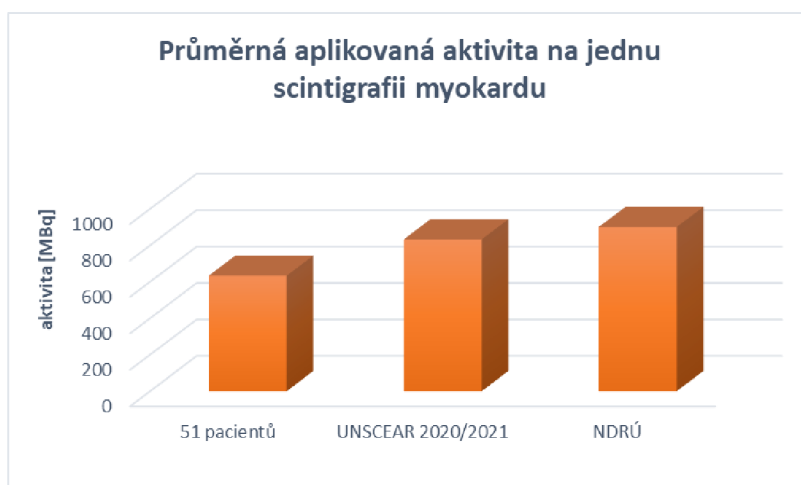


Graf 6 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - scintigrafie myokardu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 6 najedeme porovnání věku vyšetřených mužů a žen dohromady v závislosti na věkové kategorii. UNSCEAR Report z let 2020/2021 uvádí, že vyšetření v nukleární medicíně se provádí nejčastěji u pacientů ve věkovém rozmezí 65-74 let. Z grafu č. 6 vyplývá, že nejvíce vyšetřených mužů a žen je ve stejné věkové kategorii, což je shodné s údaji s UNSCEAR. Pro porovnání s údaji UNSCEAR jsem použila věkové kategorie, které uvádí v Reportu 2020/2021.

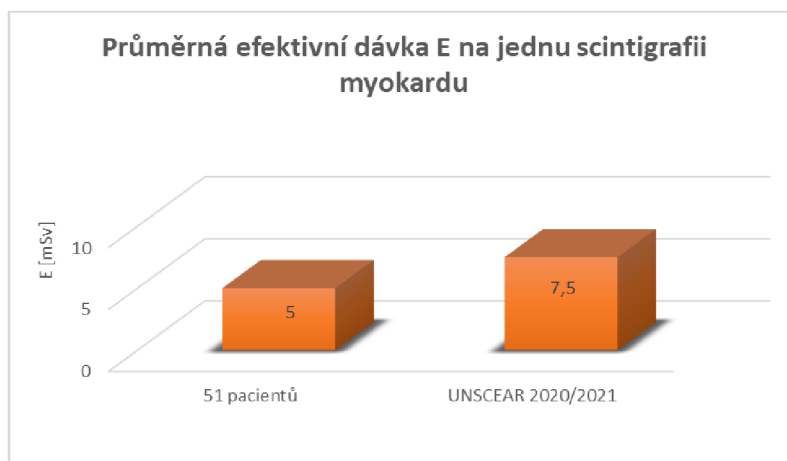
Pro výpočet průměrné aplikované aktivity jsem pracovala se souborem 51 pacientů. Aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii myokardu (MIBI) je průměrně 633,14 MBq. Ze zkoumaného souboru pacientů byla nejvyšší aplikovaná aktivita 920 MBq a nejmenší aplikovaná aktivita 475 MBq. Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii myokardu u mužů (34 mužů) je 660,15 MBq a u žen (17 žen) je 579,12 MBq. Efektivní dávka E z aplikovaného radiofarmaka je 5,22 mSv u mužů a 4,58 mSv u žen. Ekvivalentní dávka H_T pro žlučník je 21,78 mSv u mužů a 19,11 mSv u žen.



Graf 7 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii myokardu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 7 najdeme porovnání průměrné aplikované aktivity souboru 51 pacientů, průměrné aplikované aktivity uvedené v Reportu 2020/2021 a s NDRÚ. Z grafu č. 7 vyplývá, že průměrná aplikovaná aktivita souboru 51 pacientů je 23,9 % nižší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu 2020/2021 a zároveň je o 29,65 % nižší, než stanovují NDRÚ (900 MBq).



Graf 8 Průměrná efektivní dávka E na jednu perfuzní scintigrafii myokardu

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 8 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 51 pacientů a průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021. Z grafu č. 8 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 51 pacientů je nižší než uvedená v Reportu 2020/2021.

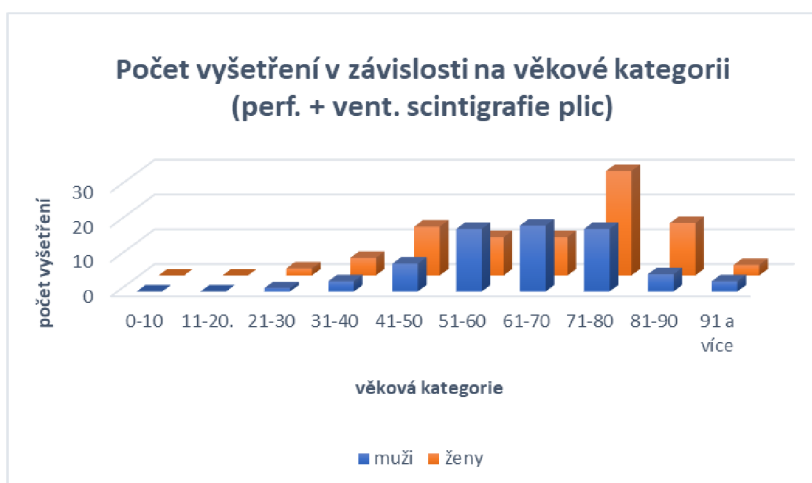
2.6.3 Perfuzně-ventilační scintigrafie plic

Tabulka 8 Rozdělení mužů a žen - perfuzní a ventilační scintigrafie plic

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	75	91,9	176,6	64,1
Ženy	91	78,5	165	66,6

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 8 najdeme počet, kolik bylo provedeno perfuzních a ventilačních scintigrafií plic za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhleno na jedno desetinné místo).



Graf 9 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - perfuzní a ventilační scintigrafie plic

Zdroj: vlastní výzkum

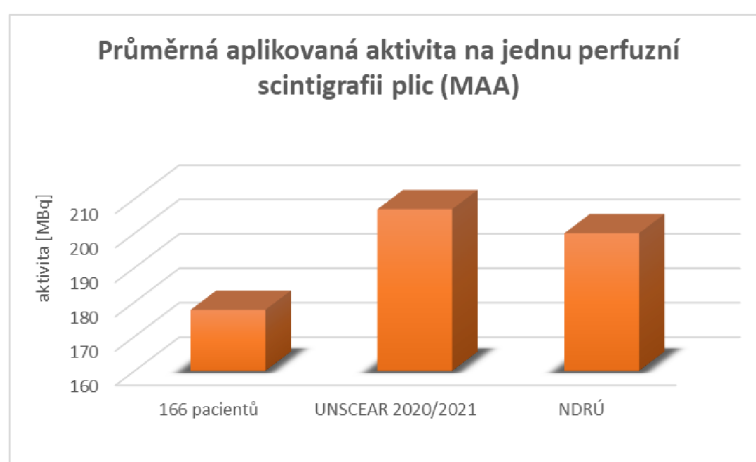
V grafu č. 9 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 9 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 61-70 let (19 z celkového počtu 75) a nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 71-80 let (30 z celkového počtu 91). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkových kategoriích 0-10 a 11-20 let.

Údaje pro porovnání věku Report UNSCEAR 2020/2021 neuvádí.

Pro výpočet průměrné aplikované aktivity MAA jsem pracovala se souborem 166 pacientů. Aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii plic (MAA) je průměrně 177,74 MBq. Ze zkoumaného souboru pacientů byla nejvyšší aplikovaná aktivita 200

MBq a nejmenší aplikovaná aktivita 150 MBq. Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii plic (MAA) u mužů (75 mužů) je 182,27 MBq a u žen (91 žen) je 174,1 MBq. Efektivní dávka E z aplikovaného radiofarmaka (MAA) je 2,01 mSv u mužů a 1,91 mSv u žen. Ekvivalentní dávka H_T pro plíce je 12,03 mSv u mužů a 11,48 mSv u žen.

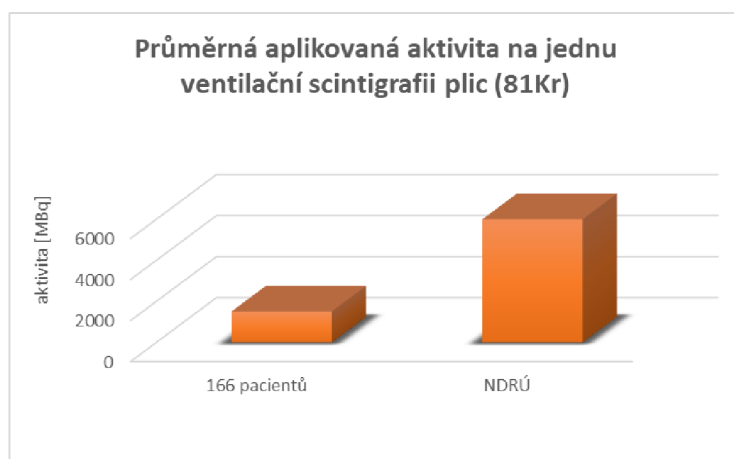
Pro výpočet průměrné aplikované aktivity ^{81}Kr jsem pracovala se souborem 166 pacientů. Aplikovaná aktivita ^{81}Kr se získává výpočtem 18 MBq na 1 kg lidské váhy. Aplikovaná aktivita na jednu ventilační scintigrafii plic (^{81}Kr) je průměrně 1511,47 MBq. Ze zkoumaného souboru pacientů byla nejvyšší aplikovaná aktivita 2646 MBq a nejmenší aplikovaná aktivita 828 MBq. Průměrná aplikovaná aktivita na jednu ventilační scintigrafii plic (^{81}Kr) u mužů (75 mužů) je 1631,79 MBq a u žen (91 žen) je 1412,31 MBq. Efektivní dávka E z vdechovaného aerosolu (^{81}Kr) je 0,05 mSv u mužů a 0,04 mSv u žen. Ekvivalentní dávka H_T pro plíce je 0,34 mSv u mužů a 0,30 mSv u žen.



Graf 10 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii plic

Zdroj: vlastní výzkum

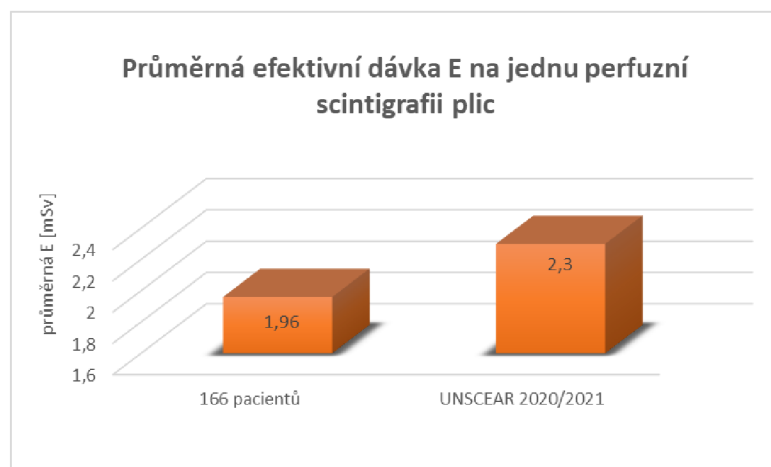
V grafu č. 10 najdeme porovnání průměrné aplikované aktivity souboru 166 pacientů, průměrné aplikované aktivity uvedené v Reportu 2020/2021 a s NDRÚ. Z grafu č. 10 vyplývá, že průměrná aplikovaná aktivita souboru 166 pacientů je 14,14 % nižší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu 2020/2021 a zároveň je o 12,12 % nižší, než stanovují NDRÚ (200 MBq).



Graf 11 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu ventilační scintigrafii plic

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 11 najdeme porovnání průměrné aplikované aktivity souboru 166 pacientů s NDRÚ. Z grafu č. 11 vyplývá, že průměrná aplikovaná aktivita souboru 166 pacientů je o 74,81 % nižší, než stanovují NDRÚ (6000 MBq). UNSCEAR ve svém Reportu 2020/2021 aplikované aktivity ^{81}Kr neuvádí.



Graf 12 Průměrná E na jednu perfuzní scintigrafii plic – porovnání

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 12 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 166 pacientů a průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021. Z grafu č. 12 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 166 pacientů je lehce nižší než uvedená v Reportu 2020/2021. Údaje pro porovnání efektivní dávky E na jednu ventilační scintigrafii plic UNSCEAR v Reportu 2020/2021 neuvádí.

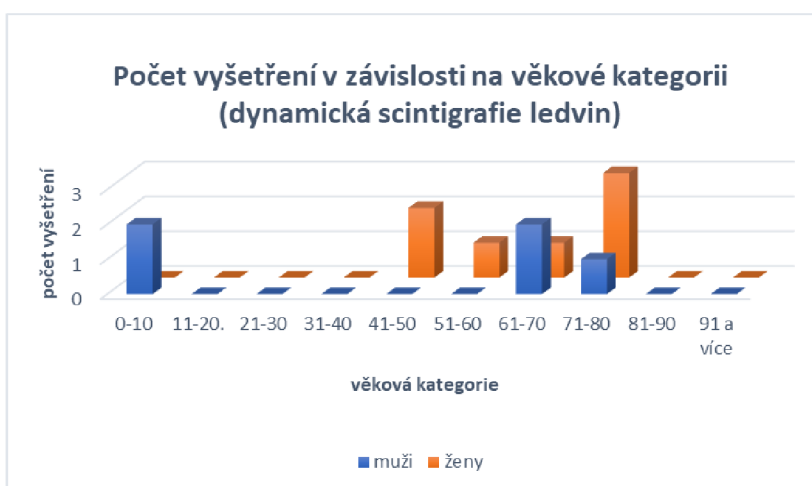
2.6.4 Dynamická scintigrafie ledvin

Tabulka 9 Rozdělení mužů a žen – dynamická scintigrafie ledvin

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	5	70,4	149,6	43,2
Ženy	7	69	163,3	62,6

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 9 najdeme počet, kolik bylo provedeno dynamických scintigrafií ledvin za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhloeno na jedno desetinné místo). Z celkového počtu vyšetřených 5 mužů byly vyšetřeny dvě děti ve věku 8 a 2 let.



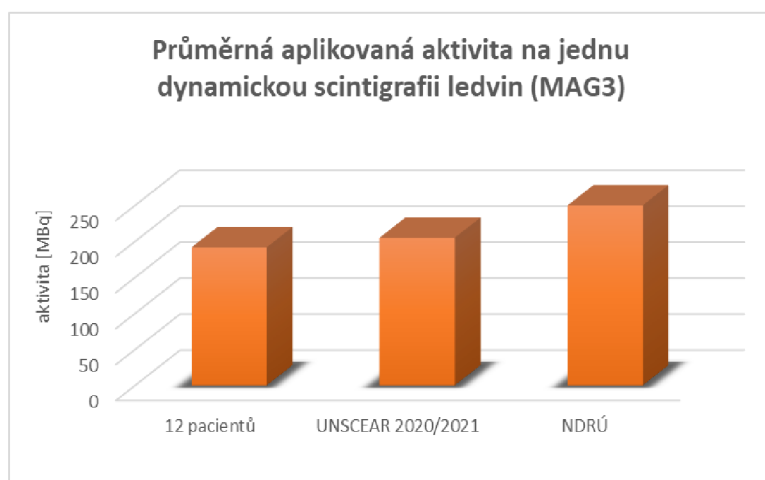
Graf 13 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - dynamická scintigrafie ledvin

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 13 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 13 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 0-10 let (2 z celkového počtu 5) a ve věkové kategorii 61-70 let (2 z celkového počtu 5). Nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 71-80 let (3 z celkového počtu 7). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkových kategoriích 11-20, 21-30, 31-40, 81-90 a 91 a více let.

Údaje pro porovnání věku Report UNSCEAR 2020/2021 neuvádí.

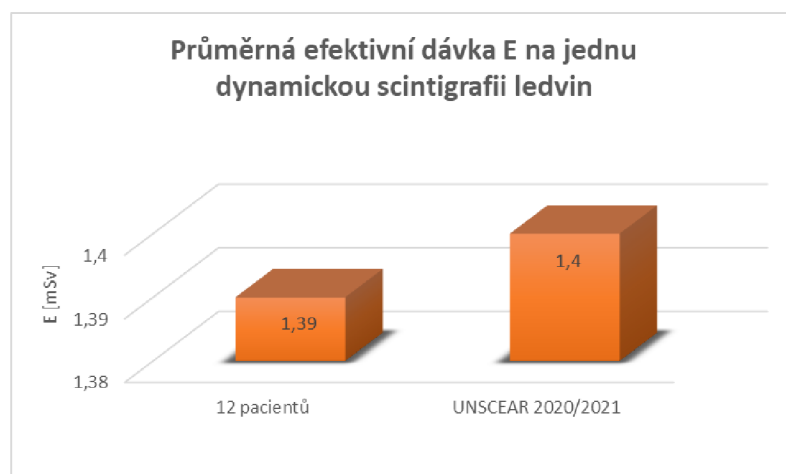
Pro výpočet průměrné aplikované aktivity jsem pracovala se souborem 12 pacientů. Aplikovaná aktivita na jednu dynamickou scintigrafii ledvin (MAG3) je průměrně 191,75 MBq. Ze zkoumaného souboru pacientů byla nejvyšší aplikovaná aktivita 325 MBq a nejmenší aplikovaná aktivita 23 MBq. Průměrná aplikovaná aktivita na jednu dynamickou scintigrafii ledvin u mužů (5 mužů) je 179,2 MBq a u žen (12 žen) je 200,71 MBq. Efektivní dávka E z aplikovaného radiofarmaka (MAG3) je 1,36 mSv u mužů a 1,41 mSv u žen. Ekvivalentní dávka H_T pro močový měchýř je 21,13 mSv u mužů a 22,08 mSv u žen.



Graf 14 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu dynamickou scintigrafii ledvin – porovnání

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 14 najdeme porovnání průměrné aplikované aktivity souboru 12 pacientů, průměrné aplikované aktivity uvedené v Reportu 2020/2021 a s NDRÚ. Z grafu č. 14 vyplývá, že průměrná aplikovaná aktivita souboru 12 pacientů je 6,46 % nižší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu 2020/2021 a zároveň je o 23,3 % nižší, než stanovují NDRÚ (250 MBq).



Graf 15 Průměrná E na jednu dynamickou scintigrafii ledvin – porovnání

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 15 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 12 pacientů a průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021. Z grafu č. 15 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 12 pacientů je téměř totožná jako hodnota uvedená v Reportu 2020/2021.

2.7 Radiodiagnostika

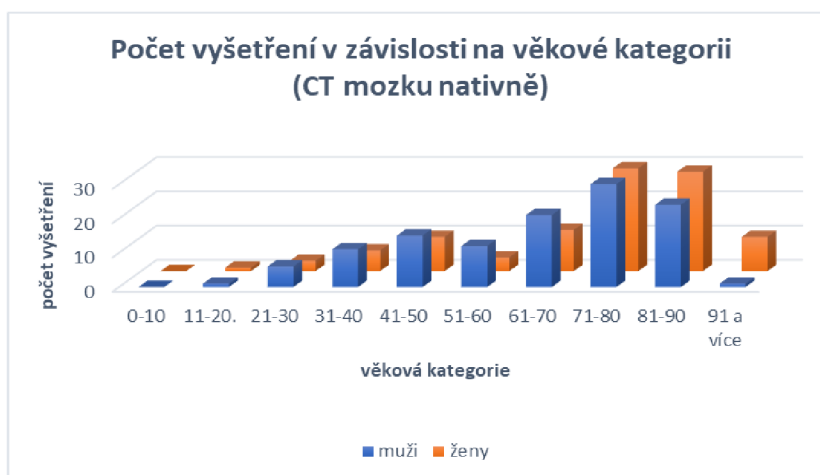
2.7.1 CT mozku nativně

Tabulka 10 Rozdělení mužů a žen – CT mozku nativně

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	121	85,5	176,8	64
Ženy	105	71,1	162,5	71

Zdroj: vlastní výzkum

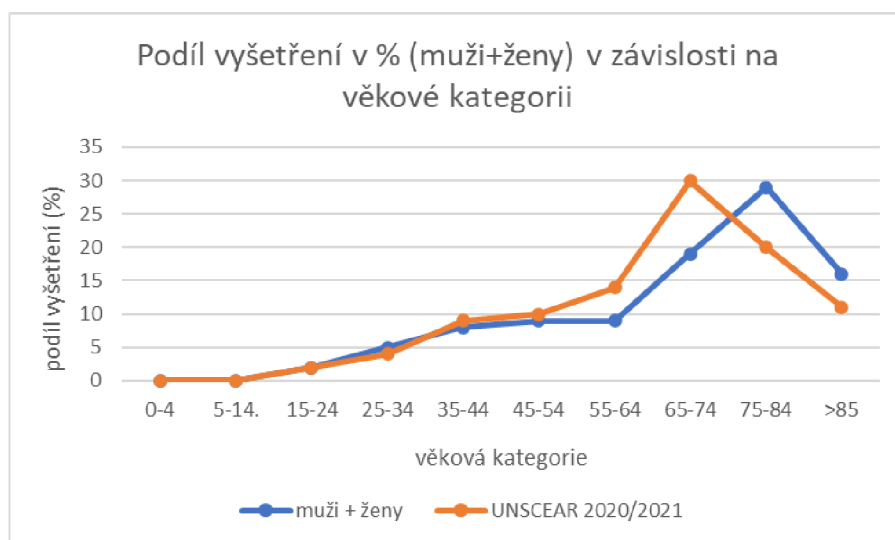
V tabulce č. 10 najdeme počet, kolik bylo provedeno CT mozku nativně za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhлено na jedno desetinné místo).



Graf 16 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - CT mozku nativně

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 16 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 16 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 71-80 let (30 z celkového počtu 121). Nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 71-80 let (30 z celkového počtu 105). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkové kategorii 0-10.

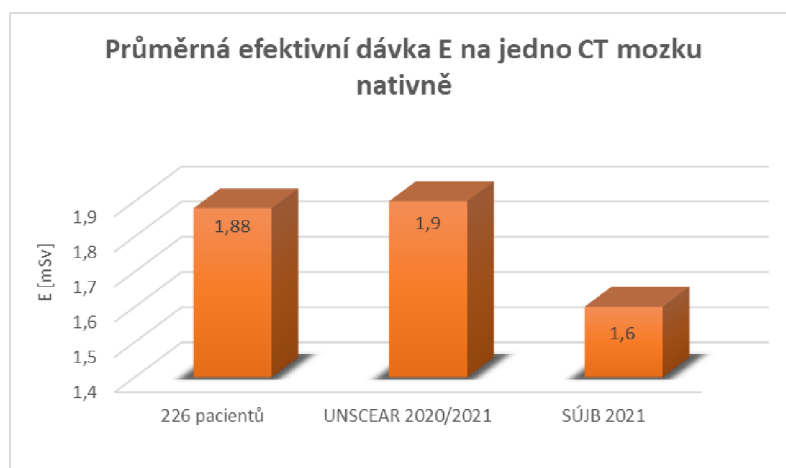


Graf 17 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT mozku nativně

Zdroj: vlastní zpracování

V grafu č. 17 najedeme porovnání věku vyšetřených mužů a žen dohromady v závislosti na věkové kategorii. UNSCEAR Report z let 2020/2021 uvádí, že CT vyšetření se provádí nejčastěji u pacientů ve věkovém rozmezí 65-74 let. Z grafu č. 17 vyplývá, že nejvíce vyšetřených mužů a žen je ve věkové kategorii 75-84, což se lehce liší v porovnání s údaji s UNSCEAR. Pro porovnání s údaji UNSCEAR jsem použila věkové kategorie, které uvádí v Reportu 2020/2021. UNSCEAR uvádí počty pacientů v závislosti na věkových kategoriích pro všechna CT vyšetření dohromady (detailnější data pro jednotlivá vyšetření neuvádí). Tzn., v tomto grafu je porovnán věk pacientů, kteří podstoupili CT mozku nativně (v rámci mého výzkumu) a věk pacientů v rámci všech CT vyšetření.

Pro výpočet průměrné hodnoty DLP jsem pracovala se souborem 226 pacientů. Hodnota DLP na jedno CT mozku nativně je průměrně 895,15 mGy.cm. Ze zkoumaného souboru pacientů byla největší hodnota DLP 1459 mGy.cm a nejnižší 738 mGy.cm. Průměrná hodnota DLP na jedno CT mozku nativně u mužů (121 mužů) je 914,81 mGy.cm a u žen (105 žen) je 872,49 mGy.cm. Efektivní dávka E na jedno CT mozku nativně je 1,92 mSv u mužů a 1,83 mSv u žen.



Graf 18 Průměrná E na jedno CT mozku nativně – porovnání

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 18 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 226 pacientů, průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021 a průměrné efektivní dávky uváděné SÚJB z roku 2021. Z grafu č. 18 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 226 pacientů je téměř totožná jako hodnota uvedená v Reportu 2020/2021. Dále také z grafu vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 226 pacientů je lehce vyšší než průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB.

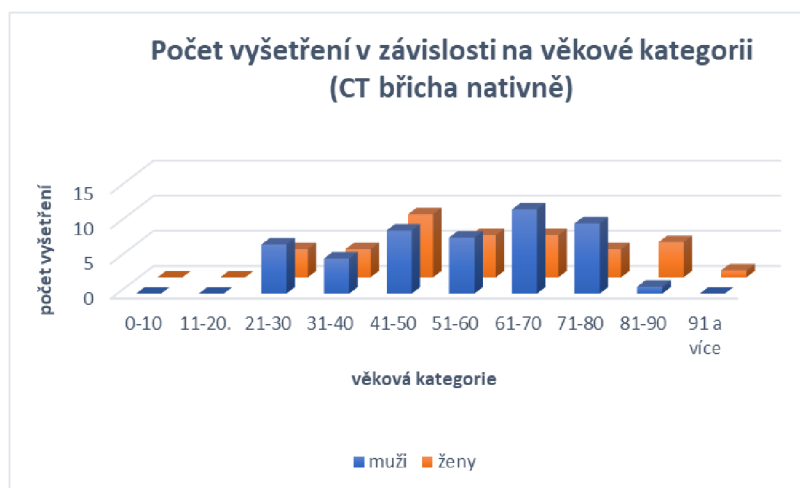
2.7.2 CT břicha nativně

Tabulka 11 Rozdělení mužů a žen - CT břicha nativně

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	52	90,3	177,4	54,7
Ženy	39	81,2	163,5	56,4

Zdroj: vlastní výzkum

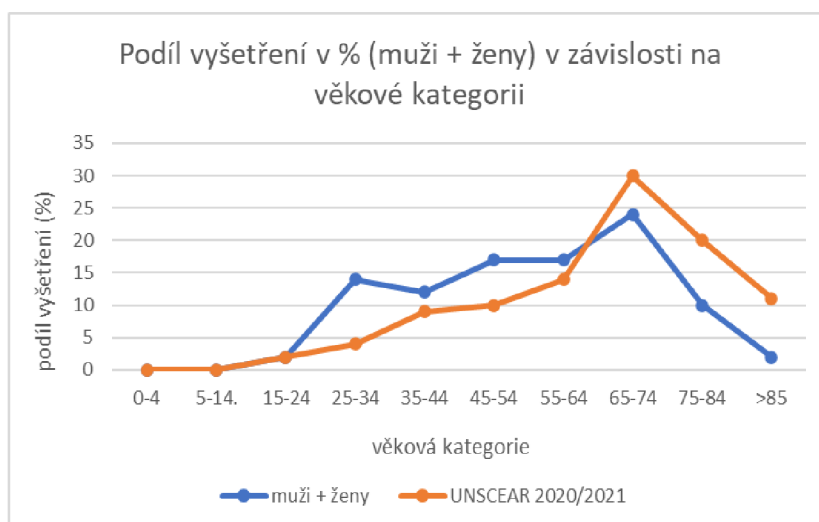
V tabulce č. 11 najdeme počet, kolik bylo provedeno CT břicha nativně za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhлено na jedno desetinné místo).



Graf 19 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - CT břicha nativně

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 19 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 19 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 61-70 let (12 z celkového počtu 52). Nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 41-50 let (9 z celkového počtu 39). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkové kategorii 0-10 a 11-20.

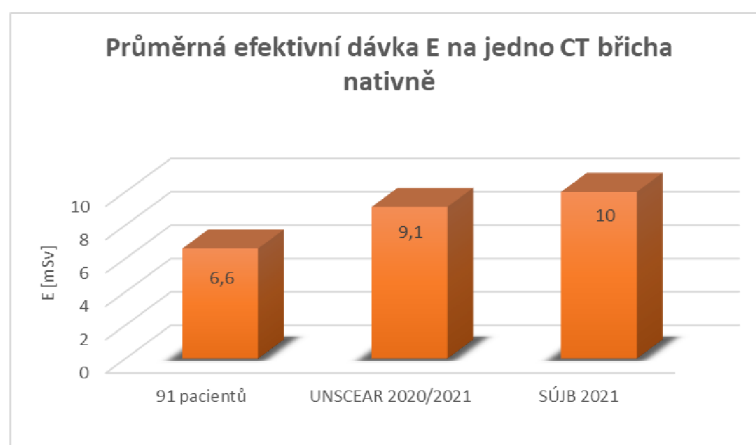


Graf 20 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT břicha nativně

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 20 najedeme porovnání věku vyšetřených mužů a žen dohromady v závislosti na věkové kategorii. UNSCEAR Report z let 2020/2021 uvádí, že CT vyšetření se provádí nejčastěji u pacientů ve věkovém rozmezí 65-74 let. Z grafu č. 20 vyplývá, že nejvíce vyšetřených mužů a žen je ve věkové kategorii 65-74, což je shodné v porovnání s údaji s UNSCEAR. Pro porovnání s údaji UNSCEAR jsem použila věkové kategorie, které uvádí v Reportu 2020/2021. UNSCEAR uvádí počty pacientů v závislosti na věkových kategoriích pro všechna CT vyšetření dohromady (detailnější data pro jednotlivá vyšetření neuvádí). Tzn., v tomto grafu je porovnán věk pacientů, kteří podstoupili CT břicha nativně (v rámci mého výzkumu) a věk pacientů v rámci všech CT vyšetření.

Pro výpočet průměrné hodnoty DLP jsem pracovala se souborem 91 pacientů. Hodnota DLP na jedno CT břicha nativně je průměrně 439,4 mGy.cm. Ze zkoumaného souboru pacientů byla největší hodnota DLP 1138 mGy.cm a nejnižší 130 mGy.cm. Průměrná hodnota DLP na jedno CT břicha nativně u mužů (52 mužů) je 435,58 mGy.cm a u žen (39 žen) je 444,49 mGy.cm. Efektivní dávka E na jedno CT břicha nativně je 6,54 mSv u mužů a 6,67 mSv u žen.



Graf 21 Průměrná E na jedno CT břicha nativně – porovnání

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 21 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 91 pacientů, průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021 a průměrné efektivní dávky uváděné SÚJB z roku 2021. Z grafu č. 21 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 91 pacientů je nižší než hodnota uvedená v Reportu 2020/2021. Dále také z grafu vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 91 pacientů je nižší než průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB.

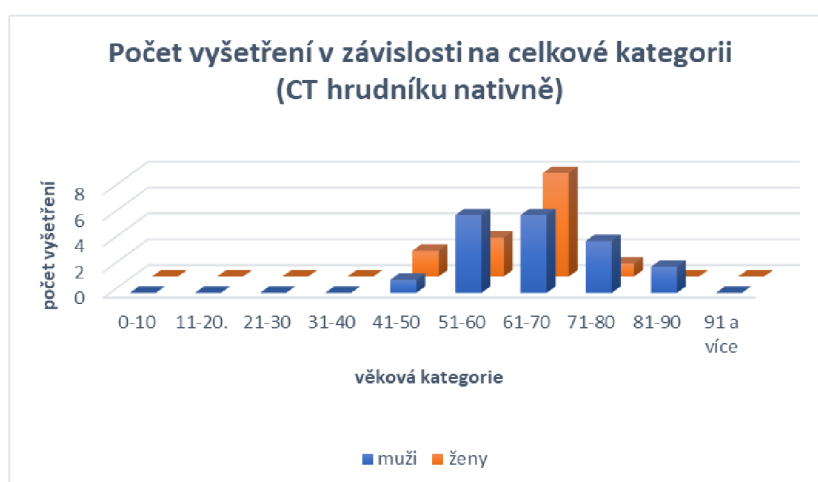
2.7.3 CT hrudníku nativně

Tabulka 12 Rozdělení mužů a žen - CT hrudníku nativně

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	19	93,2	174,7	66,5
Ženy	14	68,9	164,8	62,7

Zdroj: vlastní výzkum

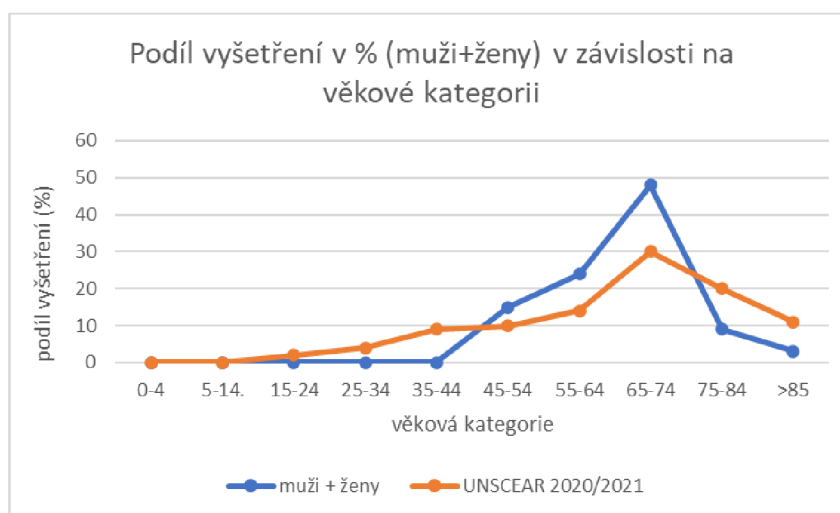
V tabulce č. 12 najdeme počet, kolik bylo provedeno CT hrudníku nativně za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhleno na jedno desetinné místo).



Graf 22 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii – CT hrudníku nativně

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 22 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 22 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 51-60 let a 61-70 let (12 z celkového počtu 19). Nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 61-70 let (8 z celkového počtu 14). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkové kategorii 0-10, 11-20, 21-30, 31-40 a 91 a více let.

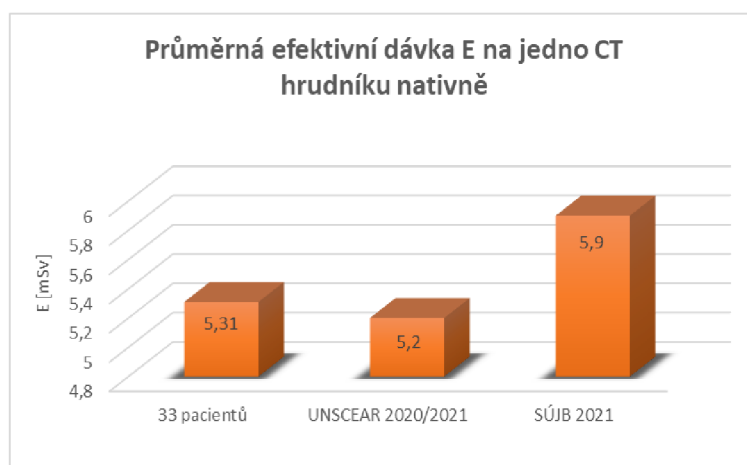


Graf 23 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT hrudníku nativně

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 23 najedeme porovnání věku vyšetřených mužů a žen dohromady v závislosti na věkové kategorii. UNSCEAR Report z let 2020/2021 uvádí, že CT vyšetření se provádí nejčastěji u pacientů ve věkovém rozmezí 65-74 let. Z grafu č. 23 vyplývá, že nejvíce vyšetřených mužů a žen je ve věkové kategorii 65-74, což je shodné v porovnání s údaji s UNSCEAR. Pro porovnání s údaji UNSCEAR jsem použila věkové kategorie, které uvádí v Reportu 2020/2021. UNSCEAR uvádí počty pacientů v závislosti na věkových kategoriích pro všechna CT vyšetření dohromady (detailnější data pro jednotlivá vyšetření neuvádí). Tzn., v tomto grafu je porovnán věk pacientů, kteří podstoupili CT hrudníku nativně (v rámci mého výzkumu) a věk pacientů v rámci všech CT vyšetření.

Pro výpočet průměrné hodnoty DLP jsem pracovala se souborem 33 pacientů. Hodnota DLP na jedno CT hrudníku nativně je průměrně 385,61 mGy.cm. Ze zkoumaného souboru pacientů byla největší hodnota DLP 1424 mGy.cm a nejnižší 147 mGy.cm. Průměrná hodnota DLP na jedno CT hrudníku nativně u mužů (19 mužů) je 469,16 mGy.cm a u žen (14 žen) je 272,21 mGy.cm. Efektivní dávka E na jedno CT hrudníku nativně je 6,41 mSv u mužů a 3,81 mSv u žen.



Graf 24 Průměrná E na jedno CT hrudníku nativně (porovnání)

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 24 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 33 pacientů, průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021 a průměrné efektivní dávky uváděné SÚJB z roku 2021. Z grafu č. 24 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 33 pacientů je lehce vyšší než hodnota uvedená v Reportu 2020/2021. Dále také z grafu vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 31 pacientů je lehce nižší než průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB.

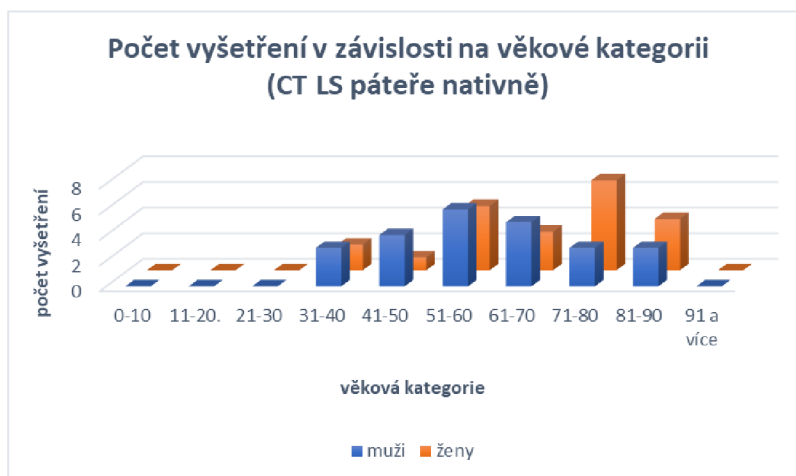
2.7.4 CT LS páteře nativně

Tabulka 13 Rozdělení mužů a žen - CT LS páteře nativně

Pohlaví	Počet vyšetření	Váha [kg]	Výška [cm]	Věk
Muži	24	97	177,2	60,3
Ženy	22	79,4	163,1	66,3

Zdroj: vlastní výzkum

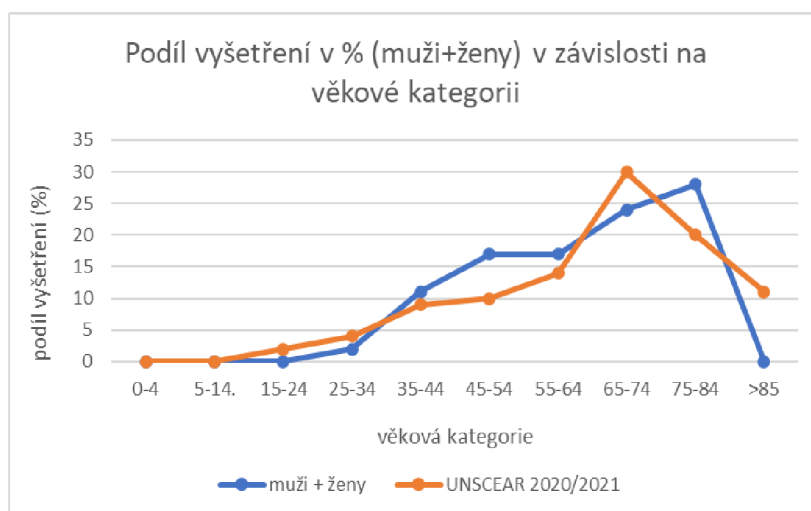
V tabulce č. 13 najdeme počet, kolik bylo provedeno CT LS páteře nativně za měsíc leden roku 2022 u mužů a žen. Dále zde najdeme jejich průměrnou váhu, výšku a věk (zaokrouhлено na jedno desetinné místo).



Graf 25 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - CT LS páteře nativně

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 25 najdeme rozdělení mužů a žen v závislosti na věkové kategorii. Věkové kategorie jsou rozdělené po 10 letech od věku 0 až po 91 a více. Z grafu č. 25 vyplývá, že nejvíce mužů bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 51-60 let (6 z celkového počtu 24). Nejvíce žen bylo vyšetřeno ve věkové kategorii 71-80 let (7 z celkového počtu 22). U mužů i žen nebyl nikdo vyšetřen ve věkové kategorii 0-10, 11-20, 21-30 a 91 a více let.

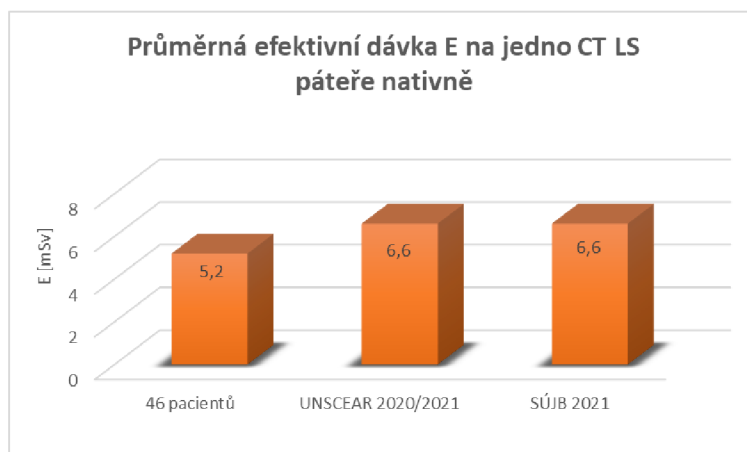


Graf 26 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT LS páteře nativně

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 26 najedeme porovnání věku vyšetřených mužů a žen dohromady v závislosti na věkové kategorii. UNSCEAR Report z let 2020/2021 uvádí, že CT vyšetření se provádí nejčastěji u pacientů ve věkovém rozmezí 65-74 let. Z grafu č. 26 vyplývá, že nejvíce vyšetřených mužů a žen je ve věkové kategorii 75-84, což se liší s údaji s UNSCEAR. Pro porovnání s údaji UNSCEAR jsem použila věkové kategorie, které uvádí v Reportu 2020/2021. UNSCEAR uvádí počty pacientů v závislosti na věkových kategoriích pro všechna CT vyšetření dohromady (detailnější data pro jednotlivá vyšetření neuvádí). Tzn., v tomto grafu je porovnán věk pacientů, kteří podstoupili CT LS páteře nativně (v rámci mého výzkumu) a věk pacientů v rámci všech CT vyšetření.

Pro výpočet průměrné hodnoty DLP jsem pracovala se souborem 46 pacientů. Hodnota DLP na jedno CT LS páteře nativně je průměrně 346,54 mGy.cm. Ze zkoumaného souboru pacientů byla největší hodnota DLP 962 mGy.cm a nejnižší 145 mGy.cm. Průměrná hodnota DLP na jedno CT LS páteře nativně u mužů (24 mužů) je 372,79 mGy.cm a u žen (22 žen) je 317,91 mGy.cm. Efektivní dávka E na jedno CT LS páteře nativně je 5,59 mSv u mužů a 4,78 mSv u žen.



Graf 27 Průměrná E na jedno CT LS páteře nativně (porovnání)

Zdroj: vlastní výzkum

V grafu č. 27 najdeme porovnání průměrné efektivní dávky E u souboru 46 pacientů, průměrné efektivní dávky E uvedené v Reportu 2020/2021 a průměrné efektivní dávky uváděné SÚJB z roku 2021. Z grafu č. 27 vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 46 pacientů je nižší než hodnota uvedená v Reportu 2020/2021. Dále také z grafu vyplývá, že průměrná efektivní dávka E souboru 46 pacientů má stejnou hodnotu jako průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB.

2.8 Výsledky 2

2.8.1 Scintigrafie skeletu

Tabulka 14 Počet scintigrafií skeletu za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	3456	4440
Středočeský kraj	1454	1891
Jihočeský kraj	1057	831
Plzeňský kraj	628	661
Karlovarský kraj	219	227
Ústecký kraj	1142	1673
Liberecký kraj	629	781
Královehradecký kraj	1271	2031
Pardubický kraj	703	701
Kraj vysočina	1388	1630
Jihomoravský kraj	3521	3086
Olomoucký kraj	996	1192
Zlínský kraj	932	1358
Moravskoslezský kraj	1964	2194

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 15 Počet scintigrafií skeletu za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	2985	3458
Středočeský kraj	1175	1568
Jihočeský kraj	796	584
Plzeňský kraj	376	269
Karlovarský kraj	161	194
Ústecký kraj	743	1222
Liberecký kraj	573	775
Královehradecký kraj	1197	1650
Pardubický kraj	497	516
Kraj vysočina	1358	1594
Jihomoravský kraj	2470	2003
Olomoucký kraj	996	792
Zlínský kraj	738	980
Moravskoslezský kraj	1555	1704

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 14 a 15 najdeme počty vyšetření scintigrafie skeletu za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 19 360 a žen 22 696. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 15 620 a žen 17 309. Nejvíce vyšetřených mužů za rok 2018 bylo v Jihomoravském kraji a za rok 2021 v kraji Hlavní město Praha. Nejvíce vyšetřených žen za rok 2018 bylo v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 v Jihomoravském kraji. Celkově se jedná o pokles četnosti vyšetření v roce 2021 a to o 19,32 % u mužů a o 23,72 % u žen.

Dále byla stanovena kolektivní efektivní dávka všech pacientů v tab. č. 14 a 15 (tab. č 16). Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jednu scintigrafii skeletu je 4,7 mSv u mužů a 4,38 mSv u žen.

Tabulka 16 Odhad kolektivní efektivní dávky - scintigrafie skeletu

Rok	2018		2021	
	Muži	Ženy	Muži	Ženy
E [mSv]	4,7	4,38	4,7	4,38
E [manSv]	89,3	96,36	70,5	74,46

Zdroj: vlastní výzkum

Zde se jedná o odhad kolektivní efektivní dávky ze scintigrafie skeletu u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění. Tento odhad nezahrnuje pacienty mimo veřejné zdravotní pojištění, ale bohužel nebylo možné najít údaje o celkovém počtu scintigrafií skeletu v ČR, aby byla stanovena kolektivní dávka všech pacientů v ČR. Z mého výzkumu lze odhadnout, že podíl kolektivní efektivní dávky vůči zbylým třem scintigrafiím (viz. dole) je 36,68 % za rok 2018 a 29,78 % za rok 2021.

Kolektivní efektivní dávka pro 42 tis. pacientů za rok 2018 je cca 186 manSv a pro 32 tis. pacientů za rok 2021 je cca 144 manSv.

2.8.2 Perfuzní scintigrafie myokardu

Tabulka 17 Počet perfuzních scintigrafií myokardu za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	7209	8088
Středočeský kraj	2464	2852
Jihočeský kraj	696	681
Plzeňský kraj	599	468
Karlovarský kraj	727	703
Ústecký kraj	1438	2012
Liberecký kraj	427	379
Královehradecký kraj	1063	1635
pardubický kraj	930	982
Kraj vysočina	2069	2623
Jihomoravský kraj	2150	2507
Olomoucký kraj	2372	2678
Zlínský kraj	1964	2675
Moravskoslezský kraj	2759	3426

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 18 Počet perfuzních scintigrafií myokardu za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	8162	9039
Středočeský kraj	3234	4053
Jihočeský kraj	728	602
Plzeňský kraj	294	273
Karlovarský kraj	733	833
Ústecký kraj	1107	1637
Liberecký kraj	462	519
Královehradecký kraj	1112	1532
pardubický kraj	865	961
Kraj vysočina	2458	3200
Jihomoravský kraj	2746	2550
Olomoucký kraj	2381	2411
Zlínský kraj	2032	2667
Moravskoslezský kraj	2451	2974

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 17 a 18 najdeme počty vyšetření perfuzní scintigrafie myokardu za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 26 867 a žen 31 709. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 28 765 a žen 33 251. Nejvíce vyšetřených mužů za rok 2018 bylo v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 taktéž. Nejvíce vyšetřených žen za rok 2018 bylo v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 taktéž. Celkově se jedná o mírný vzestup četnosti vyšetření v roce 2021 a to o 6,6 % u mužů a o 4,6 % u žen.

Dále byla stanovena kolektivní efektivní dávka všech pacientů v tab. č. 17 a 18 (tab. č. 19). Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jednu perfuzní scintigrafii myokardu je 5,22 mSv u mužů a 4,58 mSv u žen.

Tabulka 19 Odhad kolektivní efektivní dávky - perfuzní scintigrafie myokardu

Rok	2018		2021	
	Muži	Ženy	Muži	Ženy
Pohlaví	Muži	Ženy	Muži	Ženy
E [mSv]	5,22	4,58	5,22	4,58
E [manSv]	135,72	141,98	146,16	151,14

Zdroj: vlastní výzkum

Zde se jedná o odhad kolektivní efektivní dávky z perfuzní scintigrafie myokardu u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění. Tento odhad nezahrnuje pacienty mimo veřejné zdravotní pojištění, ale bohužel nebylo možné najít údaje o celkovém počtu perfuzních scintigrafií myokardu v ČR, aby byla stanovena kolektivní dávka všech pacientů ČR.

Z mého výzkumu lze odhadnout, že podíl kolektivní efektivní dávky vůči zbylým třem scintigrafiím (viz nahoře a dole) je 54,87 % za rok 2018 a 60,46 % za rok 2021.

Kolektivní efektivní dávka pro 58 tis. pacientů za rok 2018 je cca 290 manSv a pro 62 tis. pacientů za rok 2021 je cca 310 manSv.

2.8.3 Dynamická scintigrafie ledvin

Tabulka 20 Počet dynamických scintigrafií ledvin za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	244	325
Středočeský kraj	109	152
Jihočeský kraj	104	107
Plzeňský kraj	32	42
Karlovarský kraj	24	64
Ústecký kraj	121	127
Liberecký kraj	102	141
Královehradecký kraj	130	121
Pardubický kraj	30	50
Kraj vysočina	93	87
Jihomoravský kraj	224	258
Olomoucký kraj	178	151
Zlínský kraj	149	145
Moravskoslezský kraj	262	376

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 21 Počet dynamických scintigrafií ledvin za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	370	396
Středočeský kraj	71	113
Jihočeský kraj	76	85
Plzeňský kraj	18	17
Karlovarský kraj	27	55
Ústecký kraj	121	89
Liberecký kraj	80	113
Královehradecký kraj	121	106
pardubický kraj	30	64
Kraj vysočina	67	79
Jihomoravský kraj	654	599
Olomoucký kraj	161	125
Zlínský kraj	127	142
Moravskoslezský kraj	197	279

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 20 a 21 najdeme počty dynamických scintigrafií ledvin za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 1 802 a žen 2 146. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 2 120 a žen 2 262. Nejvíce vyšetřených mužů za rok 2018 bylo v Moravskoslezském kraji a za rok 2021 v Jihomoravském kraji. Nejvíce vyšetřených žen za rok 2018 bylo v Moravskoslezském kraji a za rok 2021 v Jihomoravském kraji. Celkově se jedná o mírný vzestup četnosti vyšetření v roce 2021 a to o 15 % u mužů a o 5,13 % u žen.

Dále byla stanovena kolektivní efektivní dávka všech pacientů v tab. č. 20 a 21 (tab. č. 22). Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jednu dynamickou scintigrafii ledvin je 2,01 mSv u mužů a 1,91 mSv u žen.

Tabulka 22 Odhad kolektivní efektivní dávky - dynamická scintigrafie ledvin

Rok	2018		2021	
	Muži	Ženy	Muži	Ženy
E [mSv]	2,01	1,91	2,01	1,91
E [manSv]	3,62	4,01	4,22	4,2

Zdroj: vlastní výzkum

Zde se jedná o odhad kolektivní efektivní dávky z dynamické scintigrafie ledvin u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění. Tento odhad nezahrnuje pacienty mimo veřejné zdravotní pojištění, ale bohužel nebylo možné najít údaje o celkovém počtu dynamických scintigrafií ledvin v ČR, aby byla stanovena kolektivní dávka všech pacientů v ČR.

Z mého výzkumu lze odhadnout, že podíl kolektivní efektivní dávky vůči zbylým třem scintigrafiím (viz nahoře a dole) je 1,51 % za rok 2018 a 1,71 % za rok 2021.

Kolektivní efektivní dávka pro 4 tis. pacientů je za rok 2018 cca 5,5 manSv a za rok 2021 cca také 5,5 manSv.

2.8.4 Perfuzní a ventilační scintigrafie plic

Tabulka 23 Počet perfuzních scintigrafií plic za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	1365	2024
Středočeský kraj	942	1261
Jihočeský kraj	349	556
Plzeňský kraj	350	486
Karlovarský kraj	190	297
Ústecký kraj	36	57
Liberecký kraj	91	136
Královehradecký kraj	201	278
pardubický kraj	102	173
Kraj vysočina	1135	1506
Jihomoravský kraj	1287	1995
Olomoucký kraj	325	495
Zlínský kraj	904	1208
Moravskoslezský kraj	447	645

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 24 Počet perfuzních scintigrafií plic za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	1897	2842
Středočeský kraj	1690	2166
Jihočeský kraj	276	347
Plzeňský kraj	219	350
Karlovarský kraj	205	276
Ústecký kraj	41	69
Liberecký kraj	90	132
Královehradecký kraj	142	245
pardubický kraj	199	360
Kraj vysočina	1444	1887
Jihomoravský kraj	1163	1699
Olomoucký kraj	364	590
Zlínský kraj	915	1304
Moravskoslezský kraj	458	681

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 23 a 24 najdeme počty perfuzních scintigrafií plic za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 7 724 a žen 11 117. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 9 103 a žen 12 984. Nejvíce vyšetřených mužů za rok 2018 bylo v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 taktéž. Nejvíce vyšetřených žen za rok 2018 bylo také v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 v taktéž. Celkově se jedná o mírný vzestup četnosti vyšetření v roce 2021 a to o 15,15 % u mužů a o 14,38 % u žen.

Dále byla stanovena kolektivní efektivní dávka všech pacientů v tab. č. 23 a 24 (tab. č. 25). Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jednu perfuzní scintigrafii plic je 2,01 mSv u mužů a 1,91 mSv u žen.

Tabulka 25 Odhad kolektivní efektivní dávky - perfuzní scintigrafie plic

Rok	2018		2021	
Pohlaví	Muži	Ženy	Muži	Ženy
E [mSv]	2,01	1,91	2,01	1,91
E [manSv]	14,07	21,01	18,09	22,92

Zdroj: vlastní výzkum

Zde se jedná o odhad kolektivní efektivní dávky z perfuzní scintigrafie plic u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění. Tento odhad nezahrnuje pacienty mimo veřejné zdravotní pojištění, ale bohužel nebylo možné najít údaje o celkovém počtu perfuzních scintigrafií plic v ČR, aby byla stanovena kolektivní dávka všech pacientů v ČR.

Z mého výzkumu lze odhadnout, že podíl kolektivní efektivní dávky vůči zbylým třem scintigrafiím (viz nahoře) je 6,93 % za rok 2018 a 8,33 % za rok 2021.

Kolektivní efektivní dávka je pro 18 tis. pacientů za rok 2018 cca 35 manSv a za rok 2021 pro 22 tis. pacientů cca 42 manSv.

Tabulka 26 Počet ventilačních scintigrafií plic za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Středočeský kraj	428	452
Zlínský kraj	325	325

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 27 Počet ventilačních scintigrafií plic za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Středočeský kraj	744	965
Zlínský kraj	224	363

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 26 a 27 najdeme počty ventilačních scintigrafií plic za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 753 a žen 777. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 968 a žen 1 328. Ventilační scintigrafie plic se s kódem výkonu 47 261 provádí pouze ve dvou krajích. Za oba dva roky bylo provedeno více ventilačních scintigrafií plic ve Středočeském kraji u mužů i žen. Celkově se jedná o vzestup četnosti vyšetření v roce 2021 a to o 22,21 % u mužů a o 41,49 % u žen. Dále byla stanovena kolektivní efektivní dávka všech pacientů v tab. č. 26 a 27 (tab. č. 28). Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jednu ventilační scintigrafii plic je 0,05 mSv u mužů a 0,04 mSv u žen.

Tabulka 28 Odhad kolektivní efektivní dávky - ventilační scintigrafie plic

Rok	2018		2021	
	Muži	Ženy	Muži	Ženy
E [mSv]	0,05	0,04	0,05	0,04
E [manSv]	0,035	0,028	0,045	0,052

Zdroj: vlastní výzkum

Zde se jedná o odhad kolektivní efektivní dávky z ventilační scintigrafie plic u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění. Tento odhad nezahrnuje pacienty mimo veřejné zdravotní pojištění, ale bohužel nebylo možné najít údaje o celkovém počtu ventilačních scintigrafií plic v ČR, aby byla stanovena kolektivní dávka všech pacientů v ČR.

Z mého výzkumu lze odhadnout, že podíl kolektivní efektivní dávky vůči zbylým třem scintigrafiím (viz nahoře) je 0,01 % za rok 2018 a 0,02 % za rok 2021.

Kolektivní efektivní dávka pro 1,5 tis. pacientů za rok 2018 je 0,06 manSv a pro 2,2 tis. pacientů za rok 2021 je 0,09 manSv.

2.8.5 CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní

Tabulka 29 Počet CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	26156	22159
Středočeský kraj	11250	9745
Jihočeský kraj	6684	6460
Plzeňský kraj	8376	6845
Karlovarský kraj	1662	1276
Ústecký kraj	11597	11510
Liberecký kraj	8114	5661
Královehradecký kraj	5641	5034
pardubický kraj	4503	3917
Kraj vysočina	4213	3190
Jihomoravský kraj	15721	13279
Olomoucký kraj	5921	4511
Zlínský kraj	5187	4438
Moravskoslezský kraj	15669	12618

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 30 Počet CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	30607	26464
Středočeský kraj	12651	10791
Jihočeský kraj	7682	6685
Plzeňský kraj	10038	8460
Karlovarský kraj	2147	1971
Ústecký kraj	13236	12007
Liberecký kraj	7980	6483
Královehradecký kraj	7016	5436
pardubický kraj	5490	5543
Kraj vysočina	4674	3713
Jihomoravský kraj	18127	16180
Olomoucký kraj	6946	5945
Zlínský kraj	6844	6189
Moravskoslezský kraj	18186	15609

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 24 a 25 najdeme počty CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 130 694 a žen 107 453. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 151 624 a žen 131 476. Nejvíce vyšetřených mužů za rok 2018 bylo v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 taktéž. Nejvíce vyšetřených žen za rok 2018 bylo také v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 v taktéž. Celkově se jedná o mírný vzestup četnosti vyšetření u mužů v roce 2021 a to o 13,8 % a u žen je vzestup počtu vyšetření velmi nízký – pouze o 0,59 %.

Byla stanovena kolektivní efektivní dávka pacientů v tabulkách č. 29 a 30. Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jedno CT mozku nativně je 1,88 mSv, na jedno CT břicha nativně 6,6 mSv, na jedno CT hrudníku nativně 5,31 mSv a na jedno CT LS páteře nativně 5,2 mSv.

Celkový počet CT vyšetření je podle údajů ÚZIS 238 147 za rok 2018 a 283 100 za rok 2021 (za oba dva roky se celkový počet týká pouze výkonu s kódem 89611) a proto musíme předpokládat, že celková kolektivní dávka ze všech uvažovaných vyšetření je cca 1 129 manSv za rok 2018 a cca 1 343 manSv.

2.8.6 CT vyšetření bez použití kontrastní látky do 30 skenů¹

Tabulka 31 Počet CT vyšetření bez použití KL do 30 skenů za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	374	386
Středočeský kraj	46	174
Jihočeský kraj	2308	2140
Plzeňský kraj	230	238
Karlovarský kraj	2	0
Ústecký kraj	5	1
Liberecký kraj	5	4
Královehradecký kraj	725	733
pardubický kraj	351	284
Kraj vysočina	52	54
Jihomoravský kraj	3423	3727
Olomoucký kraj	580	646
Zlínský kraj	173	205
Moravskoslezský kraj	1888	2163

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 32 Počet CT vyšetření bez použití KL do 30 skenů za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	266	221
Středočeský kraj	89	81
Jihočeský kraj	2201	2113
Plzeňský kraj	449	504
Karlovarský kraj	0	0
Ústecký kraj	6	4
Liberecký kraj	55	70
Královehradecký kraj	833	859
pardubický kraj	126	98
Kraj vysočina	100	125
Jihomoravský kraj	3149	3334
Olomoucký kraj	541	577
Zlínský kraj	95	120
Moravskoslezský kraj	1929	2194

¹ Sken znamená řez. CT přístroj nám umožňuje za použití RTG záření zobrazení celého těla v sérii řezů.
Zdroj: Výpočetní tomografie – WikiSkripta.

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulce č. 26 a 27 najdeme počty CT vyšetření bez použití kontrastní látky do 30 skenů za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 10 162 a žen 10 581. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 9 839 a žen 10 300. Nejvíce vyšetřených mužů za rok 2018 bylo v Jihomoravském kraji a za rok 2021 taktéž. Nejvíce vyšetřených žen za rok 2018 bylo také v Jihomoravském kraji a za rok 2021 taktéž. Celkově se jedná o mírný sestup četnosti vyšetření u mužů v roce 2021 a to o 3,18 % a u žen se jedná o mírný vzestup počtu vyšetření o 3,34 %.

Byla stanovena kolektivní efektivní dávka pacientů v tabulkách č. 31 a 32. Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jedno CT mozku nativně je 1,88 mSv, na jedno CT břicha nativně 6,6 mSv, na jedno CT hrudníku nativně 5,31 mSv a na jedno CT LS páteře nativně 5,2 mSv.

Celkový počet CT vyšetření je podle údajů ÚZIS 20 742 za rok 2018 a 20 139 za rok 2021 (za oba dva roky se celkový počet týká pouze výkonu s kódem 89613) a proto musíme předpokládat, že celková kolektivní dávka ze všech uvažovaných vyšetření je cca 94,95 manSv za rok oba dva roky.

2.8.7 CT vyšetření s větším počtem skenů² (nad 30), bez použití KL

Tabulka 33 Počet CT vyšetření s větším počtem skenů (nad 30), bez použití KL za rok 2018

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	36981	38284
Středočeský kraj	17992	18730
Jihočeský kraj	12360	12384
Plzeňský kraj	10245	10138
Karlovarský kraj	5934	6503
Ústecký kraj	13929	15282
Liberecký kraj	9654	9679
Královeský kraj	10193	11528
pardubický kraj	10385	10702
Kraj vysočina	10677	11389
Jihomoravský kraj	22091	19392
Olomoucký kraj	15248	15668
Zlínský kraj	11042	11261
Moravskoslezský kraj	25475	27375

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 34 Počet CT vyšetření s větším počtem skenů (nad 30), bez použití KL za rok 2021

Kraj	muži	ženy
Hlavní město Praha	38705	40105
Středočeský kraj	19712	20167
Jihočeský kraj	12576	12823
Plzeňský kraj	12478	12157
Karlovarský kraj	6350	6705
Ústecký kraj	14692	15523
Liberecký kraj	10353	10318
Královeský kraj	10664	12006
pardubický kraj	10526	10237
Kraj vysočina	11700	12018
Jihomoravský kraj	23433	24338
Olomoucký kraj	16608	16554
Zlínský kraj	11594	12192
Moravskoslezský kraj	27228	28087

Zdroj: vlastní výzkum

² Sken znamená řez. CT přístroj nám umožňuje za použití RTG záření zobrazení celého těla v sérii řezů.
Zdroj: Výpočetní tomografie – WikiSkripta.

V tabulce č. 26 a 27 najdeme počty CT vyšetření s větším počtem skenů (nad 30), bez použití kontrastní látky za rok 2018 a 2021. Za rok 2018 je celkový počet vyšetřených mužů 212 206 a žen 218 315. Za rok 2021 je celkový počet vyšetřených mužů 226 619 a žen 233 275. Nejvíce vyšetřených mužů za rok 2018 bylo v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 taktéž. Nejvíce vyšetřených žen za rok 2018 bylo také v kraji Hlavní město Praha a za rok 2021 taktéž. Celkově se za rok 2021 jedná o mírný vzestup četnosti vyšetření u mužů a to o 6,36 % a u žen o 6,41 %.

Byla stanovena kolektivní efektivní dávka pacientů v tabulkách č. 33 a 34 (tab. č. 35). Dle předchozích výsledků lze uvažovat, že průměrná efektivní dávka na jedno CT mozku nativně je 1,88 mSv, na jedno CT břicha nativně 6,6 mSv, na jedno CT hrudníku nativně 5,31 mSv a na jedno CT LS páteře nativně 5,2 mSv. Když tyto průměrné dávky násobíme počty vyšetření v tabulkách, dostaneme kolektivní efektivní dávky v tab. č. 35, dohromady cca 3000 manSv. To je ale jen kolektivní dávka pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění.

Celkový počet CT vyšetření je podle údajů ÚZIS 430 521 za rok 2018 a 459 894 za rok 2021 (za oba dva roky se celkový počet týká pouze výkonu s kódem 89615) a proto musíme předpokládat, že celková kolektivní dávka ze všech uvažovaných vyšetření je cca 2 041 manSv za rok 2018 a cca 2 179 manSv za rok 2021.

Celkový počet CT vyšetření je podle údajů ÚZIS 689 981 za rok 2018 a 763 133 za rok 2021 (za oba dva roky se celkový počet týká pouze výkonů s kódy 89611, 89613 a 89615) a proto musíme předpokládat, že celková kolektivní dávka ze všech uvažovaných vyšetření je cca 3 271 manSv za rok 2018 a cca 3 622 manSv.

Tabulka 35 Odhad kolektivní efektivní dávky u CT vyšetření

Rok	2018	2021
Pohlaví	Muži + ženy	Muži + ženy
CT mozku nativně		
E [mSv]	1,88	1,88
E [manSv]	885,48	868,56
CT břicha nativně		
E [mSv]	6,6	6,6
E [manSv]	851,4	838,2
CT hrudníku nativně		
E [mSv]	5,31	5,31
E [manSv]	934,56	918,63
CT LS páteře nativně		
E [mSv]	5,2	5,2
E [manSv]	301,6	296,4

Zdroj: vlastní výzkum

2.9 Výsledky 3

2.9.1 Nukleární medicína

Tabulka 36 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u mužů v NM

Vyšetření	Pravděpodobnost vzniku rakoviny z ozáření (%)	Pravděpodobnost	Základní riziko rakoviny	Riziko rakoviny ze všech
Scintigrafie skeletu	0,011995	1 z 8 337	44,9	44,911995
Perfuze myokardu	0,014994	1 z 6 669	44,9	44,914994
P+V scintigrafie plic	0,006882	1 z 14 531	44,9	44,906882
Dynamická scintigrafie ledvin	0,006130	1 z 16 313	44,9	44,90613

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 37 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u žen v NM

Vyšetření	Pravděpodobnost vzniku rakoviny z ozáření (%)	Pravděpodobnost	Základní riziko rakoviny	Riziko rakoviny ze všech
Scintigrafie skeletu	0,017378	1 z 5 754	37,5	37,517378
Perfuze myokardu	0,015693	1 z 6 372	37,5	37,515693
P+V scintigrafie plic	0,003923	1 z 25 491	37,5	37,503923
Dynamická scintigrafie ledvin	0,004495	1 z 22 247	37,5	37,504495

Zdroj: vlastní výzkum

2.9.2 Radiodiagnostika

Tabulka 38 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u mužů po CT vyšetření

Vyšetření	Pravděpodobnost vzniku rakoviny z ozáření (%)	Pravděpodobnost	Základní riziko rakoviny (%)	Riziko rakoviny ze všech faktorů (%)
CT mozku	0,006919	1 z 14 453	44,9	44,90619
CT břicha	0,035470	1 z 2 819	44,9	44,93547
CT hrudníku	0,027494	1 z 3 637	44,9	44,927494
CT LS páteře	0,025719	1 z 3 888	44,9	44,925719

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 39 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u žen po CT vyšetření

Vyšetření	Pravděpodobnost vzniku rakoviny z ozáření (%)	Pravděpodobnost	Základní riziko rakoviny (%)	Riziko rakoviny ze všech faktorů (%)
CT mozku	0,006350	1 z 15 748	37,5	37,50635
CT břicha	0,044051	1 z 2 270	37,5	37,544051
CT hrudníku	0,022006	1 z 4 544	37,5	37,522006
CT LS páteře	0,022386	1 z 4 467	37,5	37,522386

Zdroj: vlastní výzkum

V tabulkách č. 30, 31, 32 a 33 lze najít výslednou hodnotu pravděpodobnosti vzniku rakoviny, která je podmíněná ozářením z daného vyšetření. Ve sloupečku s názvem „pravděpodobnost“ je výsledná hodnota vztažena k epidemiologické pravděpodobnosti výskytu v populaci. Primární riziko rakoviny má program „X-ray risk“ dané u žen 37,5 % a u mužů 44,9 %. Tato hodnota může být jiná v různých programech, protože je určena vlastním výzkumem v populaci. Ve sloupečku s názvem „Riziko rakoviny ze všech faktorů (%)“ je zapsána pravděpodobnost vzniku rakoviny ze všech faktorů, tzn. i z lékařského ozáření. Mezi tyto faktory patří zejména genetické predispozice, kouření nebo životospráva.

3 Diskuze

Záměrem mé diplomové práce bylo odhadnout efektivní dávky z vyšetření v nukleární medicíně a v radiodiagnostice, dále zjistit počty těchto vyšetření v ČR a odhadnout roční dávky, a nakonec odhadnout pravděpodobnost vzniku stochastických účinků. Pro zpracování těchto cílů bylo nutné provést sběr dat z jednotlivých vyšetření a poté je vyhodnotit a dále získat statistická data od ÚZIS. Pro splnění cílů této práce jsem si stanovila 3 výzkumné otázky.

Výzkumná otázka č. 1 „*Jaké jsou efektivní dávky z lékařského ozáření různých typů vyšetření?*“

Výzkumná otázka č. 2 „*Jaké jsou roční počty jednotlivých vyšetření v ČR?*“

Výzkumná otázka č. 3 „*Jaká je pravděpodobnost vzniku stochastických účinků způsobených lékařským ozářením?*“

V rámci první výzkumné otázky jsem rozdělila všechna vyšetření podle pohlaví, váhy, výšky a věku. Věkové kategorie zahrnují věk pacientů od narození až do 90 a více. Hodnoty jsou porovnány s hodnotami uvedenými v Reportu UNSCEAR 2020/2021 (pro některá vyšetření ale bohužel hodnoty neuvádí). Byly určovány průměrné aplikované aktivity a z toho odhadnuty efektivní dávky z aplikovaných radiofarmak, dále byly zjišťovány průměrné hodnoty DLP u CT vyšetření a z toho také odhadnuty efektivní dávky. U vyšetření v nukleární medicíně jsem také provedla odhad ekvivalentní dávky na nejvíce zatížený orgán. Získané výsledky jsem porovнала s hodnotami UNSCEAR, NDRÚ, EANM, SÚJB a hodnotami z Věstníku MZČR 2016.

Scintigrafie skeletu

Průměrná aplikovaná aktivita na jednu scintigrafii skeletu, počítána v této práci (795,09 MBq), je lehce vyšší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň je o lehce nižší, než stanovují NDRÚ. EANM i Věstník MZČR 2016 uvádí doporučenou aplikovanou aktivitu pro dospělého mezi 300-740 MBq (8-10 MBq/kg pro dospělého).

Průměrná efektivní dávka z aplikovaného radiofarmaka je 4,53 mSv, což je lehce vyšší než uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021. Tento menší rozdíl je možné vysvětlit

tím, že UNSCEAR využívá koeficienty pro přepočet efektivních dávek pro muže a ženy zvlášť. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 3,9 mSv. Tuto hodnotu lze porovnat např. s Německem, kde je 3,2 mSv, nebo s Polskem, kde je 3,6 mSv. ENAM uvádí hodnotu efektivní dávky 4,9 mSv. Tyto dávky lze vypočítat pomocí faktoru uvedeném ve Věstníku Ministerstva zdravotnictví ČR.

Jak Věstník MZČR 2016, tak i EANM uvádí orgán s nejvyšší absorbovanou dávkou povrchy kostí.

Perfuzní scintigrafie myokardu

Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii, počítána v této práci (633,14 MBq), je nižší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň je nižší, než stanovují NDRÚ. EANM uvádí doporučenou aplikovanou aktivitu pro dospělého 350-700 MBq. Věstník MZČR doporučenou aplikovanou aktivitu neuvádí, opírá se o hodnotu NDRÚ.

Průměrná efektivní dávka z aplikovaného radiofarmaka je 5 mSv, což je nižší hodnota než uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 7,5 mSv. Tuto hodnotu lze porovnat např. s Německem, kde je 3,6 mSv, nebo s Polskem, kde je 7,2 mSv. Hodnota v Německu je výrazně nižší než v ČR. EANM uvádí hodnotu efektivní dávky 6,6 mSv, což je o trochu vyšší, než efektivní dávka vypočítána v rámci tohoto výzkumu. Lze to odůvodnit předpokládanou vyšší aplikovanou aktivitou na jednu perfuzní scintigrafii myokardu.

Jak EANM, tak i Věstník MZČR 2016 uvádí orgán s nejvyšší absorbovanou dávkou žlučník, EANM uvádí ještě navíc ledviny.

Perfuzní a ventilační scintigrafie plic

Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii, počítána v této práci (177,74 MBq), je lehce nižší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň je lehce nižší, než stanovují NDRÚ. EANM uvádí průměrnou aplikovanou aktivitu pro dospělého 40-120 MBq. Je zajímavé, že EANM uvádí tak nízké hodnoty, protože v praxi se takto malé dávky aplikují např. mladým

nebo těhotným ženám. Věstník MZČR 2016 uvádí hodnotu aplikované aktivity 200 MBq.

Průměrná efektivní dávka z aplikovaného radiofarmaka je 1,96 mSv, což je nižší hodnota než uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 2,3 mSv. Tuto hodnotu lze porovnat např. s Německem, kde je 1,3 mSv, nebo s Polskem, kde je 4,1 mSv. EANM uvádí hodnotu efektivní dávky na 100 MBq 1,1 mSv. Toto odpovídá mému výzkumu – na 177 MBq je efektivní dávka 1,96 mSv.

Průměrná aplikovaná aktivita na jednu ventilační scintigrafii plic, počítána v této práci (1511,47 MBq), je výrazně nižší, než stanovují NDRÚ. UNSCEAR ve svém Reportu 2020/2021 aplikované aktivity ^{81}Kr neuvádí. Takto nízkou hodnotu lze odůvodnit např. nižšími váhami vyšetřovaných pacientů nebo optimalizací aplikace ^{81}Kr . EANM i Věstník MZČR 2016 uvádí optimální hodnotu ^{81}Kr 6 GBq (jako NDRÚ).

Údaje pro porovnání efektivní dávky E na jednu ventilační scintigrafii plic UNSCEAR v Reportu 2020/2021 neuvádí. EANM uvádí efektivní dávku na hodnotu referenční aktivity 6 GBq 0,16 mSv. Z mého výzkumu vyplývá, že na průměrnou aktivitu 1511 MBq je efektivní dávka 0,05 mSv.

Jak EANM, tak i Věstník MZČR 2016 uvádí orgán s nejvyšší absorbovanou dávkou plíce (jak pro perfuzi, tak i pro ventilaci).

Dynamická scintigrafie ledvin

Průměrná aplikovaná aktivita na jednu dynamickou scintigrafii ledvin, počítána v této práci (191,75 MBq), je lehce nižší, než je průměrná aplikovaná aktivita uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň je nižší, než stanovují NDRÚ. EANM uvádí hodnotu aplikované aktivity 75 MBq, což mi přijde (vzhledem k praxi) jako velmi nízká hodnota. Lze to opět odůvodnit např. nízkou hmotností pacienta. Věstník MZČR 2016 uvádí hodnotu aplikované aktivity 75-200 MBq.

Průměrná efektivní dávka na jednu dynamickou scintigrafii ledvin je 1,39 mSv, což je hodnota téměř totožná jako uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 1,4 mSv. Tuto hodnotu lze porovnat např. s Německem,

kde je 0,7 mSv, nebo s Polskem, kde je 0,6 mSv. V Německu i Polsku je efektivní dávka výrazně nižší. EANM uvádí hodnotu efektivní dávky 0,53 mSv, což by odpovídalo uvádějící nízké aplikované aktivitě.

Jak EANM, tak i Věstník MZČR 2016 uvádí jako orgán s nejvyšší absorbovanou dávkou močový měchýř.

CT mozku nativně

Průměrná efektivní dávka na jedno CT mozku nativně, počítána v této práci (1,875 mSv), je téměř totožná jako uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň je lehce vyšší než průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 1,9 mSv. Tuto dávku lze porovnat např. s Německem, kde je také 1,9 mSv, nebo s Polskem, kde je 1,8 mSv.

CT břicha nativně

Průměrná efektivní dávka na jedno CT břicha nativně, počítána v této práci (6,6 mSv), je nižší než hodnota uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň je o nižší než průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 9,1 mSv. Tuto hodnotu lze porovnat např. s Německem, kde je 16 mSv, nebo s Polskem, kde je 22,3 mSv. To už lze považovat za velký rozdíl.

CT hrudníku nativně

Průměrná efektivní dávka na jedno CT hrudníku nativně, počítána v této práci (5,31 mSv), je lehce vyšší než hodnota uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň je nižší než průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 5,2 mSv. Tuto hodnotu lze porovnat např. s Německem, kde je 7,3 mSv, nebo s Polskem, kde je 10,1 mSv. Hodnoty jsou opět lehce vyšší.

CT LS páteře nativně

Průměrná efektivní dávka na jedno CT LS páteře nativně, počítána v této práci (5,2 mSv), je nižší než hodnota uvedená v Reportu UNSCEAR 2020/2021 a zároveň má

stejnou hodnotu jako průměrná efektivní dávka E uváděná SÚJB. Efektivní dávka uváděná UNSCEAR pro ČR je 6,6 mSv. Tuto hodnotu lze porovnat např. s Německem, kde je 3,1 mSv, nebo s Polskem, kde je 8,9 mSv. Větší rozdíl je pouze v porovnání s Německem.

Počty CT vyšetření a scintigrafií

Podle serveru „*Statista*“ počet CT vyšetření v České republice od roku 2011 lehce stoupá. Pouze v roce 2017 a 2021 je zaznamenán lehký pokles. V letech 2011 a 2012 byl počet CT vyšetření pod 1 milion, od roku 2013 vždy přes milion. Pro porovnání lze vybrat např. Slovinsko. Podle serveru „*Statista*“ byl také od roku 2011 lehký nárůst počtu vyšetření, avšak Slovinsko provádí výrazně méně vyšetření. Ani jeden rok v letech 2011-2021 počet CT vyšetření nepřesáhl 260 tis. Takto markantní rozdíl lze odůvodnit výrazně nižším počtem obyvatel³ (o 80 %) a výrazně menší rozlohou⁴ státu (o 75 %) než je ČR⁵.

Pro další porovnání si lze vybrat např. Dánsko. Podle serveru „*Statista*“ byl od roku 2012 zaznamenán nárůst počtu CT vyšetření. Počet CT vyšetření v Dánsku se oproti ČR zase tak tolik neliší (jako výše zmíněné Slovinsko). Za roky 2012-2017 byl počet CT vyšetření pod milion, v letech 2018-2021 nad milion. Nejvíce však v roce 2021. Roky 2018 a 2021 se nijak výrazně neliší (max. o pár %), i když Dánsko má výrazně nižší počet obyvatel⁶ (o 45 %) a výrazně nižší rozlohu⁷ (o 46 %) než ČR⁸.

Počty scintigrafií žádné dostupné statistiky neuvádí. Lze ale zmínit počty scintigrafií uváděné SÚJB. V roce 2015 byla provedena statistika, do které bylo zahrnuty anonymizovaná data VZP, publikované údaje ÚZIS a dále data, která byla výstupem dílčího úkolu TAČR (řešitel SÚRO). (Zdroj: SÚJB, 2016) SÚJB uvádí celkový počet scintigrafického vyšetření skeletu 63 519, scintigrafického vyšetření srdce 38 964, scintigrafického vyšetření plic 41 758 a scintigrafického vyšetření ledvin 10 264.

³ Počet obyvatel Slovinska je 2,108 milionů (k roku 2021). Zdroj: počet obyvatel slovinsko - Hledat Googlem.

⁴ Rozloha Slovinska je 20 273 km². Zdroj: rozloha slovinsko - Hledat Googlem.

⁵ Počet obyvatel ČR je 10,533 milionů (k 31.12. 2022). Zdroj: Obyvatelstvo | ČSÚ (czso.cz).

⁶ Počet obyvatel Dánska je 5,857 milionů (k roku 2021). Zdroj: počet obyvatel dánsko - Hledat Googlem.

⁷ Rozloha Dánska je 42 951 km². Zdroj: rozloha dánsko - Hledat Googlem.

⁸ Rozloha ČR je 78 867 km². Zdroj: rozloha ČR - Hledat Googlem.

Celkově se jedná o vyšší počty těchto vyšetření oproti mému výzkumu, já jsem měla pouze k dispozici údaje ÚZIS.

Kolektivní efektivní dávky

U CT mozku nativně SÚJB uvádí kolektivní efektivní dávku na 487 tis. vyšetření (u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění) 779 manSv, z mého výzkumu vychází kolektivní efektivní dávka těchto pacientů na 471 tis. vyšetření 885,48 manSv za rok 2018 a na 462 tis. vyšetření 868,56 manSv za rok 2021. Lehce nižší hodnotu za rok 2021 lze odůvodnit nižším počtem vyšetřených pacientů a vyšší hodnotu oproti hodnotě uváděné SÚJB lze odůvodnit vyšší efektivní dávkou na jedno vyšetření.

U CT břicha nativně SÚJB uvádí kolektivní efektivní dávku na 134,5 tis. vyšetření (u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění) 1345 manSv, z mého výzkumu vychází kolektivní efektivní dávka těchto pacientů na 129 tis. vyšetření 851,4 manSv za rok 2018 a na 127 tis. vyšetření 838,2 manSv za rok 2021. Vyšší hodnotu kolektivní efektivní dávky uváděné SÚJB lze odůvodnit vyšší efektivní dávkou na jedno vyšetření.

U CT hrudníku nativně SÚJB uvádí kolektivní efektivní dávku na 187,1 tis. vyšetření (u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění) 1104 manSv, z mého výzkumu vychází kolektivní efektivní dávka těchto pacientů na 176 tis. vyšetření 934,56 manSv za rok 2018 a na 173 tis. vyšetření 918,63 manSv za rok 2021. Rozdíl kolektivní efektivní dávky oproti SÚJB je lehce větší. Vyšší hodnotu lze odůvodnit vyšší počtem vyšetřených pacientů, vyšší efektivní dávkou, a nebo např. vyšším počtem provedených snímků.

U CT LS páteře nativně SÚJB uvádí kolektivní efektivní dávku na 63 tis. vyšetření (u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění) 416 manSv, z mého výzkumu vychází kolektivní efektivní dávka těchto pacientů na 58 tis. vyšetření 301,6 manSv za rok 2018 a na 57 tis. vyšetření 296,4 manSv. Lze konstatovat, že tyto hodnoty se s hodnotou SÚJB téměř neliší.

U jednotlivých scintigrafií porovnání provést nelze, protože jsem nenašla žádné studie, které by se odhadem kolektivních efektivních dávek u scintigrafií zabývaly. Lze ale říci,

že kolektivní efektivní dávky u scintigrafií jsou výrazně nižší než u CT vyšetření. To lze odůvodnit výrazně nižším počtem scintigrafií oproti CT.

Celkový odhad radiační zátěže obyvatelstva ČR ze scintigrafií v rámci mého výzkumu (pro pacienty v rámci veřejného zdravotního pojištění) je za rok 2018 je cca 0,03 mSv a za rok 2021 je také cca 0,03 mSv.

Pro porovnání celkového odhadu radiační zátěže obyvatelstva ČR ze scintigrafií lze použít údaje z Reportu UNSCEAR 2020/2021. Průměrný odhad radiační zátěže ze všech scintigrafií (průměrná efektivní dávka je cca 6,2 mSv) je cca 0,1 mSv.

Celkový odhad radiační zátěže obyvatelstva ČR z CT vyšetření v rámci celkového počtu vyšetření podle serveru „*Statista*“ a mého odhadu počtu vyšetření je za roky 2018 a 2021 cca 1 mSv (průměrná efektivní dávka na jedno CT je cca 10 mSv a uvažuje se, že v každém roce má 1/10 ze všech Čechů CT vyšetření (1 milion CT na 10 milionů lidí).

Pro porovnání celkového odhadu radiační zátěže obyvatelstva ČR z CT vyšetření lze použít údaje z Reportu UNSCEAR 2020/2021. Průměrný odhad radiační zátěže ze všech CT vyšetření (průměrná efektivní dávka je cca 6,7 mSv) je cca 0,8 mSv za rok 2018 a za rok 2021 je také cca 0,8 mSv.

Radiační zátěž ze scintigrafií je nižší než radiační zátěž z CT vyšetření, a to zejména hlavně z důvodu frekvence prováděných vyšetření a dostupnosti těchto metod (CT najdeme v každé nemocnici, nukleární medicína není tak častá).

Pravděpodobnost vzniku stochastických účinků

Pro odhad pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků (rakoviny) byl použit program „*X-ray calculator*“. Společnost, která tento program provozuje, se dlouhodobě zabývá vztahem ozáření a možností vzniku rakoviny. Program zpracovává výsledky pomocí rozsáhlé databáze vyšetření. Pro odhad pravděpodobnosti je potřeba vložit výslednou efektivní dávku z daného vyšetření, věk pacienta v u CT vyšetření je důležité

vložit hodnotu DLP. V rámci mého výzkumu jsem provedla odhad pravděpodobnosti u skupiny vyšetřených pacientů za měsíc leden roku 2022. Výsledky ale nelze brát závazně, neboť riziko pro pacienta průměrného věku není nutně průměrné riziko všech pacientů. Výsledné hodnoty nelze považovat za absolutní, protože v současné době neexistuje žádná metoda, která by provedla přesný odhad vzniku pravděpodobnosti stochastických účinků z obdržené dávky. Všechny dostupné kalkulátory jsou připojeny k rozsáhlým databázím, které zahrnují miliony vyšetření, které je možné pomocí faktorů realizovat. Přesto není tyto výsledky možné považovat za odhad reálně odrážející pravděpodobnost vzniku rakoviny.

Průměrné riziko vzniku stochastických účinků (rakoviny) je nízké (1 : 2 000 až 1 : 16 000). Dle tabulek č. 36 – 39 je vidět, že celkové riziko vzniku rakoviny se zvyšuje jen o málo. Nicméně, protože máme velký počet vyšetření (více než milion ročně), znamená toto malé riziko několik set nádorů indukovaných diagnostikou ročně.

Samozřejmě ale také musíme vnímat, že velká část pacientů má již nějakou základní diagnózu a nemá velkou šanci, aby žili ještě 20 let (typické období latence), aby se tohoto nádoru dožili. Otázkou zůstane, zda by nebylo nutné, v radiodiagnostice tyto aspekty zohlednit, a proto pokud je to možné, se vyhnout CT vyšetřením a nahradit to méně rizikovými vyšetřeními (jako je např. MR, UZ, skiografie). To je možné ale pouze v případě, když dostaneme dostatečnou diagnostickou informaci pouze jednou modalitou.

Statistické údaje z USA ukazují, že počet CT vyšetření ročně (které průměrnou dávkou ročního ozáření překračují až 4x) se tam za posledních 40 let zvýšil ze 3 na 85 miliónů. Studie Národního institutu pro rakovinu odhaduje, že 2 % z celkového počtu 1,7 milionu diagnostikovaných rakovin v roce 2007 (je to asi cca 29 000) byla způsobena CT vyšetřeními. Z tohoto počtu by se měla rakovina týkat z 66 % žen. Odborná komunita se tak neshoduje na tom, jestli někomu lékařské ozáření může uškodit, jako moc může uškodit nebo komu může škodit víc. (Gender a věda)

4 Závěr

S neustálým rozvojem medicínské techniky lehce narůstá počet diagnostických a terapeutických modalit, které využívají k zobrazování a léčbě ionizující záření a zároveň je lékařské diagnostické ozáření nenahraditelnou metodou při léčbě a diagnostice různých nemocí. Pomocí těchto modalit se výrazně zvyšuje kvalita zdravotní péče, protože získáváme kvalitnější diagnostickou informaci. Nesmíme ale zapomínat, že i přes to, že získáváme kvalitní informace, se s ionizujícím zářením pojí i různá rizika a v neposlední řadě také jeho škodlivé účinky na zdraví obyvatel a životního prostředí. S diagnostickým lékařským ozářením se pojí důležitý pojem radiační ochrana. V rámci radiační ochrany by se měli všichni, kdo pracují na pracovištích s ionizujícím zářením, řídit jejími principy. Důležité je zejména nejdříve odůvodnit každou činnost, která se pojí s použitím ionizujícího záření, zda nám poskytne dostačující diagnostickou informaci a zároveň je velmi důležité aplikovat optimalizaci, tzn. že počet expozičních dávek mají být tak nízké, jak je rozumně dosažitelné. Protože s každým lékařským ozářením se pojí efektivní dávky, které pacient obdrží, musí se radiační ochrana zaměřovat i na odhad radiační zátěže. Díky neustálému a prudkému vývoji lze konstatovat, že efektivní dávky z lékařského ozáření se snižují a tím se snižuje i pravděpodobnost vzniku nežádoucích účinků spojených s lékařským ozářením. Na druhé straně ale stále roste počet vyšetření, takže i malá rizika z hlediska veřejného zdraví nejsou zanedbatelné.

Diplomová práce byla rozdělena do dvou částí – teoretické a praktické. Teoretická část se zabývá ionizujícím zářením, radiační ochranou a možnostmi lékařského ozáření, tedy využitím ionizujícího záření v medicíně.

V praktické části byly stanoveny 3 výzkumné otázky a svým výzkumem jsem se na tyto otázky snažila odpovědět.

Na stanovenou výzkumnou otázku č. 1 „*Jaké jsou efektivní dávky z lékařského ozáření různých typů vyšetření?*“ mohu na základě výzkumu a sběru dat z jednotlivých oddělení odpovědět, že hodnoty efektivních dávek jsou odpovídající hodnotám uváděným v Reportu UNSCEAR 2020/2021.

Na stanovenou výzkumnou otázku č. 2 „*Jaké jsou roční počty jednotlivých vyšetření v ČR?*“ mohu na základě výzkumu a sběru dat odpovědět, že počet výkonů provedených u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění za rok 2018 překračuje počet 680 tis. a za rok 2021 překračuje počet 760 tis. Dle statistiky ze serveru „*Statista*“ celkový počet provedených výkonů v ČR přesahuje za rok 2018 počet 1 178 tis. a za rok 2021 počet 1 155 tis. Lze konstatovat, že počet výkonů mírně klesl v rámci celé ČR, ale v rámci výkonů provedených u pacientů v rámci veřejného zdravotního pojištění lehce stoupl.

Na stanovenou výzkumnou otázku č. 3 „*Jaká je pravděpodobnost vzniku stochastických účinků způsobených lékařským ozářením?*“ mohu na základě výzkumu a sběru dat říci, že riziko plynoucí z lékařského ozáření je malé, není ale neopomenutelné. Riziko spojené s lékařským ozářením existuje vždycky, i když k tomu nejsou žádné přímé epidemiologické důkazy, které by to potvrdzovaly. V rámci mého výzkumu se jedná pouze o odhad pravděpodobnosti jejich vzniku. Tento odhad slouží pouze pro celistvou představu o dávkách, které vycházejí z dlouhodobého epidemiologického šetření populace.

V závěru lze říci, že ionizující záření je velkým přínosem pro medicínu obecně jak v léčbě (radioterapie), tak i v diagnostice (radiodiagnostika, nukleární medicína). Tyto metody budou mít v medicíně vždy své nezastupitelné místo a s postupným vývojem techniky se nám otevírají dveře k novým možnostem diagnostiky a léčby různých onemocnění. Nicméně je nutné vždy zvážit různé alternativy a pokud je to možné, tak se vyhnout metodám spojeným s radiační zátěží a nahradit je méně rizikovými vyšetřeními.

5 Zdroje

DAVÍDKOVÁ, M. *Biologické účinky nízkých dávek ionizujícího záření*. Praha: Ústav jaderné fyziky AV ČR. (online). [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: Biologické účinky ionizujícího záření (cern.ch).

EANM & UEMS/EBNM. *European Nuclear Medicine Guide*. Edition 2020. ISBN: 978-90-78876-13-7. Dostupné z: European Nuclear Medicine Guide (nucmed-guide.app).

GENDER A VĚDA. *Případová studie: Lékařské ozáření*. (online). [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: Případová studie: Lékařské ozáření | NKC - gender a věda (genderaveda.cz).

HUDZIETZOVÁ, J., M. FÜLÖP, J. SABOL a J. DOLEŽAL, 2015. Assessment of the local exposure of skin on hands of nuclear medicine workers handling ¹⁸F – Labelled radiopharmaceuticals: Preliminary Czech study. *Radiation Protection Dosimetry* (2016) [online]. 445-452 [cit. 2022-10-11]. DOI: 10.1093/rpd/ncv441.

HUŠÁK, Václav. *Radiační ochrana pro radiologické asistenty*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. ISBN 978-80-244-2350-0.

IAEA. *Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1996 report to the General Assembly, with scientific annex*. New York (USA), 1996. (online). [cit. 2023-01-30]. ISBN 92-1-142219-1. Dostupné z: Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1996 report..|INIS (iaea.org).

ICRP Publication 103. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. International Commission on Radiological Protection, 2007. (online). [cit. 2022-25-10]. Dostupné z: ICRP.

JUNKL, A. K., HASKAL, Z. a WORGUL, B. V. *Cataract in Interventional Radiology – an Occupational Hazard?* *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, květen 2004. (online). [cit. 2022-20-10] Dostupné z: Cataract in Interventional Radiology – an Occupational Hazard? | IOVS | ARVO Journals.

KLENER, V. *Několik radiobiologických poznámek pro pracovníky v intervenční radiologii*. Praha: Státní úřad radiační ochrany. (online). [cit. 2022-20-10]. Dostupné z: Několik radiobiologických poznámek pro pracovníky v intervenční radiologii (sujb.cz).

KLENER, Vladislav. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 80-238-3703-6.

KOLEKTIV AUTORŮ. *Radiobiologie: Základní fyzikální poznatky o ionizujícím záření a neionizujícím záření, jeho detekce a dozimetrie*. [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola.html>.

KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK. *Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0168-9.

KUNA, P., NAVRÁTIL, L. a kolektiv. *Klinická radiobiologie*. 1. vydání. Praha: Manus, 2005. ISBN 80-86571-09-2.

KUPKA, K., J. KUBINYI a M. ŠÁMAL. *Nukleární medicína*. 6. vydání (2. vydání v Nakladatelství P3K). V Praze: P3K, 2015. ISBN 978-80-87343-54-8.

LINKOS. *Apoptóza*. (online). ©2023. [cit. 2023-01-29]. ISSN 2570-8791. Dostupné z: [apoptóza » Linkos.cz](http://apoptoza.linkos.cz).

LINKOS. *Role autofagie v cílené léčbě maligního melanomu*. (online). ©2023. [cit. 2023-01-29]. ISSN 2570-8791. Dostupné z: [Role autofagie v cílené léčbě maligního melanomu. » Linkos.cz](http://roleautofagie.linkos.cz).

MASARYKŮV ONKOLOGICKÝ ÚSTAV. *Radioterapie*. (online). [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: [Radioterapie Masarykův onkologický ústav Brno \(mou.cz\)](http://radioterapie.masarykuv.onkologicky.ustav.brno.mou.cz).

MASARYKŮV ONKOLOGICKÝ ÚSTAV. *Rentgenové vyšetření*. (online). [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: [Ultrazvukové vyšetření Masarykův onkologický ústav Brno \(mou.cz\)](http://ultrazvukovevysetreni.masarykuv.onkologicky.ustav.brno.mou.cz).

- MOHAN, D. *Problems with the Linear No-Threshold Model and Reasons Why It Should Not be Used for Radiation Protection*. Fox Chase Cancer Center, Philadelphia, PA, 17. října 2016 (online). [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: PowerPoint Presentation (sukupova.cz).
- MORBACHEROVÁ, J. *Atomová, jaderná a kvantová fyzika*. [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/270/Cover.html>.
- PODZIMEK, F. *Radiologická fyzika: fyzika ionizujícího záření*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05319.
- PROUZA, Z. a J. SINGER. *Principy radiační ochrany*. České Budějovice: Jihočeská univerzita: Zdravotně sociální fakulta, 2006. [cit. 2022-12-12].
- RADIOBIOLOGIE. *Kůže*. [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: fbmi.sirdik.org/5-kapitola/53/539.html.
- REICHL, J. a VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky: neutronové záření*. 2006. [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: Neutronové záření :: MEF (jreichl.com).
- REICHL, J. a VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky: záření alfa*. 2006. [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: Záření alfa :: MEF (jreichl.com).
- REICHL, J. a VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky: záření beta*. 2006. [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: Záření beta :: MEF (jreichl.com).
- ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, J. a STANĚK, J. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2006. ISBN 80-247-13837.
- SEIDL, Zdeněk. *Radiologie pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4108-6.
- SÚJB. *Atomové právo*. (online). [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: Atomové právo - Legislativa - Úvod - SÚJB (sujb.cz).
- SÚJB. *Dozor nad radiační ochranou*. (online). [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: Úvod - Radiační ochrana - Úvod - SÚJB (sujb.cz).

SÚJB. *Hodnocení lékařského ozáření*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2021. (online). [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: Bulletinlo2021.pdf (sujb.cz).

SÚJB. *Ozáření z přírodních zdrojů záření*. [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: Ozáření z přírodních zdrojů záření - Přírodní zdroje ionizujícího záření - Radiační ochrana - Úvod - SÚJB (sujb.cz).

SÚJB. *Používání rentgenů – lékařské ozáření*. (online). [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: Používání rentgenů - lékařské ozáření - Oznámení a informace - Radiační ochrana - Úvod - SÚJB (sujb.cz).

SÚJB. *Radiační ochrana. Doporučení. Zabezpečení osobního monitorování při činnostech vedoucích k ozáření*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost, červenec 2005. (online). [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: Microsoft Word - ZABEZPEČENÍ OSOBNÍHO MONITOROVÁNÍ PŮI ÈINNOSTECH VEDOUČÍCH– (sujb.cz).

SÚJB. *Rozsah znalostí požadovaných pro získání zvláštní odborné způsobilosti pro nakládání se zdroji ionizujícího záření v radioterapii*. (online). [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: Rozsah znalostí požadovaných pro získání zvláštní odborné způsobilosti pro nakládání se zdroji ionizujícího záření v radioterapii - Zkoušky zvláštní odborné způsobilosti - Radiační ochrana - Úvod - SÚJB (sujb.cz).

SÚJB. *Stručný přehled biologických účinků záření*. [online]. [cit. 2022-10-12]. Dostupné z: Stručný přehled biologických účinků záření - Oznámení a informace - Radiační ochrana - Úvod - SÚJB (sujb.cz).

SÚKUPOVÁ, L. *deterministické a stochastické účinky ozáření*. Lucie Súpová, 2022. (online). [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: Deterministické a stochastické účinky ozáření | Lucie Súpová (sukupova.cz).

SURO. *Biologické účinky ionizujícího záření*. [online]. ©2023. [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: Biologické účinky ionizujícího záření | SURO.

SURO. *Lékařské ozáření*. [online]. [cit. 2023-01-07]. Dostupné z: Lékařské ozáření | SURO.

SURO. *Principy radiační ochrany*. (online). [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: Principy radiační ochrany | SURO.

ŠIDLÍKOVÁ, M. *Alfa, beta, gama záření – principy a vztahy, způsoby měření, užití v praxi, interakce záření s prostředím* [online]. České Budějovice [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: MVT (jcu.cz). Referát. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyziky.

TOMÁŠEK, L. *Radiační rizika z CT vyšetření*. (online). 2001. [cit. 2023-12-02]. Dostupné z: Rentgen_6_2016.pdf (suro.cz).

TŘÍPÓL. *Jaderná fyzika a energetika: etika a rizika radiace*. Simopt, s.r.o., Tábor, 2014 (online). [cit. 2022-11-02]. ISSN 2464-7888. Dostupné z: Etika a rizika radiace | 3 pól - Magazín plný pozitivní energie (3pol.cz).

ULLMAN, V. *Vliv ionizujícího záření na živé organismy: biologické účinky ionizujícího záření*. (online). [cit. 2022-11-02]. Dostupné z: Biologické účinky ionizujícího záření. Radiacní ochrana. (astronuklfyzika.cz).

ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. Ionizující záření [online], 2002. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: Ionizující záření (astronuklfyzika.cz).

UNEP. *Ionizující záření účinky a zdroje*. Program OSN pro ochranu životního prostředí, 2016. ISBN: 978-92-807-3600-7.

UNSCEAR 2020/2021 REPORT. *Volume I: Report to the General Assembly: Scientific Annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation*. United Nations, New York, 2022. ISBN: 978-92-1-139206-7. Dostupné z: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation (unscear.org).

UVIVERZITA KARLOVA PRAHA. *Deterministické účinky ionizujícího záření*. [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://webservices3.lf1.cuni.cz>.

VENCLÍK, Zdeněk. *Nakládání s radiačními odpady na oddělení nukleární medicíny*. České Budějovice: Jihočeská Univerzita: Zdravotně sociální fakulta, 2012. (online). [cit.

2022-11-21]. Dostupné z: Nakládání s radiačními odpady na oddělení nukleární medicíny – Zdeněk VENCLÍK (theses.cz).

Věstník Ministerstva zdravotnictví České republiky: Standardy zdravotní péče – Národní radiologické standardy – Nukleární medicína, 2016. Praha: Ministerstvo zdravotnictví ČR, Částka 2/2016. Dostupné z: Věstník MZ ČR 2-2016.pdf (mzcr.cz).

VOMÁČKA, Jaroslav, Josef, NEKULA a Jiří KOZÁK. *Zobrazovací metody pro radiologické asistenty*. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012. ISBN 978-80-244-3126-0.

Vyhláška č. 214/1997 Sb. ze dne 5. září 1997: Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o zabezpečování jakosti při činnostech souvisejících s využíváním jaderné energie a činnostech vedoucích k ozáření a o stanovení kritérií pro zařazení a rozdělení vybraných zařízení do bezpečnostních tříd, 1997. In: Sběrka zákonů ČR. Ročník 1997. Dostupné z: 214/1997 Sb. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o zabezpečování jakosti při činnostech souvisejících... (zakonyprolidi.cz).

Vyhláška č. 307/2002 Sb. ze dne 12. července 2002: Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně, 2002. In: Sběrka zákonů ČR. Ročník 2002. Dostupné z: 307/2002 Sb. Vyhláška o radiační ochraně (zakonyprolidi.cz).

Vyhláška č. 422/2016 Sb. ze dne 14. prosince 2016: Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, 2016. In: Sběrka zákonů ČR. Ročník 2016. Dostupné z: sb172-16 6617..6904 (sujb.cz).

WIKISKRIPTA. *Skiografie*. (online). 2018. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: Skiografie – WikiSkripta.

WIKISKRIPTA. *Skiaskopie*. (online). 2022. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: Skiaskopie – WikiSkripta.

X-RAY RISK. *Calculate your risk*. (online). Updated on 2023-03-25. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: XrayRisk.com .:

Zákon č. 18/1997 Sb. ze dne 24. ledna 1997: Zákon o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, 1997. In: Sbíрка zákonů ČR. Ročník 1997. Dostupné také z: Atomovy_zakon_II (sujb.cz).

Zákon č. 263/2016 Sb. ze dne 14. července 2016: Zákon atomový zákon, 2016. In: Sbíрка zákonů ČR. Ročník 2016. Dostupné také z: 263/2016 Sb. Zákon atomový zákon (zakonyprolidi.cz).

ZÖLZER, F. *Radiobiologie buňky*. České Budějovice: Jihočeská univerzita: Zdravotně sociální fakulta, 2007. (online). [cit. 2022-13-10]. Dostupné z: <http://www.zsf.jcu.cz/cs/katedra/katedra-radiologie-toxikologie-a-ochrany-obyvательства/informace-katedry/informace-pro-studenty/ucebni-texty/ochrana-ob>

ZÖLZER, F., KUNA, P. a NAVRÁTIL, L. *Mechanismy účinků ionizujícího záření*. České Budějovice: Jihočeská univerzita: Zdravotně sociální fakulta, 2007. (online). [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: [mechanizmy-ucinku-ionizujiciho-zareni.pdf \(jcu.cz\)](#).

ZOUL, D., KOPLOVÁ, M. a KREJČOVÁ, P. *Radiační mimořádné události, část II*. Aldebaran Bulletin, 2020. (online). [cit. 2020-21-10]. Dostupné z: David Zoul, Markéta Koplová, Petra Krejčová: [Radiační mimořádné události, část II \(aldebaran.cz\)](#).

6 Seznam grafů

Graf 1 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - scintigrafie skeletu	78
Graf 2 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) – scintigrafie skeletu	79
Graf 3 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu scintigrafii skeletu.....	80
Graf 4 Průměrná efektivní dávka E na jednu scintigrafii skeletu	80
Graf 5 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii – scintigrafie myokardu.....	81
Graf 6 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - scintigrafie myokardu	82
Graf 7 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii myokardu	83
Graf 8 Průměrná efektivní dávka E na jednu perfuzní scintigrafii myokardu.....	83
Graf 9 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - perfuzní a ventilační scintigrafie plic	84
Graf 10 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu perfuzní scintigrafii plic.....	85
Graf 11 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu ventilační scintigrafii plic	86
Graf 12 Průměrná E na jednu perfuzní scintigrafii plic – porovnání.....	86
Graf 13 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - dynamická scintigrafie ledvin	87
Graf 14 Průměrná aplikovaná aktivita na jednu dynamickou scintigrafii ledvin – porovnání	88
Graf 15 Průměrná E na jednu dynamickou scintigrafii ledvin – porovnání	89
Graf 16 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - CT mozku nativně.....	90
Graf 17 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT mozku nativně.....	91

Graf 18 Průměrná E na jedno CT mozku nativně – porovnání	92
Graf 19 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - CT břicha nativně.....	93
Graf 20 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT břicha nativně.....	94
Graf 21 Průměrná E na jedno CT břicha nativně – porovnání	95
Graf 22 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii – CT hrudníku nativně.....	96
Graf 23 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT hrudníku nativně.....	97
Graf 24 Průměrná E na jedno CT hrudníku nativně (porovnání)	98
Graf 25 Počet vyšetření v závislosti na věkové kategorii - CT LS páteře nativně	99
Graf 26 Podíl vyšetření (%) v závislosti na věkové kategorii (porovnání) - CT LS páteře nativně.....	100
Graf 27 Průměrná E na jedno CT LS páteře nativně (porovnání)	101

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma záření alfa	20
Obrázek 2 záření beta	21
Obrázek 3 Průměrné expozice obyvatel podle zdrojů záření	24
Obrázek 4 schéma rentgenky s rotující anodou	26
Obrázek 5 Umístění interakcí elektromagnetického záření	28
Obrázek 6 Účinky záření na lidský organismus	31
Obrázek 7 Deterministické a stochastické účinky	37
Obrázek 8 Principy radiační ochrany	44
Obrázek 9 Stínící zástěra	51
Obrázek 10 Filmový dozimetr	55
Obrázek 11 Termoluminiscenční dozimetr	56
Obrázek 12 OSL dozimetr	57
Obrázek 13 Příklad - scintigrafie skeletu	63
Obrázek 14 Příklad - ultrazvuk srdce v M módu	65
Obrázek 15 Příklad RTG ruky	65
Obrázek 16 Příklad - nativní CT mozku	67
Obrázek 17 Příklad - MR mozku	68
Obrázek 18 X-ray risk calculator	76
Obrázek 19 Graf věkové závislosti pravděpodobnosti vzniku rakoviny	77

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 Obecné limity.....	47
Tabulka 2 Limity pro radiační pracovníky	47
Tabulka 3 Limity pro učně a studenty	48
Tabulka 4 Hodnoty radiačního váhového součinitele W_R	58
Tabulka 5 Hodnoty tkáňového váhového faktoru.....	59
Tabulka 6 Rozdělení mužů a žen - scintigrafie skeletu	78
Tabulka 7 Rozdělení mužů a žen - perfuzní scintigrafie myokardu	81
Tabulka 8 Rozdělení mužů a žen - perfuzní a ventilační scintigrafie plic.....	84
Tabulka 9 Rozdělení mužů a žen – dynamická scintigrafie ledvin	87
Tabulka 10 Rozdělení mužů a žen – CT mozku nativně	90
Tabulka 11 Rozdělení mužů a žen - CT břicha nativně.....	93
Tabulka 12 Rozdělení mužů a žen - CT hrudníku nativně	96
Tabulka 13 Rozdělení mužů a žen - CT LS páteře nativně	99
Tabulka 14 Počet scintigrafií skeletu za rok 2018	102
Tabulka 15 Počet scintigrafií skeletu za rok 2021	102
Tabulka 16 Odhad kolektivní efektivní dávky - scintigrafie skeletu.....	103
Tabulka 17 Počet perfuzních scintigrafií myokardu za rok 2018.....	104
Tabulka 18 Počet perfuzních scintigrafií myokardu za rok 2021	104
Tabulka 19 Odhad kolektivní efektivní dávky - perfuzní scintigrafie myokardu.....	105
Tabulka 20 Počet dynamických scintigrafií ledvin za rok 2018.....	106
Tabulka 21 Počet dynamických scintigrafií ledvin za rok 2021	106

Tabulka 22 Odhad kolektivní efektivní dávky - dynamická scintigrafie ledvin.....	107
Tabulka 23 Počet perfuzních scintigrafií plic za rok 2018	108
Tabulka 24 Počet perfuzních scintigrafií plic za rok 2021	108
Tabulka 25 Odhad kolektivní efektivní dávky - perfuzní scintigrafie plic.....	109
Tabulka 26 Počet ventilačních scintigrafií plic za rok 2018.....	109
Tabulka 27 Počet ventilačních scintigrafií plic za rok 2021.....	110
Tabulka 28 Odhad kolektivní efektivní dávky - ventilační scintigrafie plic	110
Tabulka 29 Počet CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní za rok 2018	111
Tabulka 30 Počet CT vyšetření hlavy nebo těla nativní a kontrastní za rok 2021	111
Tabulka 31 Počet CT vyšetření bez použití KL do 30 skenů za rok 2018	113
Tabulka 32 Počet CT vyšetření bez použití KL do 30 skenů za rok 2021	113
Tabulka 33 Počet CT vyšetření s větším počtem skenů (nad 30), bez použití KL za rok 2018	115
Tabulka 34 Počet CT vyšetření s větším počtem skenů (nad 30), bez použití KL za rok 2021	115
Tabulka 35 Odhad kolektivní efektivní dávky u CT vyšetření.....	117
Tabulka 36 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u mužů v NM.....	118
Tabulka 37 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u žen v NM	119
Tabulka 38 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u mužů po CT vyšetření.....	119
Tabulka 39 Pravděpodobnost vzniku rakoviny u žen po CT vyšetření	120