



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Metody nukleární medicíny v diagnostice kardiovaskulárních onemocnění

Methods of nuclear medicine in diagnostics of cardiovascular diseases

Bakalářská práce

Studijní program: Specializace ve zdravotnictví

Studijní obor: Radiologický asistent

Autor bakalářské práce: Tereza Včelišová

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petra Dostálová

Kladno 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Včelišová** Jméno: **Tereza** Osobní číslo: **473779**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**
Studijní program: **Specializace ve zdravotnictví**
Studijní obor: **Radiologický asistent**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Metody nukleární medicíny v diagnostice kardiovaskulárních onemocnění

Název bakalářské práce anglicky:

Methods of Nuclear Medicine in Diagnostics of Cardiovascular Diseases

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce bude zaměřena na jednotlivá kardiovaskulární onemocnění a jejich diagnostiku pomocí metod nukleární medicíny. Součástí práce bude vytvoření stručného přehledu používaných radiofarmak v nukleární kardiologii. Největší část bakalářské práce bude věnována klidové a zátěžové scintigrafii myokardu, jejímu principu, indikacím a jejich patofyziologii, používaným radiofarmakům a způsobu vyšetření. Bude zmíněno vyšetření metabolismu myokardu a jeho viability pomocí zobrazovacích metod. Součástí práce bude i princip vyšetření myokardu pomocí moderního zobrazovacího systému D-SPECT. Praktická část se zaměří na kazuistiky konkrétních kardiologických onemocnění získaných z pracovišť nukleární medicíny.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KORANDA, Pavel, Nukleární medicína, Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, ISBN 978-80-244-4031-6
- [2] KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL, Nukleární medicína, ed. 6. vydání (2. vydání v Nakladatelství P3K), V Praze: P3K, 2015, ISBN 978-80-87343-54-8
- [3] KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK, Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami, ed. , Praha: Grada Publishing, 2018, ISBN 978-80-271-0168-9

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petra Dostálová

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **17.02.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**


prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc., MBA, dr.h.c.
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Metody nukleární medicíny v diagnostice kardiovaskulárních onemocnění vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne 20.05.2020

.....
Tereza Včelišová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi ráda poděkovala Ing. Petře Dostálové za její ochotu a cenné rady pro zhotovení této práce. Dále bych chtěla poděkovat primářce MUDr. Nevence Solar a MUDr. Marii Buncové, CSc. za odborné konzultace a popis nálezů, vrchní sestře Bc. Daniele Bencsikové za poskytnutí dat a pomoc s kazuistikami. Mimo jiné bych chtěla poděkovat celému personálu Radioizotopového pracoviště Institutu klinické a experimentální medicíny za umožnění praktické výuky.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině za podporu a trpělivost.

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce je vytvoření souhrnu všech dostupných metod nukleární medicíny v diagnostice kardiovaskulárních onemocnění. V jednotlivých kapitolách používaných metod nukleární kardiologie jsou popsány indikace, příprava pacienta, radiační zátěž, princip a hodnocení vyšetření.

Součástí bakalářské práce je přehled vývoje zobrazovacích systémů používaných při akvizici snímků myokardu včetně dedikované kamery D-SPECT.

V teoretické části je také vytvořen souhrn jednotlivých radiofarmak používaných pro zobrazení perfúze, inervace, nekrózy a metabolismu myokardu.

Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na jednotlivé metody nukleární kardiologie v diagnostice kardiovaskulárních defektů ve formě kazuistik.

Klíčová slova

Nukleární kardiologie; D-SPECT; radiofarmaka; perfúzní scintigrafie myokardu; radionuklidová ventrikulografie; viabilita myokardu; inervace myokardu

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to make a summary of all available methods of nuclear medicine in diagnosing cardiovascular diseases. Indications, preparation of patients, radiation burden and the principle and evaluation of the examination are described in the individual chapters on the methods of nuclear cardiology.

A part of the bachelor thesis is an overview of the development of imaging systems used for the acquisition of myocardial images including a D-SPECT dedicated camera.

In the theoretical part, there is also a summary of individual radiopharmaceutical drugs used for imaging perfusion, innervation, necrosis and myocardial metabolism.

The practical part of the bachelor thesis focuses on individual methods of nuclear cardiology in the diagnosing cardiovascular defects in the form of case histories.

Keywords

Nuclear cardiology; D-SPECT; radiopharmaceutical; myocardial perfusion scintigraphy; radionuclide ventriculography; myocardial viability; myocardial innervation

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Cíle práce.....	13
3	Přehled současného stavu.....	14
3.1	Historie nukleární kardiologie	14
3.2	Princip zobrazení v nukleární kardiologii.....	14
3.3	Zobrazovací systémy.....	15
3.3.1	Scintilační kamera	16
3.3.2	SPECT.....	18
3.3.3	Pozitronová emisní tomografie	22
3.4	Radiofarmaka využívaná pro scintigrafii myokardu.....	23
3.4.1	Radiofarmaka pro perfúzi myokardu	23
3.4.2	Zobrazení glukózového metabolismu myokardu.....	27
3.4.3	Zobrazení nekrózy myokardu.....	29
3.4.4	Zobrazení inervace myokardu	30
3.5	Perfúzní scintigrafie myokardu.....	31
3.5.1	Indikace a jejich patofyziologie	32
3.5.2	Příprava pacienta.....	34
3.5.3	Princip vyšetření.....	34
3.5.4	Vyšetřovací protokoly	37
3.5.5	Provedení scintigrafického vyšetření	40
3.5.6	Radiační zátěž	41
3.5.7	Hodnocení scintigrafického záznamu.....	42
3.6	Radionuklidová ventrikulografie.....	44

3.6.1	Indikace.....	44
3.6.2	Příprava pacienta.....	44
3.6.3	Princip vyšetření.....	45
3.6.4	Radiační zátěž.....	45
3.6.5	Hodnocení vyšetření.....	45
3.7	Radionuklidová angiokardiografie.....	46
3.7.1	Indikace.....	46
3.7.2	Princip vyšetření.....	47
3.7.3	Radiační zátěž.....	47
3.7.4	Hodnocení vyšetření.....	47
3.8	Vyšetření metabolismu myokardu.....	48
3.8.1	Princip, indikace a jejich patofyziologie.....	48
3.8.2	Provedení vyšetření.....	49
3.9	Vyšetření inervace myokardu.....	50
3.9.1	Indikace a jejich patofyziologie.....	50
3.9.2	Princip vyšetření.....	51
4	Metodika.....	52
5	Výsledky.....	53
5.1	Kazuistika č. 1 – fyziologický nález.....	53
5.1.1	Indikace.....	53
5.1.2	Průběh vyšetření.....	53
5.1.3	Popis nálezu.....	54
5.1.4	Závěr.....	54
5.2	Kazuistika č. 2 – drobná nevýznamná ložiska snížené četnosti.....	54

5.2.1	Indikace.....	54
5.2.2	Průběh vyšetření.....	55
5.2.3	Popis nálezu	55
5.2.4	Závěr	55
5.3	Kazuistika č. 3 – ložisko v bazální části septa	56
5.3.1	Indikace.....	56
5.3.2	Průběh vyšetření.....	56
5.3.3	Popis nálezu	57
5.3.4	Závěr	57
5.4	Kazuistika č. 4 – snížená perfúze na přední stěně LK.....	58
5.4.1	Indikace.....	58
5.4.2	Průběh vyšetření.....	58
5.4.3	Popis nálezu	58
5.4.4	Závěr	59
5.5	Kazuistika č. 5 – reverzibilní defekt.....	60
5.5.1	Indikace.....	60
5.5.2	Průběh vyšetření.....	60
5.5.3	Popis nálezu	60
5.5.4	Závěr	60
5.6	Kazuistika č. 6 – reverzibilní defekt.....	61
5.6.1	Anamnéza.....	61
5.6.2	Průběh vyšetření.....	62
5.6.3	Popis nálezu	62
5.6.4	Závěr	62

5.7	Kazuistika č. 7 – rozsáhlý perfúzní defekt	64
5.7.1	Indikace.....	64
5.7.2	Průběh vyšetření.....	64
5.7.3	Popis nálezu	64
5.7.4	Závěr	64
5.8	Kazuistika č. 8 – fixní defekt	65
5.8.1	Indikace.....	65
5.8.2	Průběh vyšetření.....	65
5.8.3	Popis nálezu	66
5.8.4	Závěr	66
5.9	Kazuistika č. 9 – farmakologická zátěž předoperačního vyšetření	67
5.9.1	Indikace.....	67
5.9.2	Průběh vyšetření.....	67
5.9.3	Popis nálezu	67
5.9.4	Závěr	68
5.10	Kazuistika č. 10 – určení viability myokardu.....	68
5.10.1	Indikace	68
5.10.2	Průběh vyšetření.....	68
5.10.3	Popis nálezu	69
5.10.4	Závěr.....	69
5.11	Kazuistika č. 11 – ventrikulografie	70
5.11.1	Indikace	70
5.11.2	Průběh vyšetření.....	70
5.12	Kazuistika č. 12 – inervace.....	71

5.12.1	Indikace	71
5.12.2	Popis nálezu	71
6	Diskuze	72
7	Závěr	78
8	Seznam použitých zkratk.....	79
9	Seznam použité literatury	81
10	Seznam použitých obrázků	83
11	Seznam použitých tabulek.....	85

1 ÚVOD

Nukleární kardiologie je odvětví nukleární medicíny používající otevřené radioaktivní zářiče k určení diagnózy, prognózy a způsobu léčby kardiovaskulárních onemocnění.

Na světě jsou onemocnění kardiovaskulárního systému stále příčinou vysoké mortality. Z tohoto důvodu je vhodné provádět scintigrafické vyšetření srdečního svalu. Nejvíce používanou metodou je hodnocení perfúze srdečního svalu pomocí jednofotonové emisní počítačové tomografie. Neboť toto vyšetření může zachytit ischemickou chorobu srdeční, stanovit riziko akutního infarktu myokardu a minimalizovat tak riziko náhlé srdeční smrti.

K radionuklidovému vyšetření srdečního svalu slouží neinvazivní metody nukleární kardiologie, jimiž jsou:

- perfúzní scintigrafie myokardu;
- radionuklidová ventrikulografie;
- radionuklidová angiokardiografie;
- vyšetření metabolismu myokardu;
- vyšetření inervace myokardu.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je vytvoření souhrnu všech dostupných metod nukleární kardiologie a popsat jejich princip. Dalším cílem bakalářské práce je popsat scintigrafické vyšetření myokardu pomocí jednoúčelové kamery D-SPECT.

Jednotlivé metody nukleární kardiologie jsou popsány jak teoreticky, tak i pomocí kazuistik získaných z pracoviště nukleární medicíny.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Historie nukleární kardiologie

Nukleární medicína je specifická diagnostikou a léčbou patologických procesů pomocí aplikace otevřených radioaktivních zářičů, které se vpravují do těla pacienta ve formě radiofarmak.

Počátek tohoto oboru se datuje do padesátých let 20. století, kdy Blugmart zkoumal rychlost krevního proudu u člověka. Intravenózně aplikoval radioaktivní plyn radon a jako detektor použil Wilsonovu mlžnou komoru. Přesně o 20 let později byl popsán první radiokardiogram Myronem Prinzmetalem, jenž umístil do prekordia Geiger-Mülleorvu trubici a zaznamenal tak průchod bolusu radioaktivního albuminu srdcem [1].

Nukleární kardiologie zaznamenala překotný rozvoj v roce 1965, kdy se sestrojila zobrazovací gamakamera, pomocí které se měřil srdeční tranzitní čas. O 4 roky později byla gamakamera použita pro měření ejekční frakce komory při aplikaci radionuklidu přímo do komory [1].

V 70. letech 20. století se v klinické praxi začala uplatňovat zátěžová perfúzní scintigrafie srdečního svalu a zobrazení akutního infarktu myokardu. Až o několik let později byla zavedena i zátěž farmakologická. Do popředí se začala dostávat jednofotonová (SPECT) a pozitronová (PET) výpočetní tomografie, na kterých se uplatňovala kvantifikace perfúze myokardu [1].

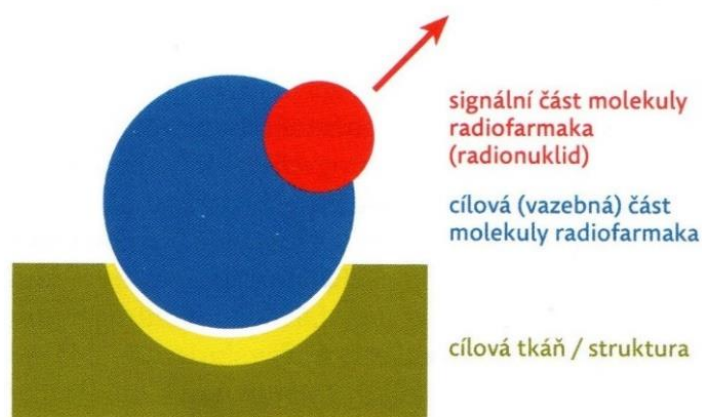
3.2 Princip zobrazení v nukleární kardiologii

Nukleární medicína se obecně zabývá metodou, která vychází z indikátorového neboli stopovacího principu. Podstatou stopovacího principu je, že radioaktivní a stabilní izotopy téhož prvku reagují stejně v chemických

reakcích, jelikož jejich atomy mají stejné elektronové obaly, ale liší se fyzikálními vlastnostmi jádra. Z této podstaty vyplývá, že lze sledovat radioaktivní prvky v chemických reakcích a měřit jejich množství vhodnými detektory [2, 3].

Do pacientova těla se intravenózně, perorálně či inhalačně vpravuje radionuklidový zářič v podobě radiofarmaka. Následně dochází k detekci záření vhodným detektorem a zobrazení distribuce radiofarmaka v organismu.

Zdrojem záření je tedy radionuklid, jenž signalizuje distribuci a polohu molekuly radiofarmaka. Radionuklid, označován také jako signální část, je aktivní částí radiofarmaka a je navázán na tzv. nosič. Nosič je součástí cílové či vazebné částí molekuly, jejíž úlohou je navázání na určité tkáňové či buněčné struktury, vstupování do chemických reakcí apod [2].



Obrázek 1 Molekula radiofarmaka, upraveno z [2]

3.3 Zobrazovací systémy

V nukleární medicíně rozdělujeme dva typy zobrazovacích metod. První metodou je scintigrafie, která využívá scintilačních či polovodičových detektorů. Další metodou je gamagrafie, jež má název podle detekce gama záření bez ohledu na typ detektoru. Dalším rozdělením scintigrafie je planární a tomografické.

Mezi planární scintigrafii se řadí statické a dynamické zobrazení. Do tomografických scintigrafických metod spadá SPECT (jednofotonová emisní výpočetní tomografie) a PET (pozitronová emisní tomografie). Tyto gamakamery mohou být využity nejen k zobrazení rozložení radiofarmaka v myokardu, ale i k vyšetření jiných orgánů. V dnešní době existují však i jednoúčelové gamakamery, které jsou určeny pro scintigrafické zobrazení myokardu, touto kamerou je např. zobrazovací systém D-SPECT [2, 3].

3.3.1 Scintilační kamera



Obrázek 2 Jednodetektorová scintilační gamakamera při kardiologickém vyšetření [1]

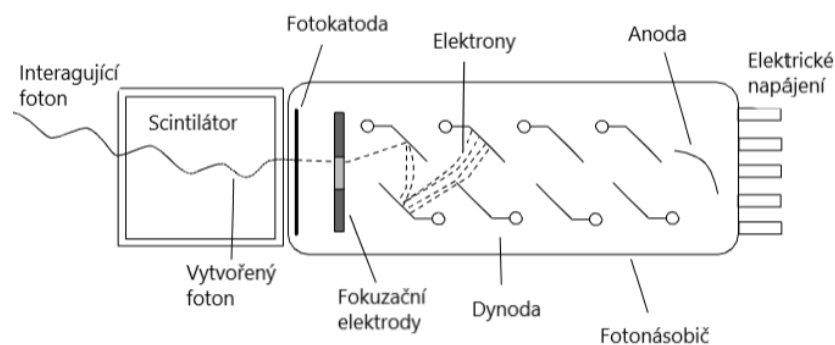
Základním zobrazovacím systémem v nukleární kardiologii je scintilační kamera neboli gama-kamera. Disponuje jedním či více detektory, které obsahují kolimátor, scintilační krystal, fotonásobič a zpracující techniku. Používá se pro zobrazení rozložení radiofarmaka v těle pacienta [4].

Z pacientova těla jsou izotropně emitovány fotony gama záření, které dopadají na detektor a dále prochází kolimátorem, jenž je vyroben z olověného materiálu a vymezuje směr ionizujícího záření. Na scintilační krystal propouští malými otvory pouze ty fotony gama, které dopadají na detektor gamakamery kolmo. Ostatní fotony jsou pohlceny v olověných septech.

Existuje široká škála výměnných kolimátorů, které se nasazují dle potřeby. Na vlastnostech kolimátoru závisí kvalita vytvořeného obrazu. Bez něj bychom viděli pouze rozmazanou plochu, a nikoliv rozložení radiofarmaka v těle pacienta [1,2].

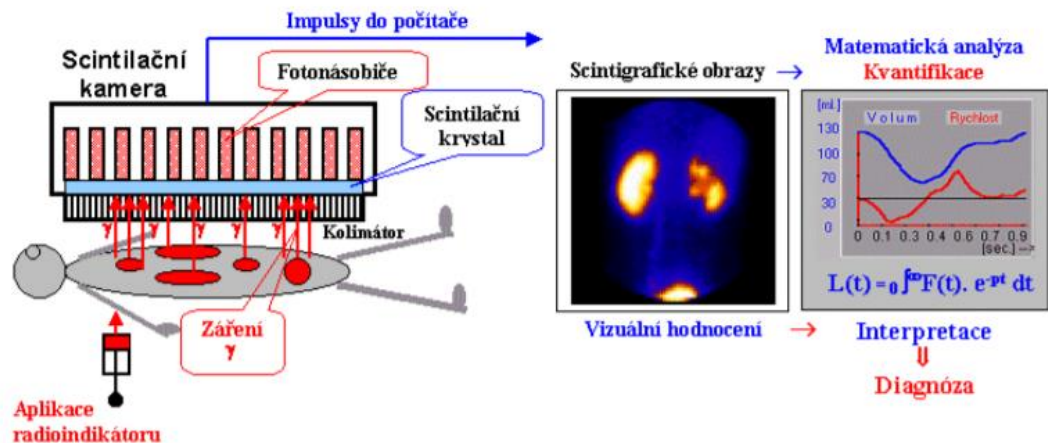
Fotony záření gama po projití kolimátorem dopadají na scintilační krystal vyrobený z jodidu sodného aktivovaného thalliem – NaI(Tl). Krystal je uložen v hliníkovém světlotěsném pouzdře, čímž se předchází nežádoucím změnám detekčních vlastností krystalu. Scintilační krystal slouží ke konverzi fotonů gama na viditelné světlo [2].

Současné scintilační kamery mají po celé své celé ploše krystalu připevněno kolem 80-100 fotonásobičů, jejichž úkolem je převod energie scintilačních fotonů na elektrický impulz a následně jeho zesílení k dalšímu zpracování. Fotonásobič je vakuová elektronická součástka, která obsahuje fotokatodu, soustavu dynod a anodu. Na fotokatodě dojde k převodu scintilačního fotonu na elektron, jenž následně dopadá na první dynodu, kde dochází k vyražení několika dalších elektronů. Tyto elektrony jsou urychleny přiloženým napětím a dopadají na další dynodu ze soustavy dynod, kde dochází opět k emisi sekundárních elektronů. Tento násobící proces je ukončen na anodě fotonásobiče, kam dopadá přibližně 10^6 elektronů. Na anodě dochází ke vzniku elektrického impulzu [2,5].



Obrázek 3 Schéma fotonásobiče, upraveno z [5]

Vzniklé elektrické impulzy z fotonásobičů jsou zpracovány složitými elektronickými obvody. Dochází k zesílení impulzů v zesilovači, k jejich třídění podle velikosti a k následnému výpočtu polohy dané události v amplitudovém analyzátoru. Konečným výsledkem zpracování signálu je množství impulzů o různé amplitudě, které tvoří tzv. energetické spektrum [2,5].



Obrázek 4 Schéma detekce fotonového záření při vyšetření, upraveno z [2]

3.3.2 SPECT

Jednofotonová emisní počítačová tomografie (SPECT) umožňuje zobrazení prostorového rozložení radiofarmaka ve formě řezů v sagitálních, transverzálních a frontálních rovinách. Při vyšetření touto zobrazovací modalitou se využívají radionuklidy, které emitují pouze jeden foton na přeměnu, nejčastěji se používá ^{99m}Tc . Optimální SPECT kamery pro kardiologické vyšetření obsahují dva otočné detektory v úhlu 90° , které rotují kolem pacienta a jejich konstrukce je shodná s planární gamakamerou. Při SPECT vyšetření myokardu se využívá rotace 180° , a to od pravé přední šikmé projekce až do levé zadní šikmé projekce, přičemž se zaznamenává 32-64 scintigrafických obrazů myokardu. Následuje počítačová rekonstrukce, ze které se konstruují

tomografické transverzální řezy, z kterých vzniká konečný trojrozměrný obraz, jenž udává informaci o rozložení radiofarmaka ve vyšetřovaném orgánu [3,4].

3.3.2.1 Synchronizovaná (gated) SPECT

Existuje několik druhů SPECT. Jedním z nich je hradlovaná jednofotonová emisní počítačová tomografie (G-SPECT), která zobrazuje nejen prostorovou distribuci radiofarmaka v myokardu, ale i pohyb levé komory srdečního svalu. Tato zobrazovací metoda spolupracuje s elektrokardiografií (EKG). Z tohoto vyšetření získáváme jednotlivé řezy myokardu ve třech rovinách. Je však důležitý pravidelně opakující se pohyb vyšetřovaného myokardu, jenž je časově sladěný s EKG. Výsledkem synchronizované SPECT studie je 3D zobrazení, z kterého je patrné uložení léze v prostoru [3].

3.3.2.2 D-SPECT

V současné době existují vedle rotačních gamakamer i speciální gamakamery, které se využívají pouze pro zobrazení myokardu. Jednou z nich je Spectrum Dynamics D-SPECT, který v České republice vlastní FN Brno a IKEM.



Obrázek 5 D-SPECT [4]

Kamera se skládá ze 6 nebo 9 polovodičových detektorů z kadmia, zinku, teluru. CZT detektory jsou uspořádány do zakřivené nerotující konfigurace tvaru podkovy, která obklopuje při akvizici levou stranu hrudníku pacienta. Kamera je vybavena wolframovými kolimátory s paralelními otvory, které jsou kratší a mají větší čtvercové otvory ve srovnání se standardními kolimátory s paralelními otvory ve tvaru šestiúhelníků. Každý sloupec detektoru se může nezávisle otáčet podél své dlouhé osy až do 110 ° a zaostřovat na oblast srdce. Na této kameře byly implementovány specifické algoritmy rekonstrukce, které modelují konkrétní geometrii širokouhlého kolimátoru, a umožňují zlepšení prostorového rozlišení a kontrastu obrazu [6].

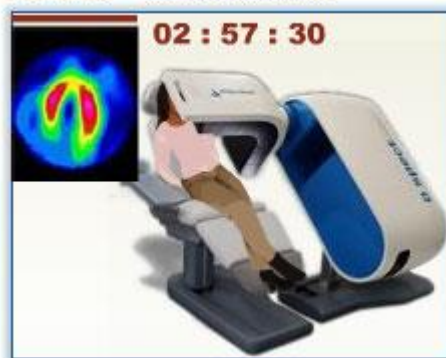
Výsledkem vyšetření tímto zobrazovacím systémem je tomografické zobrazení s větší citlivostí a rozlišením, což přináší možnost aplikace nižší dávky radiofarmaka oproti vyšetření SPECT. Na citlivosti se v zobrazovacím systému D-SPECT uplatňují kolimátory i detektory (Tabulka 1). Pixely jednoúčelové kamery D-SPECT jsou schopny díky konstrukci čtvercových kolimátorů detekovat cca 9krát více fotonů než pixely standardní gamakamery Infinia Hawkeye 4. Kolimační systém D-SPECT nechá projít přibližně 150 % více fotonů než kolimátory běžné gamakamery. Na vyšší citlivosti se podílejí i samotné detektory. Polovodičové detektory jsou cca o 48 % tenčí, ale mají o 57 % vyšší hustotu. Oproti NaI(Tl) krystalům jsou detektory systému D-SPECT schopny detekovat 92 % fotonů. V kombinaci s kolimátory jsou detektory v detekci fotonů o 139 % účinnější oproti gamakameře Infina Hawkeye 4. [7]

Další výhodou je kratší doba akvizice, kdy synchronizovaný SPECT záznam trvá přibližně 5 minut, oproti tomu na univerzálních gamakamerách je doba vyšetření kolem 20 minut. Vyšetření probíhá ve 2 projekcích – vsedě a vleže kvůli případným artefaktům [3].

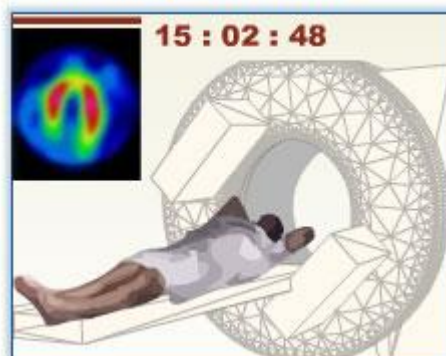
Tabulka 1 Porovnání citlivosti D-SPECT a běžné gamakamery, upraveno z [7]

	Infinia Hawkeye 4	D-SPECT
Materiál kolimátoru	Pb	W
Výška kolimátoru	35	21,07
Obsah otvoru kolimátoru [mm²]	Šestiúhelník; 1,46	Čtverec; 5,11
Efektivní úhel detekce [mm²]	0,00119	0,0108
Efektivní úhel detekce na plochu [sr/mm²]	0,000816	0,00212
Typ detektoru	Scintilační	Polovodičový
Materiál detektoru	NaI:Tl	CdZnTe
Efektivní protonové číslo	Z = 50	Z = 49
Tloušťka krystalu	3/8" = 9,5 mm	2/10" = 5 mm
Hustota [g/cm³]	3,67	5,78

D-SPECT™ Cardiac Scanner



Conventional Gamma Camera



Obrázek 6 Porovnání D-SPECT a běžné gamakamery [8]

3.3.3 Pozitronová emisní tomografie

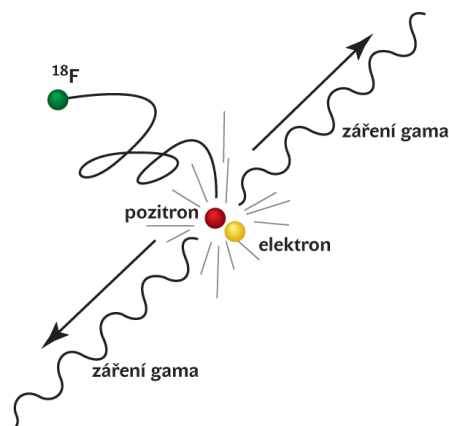
Pozitronová emisní tomografie je metodou využívající anihilačního záření pozitronových radiofarmak, nejčastěji ^{18}F . V nukleární medicíně je tato tomografická metoda nejnákladnější modalitou. Hlavním rozdílem od jednofotonové emisní výpočetní tomografie je nepohyblivé gantry, která nemá žádné kolimátory. Kolimace tedy probíhá elektronicky, což výrazně zvyšuje citlivost detekce, jelikož nedochází k zániku fotonů v olověných septech kolimátoru. V současnosti se PET kamery konstruují jako hybridní systémy PET/CT [9].



Obrázek 7 Hybridní systém PET/CT, upraveno z [10]

Při tomto způsobu zobrazení jsou využívána radiofarmaka značená pozitronovými zářiči emitující při své radioaktivní přeměně pozitron. Pozitron, kladně nabitá částice elektronu, postupně v těle pacienta ztrácí svoji kinetickou energii pohybem po klikaté trajektorii. Po ztrátě energie pozitron anihiluje s elektronem a jsou emitovány dva fotony záření gama, které mají energii 511 keV. Vzniklé fotony jsou z místa anihilace emitovány v opačném směru a následně jsou detekovány scintilačními detektory zapojenými do elektrického koincidenčního obvodu. Tímto obvodem projdou do další elektronické

aparatury pouze ty impulsy, které odpovídají současné detekci fotonů v obou detektorech [2,9].



Obrázek 8 Schéma interakce pozitronu s elektronem za vzniku dvou fotonů [11]

3.4 Radiofarmaka využívaná pro scintigrafii myokardu

V nukleární kardiologii jsou používána různá radiofarmaka pro zobrazení jednotlivých vlastností myokardu a diagnostiku kardiovaskulárních onemocnění. Radionuklidy jsou vyráběny v jaderném reaktoru, radionuklidovém generátoru nebo cyklotronu.

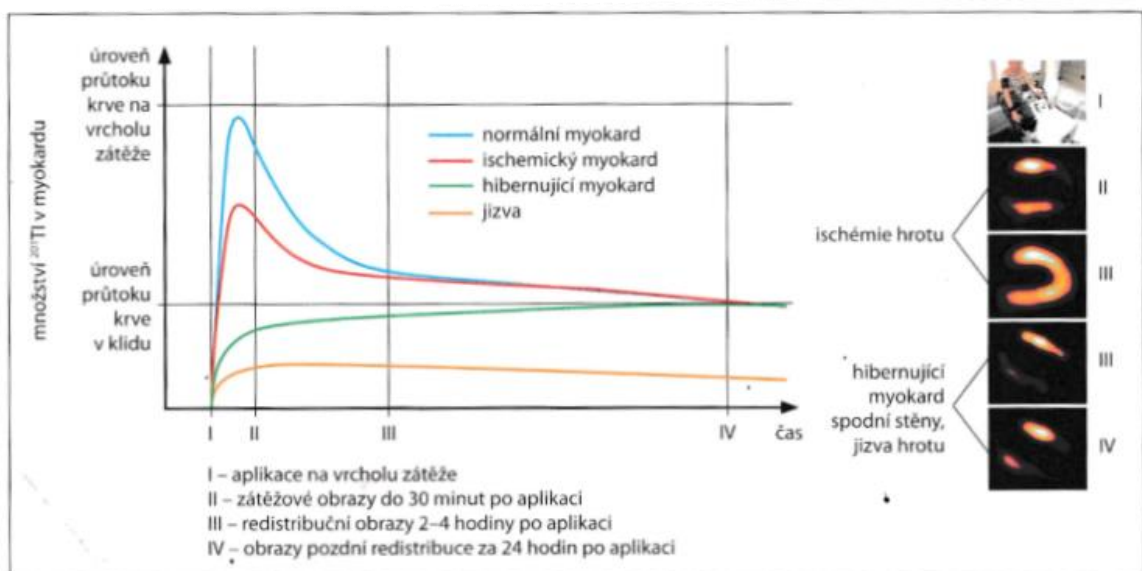
3.4.1 Radiofarmaka pro perfúzi myokardu

3.4.1.1 ^{201}Tl -thallium

Radiofarmakum $^{201}\text{TlCl}$, chlorid thalný, bylo do klinické praxe zavedeno v 70. letech 20. století. Radionuklid ^{201}Tl má v lidském organismu podobné biologické vlastnosti jako kalium, proto se označuje za metabolický analog draslíku. [1]

Thallium vstupuje do buněk srdečního svalu přes buněčnou membránu aktivním transportem pomocí sodíko-draselné adenosin-trifosátové pumpy a částečně pasivní difuzí. Radionuklid

^{201}Tl -thallium se pacientovi aplikuje intravenózně na vrcholu zátěže, kdy dochází k jeho rychlé akumulaci v myokardu a jeho nejvyšší hodnota koncentrace je v 7–30 min. po aplikaci. Scintigramy vzniklé ihned po zátěži podávají informaci o regionálním krevním průtoku ve srdečním svalu během největší zátěže. Pozdní scintigramy, které vzniknou 2-24 h po i. v. aplikaci radiofarmaka, jsou ukazatelem neporušenosti buněčné membrány a viability srdečního svalu. Viabilní-hibernující tkáň je diagnostikována, pokud vychytávání radiofarmaka je během zátěže sníženo, ale po 3-4 hodinách po i. v. injekci dojde k jeho akumulaci v myokardu. Pokud se jedná o jizevnatou či nekrotickou tkáň, radiofarmakum se nevychytává. [2,3]



Obrázek 9 Grafické znázornění časových změn koncentrace ^{201}Tl při zátěžové perfúzní scintigrafii myokardu [1]

Při vyšetření se musí aplikovat nižší aktivita než u radiofarmak značených pomocí $^{99\text{m}}\text{Tc}$, neboť má ^{201}Tl -thallium dlouhý poločas rozpadu (72 h), což má za následek vyšší radiační zátěže pacienta. Důsledkem tohoto faktu je horší kvalita scintigramů. Dalším faktorem snížení kvality scintigramů je větší rozptyl záření ve tkáni způsobeno nízkou energií záření radionuklidu. Další nevýhodou je finanční nedostupnost a nemožnost výroby radionuklidu na pracovištích nukleární medicíny. Výhodou ^{201}Tl -thallia je získání obrazu o stavu regionálního

prokrvení srdečního svalu v zátěži i v klidu po jediné intravenózní aplikaci [12, 13].

3.4.1.2 Radiofarmaka značená pomocí ^{99m}Tc

^{99m}Tc -značená radiofarmaka jsou nepolární lipofilní kationty, mezi které patří ^{99m}Tc -MIBI (methoxyisobutylisonitril) a ^{99m}Tc -tetrofosmin. Na trh byla tato radiofarmaka uvedena v 80. a 90. letech 20. století. Do myocytů vstupují po intravenózní aplikaci pasivním transportem a váží se na nitrobuňkové struktury, především mitochondrie. Po i. v. podání se akumulují nejen ve srdečním svaly, ale také v játrech, odkud jsou vylučována do žlučových cest. Z anatomického hlediska jsou játra a myokard v těsné blízkosti, což může znesnadnit interpretaci nálezu. Z tohoto důvodu nejdříve musí dojít k poklesu radioaktivity v játrech a následně lze zahájit scintigrafii myokardu. Distribuce těchto radiofarmak je úměrná regionální perfuzi ve srdečním svaly [1, 12].

Jelikož mají tyto látky poločas rozpadu 6 h, mohou být aplikovány vyšší aktivity oproti ^{201}Tl . Dalším rozdílem od ^{201}Tl -thallia je vyšší energie záření, jejímž následkem je lepší kvalita obrazů, neboť nedochází k velkému rozptylu ve tkáních. Mezi další výhodu můžeme zařadit lepší komerční i výrobní dostupnost. [13]

Distribuce těchto radiofarmak v myokardu je relativně stabilní. Při vyšetření těmito látkami je možnost odložení záznamu obrazů o několik hodin později od intravenózní injekce a neztratí se tím jejich senzitivita. Na rozdíl od $^{201}\text{TlCl}$ nemají tato radiofarmaka téměř žádnou redistribuci. Z této podstaty vyplývá nutnost dvojího podání radiofarmaka v časovém odstupu, na vrcholu zátěže a v klidu, pokud chceme porovnat zátěžový a klidový myokardiální průtok [2, 13].

V minulosti byl pokus o zavedení radiofarmaka ^{99m}Tc -teboroxim do klinické praxe, avšak neúspěšně. Tato neutrální lipofilní látka velmi rychle difunduje přes membránu myokardiální buňky, odkud se taky velkou rychlostí vyplavuje. V klinické praxi by muselo být scintigrafické vyšetření zahájeno co nejdříve po aplikaci radiofarmaka a také rychle ukončeno, což není snadno proveditelné [1, 9].

3.4.1.3 Pozitronová radiofarmaka

Pro posouzení perfúze myokardu pozitronovou emisní tomografií se využívají především tři radionuklidy – ^{13}N , ^{15}O a ^{82}Rb .

3.4.1.3.1 ^{13}N -amoniak

Pro zobrazení krevního toku srdečního svalu je radiofarmakum ^{13}N - NH_3 používáno od počátku 21. století. Kvůli svému krátkému poločasu rozpadu (9,9 minut) je nutné, aby byl na pracovištích nukleární medicíny cyklotron. Výhodou krátkého poločasu rozpadu je odstranění krevního pozadí, díky čemuž mají vzniklé snímky lepší kvalitu. Po i. v. injekci radiofarmakum volně přechází z krevního oběhu přes buněčnou membránu do myocytu, kde je vázán na glutamin pomocí enzymu glutamin syntetáza. Aplikovaná aktivita je 550-740 MBq. Vyšetření pomocí tohoto radiofarmaka je pracné a časově i komerčně náročné, proto se dává přednost vyšetření pomocí jiných radiofarmak [1, 14].

3.4.1.3.2 ^{15}O -voda

Radiofarmakum ^{15}O -voda je považováno za zlatý standard pro měření krevního průtoku srdečním svalem. Tato látka má velmi krátký poločas rozpadu, tj. 210 s. Z tohoto důvodu je jeho využití možné pouze na pracovištích, které disponují cyklotronem. ^{15}O - H_2O se označuje za ideální indikátor perfúze

myokardu, jelikož je metabolicky inertní, má neomezenou schopnost přechodu mezi buněčnými membránami a extrakční frakce v myokardu je 100%. Aplikovaná aktivita činí 555-740 MBq. Značnou výhodou je rychlost vyšetření, které trvá přibližně 10 minut [15, 16].

3.4.1.3.3 ^{82}Rb -chlorid

Jedná se o pozitronový zářič, jenž má poločas přeměny 75 sekund. Jeho obrovskou výhodou je výroba v radionuklidovém generátoru, kde se přeměňuje z ^{82}Sr . Vymývá se fyziologickým roztokem přímo do žíly pacienta. ^{82}Rb se označuje za metabolický analog draslíku stejně jako ^{201}Tl a je rychle extrahován ve srdečním svalu. Do myocytů se tedy dostává aktivním transportem pomocí Na/K-ATP pumpy. Akumulace je zvýšena v životaschopné tkáni myokardu a odstraněna z nekrotické či ischemické tkáně. Kvůli krátkému poločasu rozpadu je nutné aplikovat vysokou aktivitu kolem 1850-2200 MBq. [1, 17]

Ve srovnání se SPECT má toto vyšetření pomocí ^{82}Rb mírně zhoršené rozlišení z důvodu vysoké energie pozitronů, a tedy z jejich dlouhého doletu ve tkáni (cca 2,6 mm) [1].

3.4.2 Zobrazení glukózového metabolismu myokardu

Srdeční sval při své činnosti spotřebovává velké množství energie, kterou získává právě z mastných kyselin, jež jsou ze 60–90 % energeticky bohaté pro srdeční sval. Dále myokard energeticky zásobí z 20 % glukóza a z 5 % laktát [1, 2].

Pro zobrazení metabolismu myokardu se používají deriváty mastných kyselin a fluorodeoxyglukóza (FDG) [1].

3.4.2.1 Fluorodeoxyglukóza

Fluorodeoxyglukóza (^{18}F -FDG) se označuje za metabolický analog glukózy. Poločas přeměny ^{18}F je 110 minut, proto je vhodné zahájit detekci maximálně do jedné hodiny po aplikaci, později by docházelo ke zhoršení kvality obrazů. Detekce tohoto radiofarmaka se provádí pozitronovou emisní tomografií, kdy je úkolem zjistit metabolismus glukózy a stav perfúze v části srdečního svalu, kde došlo k poruše funkce. Distribuce ^{18}F -FDG není zcela homogenní, boční stěna myokardu absorbuje více glukózy než septum. Neviabilní myokard se diagnostikuje tehdy, pokud v oblasti poruchy perfúze nedochází k akumulaci radiofarmaka. Naopak akumulace ^{18}F -FDG v porušené oblasti, svědčí o viabilitě myokardu [1, 2].

3.4.2.2 Mastné kyseliny

Hlavním energetickým zdrojem srdečního svalu jsou mastné kyseliny, které jsou získávány především beta-oxidací, jež je náročná na spotřebu kyslíku.

Pro zobrazování na pozitronové emisní tomografii se používá ^{11}C -palmitát, který je po injekci částečně metabolizován a část zůstává intracelulárně ve formě fosfolipidů. ^{11}C -palmitát se používá především pro kvalitativní vyšetření myokardu. Dalším radiofarmakem zobrazovaným PET technikou je fluorem značená kyselina thioheptadekanová (^{18}F -FTHA), jejíž extrakce srdečním svalem je vysoká [1].

Pro zobrazování SPECT technikou se používají mastné kyseliny značené ^{123}I , které se rozdělují na dva typy. Prvním typem jsou mastné kyseliny s rovným řetězcem, jež jsou metabolizovány beta-oxidací a následně je jod ze srdce rychle vyplavován. Takovým radiofarmakem je např. kyselina pentadekanová značená ^{123}I (^{123}I -IPPA). Naopak mastné kyseliny s rozvětveným řetězcem, jejímž zástupcem je ^{123}I značená kyselina fenylmethylpentadekanová

(¹²³I-BMIPP), jsou v myokardu zadrženy, což umožňuje vzniku kvalitních obrazů [1].

3.4.2.3 Další radiofarmaka

K posouzení viability srdečního svalu se používají i radiofarmaka, která hodnotí perfúzi myokardu. Jsou jimi ²⁰¹Tl-thallium a ^{99m}Tc-značená radiofarmaka (^{99m}Tc-MIBI, ^{99m}Tc-tetrofosmin). Myokard je označen za viabilní, pokud se při klidové perfúzní scintigrafii myokardu akumuluje v myocytu radiofarmakum, neboť integrita buněčné membrány je zachována. Tato radiofarmaka jsou však méně citlivější než přímý průkaz životaschopného myokardu pomocí ¹⁸F-FDG [2].

V současnosti se pro průkaz viability srdečního svalu využívá magnetická rezonance, která má podstatně vyšší rozlišovací schopnost než techniky nukleární medicíny [2].

3.4.3 Zobrazení nekrózy myokardu

Při tomto vyšetření dochází k akumulaci radiofarmaka v oblasti myokardiální nekrózy a ložiska se zobrazují buď jako horká či studená léze. Při zobrazení horké léze je nutné, aby byl zachován minimální průtok krve a radiofarmakum se po intravenózní aplikaci k nekrotické tkáni dostalo. Studená léze označuje nepřímé zobrazení nekrózy srdečního svalu pomocí klidové perfúzní scintigrafie s použitím radiofarmak ^{99m}Tc-MIBI, ^{99m}Tc-tetrofosmin. Toto vyšetření se rutinně neprovádí, kvůli omezené dostupnosti některých radiofarmak [1, 2, 12].

3.4.3.1 ^{99m}Tc-pyrofosfát

Toto radiofarmakum se po intravenózní aplikaci akumuluje v mitochondriích nekrotické tkáně myokardu. Největší akumulace nastává mezi 2. – 5. dnem

po vzniku bolesti na hrudi. Nevýhodu však je dlouhá pozitivita ještě týden po infarktu [2].

3.4.3.2 ^{99m}Tc -glukarát

Kyselina glukarová značená ^{99m}Tc disponuje svoji rychlou akumulací v infarktové tkáni. Provedení scintigrafického záznamu je možné již po 30 minutách po injekci radiofarmaka. Toto radiofarmakum je tedy vhodné pro akutní zobrazení, ale již po 9 hodinách od vzniku infarktu může být výsledek záznamu nesprávně negativní [1, 2].

3.4.3.3 ^{111}In -antimyozin

Jedná se o myší monoklonální protilátku, jež se váže na myozin v myofibrilách. Scintigrafický záznam je možné provést až po 24 h po podání radiofarmaka. Toto radiofarmakum se používá nejen u pacientů s akutním infarktem myokardu, ale je vhodné i k detekci rejekce po transplantaci či k detekci toxického poškození srdečního svalu léky [2].

3.4.3.4 ^{99m}Tc -annexin

Toto radiofarmakum značené ^{99m}Tc se váže na membránu buněk, které jsou v časně fázi apoptózy. Apoptóza označuje programovanou smrt buněk, které již nejsou potřebné či došlo k jejich poškození. ^{99m}Tc -annexin lze také využít u pacientů se zánětlivým či nádorovým postižením srdečního svalu [1, 2].

3.4.4 Zobrazení inervace myokardu

Jelikož nervový systém je velmi důležitý v řízení kardiovaskulárních funkcí, jsme schopni pomocí zobrazovacích metod nukleární kardiologie vyšetřit adrenergní inervaci myokardu.

3.4.4.1 ¹²³I-MIBG

K posouzení inervace srdečního svalu se používá radiofarmakum metaiodobenzylguanidin, které má shodný akumulární mechanismus na nervových zakončeních jako noradrenalin. Označuje se tedy za jeho analog. Snížené vychytávání a zrychlené vyplavení tohoto radiofarmaka z myokardu se pozoruje u pacientů s patologickými stavy, které mohou vést k srdečnímu selhání či maligní arytmii [2, 12].

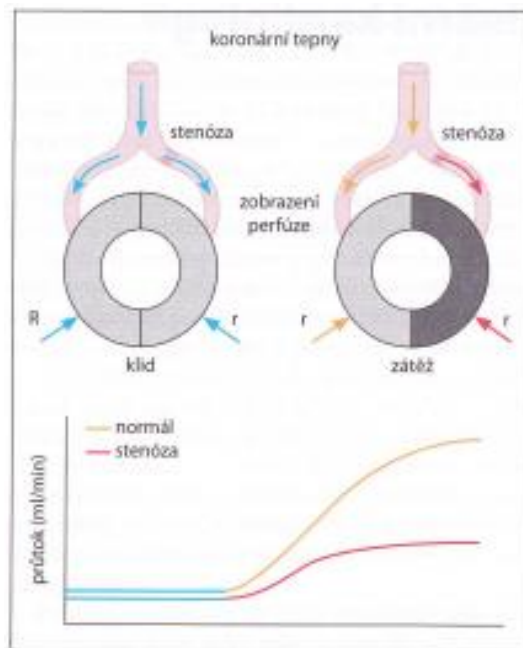
3.5 Perfúzní scintigrafie myokardu

Radionuklidové vyšetření perfúze srdečního svalu se v současné době označuje za nejpoužívanější a nejdostupnější metodu nukleární kardiologie. Jedná se o vyšetřovací neinvazivní metodu, která posuzuje regionální krevní průtok myokardem. Toto vyšetření nám udává informace o dopadu koronární stenózy na dodávku krve do myokardu [12].

Perfúzní scintigrafie srdečního svalu se provádí v kombinaci se zátěžovým testem či za klidových podmínek pro zhodnocení viability myokardu. Na vrcholu zátěže dochází ke zvýšené spotřebě kyslíku ve srdeční tkáni, tím pádem se zvýší požadavky na jeho dodávku do myokardu. V normálním koronárním řečišti dochází při maximální zátěži k vazodilataci, která vede ke zvýšení koronárního průtoku. Patologicky zúžené koronární tepny jsou již dilatovány v důsledku maximální klidové dilatace, jejich průtok se zvýšit nemůže. V distribuci myokardiální perfúze dochází k tzv. heterogenitě, radiofarmakum se akumuluje převážně v neporušeném koronárním řečišti [18, 18].

Při klidovém vyšetření perfúzní scintigrafie myokardu nedochází ke znatelnému rozdílu v průtoku mezi normální tepnou a tepnou poškozenou

stenózou, jestliže není zúžení větší než 90 % lumen koronární tepny. Krevní průtok srdečním svalem je dostatečný, rozložení perfúze je tedy homogenní. Vyšetření myokardu za klidových podmínek se nejčastěji doplňuje při patologickém scintigramu po aplikaci radiofarmaka při zátěži [12, 18].



Obrázek 10 Princip zátěžového vyšetření [1]

3.5.1 Indikace a jejich patofyziologie

Zátěžovou perfúzní scintigrafii myokardu indikuje kardiolog především k detekci, lokalizaci, rozsahu a závažnosti ischemie myocytů srdečního svaly. Nejčastější indikací tohoto vyšetření je diferenciální diagnostika etiologie bolesti na hrudi k vyloučení či potvrzení ischemické choroby srdeční (ICHS). SPECT vyšetření má k diagnostice ICHS podstatně vyšší senzitivitu než zátěžové EKG vyšetření. Tato metoda nukleární kardiologie se používá nejen k diagnostice ICHS, ale i k předpovědi rizika náhlé srdeční příhody, jako je akutní infarkt myokardu či náhlá srdeční smrt. Je dokázáno, že při fyziologickém nálezů na scintigrafickém záznamu, je velmi nízké riziko vzniku akutních koronárních příhod (cca 0,6 % za rok). Naopak při pozitivním

nálezu dochází ke zvýšení pravděpodobnosti vzniku akutního infarktu myokardu či srdeční smrti na 7 % za rok [2, 18].

Dalším využitím hodnocení perfúze myokardu je u pacientů před nekardiologickým chirurgickým výkonem pro správný operační postup. Při zjištění velkého srdečního rizika dochází nejdříve ke stabilizaci ICHS a až poté k chirurgickému výkonu. Dále se tato metoda používá k posouzení funkčnosti bypassu, po akutním koronárním syndromu, zjištění viability myokardu s dysfunkcí levé komory a k posouzení závažnosti stenóz, které byly zjištěny při koronarografii [2, 18].

Pokud je na vzniklém scintigramu na stěně levé komory patrná snížená akumulace radiofarmaka oproti okolní tkáni, jde o tzv. defekt, který může být reverzibilní či fixní. S reverzibilním defektem se setkáváme při vyšetření se zátěžovým testem, při klidové studii tedy defekt zcela chybí nebo je nižšího stupně. Naopak fixní defekt představuje nejčastěji fibrózní tkáň po infarktu myokardu, který pacient prodělal. Při fixním defektu dochází ke stejnému snížení akumulace radiofarmaka v klidu i při zátěži [2, 12].

U pacientů, kterým byla velmi brzy zprůchodněna uzavřená koronární tepna po prodělaném infarktu myokardu, hovoříme o tzv. reverzní redistribuci. Tento typ redistribuce označuje defekt, jenž je přítomen pouze při vyšetření klidovou studií. Poukazuje na přítomnost viabilního myokardu v oblasti defektu díky viabilním srdečním buňkám, které jsou více prokrveny při zátěži. Tento defekt vzniká důsledkem jizevnaté fibrózní tkáně [2].

Pokud jsou postiženy alespoň 3 věnčité tepny, dochází k dysfunkci levé komory. Na snímku se tento fakt zobrazí vyšší akumulací radiofarmaka v plicích po zátěži, která bývá při normálním nálezu minimální. Na scintigrafickém záznamu se většinou pravá komora myokardu nezobrazuje důsledkem menšího

krevního průtoku oproti levé komoře. Pokud se pravá komora na scintigramu zobrazí, může být příčinou její hypertrofie [2].

Při fyziologickém nálezů je objem levé komory větší na klidových scintigramech než na zátěžových. Ale může nastat situace, kdy objem levé komory po zátěžovém vyšetření je větší než při klidové studii. Tento jev se nazývá tranzitorní ischemická dilatace levé komory (TID). Příčinou TID může být snížená akumulace aplikovaného indikátoru v subendokardiální oblasti v důsledku „ztenčení“ srdečního svalu na zátěžových snímcích oproti klidovým [2].

3.5.2 Příprava pacienta

Před vyšetřením krevního průtoku srdečního svalu není nutná zvláštní příprava pacienta. Je však důležité, aby pacient byl lačný, jelikož požití jídla může ovlivňovat distribuci radionuklidu ve splachnické oblasti. Diabetici však dodržují svůj režim. Nedoporučuje se 24 hodin před vyšetřením požívat kofeinové nápoje, čaje a suroviny obsahující xantinové deriváty (banány, čokoláda). Je vhodné, aby si pacient s sebou přinesl tučnější svačinu. Pacientův ošetřující kardiolog rozhoduje o případném vysazení medikace 48 hodin před vyšetřením. Nejčastěji se jedná o vysazení beta-blokátorů, nitrátů či blokátorů vápníkového kanálu. Pokud pacient podstoupí farmakologickou zátěž, je nutné vysazení medikace způsobující vazodilataci. Vyšetřující lékař seznámí pacienta s možnými vedlejšími efekty během zátěže. Jedná se o bolest na hrudi, dušnost, návaly horka, bolest hlavy, tlukot srdce, závratě [2, 18].

3.5.3 Princip vyšetření

Na vrcholu zátěže se pacientovi intravenózně aplikuje radiofarmakum, které se následně vychytává ve srdečním svalu v závislosti na jeho prokrvení. Čím je větší krevní průtok, tím více dochází k akumulaci v nepoškozeném

myocytu. Akumulace radiofarmaka je tedy snížena v jizevnatých poškozených tkáních po infarktu myokardu [2].

3.5.3.1 Zátěžové testy

Zátěžové vyšetření pro diagnostiku ischemické choroby srdeční má zásadní význam pro kvalitu scintigrafického vyšetření. Jedním ze způsobů provedení je fyzická zátěž, která se provádí na bicyklovém ergometru či na pohyblivém pásu. Většina pacientů není schopna fyzické zátěže z důvodů extrakardiálních či kardiálních (blokáda levého Tawarova raménka), a proto se provede zátěž farmakologická [12].

3.5.3.1.1 Fyzická zátěž

Nejčastěji se dynamická zátěž provádí pomocí ergometru vybaveného obrazovkou, na které je označena doporučená rychlost, podle níž pacient šlape. Doporučenou součástí vyšetření je vhodné oblečení včetně obuvi pacienta, aby nedocházelo k omezení pohybu. Ergometr je napojen na počítač, na kterém lékař sleduje EKG záznam, tepovou frekvenci a krevní tlak pacienta během zátěže. Vyšetřovací místnost musí být vybavena defibrilátorem, medikací pro první pomoc (nitroglycerin, adrenalin, atropin) a lůžkem v případě možných komplikací. Vyšetření obvykle začíná na 25-50 W a postupně se zátěž zvyšuje každé 2 minuty. Na vrcholu zátěže, nebo při překročení 85% maximální tepové frekvence, se pacientovi aplikuje radiofarmakum a dochází k postupnému snižování zátěže. Během zátěžového testu může dojít k situaci, kdy nastane angina pectoris, dušnost či výrazné změny v EKG. Při těchto komplikacích je radiofarmakum aplikováno ihned [3, 18, 19].

Kontraindikací pro fyzickou zátěž pomocí ergometru je nestabilní angina pectoris, nekontrolovaná arteriální hypertenze, akutní infarkt myokardu, akutní plicní embolie, závažná aortální stenóza, nekontrolovaná srdeční arytmie [3].



Obrázek 11 Ergometr ve Všeobecné fakultní nemocnici

3.5.3.1.2 Farmakologická zátěž

Většina pacientů není schopna fyzické zátěže z důvodu ortopedických problémů, obezity, ischemické choroby dolních končetin, a proto se indikuje zátěž farmakologická. Farmakologická zátěž se také využívá u pacientů s bloádou levého raménka Tawarova či s nedostatečnou fyzickou zátěží na ergometru. Látky používané pro tento typ zátěže se dělí do dvou skupin:

- a) Vazodilatační látky (adenosin, dipyridamol, regadenoson)

Účelem těchto látek je zvýšení hladiny adenosinu, jenž má za následek aktivaci speciálních receptorů. Tyto receptory vedou k vazodilataci věnčitých tepen a k několikanásobnému zvýšení koronárního průtoku oproti klidovým podmínkám [2, 18].

Kontraindikací pro podání dipyridamolu je vstupní hypotenze, kdy systolický krevní tlak je nižší než 90 mm Hg. Další kontraindikací je astma bronchiale, plicní hypertenze a kontraindikace, které jsou platné i pro fyzickou zátěž [3].

b) Sympatikomimetika (dobutamin)

Dobutamin zvyšuje spotřebu kyslíku ve srdeční tkáni, a tím pádem dochází ke zvýšení průtoku koronárním řečištěm. Tato látka je nejčastěji používanou alternativou pro fyzickou zátěž [19].

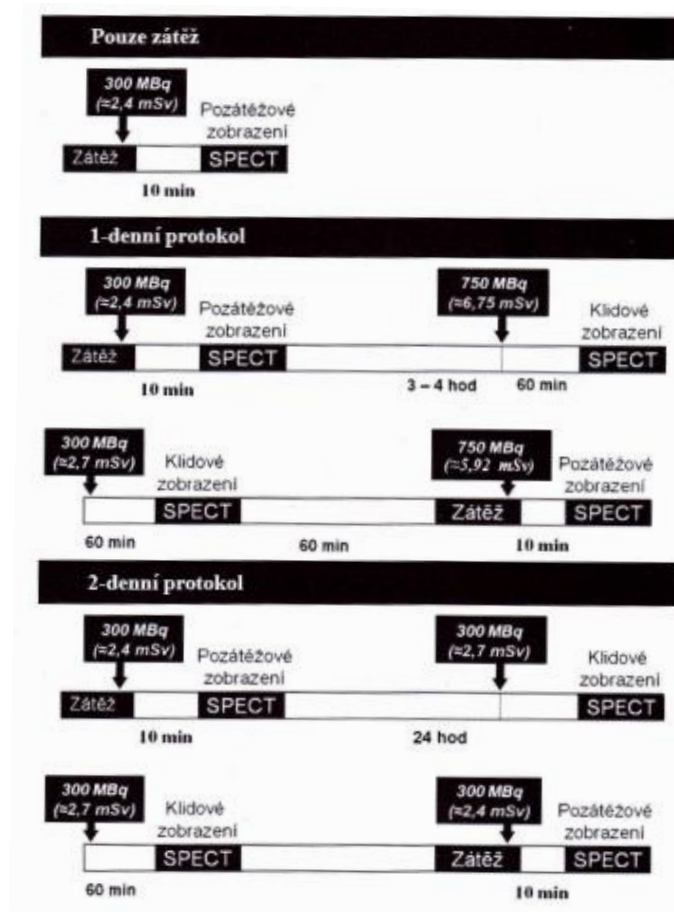
Tuto látku není vhodné podat, pokud pacient trpí nekorigovanou plicní hypertenzí, komorovou tachyarytmií a hypertrofickou kardiomyopatií [3].

3.5.3.1.3 Kombinovaná zátěž

Po podání vazodilatačních látek se mohou objevit nežádoucí vedlejší účinky, především arytmie nebo hypotenze. Z tohoto důvodu je vhodné, aby se farmakologická zátěž kombinovala s nízkou fyzickou zátěží. Dojde jednak k nižšímu výskytu vedlejších účinků, ale i zlepšení kvality scintigramů a snížení akumulace radiofarmaka v extrakardiální oblasti. Absolutní kontraindikací pro fyzickou zátěž je pacient, jemuž byla diagnostikována blokáda levého raménka Tawarova, nebo má kardiostimulátor v oblasti pravé komory. Kvůli zvýšení tepové frekvence při fyzické zátěži by mohlo docházet k falešně pozitivním nálezům [2].

3.5.4 Vyšetřovací protokoly

V současnosti je k dispozici několik vyšetřovacích protokolů. Dle fyzikálních vlastností použitých radiofarmak, je nezbytné dodržet časové rozestupy mezi provedením zátěže a klidové studie pro srovnání distribuce prokrvení srdeční tkáně.



Obrázek 12 Různé varianty vyšetřovacích protokolů pro zátěžové zobrazování perfúze myokardu pomocí ^{99m}Tc -značených radiofarmak [12]

3.5.4.1 Protokoly pro ^{99m}Tc značená radiofarmaka

Perfúzní vyšetření myokardu pomocí ^{99m}Tc značnými preparáty se může provádět v režimu jednodenního či dvoudenního protokolu.

Podmínkou injekce radiofarmaka při dvoudenním protokolu je odstup mezi zátěžovým a klidovým vyšetřením minimálně 24 hodin. Výhodou tohoto protokolu je, že se na scintigramech nejeví artefakty způsobené reziduální radioaktivitou z předchozího vyšetření, jelikož došlo k fyzikálnímu rozpadu ^{99m}Tc (6,03 h). Pokud se při zátěžové studii neobjeví žádný patologický nález, není nutné pokračovat ve vyšetření s klidovou studií. Vyšetření jednofotonovou emisní tomografií se provádí 15-30 minut po intravenózní aplikaci radiofarmaka v době maximální fyzické zátěže či v době největšího účinku farmakologické

zátěže. Při vyšetření klidové perfúze srdečního svalu dochází k aplikaci stejného množství radiofarmaka jako při zátěžové studii a po 60 minutách začíná snímání pomocí SPECT [3, 18].

Při jednodenním protokolu dochází k aplikaci dvou různě velkých aktivit v jednom dni s odstupem 3-4 hodin. Vyšetření je možné začít buď klidovou nebo zátěžovou studií. Při první aplikaci radiofarmaka je podmínkou podat pouze $\frac{1}{4}$ celkového množství dané látky a zbylé $\frac{3}{4}$ se aplikují s odstupem několika hodin [3, 18].

3.5.4.2 Protokoly pro ^{201}Tl

Vyšetřovací protokoly pro ^{201}Tl podávají informace o perfúzi a viabilitě myokardu. Radiofarmakum se aplikuje na vrcholu zátěže a za 5-10 minut po aplikaci následuje SPECT. Pomocí SPECT dochází k detekci ischemie, která je v porovnání s perfundovanou tkání negativně kontrastně zobrazena. Díky využití fyziologické redistribuce thallia hypoaktivita za cca 4 hodiny mizí. Avšak v případě přítomnosti jizvy negativně kontrastně zbarvené ložisko zůstává. Výhodou tohoto protokolu je jediná aplikace radiofarmaka pro zátěžové i klidové vyšetření [3, 18].

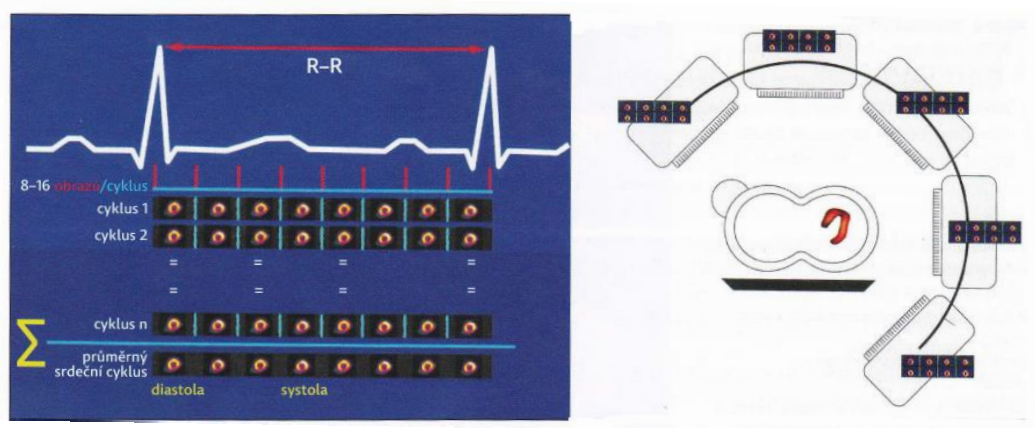
3.5.4.3 Kombinované protokoly

Kombinované protokoly s použitím $^{201}\text{TlCl}$ a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ značených radiofarmak umožňují posouzení srdeční perfúze, viability a funkce levé komory. Nejčastěji se používá ^{201}Tl -chlorid pro klidové vyšetření a následně $^{99\text{m}}\text{Tc}$ značené preparáty pro zátěžovou studii. Při tomto kombinovaném protokolu nedochází k překrytí scintigramů perfúze při zátěži a v klidu, jelikož tento protokol umožňuje vyšší energie $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Kombinované protokoly se však v současné době zpravidla nepoužívají kvůli ekonomické náročnosti [18].

3.5.5 Provedení scintigrafického vyšetření

Při klidovém či zátěžovém vyšetření dochází k aplikaci ^{201}Tl -chloridu o aktivitě 75-110 MBq nebo $^{99\text{m}}\text{Tc}$ značených radiofarmak o aktivitě 500-750 MBq. V současnosti se k detekci distribuce aplikované látky, která se následně vychytává ve srdečním svalu v závislosti na jeho krevním průtoku, používá SPECT či jednoúčelová kamera (D-SPECT). Při scintigrafickém záznamu může docházet k překrytí části srdečního svalu aktivitou, která je naakumulována v sousedních orgánech myokardu, např. ve střevech a játrech. V tomto případě je vhodné, aby pacient požil tučnou stravu, která umožňuje odsunutí aktivity z okolních orgánů, urychluje vylučování nevychyteného radiofarmaka žlučovými cestami a snižuje případný gastroduodenální reflux aplikovaného radiofarmaka. Scintigrafický záznam se opakuje po 45-60 minutách [2, 12].

Při SPECT vyšetření je pacient uložen v supinaci, levou ruku má nejčastěji za hlavou, aby byla mimo zorné pole. U obézních pacientů je pravděpodobnost absorpce záření tukovou tkání, proto může být scintigrafický záznam doplněn i v pronaci. V současnosti se na většině pracovišť SPECT vyšetření provádí synchronizovaně s R kmitem EKG techniky (gated SPECT). Gated SPECT podává informace jak o krevním průtoku myokardu, tak o funkci levé komory, jejím systolickém ztlušťování, hybnosti stěn a ejekční frakci [2, 12].



Obrázek 13 Schéma hradlované perfúzní tomografie myokardu [2]

Při D-SPECT scintigrafickém vyšetření je pacient usazen na vyšetřovací lehátko. Levá paže pacienta je umístěna na horní hraně ramene kamery obsahující detektory. Musí být dbáno, aby rameno bylo co nejbližší k levé straně hrudníku pacienta, neboť prostorové rozlišení a kvalita obrazu se s rostoucí vzdáleností myokardu od detektorů zmenšuje [6].



Obrázek 14 Poloha pacienta při vyšetření D-SPECT [20]

3.5.6 Radiační zátěž

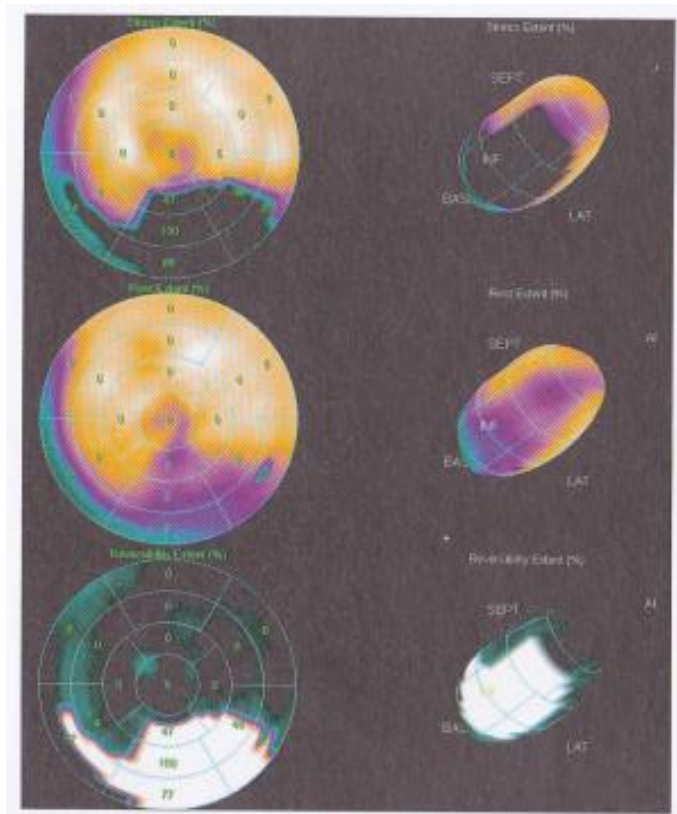
Při aplikaci 700 MBq ^{99m}Tc -značeného radiofarmaka při klidovém vyšetření je kritickým orgánem žlučník. Radiační zátěž žlučníku u dospělého člověka s hmotností 70 kg představuje $0,04 \text{ mGy} \cdot \text{MBq}^{-1}$, efektivní dávka je $0,009 \text{ mSv} \cdot \text{MBq}^{-1}$, což je cca 6 mSv. Radiační zátěž tohoto vyšetření u dítěte do 5 let je podstatně vyšší, efektivní dávka je okolo $0,03 \text{ mSv} \cdot \text{MBq}^{-1}$. Při vyšetření se zátěžovým testem dochází k urychlenému vylučování radiofarmaka, proto je zátěž zářením v kritickém orgánu cca o 10-20 % nižší než při klidovém vyšetření. Při vyšetření perfúzní scintigrafie myokardu s použitím ^{201}Tl jsou kritickými orgány varlata a vaječníky. Radiační zátěž je podstatně vyšší než u vyšetření s použitím ^{99m}Tc -značených radiofarmak, z tohoto důvodu se ^{201}Tl nepoužívá pro vyšetření u dětí do 5 let. Radiační zátěž dospělého člověka na varlata je $0,73 \text{ mGy} \cdot \text{MBq}^{-1}$

a na vaječníky $0,45 \text{ mGy} \cdot \text{MBq}^{-1}$. Efektivní dávka u dospělého člověka se 70 kg při aplikaci 100 MBq představuje asi 20 mSv [21].

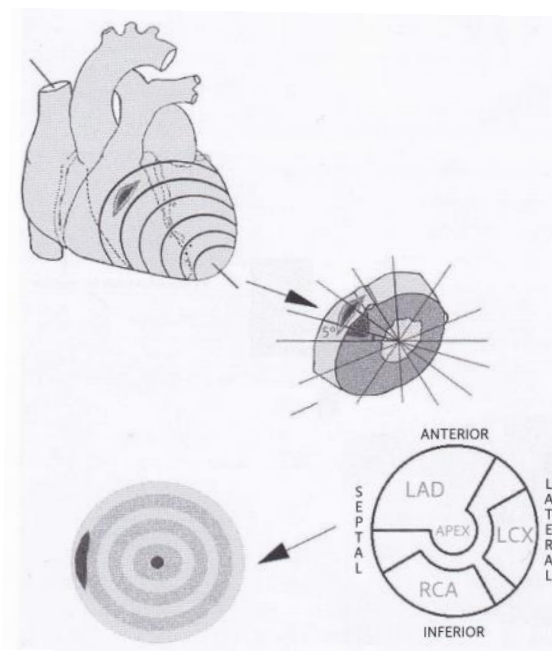
3.5.7 Hodnocení scintigrafického záznamu

Pomocí zobrazovací modality se získávají řezy srdečního svaly ve všech třech rovinách. Lékař hodnotí vzniklé scintigramy vizuální interpretací myokardiálních řezů a také kvantitativně. Rozsah a stupeň poruchy srdečního prokrvení lze vyjádřit pomocí sumačního zátěžového (SSS) a klidového (SRS) skóre. Čím je hodnota sumačního skóre vyšší, tím je závažnější prognóza pacienta. Vyšší SRS znamená horší prognózu pacienta v důsledku většího rozsahu poruchy perfúze na scintigramu vzniklém při klidovém vyšetření. Vyšší SRS skóre lze interpretovat nejčastěji u pacientů již po prodělaném infarktu myokardu [2, 12].

Při kvantitativním hodnocení myokardiální perfúze se používají polární mapy, které jsou počítačově vytvořené převedením trojrozměrného zobrazení řezů do dvojrozměrného obrazu. Polární mapu si lze představit jako kruh získaný ze stěny levé komory. V oblasti uprostřed kruhu se nachází srdeční hrot a po obvodech je srdeční baze. Polární mapy jsou vhodné k porovnání s databází normálních nálezů pacienta, kdy je radiofarmakum relativně homogenně rozloženo v levé komoře srdečního svaly. Pokud je na stěně levé komory patrná snížená akumulace radiofarmaka oproti okolní tkáni, jde o tzv. defekt, který může mít několik charakterů (viz. výše) [2, 12].



Obrázek 15 Kvantifikace distribuce radiofarmaka v LK při zobrazení v polárních mapách (vlevo) a 3D (vpravo) [3]



Obrázek 16 Princip rekonstrukce polární mapy z řezů podél krátké osy [2]

3.6 Radionuklidová ventrikulografie

Jedná se o neinvazivní vyšetřovací metodu nukleární medicíny, jež umožňuje hodnotit funkční parametry levé komory během srdečního cyklu v důsledku změny aktivity radiofarmaka. Toto vyšetření podává informace o regionální kinetice stěny levé komory a umožňuje měřit její ejekční frakci, která udává množství krve vypuzené při jednom stahu. Uvádí se v procentech celkového množství krve v levé komoře. Radionuklidová ventrikulografie se v dnešní době používá výjimečně, neboť lze toto vyšetření nahradit echokardiografií [12, 21].

3.6.1 Indikace

Radionuklidová ventrikulografie se indikuje k posouzení funkce levé komory u pacientů s ICHS, srdečním selháním, u arteriální hypertenze a při kardiomyopatii. Avšak toto vyšetření se používá především při ověřování a léčbě kardiotoxicity cytostatik u onkologických pacientů. Díky malé scintilační sondě, která je umístěna na levou část hrudníku, lze tuto metodu použít i k několikahodinovému posouzení srdeční funkce obdobně jako při Holterově monitoraci EKG. Nezískávají se však parametrické obrazy, metoda slouží pouze k monitorování funkčních parametrů levé komory myokardu [2].

3.6.2 Příprava pacienta

Pro hodnocení pohybu stěn, objemu a ejekční frakce srdečních komor se používají radiofarmaka, která po intravenózní aplikaci přetrvávají dlouho v krevním oběhu. Používají se tedy ^{99m}Tc -technecianem značené autologní erythrocyty aplikované in vivo či in vitro, lze také použít ^{99m}Tc -lidský albumin. Nejčastější technikou je in vivo metoda, při které se nejprve intravenózně aplikuje cínatý pyrofosfát a za 20 minut dochází k i. v. injekci ^{99m}Tc -technecianu. Před vyšetřením je vhodné blokování akumulace volného technecianu ve štítné žláze pomocí chloristanu draselného [2, 12].

3.6.3 Princip vyšetření

Po intravenózní aplikaci radiofarmaka dochází ke snímání oblasti srdce pomocí hradlovaného SPECT k posouzení změn objemu komor. Začátek a konec srdečního stahu od diastoly přes systolu po diastolu dalšího cyklu je vymezen R kmitem na EKG. Hodnotí se změny aktivity během srdečního cyklu v levé komoře. Změny aktivity daného indikátoru jsou přímo-úměrné změnám objemu komory tehdy, pokud injekované radiofarmakum neuniká z krevního řečiště a je v něm rovnoměrně rozptýleno. Pomocí EKG dochází k rozdělení srdečního cyklu do několika fází. Výsledkem tohoto vyšetření je jeden srdeční cyklus, který je získán z průměrného nastřádání několika set srdečních cyklů. Jednotlivé srdeční stahy se střádají z důvodu získání dostatečné statistické četnosti impulzů, neboť jejich změny během jediného srdečního cyklu jsou zcela neodlišitelné od statistického kolísání aktivity. Konečný scintigrafický záznam obsahuje 16-32 snímků z jednoho srdečního cyklu. Vyšetření radionuklidové ventrikulografie lze provádět v klidu i při zátěži k upřesnění změn hybnosti stěn jednotlivých srdečních komor [1, 2, 12, 21].

3.6.4 Radiační zátěž

Při aplikaci 700 MBq radiofarmaka pacientovi o váze 70 kg představuje efektivní dávka 5 mSv. Kritickým orgánem je srdce, v němž je zátěž zářením přibližně $0,023 \text{ mGy} \cdot \text{MBq}^{-1}$. Radiační zátěž v kritickém orgánu u dětského pacienta činí $0,066 \text{ MGy} \cdot \text{MBq}^{-1}$ [21].

3.6.5 Hodnocení vyšetření

Vzniklé scintigramy se hodnotí kvalitativně i kvantitativně. Při kvalitativním hodnocení dochází k orientačnímu posouzení regionální kontraktility stěn srdečních komor [12].

Při kvantitativní interpretaci se hodnotí volumetrická křivka a parametrické obrazy získané z výpočetního zpracování. Průměrná volumetrická křivka levé komory vzniká z vhodně zvolené oblasti zájmu. Z této křivky lze posoudit ejekční frakci, end-diaastolický a end-systolický objem (EDV, EDS), rychlost plnění a vyprazdňování levé komory a další její funkční parametry. Pomocí parametrických obrazů lze posuzovat funkci a případné poruchy kinetiky stěny levé komory. Z důvodu překrývání pravé komory s pravou síní není vhodná tato metoda k hodnocení funkčních parametrů pravé komory. Její ejekční frakci lze hodnotit pomocí prvoprůtokové angiokardiografie [2, 12].

3.7 Radionuklidová angiokardiografie

Radionuklidová angiokardiografie neboli metoda prvního průtoku, je neinvazivní vyšetřovací metoda nukleární medicíny k posouzení krevního průtoku jednotlivými srdečními oddíly. Dochází ke sledování malého bolusu radiofarmaka, který prochází jednotlivými srdečními dutinami od pravé strany srdce, přes plíce do levých srdečních dutin a dále do velkého krevního oběhu. Toto vyšetření je v dnešní době kvůli metodickým problémům využíváno minimálně oproti radionuklidové ventrikulografii, lze ho také nahradit vyšetřením ultrasonografickým [12, 21].

3.7.1 Indikace

V současnosti lze vyšetření metodou prvního průtoku nahradit echokardiografií. Využívá se však ke zhodnocení funkce pravé komory myokardu a k detekci nitrosrdečních zkratů. Přítomnost pravolevého zkratu se projeví předčasnou recirkulací aplikovaného indikátoru do plicního řečiště a na vzniklém pulmogramu dojde ke vzniku tzv. recirkulačního vrcholu nad vrcholem prvního plicního průtoku [12].

3.7.2 Princip vyšetření

Pacientovi se intravenózně aplikuje jakékoliv ^{99m}Tc -značené radiofarmakum, nejčastěji ^{99m}Tc -DTPA. Je důležitá rychlá aplikace vysoké aktivity radiofarmaka v malém objemu do vény co nejbližší k srdci, nejlépe do v. jugularis interna. Objem bolu je maximálně 0,5 ml. Po injekci ^{99m}Tc -DTPA následuje podání 10-20 ml fyziologického roztoku, jenž urychluje venózní tok. Následuje rychlé snímání dynamické studie pomocí scintilační kamery a sleduje se postupný první průtok bolu srdečními dutinami. Celková doba snímání je velmi krátká, kolem 60 sekund [2, 12].

3.7.3 Radiační zátěž

Radiofarmakum ^{99m}Tc -DTPA má nefrotropní vlastnosti, je rychle vylučováno ledvinami. Při aplikaci 500 MBq radiofarmaka dospělému 70 kg pacientovi je zátěž zářením v kritickém orgánu, močovém měchýři, 0,062 mGy.MBq⁻¹, efektivní dávka je 0,005 mSv.MBq⁻¹, což činí cca 2,5 mSv. U dětského pacienta do 5 let je radiační zátěž v močovém měchýři vyšší – 0,095 mGy.MBq⁻¹, efektivní dávka činí přibližně 0,009 mSv.MBq⁻¹ [21].

3.7.4 Hodnocení vyšetření

Vzniklé scintigrafické záznamy se hodnotí vizuálně ale také kvantitativně. Při kvantitativní analýze se hodnotí pulmogram, který vyjadřuje časový průběh četnosti jednotlivých impulzů z oblasti nad pravou, levou komorou a nad plícemi. Očekává se kompaktní průchod bolu jednotlivými myokardiálními oddíly, což je lépe splněno pro pravou komoru na rozdíl od levé. Pokud dojde k injekci bolu do periferního žilního řečiště, může dojít

k fragmentaci, kdy se bolus rozdělí na jednotlivé části, které prochází srdcem odděleně a vyšetření není z tohoto důvodu hodnotitelné [2, 12].

3.8 Vyšetření metabolismu myokardu

Metabolismus myokardu se využívá především u pacientů po prodělaném infarktu myokardu k určení viability srdečního svalu.

3.8.1 Princip, indikace a jejich patofyziologie

Hlavními zdroji energie myokardu, jejíž velké množství srdeční sval spotřebuje, jsou mastné kyseliny. Mastné kyseliny vznikají beta-oxidací, jež je náročná na potřebu kyslíku. Je-li ischemie závažnější, uplatňuje se anaerobní glykolýza, při které srdeční sval získává méně energie a hypoperfundovaná část srdeční tkáně se přestává kontrahovat. Při chronické závažné hypoperfúzi může nastat afunkční, ale viabilní myokard, tzv. hibernovaný myokard. Při hibernovaném myokardu je snížena až vymizena kontraktilita, ale je zachován minimální krevní průtok a myocyt využívá zbytek své energie k udržení bazálního metabolismu zajišťující nejnutnější buněčné pochody. Avšak poklesne-li koronární průtok myokardu pod kritickou mez, dojde k nekróze myocytů, a tím pádem k infarktu myokardu. Při ztrátě kontraktility srdečních stěn je stále myokard viabilní a pokud dojde k obnově krevního průtoku, dojde i k obnovení celkové funkce myokardu. Pokud však koronární průtok nelze obnovit, dochází k postupné fibrotické přeměně srdeční tkáně. Hibernace je tedy stav reverzibilní [2, 18].

Tabulka 2 Viabilita myokardu u různých typů ischemického postižení, upraveno z [2]

Myokard	Funkce	Perfúze	Akumulace FDG	Viabilita
normální	normální	normální	zachována	viabilní
nekróza („jizva“)	chybí	chybí	chybí	neviabilní
hibernovaný	snížená	snížená	zachována	viabilní
omráčený	snížená	normální	postupně se upravující	viabilní

Vyšetření metabolismu myokardu se indikuje zpravidla u pacientů po prodělaném infarktu myokardu k posouzení viability srdečního svalu. Pravděpodobnost zlepšení srdeční funkce po revaskularizačním zákroku se zvyšuje, čím je větší část dysfunkčního srdečního svalu viabilní. Revaskularizace spočívá v přemostění zúžené části koronární tepny žilním či tepenným štěpem a k následnému obnovení postižené části myokardu okysličenou krví. Díky tomuto chirurgickému zákroku se snižuje riziko vzniku infarktu myokardu a předchází se následným komplikacím. Chirurgická revaskularizace myokardu se doporučuje i u pacientů s hibernovaným myokardem, jelikož se u nich častěji vyskytují maligní arytmie než u pacientů po prodělaném, jizvou zhojeném, infarktu myokardu [2].

3.8.2 Provedení vyšetření

Pomocí pozitronové emisní tomografie s použitím ¹⁸F-FDG lze posoudit viabilitu srdečního svalu, kdy se zjišťuje metabolismus glukózy a stav perfúze

v oblasti léze. Při tomto vyšetření mohou nastat dva jevy – match a miss match. Match představuje jev, kdy v oblasti porušené funkce myokardu je současný výpadek perfúze i metabolismu. Tento perfúzně-metabolický match svědčí o neviabilním myokardu, např. o jizvě po prodělaném infarktu myokardu. Naopak miss match svědčí pro viabilní myokard, kdy dochází ke snížené funkci perfúze, ale je zachován dostatečný metabolismus glukózy, jelikož došlo k dostatečné akumulaci ^{18}F -FDG [12, 18].

Průkaz viability myokardu pomocí ^{18}F -FDG je citlivější oproti $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -značených radiofarmak, přesto se častěji k posuzování viability srdečního svalu používá perfúzní vyšetření. Posouzení viability pomocí hradlované SPECT vychází z předpokladu, že myocyt je viabilní, pokud akumuluje $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -značené radiofarmakum (MIBI, tetrofosmin), neboť má zachovanou propustnost buněčné membrány [2, 12].

3.9 Vyšetření inervace myokardu

Metody nukleární kardiologie jsou schopny posoudit neuronální funkci srdečního svalu, jelikož sympatický nervový systém hraje významnou roli v kardiovaskulární fyziologii.

3.9.1 Indikace a jejich patofyziologie

Tato metoda nukleární medicíny se provádí pouze zřídka, dosud nebyla zařazena do indikačních doporučení. Vyšetření inervace myokardu se může indikovat u vybraných pacientů po transplantaci srdce, které je kompletně denervované. Po několika letech po transplantaci dochází k postupné reinervaci, díky níž je transplantované srdce schopno lépe fyziologicky reagovat na různé podněty. Další indikací může být ICHS, neboť sympatický nervový systém je více citlivější na ischemii než svalová tkáň myokardu. Z tohoto důvodu je oblast

poruchy inervace na scintigramu větší než perfúzní defekt. Toto vyšetření může být dále cenné u pacientů s dilatační kardiomyopatií, která se manifestuje kardiomegalií s těžkým městnavým srdečním selháním, na jehož patofyziologii má významnou roli adrenergní nervový systém. Většina diabetiků trpí neuropatií, která postihuje i autoimunitní nervový systém, proto lze i u nich toto vyšetření indikovat. Nízká akumulace aplikovaného adrenergního radiofarmaka odpovídá horší prognóze pacienta, a tím i větší pravděpodobnosti náhlé srdeční smrti [1, 2].

3.9.2 Princip vyšetření

K zobrazení presynaptické funkce neuronů se intravenózně aplikuje radiofarmakum zvané metaiodobenzylguanidin (^{123}I -MIBG), které se používá pro vyšetření pomocí klasické planární scintigrafie či SPECT. ^{123}I -MIBG má stejný akumulární mechanismus na sympatických nervových zakončeních v myokardu jako noradrenalin, jde tedy o jeho analog. Na vzniklých scintigramech se hodnotí akumulace adrenergního radiofarmaka v mediastinu a v myokardu. Porucha inervace srdečního svalu je definována výrazně sníženou akumulací radiofarmaka a jeho rychlejším vyplavováním z myokardu. Tito pacienti mají vyšší pravděpodobnost srdečního selhání a maligní arytmie [2, 12].

V klinické praxi se používá pouze radiofarmakum ^{123}I -MIBG. V zahraničí lze toto vyšetření provést pomocí PET se zaměřením na sympatickou a parasympatickou interakci a zobrazením nervové regulace perfúze. Pro PET vyšetření k zobrazení adrenergní funkce myokardu se používají radiofarmaka ^{18}F -fluordopamin, ^{18}F -6-fluorometaraminol a ^{11}C -hydroxyfedrin, která nejsou v ČR zatím dostupná [2, 9].

4 METODIKA

Nasbíraná data z radioizotopového pracoviště Institutu klinické a experimentální medicíny sloužily k vytvoření jednotlivých kazuistik a přehledu používaných metod nukleární medicíny k zobrazení jednotlivých defektů srdečního svalu.

Nejvíce kazuistik je zaměřeno na nejpoužívanější metodu spočívající k hodnocení perfúze myokardu s jednotlivými možnými nálezy (fyziologický náleze, drobná nevýznamná ložiska, reverzibilní defekt, plně reverzibilní defekt, fixní defekt). Většina vyšetření byla provedena ergometrickou zátěží, ale je uvedena i ukázka farmakologické zátěže či vyšetření před nekardiologickým chirurgickým zákrokem.

Další kazuistiky jsou zaměřeny na určení viability srdečního svalu, ventrikulografii a inervaci, která byla převzata z odborného článku z důvodu neposkytnutí materiálu, jelikož se nejedná o běžně používané vyšetření.

Ke sběru dat byla použita hradlovaná SPECT s použitím jednoúčelové kamery D-SPECT s akvizicí vleže a vsedě.

Ve většině kazuistik jsou uvedeny indikace, průběh vyšetření, popis získaného nálezu, závěr a ilustrace.

5 VÝSLEDKY

5.1 Kazuistika č. 1 – fyziologický nález

5.1.1 Indikace

Hypertonik ve věku 85 let byl přijat na vyšetření k vyloučení ischemické choroby srdeční.

5.1.2 Průběh vyšetření

Před vyšetřením pacient vysadil beta blokátory. Pacient byl poučen o celkovém průběhu zátěžového a klidového vyšetření. Pacientovi byla intravenózně zavedena kanyla, byl připojen na EKG a k zařízení k měření krevního tlaku.

Ergometrická zátěž činila od 20 W do 120 W s postupným navyšováním 20 W/min. Ascendentní zátěž trvala 5 minut 53 sekund. Na vrcholu zátěže, kdy pacient dosáhl 79,25 % maximální tepové frekvence (MTF), bylo aplikováno radiofarmakum ^{99m}Tc -MIBI o aktivitě 487 MBq a následně byla zátěž snižována. Pacient nezaznamenal při zátěži žádnou bolest na hrudi, byl přiměřeně dušný, hodnoty krevního tlaku a tepové frekvence byly přiměřené k fyzické zátěži. Akvizice proběhla cca za 15 minut po injekci radiofarmaka.

Scintigrafie perfúze myokardu v klidu byla doplněna za 2 dny, kdy bylo pacientovi aplikováno 444 MBq ^{99m}Tc -MIBI a po 60 minutách došlo ke snímání pomocí jednoúčelové kamery.

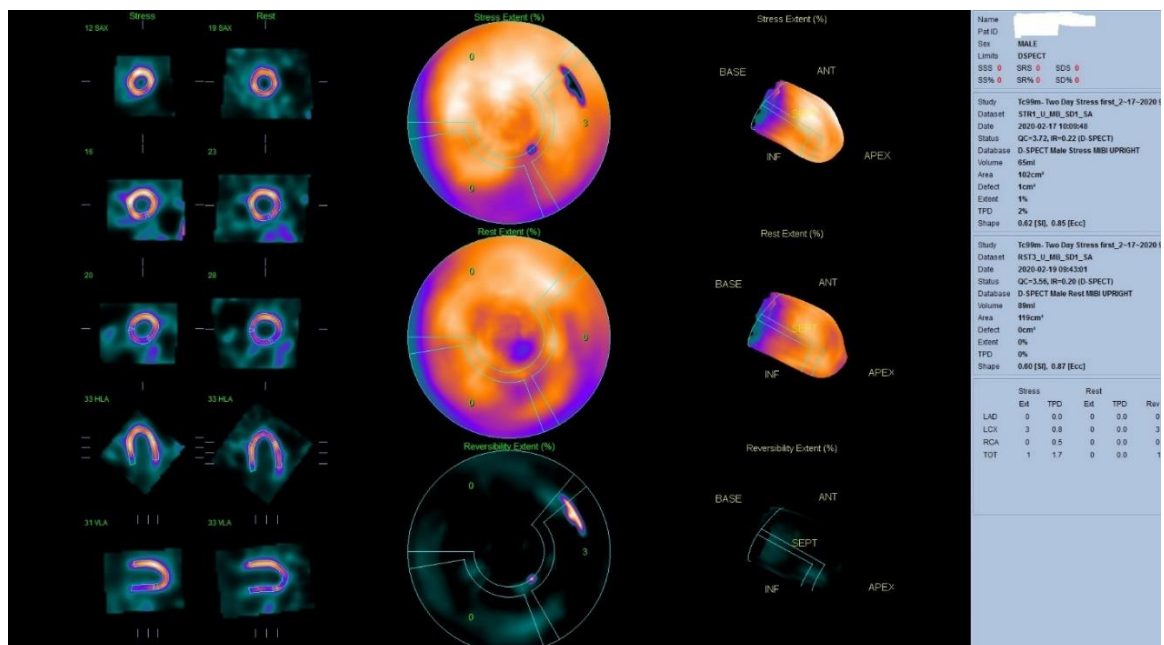
Akvizice snímků zátěžové i klidové studie proběhla pomocí D-SPECT v pozici vleže i vsedě a následně došlo k porovnání získaných snímků.

5.1.3 Popis nálezu

Při zobrazení myokardu v zátěži i v klidu, vleže i vsedě jsou řezy ve třech základních rovinách obvyklé velikosti a homogenně zobrazeny. Polární mapa levé komory je také homogenně zobrazena (Obrázek 17).

5.1.4 Závěr

Při bicyklové zátěži i v klidu nebyla zaznamenána významná lokální hypoperfúze myokardu levé komory, volumové ukazatele (ejekční frakce, end-disastolický objem, end-systolický objem) jsou v normě.



Obrázek 17 Fyziologický nálezu perfúze myokardu levé komory

5.2 Kazuistika č. 2 – drobná nevýznamná ložiska snížené četnosti

5.2.1 Indikace

54letý pacient s diabetes mellitus 2. typu byl indikován k vyšetření z důvodu atypických bolestí na hrudi.

5.2.2 Průběh vyšetření

Ascendentní zátěž trvala 4 minuty 15 vteřin od 25 W do 175 W s postupným navyšováním zátěže 25 W/min. Na vrcholu zátěže bylo pacientovi aplikováno ^{99m}Tc -MIBI o aktivitě 540 MBq. Dostatečná aktivita aplikovaného radiofarmaka je vypočítána z hmotnosti (110 kg) a výšky (175 cm) pacienta. Tepová frekvence v klidu činila 108/min, na vrcholu zátěže 140/min, tj. 85,5 % MTF. Hodnota krevního tlaku v klidu byla 110/80 mm Hg, při maximální zátěži 190/80 mm Hg. Během zátěže byla přiměřená tepová frekvence, bolesti na hrudi pacient neměl.

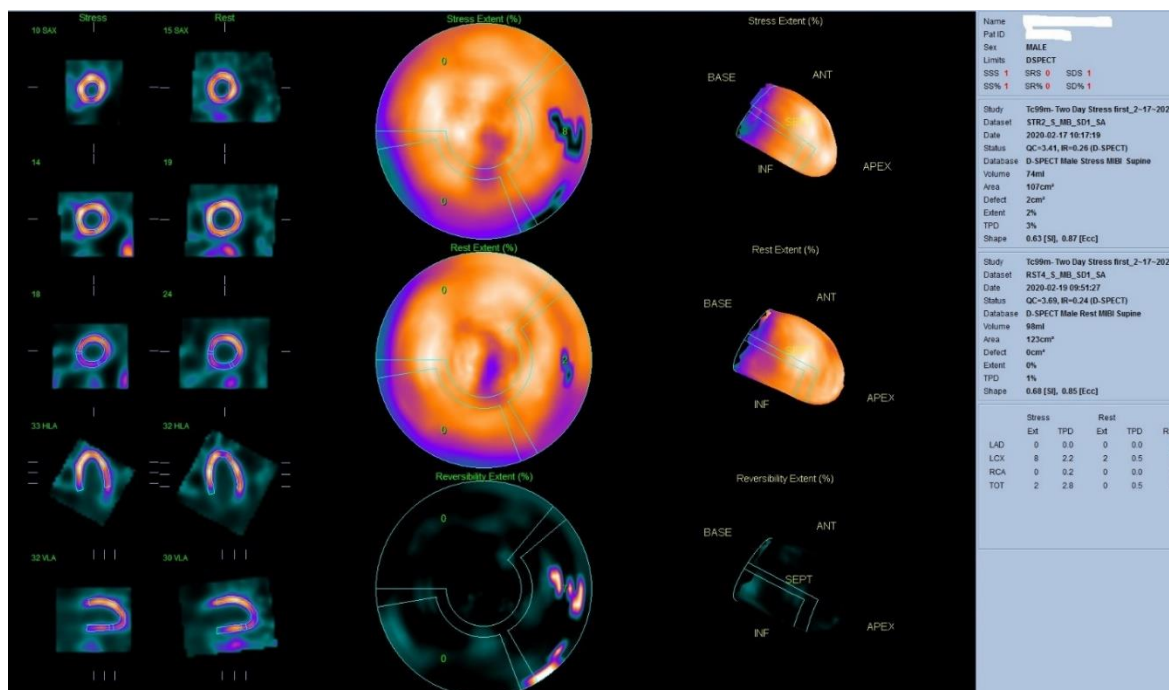
Při klidové studii bylo aplikováno 550 MBq. Akvizice obou studií byly detekovány pomocí D-SPECT a následně došlo k porovnání perfúze myokardu levé komory obou studií vleže i vsedě.

5.2.3 Popis nálezu

Při zobrazení srdečního svalu v řezech ve všech třech základních rovinách došlo k homogenní akumulaci radiofarmaka, řezy jsou obvyklé velikosti. Při zobrazení levé komory v polárních mapách se vyskytla drobná ojedinělá ložiska, která jsou velikostí nevýznamná, jelikož volumové i numerické hodnoty jsou v normě (Obrázek 18).

5.2.4 Závěr

Při ergometrické zátěži i v klidu není patrná významná hypoperfúze myokardu, jsou přítomna drobná nevýznamná ložiska snížené četnosti, ejekční frakce je v normě.



Obrázek 18 Scintigrafie perfúze myokardu při klidové a zátěžové studii, na snímku jsou patrná drobná ložiska snížené četnosti v oblasti r. circumflexus levé koronární tepny

5.3 Kazuistika č. 3 – ložisko v bazální části septa

5.3.1 Indikace

Diabetička ve věku 72 let s primární esenciální hypertenzí byla indikována k vyšetření z důvodu vyloučení ICHS.

5.3.2 Průběh vyšetření

Bicyklová zátěž byla nízká od 20 W do 40 W, jelikož pacientka trpí neuropatií a tepová frekvence byla již dostatečná k aplikaci radiofarmaka. V klidu TF činila 90/min, při zátěži 133/min, tj. 89,8 % MTF. Na vrcholu zátěže byla do levé kubity aplikována aktivita 330 MBq ^{99m}Tc-MIBI. Ascendentní zátěž trvala 4 minuty 35 sekund, poté byl cca 2 minuty volný bicyklový pohyb. Při zátěži nebyla zaznamenána bolest na hrudi, dušnost a hodnoty tepové frekvence byly přiměřené. Během zátěže byly zaznamenány pomocí EKG četné komorové extrasystoly. Krevní tlak v klidu činil 150/80 mm Hg, při zátěži 200/80 mm Hg.

Po zátěžové studii došlo k akvizici pomocí zobrazovacího systému D-SPECT a vzniklé scintigramy vleže a vsedě byly porovnány.

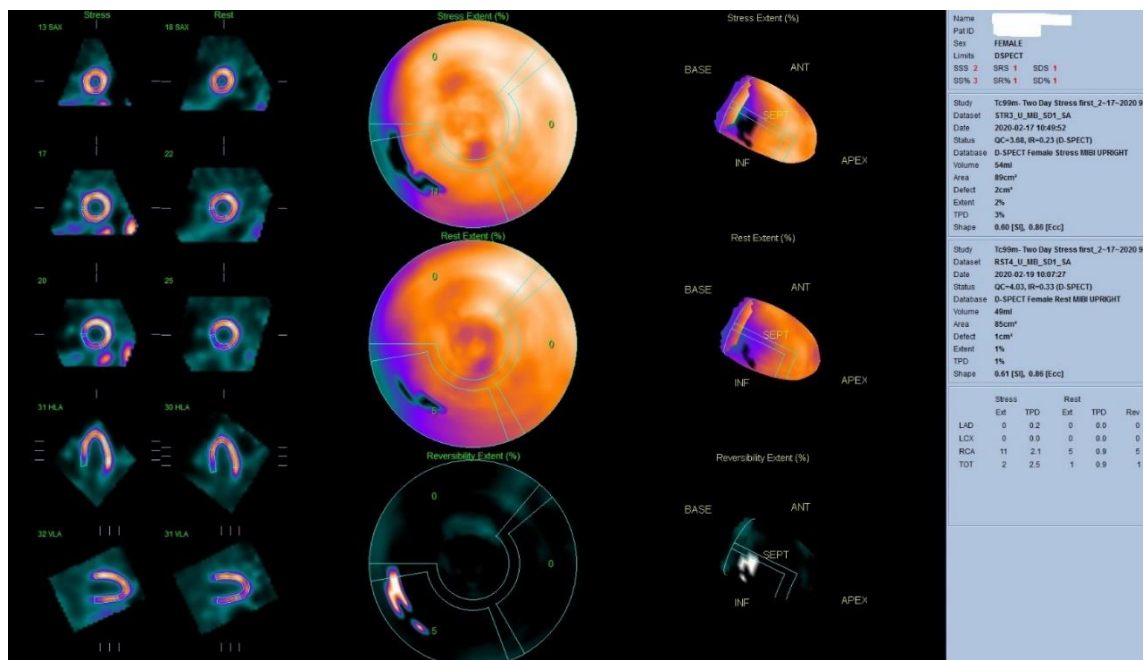
Za dva dny po zátěžové studii pacientka podstoupila klidovou perfúzní scintigrafii myokardu, kdy jí bylo aplikováno ^{99m}Tc -MIBI o aktivitě 358 MBq.

5.3.3 Popis nálezu

Řezy myokardu ve třech základních rovinách při klidové i zátěžové studii jsou homogenně zobrazeny v obvyklé velikosti. Při zobrazení levé komory v polární mapě je patrné ložisko snížené četnosti v bazální části septa (Obrázek 19).

5.3.4 Závěr

Při ergometrické zátěži je zaznamenáno ložisko snížené četnosti hraniční velikosti v bazální části septa, které v klidu mizí. Nejsou však známky závažné alterace lokální motility části stěny LK, ejekční frakce není snížena.



Obrázek 19 Porovnání klidové a zátěžové studie perfúzní scintigrafie myokardu, na snímcích je patrné ložisko v bazální části septa, které v klidu mizí

5.4 Kazuistika č. 4 – snížená perfúze na přední stěně LK

5.4.1 Indikace

Pacient ve věku 52 let byl indikován k vyšetření perfúze myokardu z důvodu časté palpitace s pocitem nedodechnutí, doplněné náhlou hypotenzí, parestézií levé horní končetiny a tíhou na hrudi.

5.4.2 Průběh vyšetření

Fyzická zátěž činila od 20 W do 150 W s postupným navyšováním zátěže po 25 W/min. Hodnota tepové frekvence v klidu byla 93/min, při maximální zátěži 147/min. Po dosažení 87,5 % MTF bylo aplikováno 435 MBq ^{99m}Tc-MIBI. Ascendentní zátěž trvala cca 5 minut 36 sekund, poté byla zátěž snížena k volnému bicyklovému pohybu. Hodnoty krevního tlaku v klidu činily 110/70 mm Hg, při maximální zátěži 190/70 mm Hg. Při fyzické zátěži nebyla zaznamenána bolest na hrudi, pacient byl dušný.

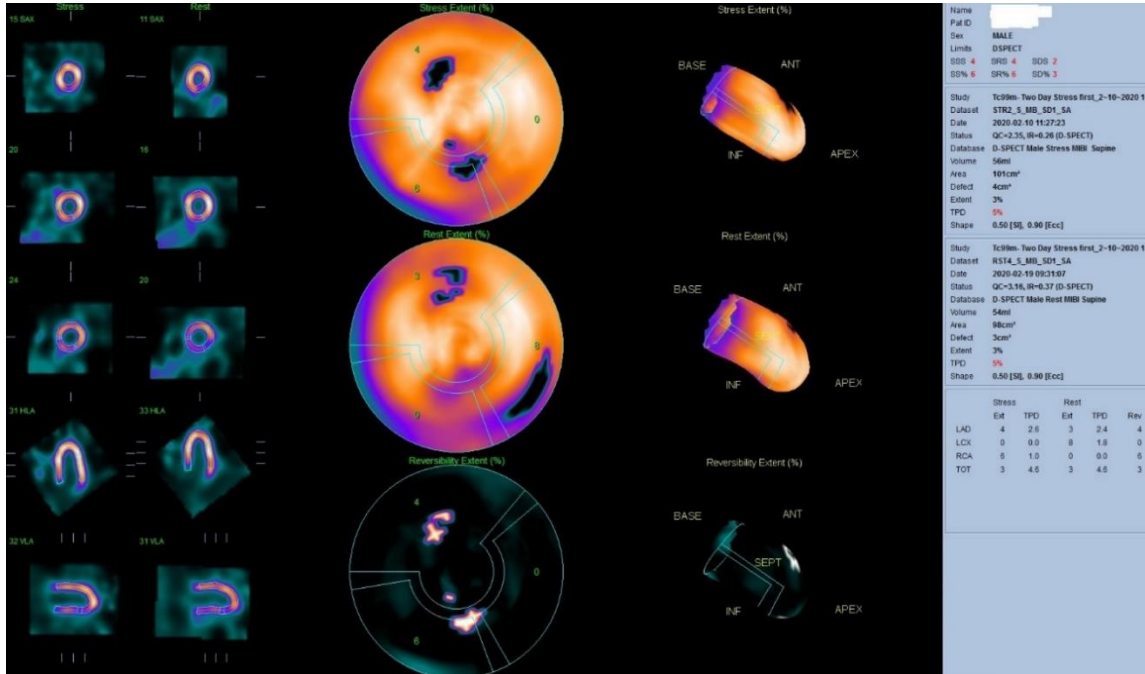
Scintigrafie klidové perfúze myokardu byla doplněna s aplikací 429 MBq ^{99m}Tc-MIBI. Akvizice obou studií byly provedeny kamerou D-SPECT vleže i vsedě a následně došlo k jejich porovnání.

5.4.3 Popis nálezu

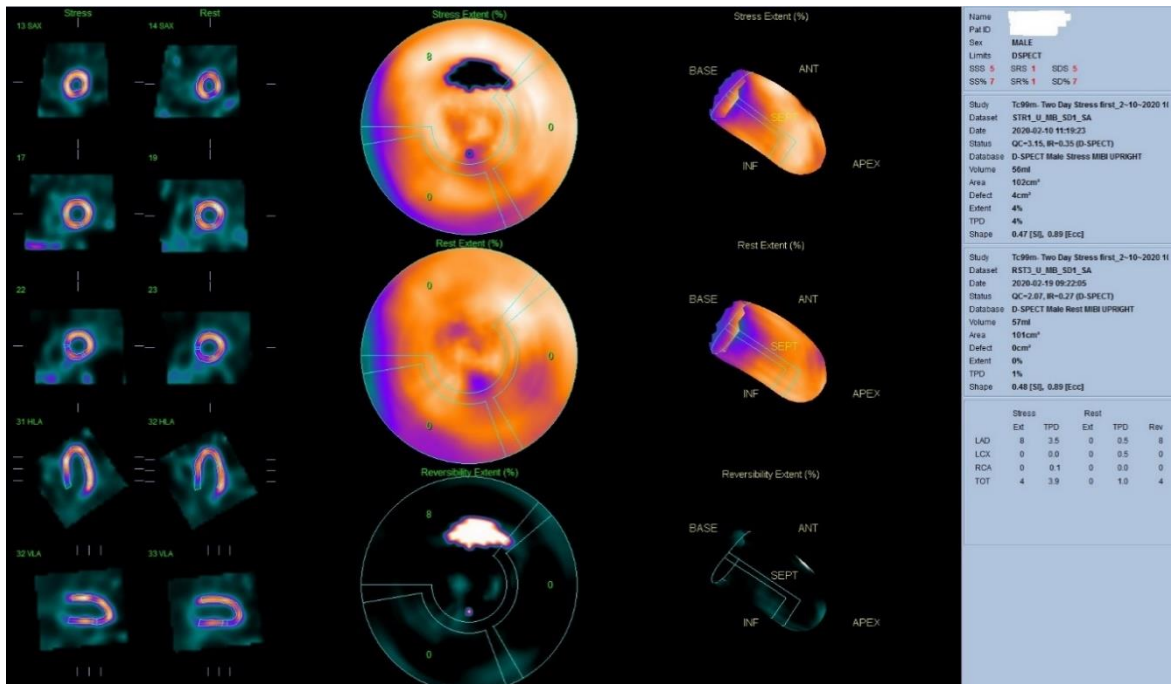
Při zobrazení perfúze myokardu levé komory při zátěži jsou řezy ve třech základních rovinách obvyklé velikosti, jen mírně nehomogenně zobrazeny. Při zobrazení LK v polární mapě je patrné malé ložisko na přední stěně, které v klidu vsedě mizí (Obrázek 21), ale vleže spíše přetrvává (Obrázek 20).

5.4.4 Závěr

Při bicyklové zátěži je zobrazeno hraniční ložisko snížené perfúze na přední stěně levé komory, které při klidové studii mizí.



Obrázek 20 Porovnání zátěžové (polární mapa nahoře) a klidové (polární mapa uprostřed) studie vleže, na obou snímcích je zobrazeno ložisko na přední stěně LK, při klidové studii je na boční stěně zaznamenán artefakt



Obrázek 21 Porovnání zátěžové a klidové studie vsedě, na snímku zátěžové studie je patrné ložisko na přední stěně, které v klidu mizí

5.5 Kazuistika č. 5 – reverzibilní defekt

5.5.1 Indikace

Pacient ve věku 65 let s chronickou ischemickou chorobou srdeční, stabilní anginou pectoris a diabetem mellitus 2. typu byl indikován k vyšetření perfúze myokardu z důvodu pravidelné kontroly po dvou letech.

5.5.2 Průběh vyšetření

Ergometrická zátěž trvala 4 minuty 30 sekund od 20 W do 80 W. Zátěž byla ukončena pro dušnost pacienta při maximální tepové frekvenci 61,29 % s aplikací 506 MBq ^{99m}Tc-MIBI. Pacient byl limitován dušností a únavou, bolest na hrudi nebyla, tlaková reakce byla přiměřená zátěži.

Před klidovou scintigrafií myokardu bylo pacientovi aplikováno 497 MBq radiofarmaka a po 60 minutách po aplikaci byla provedena jednofotonová hradlovaná emisní tomografie na kameře D-SPECT.

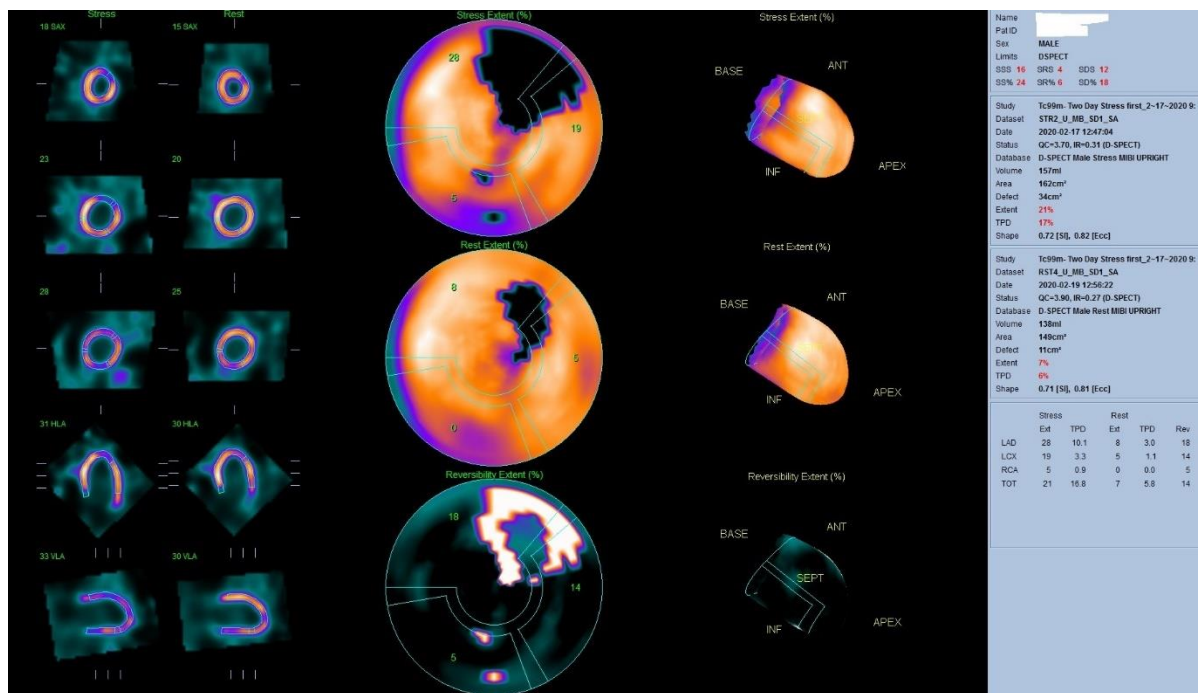
5.5.3 Popis nálezu

Řezy levé komory ve třech základních rovinách jsou hraniční velikosti až zvětšeny s defektem na přední stěně. Při zobrazení levé komory v polárních mapách je zobrazeno středně velké ložisko na přední stěně, které je větší při zátěži než v klidu. Numerické hodnoty svědčí pro velké ložisko ischemie se známkami reverzibility (Obrázek 22).

5.5.4 Závěr

Bicyklová zátěž předčasně ukončena pro dušnost. Nález středního až velkého ložiska hypoperfúze na přední stěně levé komory se známkami významné

reverzibility v klidu. Výrazná porucha motility septa. Ejekční frakce je patologicky snížena.



Obrázek 22 Porovnání zátěžové a klidové studie perfúze myokardu, při zátěži je zobrazeno velké ložisko hypoperfúze, které v klidu mizí

5.6 Kazuistika č. 6 – reverzibilní defekt

5.6.1 Anamnéza

49letý pacient se známou ICHS vyšetřen na koronarografii z důvodu tlaku za hrudní kostí podobného charakteru jako při IM. Bolest spontánně odezněla, ale druhý den došlo k recidivě potíží větší intenzity. Na koronarografii byla patrná stenóza ve střední části ramus interventricularis anterior (RIA) (Obrázek 24), proto pacient podstoupil angiografický zákrok s implantací 2 stentů. Následně byla provedena zátěžová perfúzní scintigrafie myokardu, kde nebyla zaznamenána významná patologie, na polárních mapách bylo rozložení radiofarmaka homogenní. Po několika letech při pravidelné kontrole pacient oznámil nové občasné bolesti na hrudi jiného charakteru než doposud, proto bylo doporučeno vyšetření perfúze srdečního svalu.

5.6.2 Průběh vyšetření

Ergometrická zátěž od 20 W do 60 W byla předčasně ukončena pro bolest na hrudi. Bolest ustoupila v klidu, na vrcholu zátěže byl pacient přiměřeně dušný. Ascendentní zátěž trvala 3 minuty 8 sekund. Při maximální tepové frekvenci 70,73 % bylo aplikováno do levé kubitě radiofarmakum $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ o aktivitě 436 MBq.

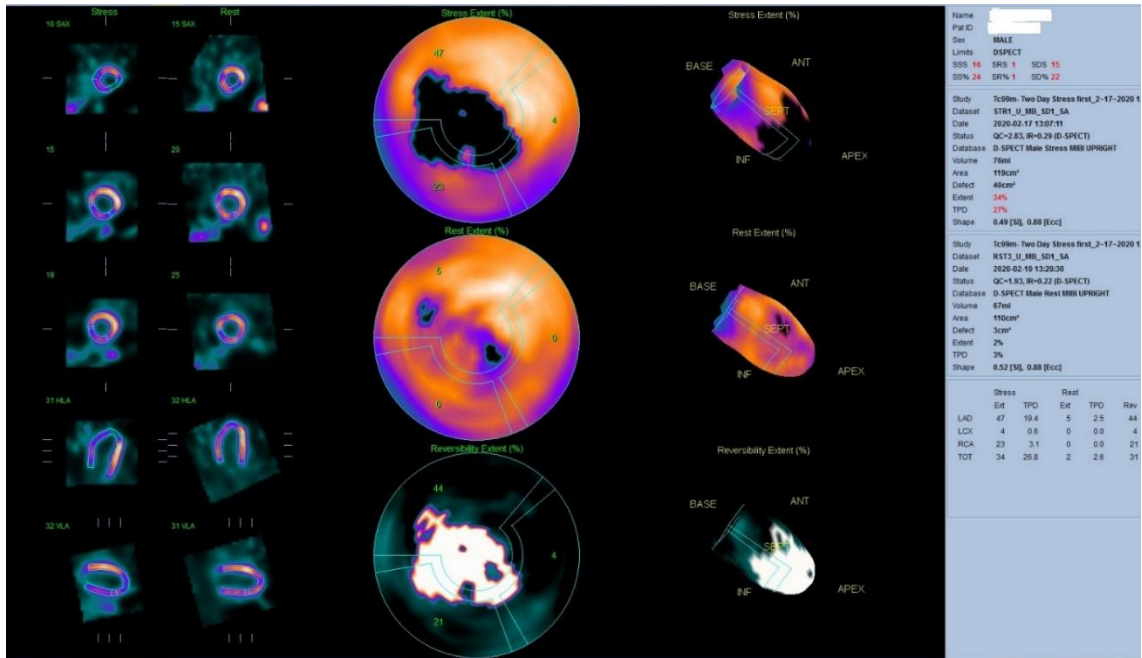
Za 48 hodin byla doplněna klidová studie perfúze myokardu, kdy bylo aplikováno 497 MBq perfúzního radiofarmaka. Obě dvě studie byly provedeny pomocí hradlované SPECT na kameře D-SPECT.

5.6.3 Popis nálezu

Při zobrazení levé komory myokardu jsou řezy obvyklé velikosti, je však zaznamenán velký defekt v oblasti apexu. Při zobrazení levé komory v polárních mapách při zátěži je patrné velké ložisko hypoperfúze v oblasti apexu s přesahem na spodní stěnu a septum, v klidu ložisko mizí (Obrázek 23). Ejekční frakce je v normě, ale po zátěži je nižší než v klidu.

5.6.4 Závěr

Bicyklová zátěž byla ukončena pro bolest na hrudi. Při zátěži je zobrazeno velké ischemické ložisko v oblasti apexu s přesahem na septum a spodní stěnu. Ložisko je téměř plně reverzibilní v klidu.



Obrázek 23 Zátěžová a klidová studie perfúze myokardu, po zátěžovém vyšetření je zaznamenán velký reverzibilní defekt v oblasti apexu s přesahem na septum a spodní stěnu



Obrázek 24 Koronarografie, kmen bez stenózy, ve střední části RIA je patrná 90% stenóza

5.7 Kazuistika č. 7 – rozsáhlý perfúzní defekt

5.7.1 Indikace

77letý pacient s namáhavou dušností indikován k vyšetření k vyloučení ICHS.

5.7.2 Průběh vyšetření

Zátěžový test byl proveden od 25 W do 150 W po dobu 5 minut 19 sekund. Test byl ukončen pro dušnost, ale bylo dosaženo požadované zátěže. MTF činila 89 %. Plaková reakce na zátěž byla přiměřená.

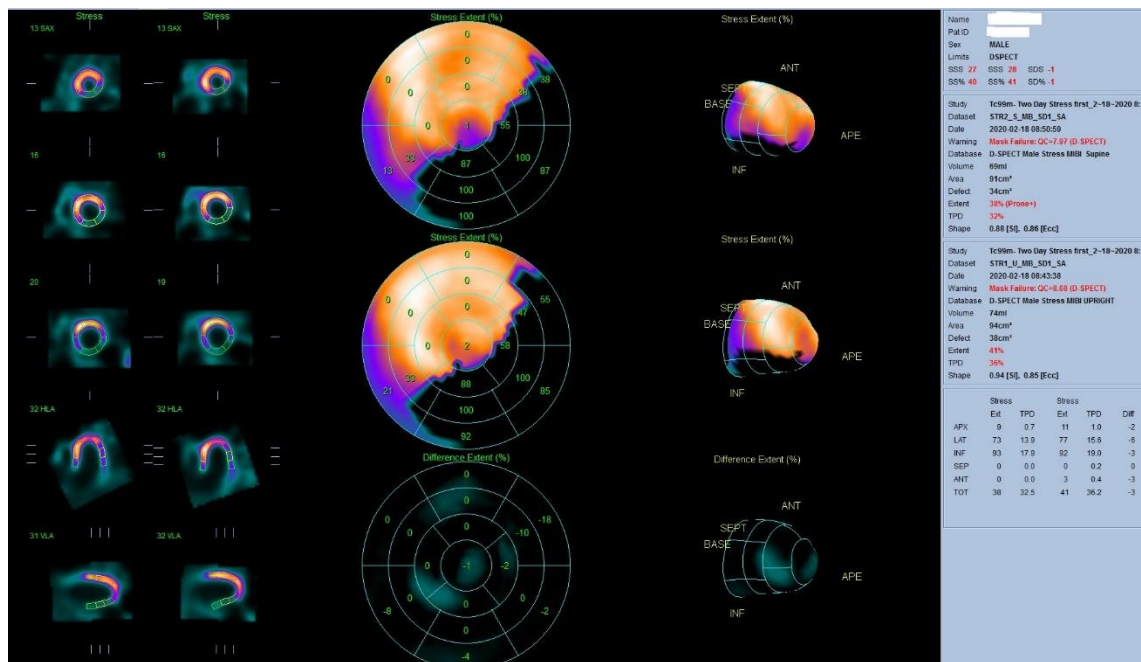
V odstupu 15 minut po i.v. aplikaci radiofarmaka ^{99m}Tc -MIBI o aktivitě 413 MBq do pravého zápěstí byl proveden G-SPECT levé komory srdeční na kameře D-SPECT.

5.7.3 Popis nálezu

Na tomografických řezech a 3D modelu LK je patrný rozsáhlý perfúzní defekt v oblasti spodní a laterální stěny (Obrázek 25).

5.7.4 Závěr

Při dostatečné ergometrické zátěži byl scintigraficky zaznamenán rozsáhlý perfúzní defekt spodní a laterální stěny, který zaujímá 36 % celkového myokardu LK. Ejekční frakce je zachovalá při dolních mezích normálu (53 %). Dle doporučení kardiologa byl pacient po zátěžovém vyšetření ihned odeslán k akutnímu příjmu. Tentýž den pacient podstoupil chirurgickou léčbu spočívající v provedení aortokoronárního bypassu.



Obrázek 25 Scintigrafické hodnocení LK srdeční po zátěži vleže (nahore) a vsedě (uprostřed). Na polárních mapách a 3D zobrazení LK je patrná rozsáhlá hypoperfúze spodní a laterální stěny.

5.8 Kazuistika č. 8 – fixní defekt

5.8.1 Indikace

Pacient ve věku 64 let prodělal akutní infarkt myokardu přední stěny. Ke scintigrafickému vyšetření byl indikován k verifikaci ischemie.

5.8.2 Průběh vyšetření

Kvůli vysokému krevnímu tlaku pacienta z důvodu vysazení betablokátorů bylo vstupně provedeno klidové vyšetření s aplikací ^{99m}Tc-MIBI. Za 60 minut po i.v. podání radiofarmaka byl proveden G-SPECT na kameře D-SPECT.

Zátěžové vyšetření pomocí ergometru bylo provedeno od 25 W do 75 W po dobu 2 minut a 49 sekund, poté byla pacientovi snížena zátěž a radiofarmakum bylo aplikováno ve 3 minutách 22 sekund při dosažení 81 % MTF. Zátěžový test byl ukončen předčasně z důvodu dušnosti a bolesti dolních končetin. Bylo dosaženo požadované tepové frekvence i přes nevysazení

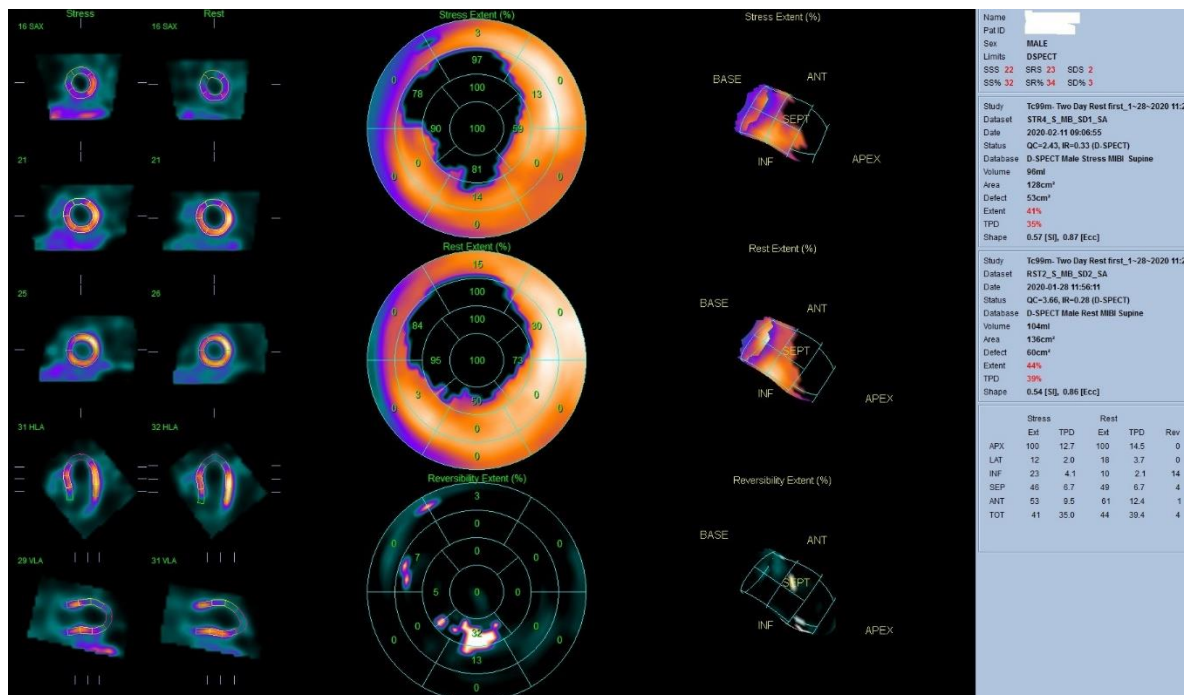
betablokátorů 48 hodin před vyšetřením. Krevní tlak v klidu činil 159/84 mm Hg, při zátěži 155/89 mmHg. V odstupu 15 minut po podání indikátoru byla provedeno hradlované SPECT na kameře D-SPECT v polohách vleže a vsedě.

5.8.3 Popis nálezu

Na scintigrafických tomografických řezech a 3D modelu levé komory srdeční je po zátěžové i klidové studii zaznamenán rozsáhlý perfúzní defekt v oblasti přední stěny, apexu a septa, s mírným přesahem na boční stěnu (Obrázek 26).

5.8.4 Závěr

Při dosažení MTF 81 % je scintigraficky patrný rozsáhlý perfúzní defekt na přední stěně, apexu a septu, s mírným přesahem inferoapikálně. Defekt je závažného rozsahu, zaujímá 35-38 % celkového myokardu LK. Zobrazený defekt je v celém rozsahu fixního charakteru – obraz „jizvy“. Regionální porucha kinetiky není patrná.



Obrázek 26 Porovnání zátěžové a klidové studie v polárních mapách a 3D modelu LK srdeční. Je znázorněn rozsáhlý perfúzní fixní defekt.

5.9 Kazuistika č. 9 – farmakologická zátěž předoperačního vyšetření

5.9.1 Indikace

Hypertonik ve věku 57 let byl indikován ke scintigrafickému vyšetření z důvodu patologického nálezu na EKG v rámci předoperačního vyšetření kolenního kloubu.

5.9.2 Průběh vyšetření

Z ortopedických důvodů byla provedena farmakologická zátěž regadenosonem (preparát Rapiscan). Došlo k i. v. podání 5 ml preparátu v průběhu 10 sekund. Poté následoval proplach 5 ml fyziologickým roztokem. Za 20 sekund po i. v. aplikaci Rapiscanu došlo k podání radiofarmaka ^{99m}Tc -MIBI o aktivitě 517 MBq. V klidu krevní tlak pacienta činil 140/70 mmHg a tepová frekvence 55/min. Po aplikaci farmaka se krevní tlak zvýšil na 160/70 mmHg a tepová frekvence byla max. 141/min, bylo dosaženo cílové tepové frekvence. V odstupu 15 minut po podání radiofarmaka bylo provedeno G-SPECT na kameře D-SPECT.

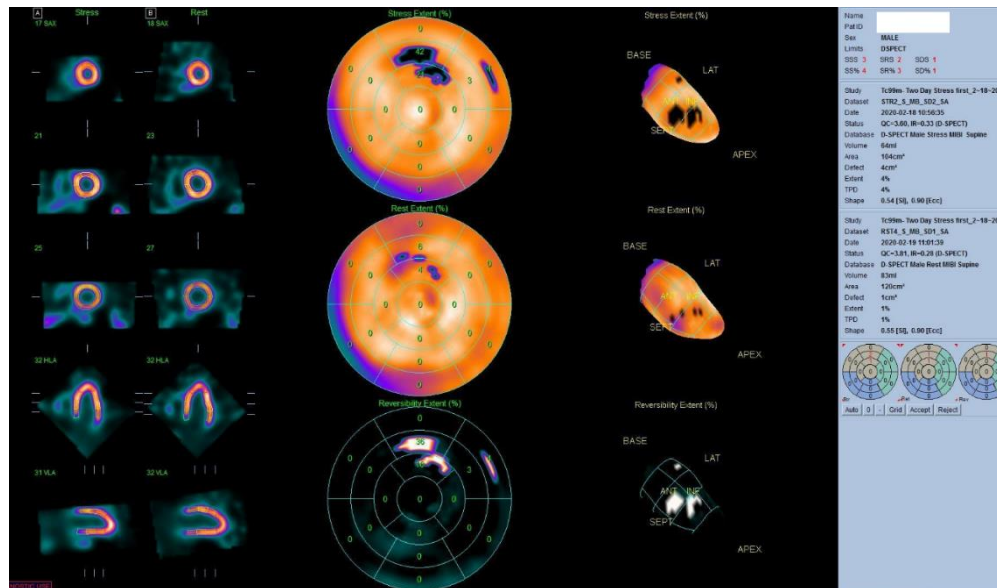
Následující den bylo scintigrafické vyšetření doplněné klidovou studií, kdy se aplikovalo 499 MBq perfúzního radiofarmaka a za 60 minut po jeho podání byl registrován G-SPECT myokardu.

5.9.3 Popis nálezu

Po farmakologické zátěži regadenosonem je akumulace radiofarmaka na tomografických řezech a 3D modelu LK lehce snížena na přední stěně. Tento defekt však při klidové studii mizí, je tedy reverzibilního charakteru (Obrázek 27).

5.9.4 Závěr

Při zátěžové studii je scintigraficky patrný menší perfúzní defekt v oblasti přední stěny, který je částečně reverzibilního charakteru. Ischémie vzniklá po zátěži je mírná, zaujímá 1-7 % celkového myokardu LK. Porucha kinetiky není patrná.



Obrázek 27 Na polární mapě a 3D modelu LK je po zátěžové studii patrný drobný perfúzní reverzibilní defekt

5.10 Kazuistika č. 10 – určení viability myokardu

5.10.1 Indikace

48letý pacient po prodělaném IM byl indikován ke scintigrafickému vyšetření myokardu pro zhodnocení jeho viability v oblasti RIA.

5.10.2 Průběh vyšetření

Z důvodu vysazení beta-blokátorů měl pacient vysoký vstupní krevní tlak, proto bylo vstupně provedeno klidové vyšetření. Po 60 minutách po i. v. aplikaci ^{99m}Tc-MIBI byl registrován G-SPECT myokardu na kameře D-SPECT.

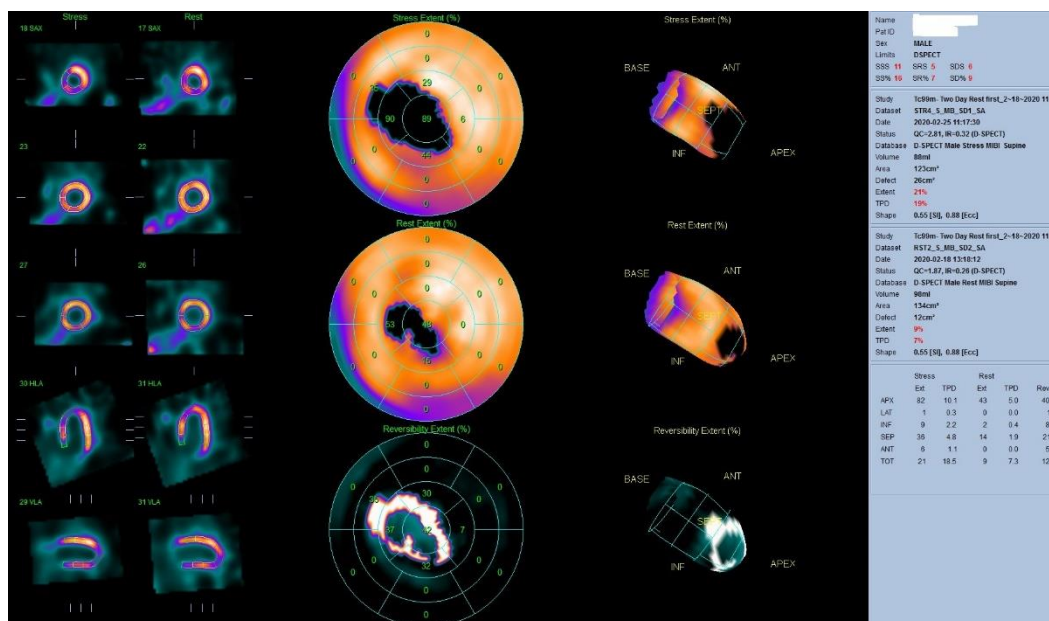
Za několik dní byla provedena bicyklová ergometrie se stupňovanou zátěží od 25 W do 150 W po dobu 6 minut. Bylo dosaženo cca 84 % MTF, TF basálně činil 99/min a v průběhu byl max. 145/min. Zátěžový test byl ukončen pro dušnost, ale bylo dosaženo cílové tepové frekvence.

5.10.3 Popis nálezu

Na scintigrafickém záznamu je zaznamenána snížená akumulace radiofarmaka apikálně, s přesahem na spodní stěnu a septum. Defekt je za klidových podmínek menšího rozsahu než při zátěži (Obrázek 28).

5.10.4 Závěr

Při dostatečné ergometrické zátěži je scintigraficky patrný perfúzní defekt středně velkého rozsahu v oblasti apexu, s přesahem na spodní stěnu a septum. Defekt je částečně reverzibilního charakteru. Viabilita srdečního svalu je zachovalá v celém rozsahu defektu (perfúze je nad 50 %). Pro pacienta by byl tedy přínosný chirurgický zákrok k opravě poškozené tepny.



Obrázek 28 Scintigraficky zhodnotitelná viabilita srdečního svalu

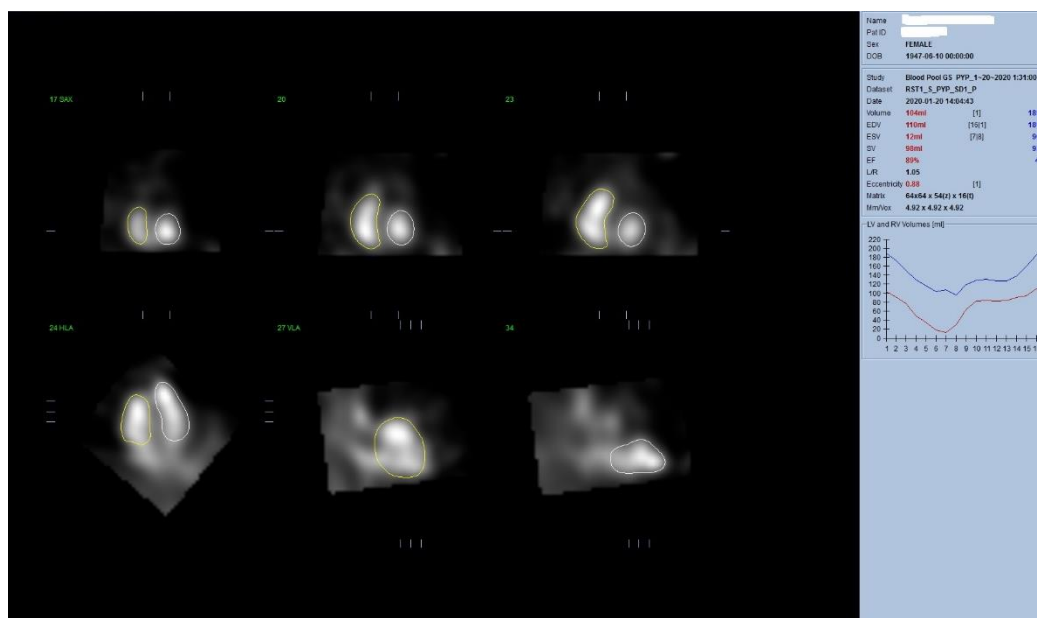
5.11 Kazuistika č. 11 – ventrikulografie

5.11.1 Indikace

Pacientka ve věku 73 let s namáhavou dušností, se známkami plicní hypertenze a se známkami restriktivního plnění LK byla indikována k ventrikulografii LK. U pacientky je známo srdeční selhání.

5.11.2 Průběh vyšetření

Pacientce byla per os podána 1 tableta Chlorigenu k blokování akumulace volného technecianu ve štítné žláze. Poté došlo k i. v. aplikaci cínatého pyrofosfátu a s odstupem 30 minut byl podán ^{99m}Tc -technecian o aktivitě 734 MBq k in vivo označení erytrocytů. Pomocí hradlovaného SPECT na kameře D-SPECT byl hodnocen blood pool srdečních dutin nejprve vleže a poté s elevací dolních končetin do úhlu 60° z důvodu kvalitnějšího zobrazení plnění pravé komory.



Obrázek 29 Parametrické obrazy hradlované ventrikulografie (fyziologický nález)

5.12 Kazuistika č. 12 – inervace

5.12.1 Indikace

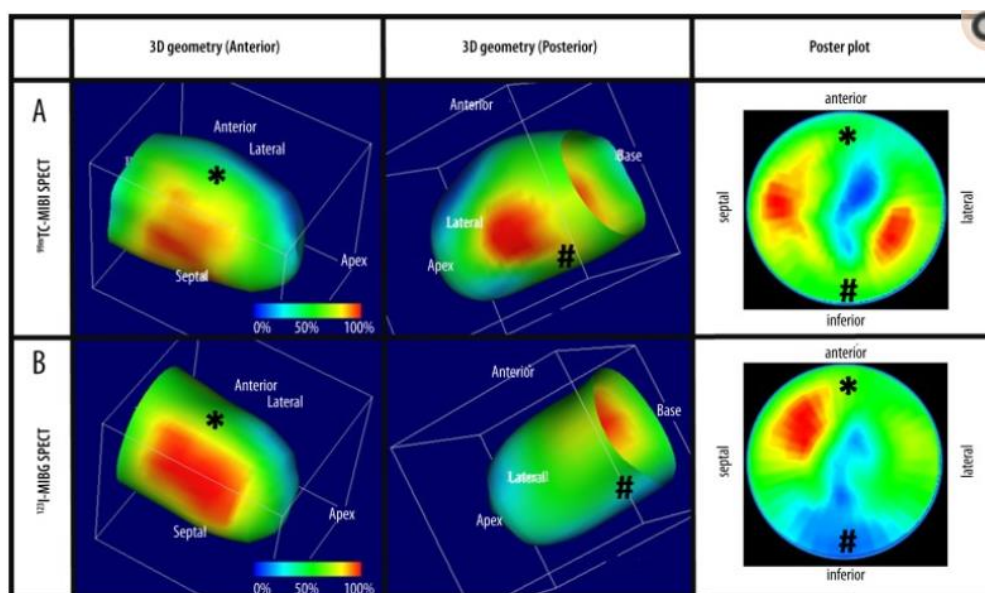
69letý pacient s recidivující komorovou tachykardií a po prodělaném infarktu myokardu byl přijat k vyšetření inervace a perfúze srdečního svalu [22].

5.12.2 Popis nálezu

Akvizice obou vyšetření byla provedena na běžné kameře SPECT.

Klidová perfúze myokardu s použitím ^{99m}Tc -MIBI zaznamenala jizvu myokardu odpovídající defektem perfúze, který je prezentován trojrozměrně i v polární mapě (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Pomocí koronarografie nebyla nalezena žádná významná koronární stenóza [22].

4 hodiny po i. v. aplikaci ^{123}I -MIBG byl zaznamenán rozsáhlý deficit sympatické inervace na spodní straně srdečního svalu, jenž není patrný na snímku klidové perfúzní scintigrafie (Obrázek 30) [22].



Obrázek 30 Porovnání scintigrafie myokardu pomocí ^{99m}Tc -MIBI (řádek A) a ^{123}I -MIBG (řádek B) v trojrozměrném zobrazení a v polárních mapách, upraveno z [22]

6 DISKUZE

Nukleární medicína v diagnostice kardiovaskulárních onemocnění zaznamenala v posledních několika desetiletích překotný rozvoj.

Zobrazovací technika se neustále vyvíjí s cílem zvyšovat účinnost kamer. Zpočátku se vyšetření myokardu provádělo planární scintigrafií pomocí standardní gamakamery. Později došlo k zavedení jednofotonové emisní počítačové tomografie (SPECT), díky níž docházelo k lepšímu hodnocení výsledků z důvodu kvalitnějšího zobrazení. Nyní se pro zobrazení srdečního svalu používá hradlovaná SPECT (G-SPECT). G-SPECT je vhodná pro přesné posouzení viability srdečního svalu, podává nám informaci o perfúzi a metabolismu myokardu. Dále určuje ejekční frakci, posuzuje motilitu stěn a jejich ztlušťování při systole. Předností hradlované SPECT je fakt, že nevyžaduje žádné dodatečné náklady ve srovnání se SPECT. Z tohoto důvodu se doporučuje všechna vyšetření myokardu provádět pomocí G-SPECT. Dalším průlomem bylo zavedení jednoúčelových kamer pouze pro scintigrafii myokardu, např. D-SPECT. Kromě zlepšení kvality obrazů, je možné těmito dedikovanými kamerami snížit radiační zátěž pacienta i personálu až na polovinu. Vyšetření pomocí D-SPECT se provádí z důvodu vzniku častých atenuačních artefaktů ve dvou polohách – vleže a vsedě. Při hodnocení snímků se v pozici vsedě často zobrazují defekty imitující poruchu perfúze, které vznikají zeslabením záření ve tkáních u obézních pacientů či z důvodu větších ňader. Proto je vhodné při interpretaci nálezu klást větší důraz na snímky vzniklé v pozici vleže.

Praktická část bakalářské práce je z důvodu lepší přehlednosti rozdělena podle jednotlivých dostupných metod nukleární kardiologie. Základní a nejvíce používanou metodou v diagnostice ICHS je radionuklidové vyšetření perfúze

myokardu pomocí ^{99m}Tc -značených radiofarmak, které mají výhodnější fyzikální vlastnosti na rozdíl od thallia, jehož sloučenina ve formě radiofarmaka byla používána v nukleární kardiologii dříve. Předností ^{99m}Tc -značených radiofarmak je vyšší energie záření a možnost aplikace vyšší aktivity, což umožňuje vznik kvalitnějších obrazů s minimem artefaktů oproti obrazům vzniklých po aplikaci $^{201}\text{TlCl}$. Pro posouzení funkční rezervy srdečního svalu se upřednostňuje ergometrická fyzická zátěž na rozdíl od farmakologické. Po farmakologické zátěži se radiofarmakum více akumuluje v okolních orgánech v blízkosti srdce a dochází tak k nežádoucím artefaktům na scintigrafických obrazech. Z tohoto důvodu se doporučuje požití po zátěži tučnou stravu, která urychluje peristaltiku a dochází tak ke vzniku lépe hodnotitelných snímků s minimem artefaktů. Na některých pracovištích nukleární medicíny se pacientovi podává pohárek vody vždy po farmakologické i fyzické zátěži k urychlení peristaltiky. Farmakologická zátěž se považuje za adekvátní a aplikuje se u pacientů, kteří nejsou schopni dosáhnout požadovaných hodnot při fyzické zátěži. Zátěžové testy s použitím farmak jsou účinné, avšak se po jejich aplikaci mohou vyskytnout závažné nežádoucí účinky.

Na radioizotopovém pracovišti IKEM se používá vazodilatační látka Rapiscan (Regadenoson 400 $\mu\text{g}/5\text{ml}$). Rapiscan má méně nežádoucích účinků, jelikož účinkuje především na receptory v koronárním řečišti. Po jeho aplikaci je důležité, aby pacient seděl či ležel, dokud nedojde ke stabilizaci tepové frekvence a krevního tlaku. Nedoporučuje se tento preparát kombinovat s fyzickou zátěží, jelikož může vyvolat závažné vedlejší reakce (hypotenzi, hypertenzi, synkopu). Nejčastějšími vedlejšími efekty jsou bolesti na hrudi, zrudnutí, bolest hlavy, GIT obtíže, závratě, stavy hypotenze.

Veškeré literatury uvádí, že radiofarmakum se aplikuje ihned při překročení 85% tepové frekvence. Z praktického hlediska je vhodné pokračovat

v ergometrické zátěži i při překročení 85% tepové frekvence, pokud to fyzický stav pacienta dovolí. Hlavním důvodem je fakt, že čím jsou hodnoty tepové frekvence vyšší, tím lépe je vyšetření hodnotitelné.

V literatuře je dále uvedeno, že pokud je na scintigramech po zátěžové studii zhodnocen fyziologický nález, není potřeba provádět klidové vyšetření. Avšak některá pracoviště nukleární medicíny vždy provádí klidovou studii i po negativním výsledku fyzické zátěže. Důvodem může být zaznamenání defektu pouze při klidovém vyšetření, což představuje reverzní redistribuci. Reverzní redistribuce je nejčastěji zaznamenána u pacientů po prodělaném infarktu myokardu, kterým byla brzy zprůchodněna postižená céva a oblast defektu má tedy viabilní charakter.

Aby došlo ke správnému efektu vyšetření, kardiolog vysadí pacientovi na 48 hodin beta-blokátory, které korigují hypertenzi. Vysoký TK je nejzávažnějším rizikovým faktorem ke vzniku ischemické či hemoragické cévní mozkové příhody. Je-li krevní tlak pacienta před fyzickou zátěží vysoký, provede se nejprve klidové vyšetření a s odstupem 24 hodin se provede zátěžové vyšetření, kdy pacient předem požil beta-blokátory dle své anamnézy. Interpretace a efekt vyšetření s užitím beta-blokátorů nebude sice ideální, ale minimalizuje se tak riziko vzniku mozkové příhody pacienta, které by mohlo nastat při zvyšování krevního tlaku ergometrickou zátěží bez užití medikace na snížení krevního tlaku.

SPECT vyšetření perfúze myokardu hraje významnou roli v diagnostice ischemické choroby srdeční. Scintigrafické vyšetření nám přináší informace o rozsahu, lokalizaci a závažnosti ischemie. Při scintigrafickém vyšetření nemusí být patrné zúžení kmene, z kterého vystupuje RIA a r. circumflexus. Z tohoto důvodu je důležitá spolupráce scintigrafie a koronarografie

k následnému určení správné terapie. Koronarografie na rozdíl od scintigrafického vyšetření poskytuje informace o tom, která céva či její větev je zúžena a na kolik procent.

Velkým pozitivem vyšetření perfúze myokardu je hodnocení rizika vzniku náhlé srdeční příhody a tím pádem posouzení, zda je vhodné provést revaskularizační výkon. U pacientů, kteří mají fyziologický nález nebo stabilní fixní defekt, je velmi nízké riziko vzniku náhlé srdeční příhody v následujících 3 letech. Další skupinou jsou pacienti, jimž byla prokázána zátěžová reverzibilní ischémie. Čím je nález rozsáhlejší, tím je riziko vzniku akutní koronární příhody vyšší. Díky SPECT perfúzi myokardu lze zobrazit všechny numerické (SSS, SRS, SDS) i volumové (EF, EDV, ESV) hodnoty srdečního svalu.

Scintigrafické vyšetření myokardiální perfúze hraje klíčovou roli v diagnostice ICHS u diabetických pacientů, kteří mají vyšší riziko vzniku kardiovaskulárních příhod způsobené aterosklerotickými změnami na koronárních cévách. V posledních letech mortalita na kardiovaskulární onemocnění výrazně klesá, u diabetických pacientů se však mortalita zvyšuje. Jelikož se u diabetiků často objevuje němá ischémie, doporučuje se provádět scintigrafické vyšetření i u asymptomatických pacientů v rámci preventivní kontroly každé 2 roky. Z důvodu obezity pacienta či periferní neuropatie se často provádí farmakologická zátěž, jelikož diabetičtí pacienti nejsou schopni dosáhnout požadovaných hodnot při fyzické zátěži.

Další často používanou metodou v České republice je vyšetření metabolismu myokardu ke zhodnocení jeho viability. K této metodě jsou nejčastěji indikováni pacienti po prodělaném infarktu myokardu. Průkaz viability srdečního svalu se zejména provádí pomocí perfúzního SPECT vyšetření s použitím ^{99m}Tc-značených radiofarmak. Na pracovišti nukleární medicíny IKEM se

využívá metoda ke zhodnocení viability pomocí izoketu, který uvolňuje hladkou svalovinu cévní stěny a využívá se v nemocnicích ke kontrole oběhových funkcí. Pokud je pacient neschopen fyzické zátěže, zvolí se jednodenní protokol. Za 1 hodinu po i. v. aplikaci radiofarmaka dojde k akvizici pomocí SPECT kamery. Následuje 3 hodiny pauza. Poté se pacientovi změří TK a dojde ke 2 vstříkům izoketu pod jazyk. Za 2-3 minuty po podání izoketu se aplikuje radiofarmakum o aktivitě 2x větší než při prvním snímání. Za hodinu po aplikaci radiofarmaka dochází ke snímání. Pokud je pacient schopen fyzické zátěže, tak se první den provede ergometrická zátěž a druhý den dochází ke klidovému vyšetření s aplikací izoketu. PET vyšetření pomocí ^{18}F -FDG je citlivější ke zhodnocení metabolismu myokardu, ale v ČR se z důvodu náročnosti vyšetření používá velmi omezeně. Dalším důvodem minimálního použití ^{18}F -FDG pro průkaz viability myokardu je nedostupnost hradlovaného PET v ČR. V současnosti nukleární medicína úzce spolupracuje s radiodiagnostikou, jelikož magnetická rezonance disponuje vysokou rozlišovací schopností a s použitím kontrastní látky dokáže posoudit viabilitu srdečního svalu.

Dalšími používanými metodami v nukleární kardiologii jsou hradlovaná ventrikulografie a prvoprůtoková angiokardiografie. Ventrikulografie udává funkční parametry levé komory a posuzuje její systolickou i diastolickou funkci pomocí označených autologních erytrocytů. Naopak angiokardiografie po aplikaci $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -značených radiofarmak do cévy v blízkosti srdce posuzuje funkci pravé komory myokardu. Obě tyto metody jsou v dnešní době využívány minimálně, jelikož lze tato vyšetření nahradit vyšetřením ultrasonografickým.

Dle informací v literatuře při hradlované ventrikulografii nelze hodnotit funkční parametry pravé komory, neboť dochází k její překrývání s pravou síní. Z praktického hlediska to však je proveditelné. Dochází ke snímání oblasti srdečního svalu ve dvou polohách. Data jsou nejprve snímána v pozici vleže,

kdy detektor kamery je cílen na oblast srdce a skloněn do levé přední šikmé polohy. Rovina mezikomorového septa by měla být kolmá na rovinu detektoru. Poté se vypořádá pacientovi dolní končetiny do úhlu 60°. Dojde tak k lepšímu zobrazení obou komor srdečních a může tak být hodnocen jejich krevní průtok.

Poslední metodou je vyšetření inervace myokardu. Tato metoda je však v ČR využívána velmi omezeně, neboť je stále ve fázi výzkumu. V českém zdravotnictví lze k tomuto vyšetření použít pouze radiofarmakum ¹²³I-MIBG, jelikož pozitronová radiofarmaka k vyšetření inervace srdečního svalu nejsou v ČR zatím dostupná. Lze však říci, že toto vyšetření by mělo hrát klíčovou roli u diabetických pacientů, jejichž zdravotní stav bývá doprovázen neuropatií postihující i autoimunitní nervový systém, a tím pádem je u nich větší riziko náhlé srdeční smrti. Srdeční selhání a poškození inervace myokardu je rizikové i u onkologických pacientů, neboť může dojít ke kardiotoxicitě v důsledku léčby cytostatiky. Lze tedy říci, že radiofarmakum sympatické inervace myokardu může odhalit toto riziko již na začátku onkologické léčby. Dále může být toto vyšetření cenné u pacientů užívající beta-blokátory k posouzení efektu léčby.

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření souhrnu jednotlivých metod nukleární medicíny pro vyšetření srdečního svalu. Na základě teoretické a praktické části byl vytvořen přehled všech dostupných metod nukleární kardiologie včetně používaných radiofarmak, indikací, popisu principu a průběhu vyšetření jednotlivých metod.

První kapitola teoretické části stručně shrnuje informace o historii nukleární kardiologie. Dále je popsán princip zobrazení v nukleární medicíně pomocí radionuklidových zářičů ve formě radiofarmak.

Součástí bakalářské práce je přehled vývoje zobrazovacích systémů používaných při akvizici snímků myokardu. V této kapitole je popsán princip scintilační kamery, jednofotonové emisní počítačové tomografie a pozitronové emisní tomografie. Součástí této kapitoly je také popis principu, výhod a nevýhod dedikované kamery D-SPECT.

Nukleární kardiologie se stále vyvíjí perspektivním směrem. Zkoumají se nová radiofarmaka pro zobrazení srdečního svalu, která by lépe odpovídala optimálním vlastnostem. Stále dochází k vylepšování zobrazovací techniky a účinnosti kamer. Díky nimž dochází nejen ke zlepšení kvality obrazu, ale i k snížení doby vyšetření a radiační zátěže pacienta i personálu, což jednoznačně přispívá ke zdokonalení a neocenitelnému vývoji nukleární medicíny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3D – trojrozměrný obraz

CT – výpočetní tomografie

CZT detektory – detektory z kadmia, telluru a zinku

D-SPECT – dynamická kamera jedno-fotonové emisní výpočetní tomografie

EDV – end-diastolický objem

EF – ejekční frakce

EKG – elektrokardiografie

ESV – end-systolický objem

FDG – fluorodeoxyglukóza

FN – fakultní nemocnice

G-SPECT – hradlovaná jedno-fotonová emisní výpočetní tomografie

ICHS – ischemická choroba srdeční

IKEM – Institut klinické a experimentální medicíny

i.v. – intravenózní podání

LK – levá komora

MIBI – methoxyisobutylisonitril

MTF – maximální tepová frekvence

Na/K – ATP pumpa – sodíko-draselná adenosin-trifosfátová pumpa

PET – pozitronová emisní tomografie

PK – pravá komora

RIA – ramus interventricularis anterior

SDS – sumační rozdílové skóre

SPECT – jedno-fotonová emisní výpočetní tomografie

SRS – sumační klidové skóre

SSS – sumační zátěžové skóre

TF – tepová frekvence

TID – tranzitorní ischemická dilatace

TK – krevní tlak

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LANG, Otto, Milan KAMÍNEK a Helena TROJANOVÁ. *Nukleární kardiologie*. Praha: Galén, c2008. Klinická kardiologie. ISBN 978-80-7262-481-2.
- [2] KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína*. 6. vydání (2. vydání v Nakladatelství P3K). V Praze: P3K, 2015. ISBN 978-80-87343-54-8.
- [3] ADÁMKOVÁ, Věra. *Hodnocení vybraných metod v kardiologii a angiologii pro praxi*. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5763-6.
- [4] PREKEGES, Jennifer. *Nuclear Medicine Instrumentation*. Burlington: Jones Bartlett Learning, 2013. ISBN 978-1-4496-5288-3
- [5] VLČEK, Petr. *Praktická cvičení z nukleární medicíny*. Praha: Karolinum, 2010. ISBN 978-80-246-1819-7.
- [6] HYAFIL, F., GIMELI, A., SLART, RHJA et al. *EANM procedural guidelines for myocardial perfusion scintigraphy using cardiac-centered gamma cameras*. *European J Hybrid Imaging* **3**, 11 (2019) doi:10.1186/s41824-019-0058-2
- [7] TERŠ, Jiří. *PRVNÍ ZKUŠENOSTI S KAMEROU VYBAVENOU (CdZnTe) POLOVODIČOVÝMI DETEKTORY* [online]. In: . [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: http://www.csfm.cz/userfiles/file/Udalosti_2015/zverejnene/Ter%C5%A1.pdf
- [8] D-SPECT™ Cardiac Scanner. *Medgadget* [online]. 7.12.2015 [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: https://www.medgadget.com/2005/12/dspect_cardiac.html
- [9] URBÁNEK, Jan a kolektiv autorů. *Nukleární medicína*. Jilemnice: Gentiana, 2002. ISBN 80-86527-05-0
- [10] Improvements in PET/CT Systems. *Imaging technology news* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.itnonline.com/article/improvements-petct-systems>
- [11] *Vesmír* [online]. 1871-, **2010**(12) [cit. 2019-12-07]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2010/cislo-12/pet-ct-hybridni-zobrazovaci-metoda.html>
- [12] KORANDA, Pavel. *Nukleární medicína*. 2. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4031-6.

- [13] EANM/ESC procedural guidelines for myocardial perfusion imaging in nuclear cardiology. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging* [online]. 2005, **2005**(7) [cit. 2019-12-11]. DOI: 10.1007/s00259-005-1779-y. Dostupné z: https://eanm.org/publications/guidelines/gl_cardio_myocard_perf.pdf
- [14] Ammonia. *National Center for Biotechnology Information* [online]. NCBI, 2005 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK23075/>
- [15] KOWALSKY Richard J., Steven W. FALEN. Radiopharmaceuticals in Nuclear Pharmacy and Nuclear Medicine. Third edition. Washington, DC 20037-2985: American Pharmacist Association, 2011. ISBN 978-1-58212-118-5.
- [16] Calculation of left ventricular volumes and ejection fraction from dynamic cardiac-gated 15O-water PET/CT: 5D-PET. *National Center for Biotechnology Information* [online]. NCBI, 2017 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5686036/>
- [17] VOTRUBOVÁ, Jana. *Klinické PET a PET/CT*. Praha: Galén, 2009. ISBN 978-80-7262-619-9.
- [18] CHALOUPKA, Václav a Lubomír ELBL. *Zátěžové metody v kardiologii*. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0327-0.
- [19] LUBOMÍR, Houdek, ed. *Nukleární medicína: Průřez vyšetřovacími metodami v oboru nukleární medicína*. Praha: Galén, 2008. ISBN 978-80-7262-533-8.
- [20] *Spectrum Dynamics Medical* [online]. [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://www.spectrum-dynamics.com/>
- [21] 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.
- [22] JUNGEN, Christiane, Gwendolyn VON GOGH, Christiane SCHMITT, et al. Mismatch Between Cardiac Perfusion, Sympathetic Innervation, and Left Ventricular Electroanatomical Map in a Patient with Recurrent Ventricular Tachycardia. *American Journal of Case Reports* [online]. 2016, **17**, 280-282 [cit. 2020-03-11]. DOI: 10.12659/AJCR.897412. ISSN 1941-5923. Dostupné z: <http://www.amjcaserep.com/abstract/index/idArt/897412>

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Molekula radiofarmaka, upraveno z [2].....	15
Obrázek 2 Jednodetektorová scintilační gamakamera při kardiologickém vyšetření [1].....	16
Obrázek 3 Schéma fotonásobiče, upraveno z [5]	17
Obrázek 4 Schéma detekce fotonového záření při vyšetření, upraveno z [2] .	18
Obrázek 5 D-SPECT [4]	19
Obrázek 6 Porovnání D-SPECT a běžné gamakamery [8]	21
Obrázek 7 Hybridní systém PET/CT, upraveno z [10]	22
Obrázek 8 Schéma interakce pozitronu s elektronem za vzniku dvou fotonů [11].....	23
Obrázek 9 Grafické znázornění časových změn koncentrace ^{201}Tl při zátěžové perfúzní scintigrafii myokardu [1]	24
Obrázek 10 Princip zátěžového vyšetření [1].....	32
Obrázek 11 Ergometr ve Všeobecné fakultní nemocnici	36
Obrázek 12 Různé varianty vyšetřovacích protokolů pro zátěžové zobrazování perfúze myokardu pomocí $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -značených radiofarmak [12] ...	38
Obrázek 13 Schéma hradlované perfúzní tomografie myokardu [2].....	40
Obrázek 14 Poloha pacienta při vyšetření D-SPECT [20]	41
Obrázek 15 Kvantifikace distribuce radiofarmaka v LK při zobrazení v polárních mapách (vlevo) a 3D (vpravo) [3].....	43
Obrázek 16 Princip rekonstrukce polární mapy z řezů podél krátké osy [2] .	43
Obrázek 17 Fyziologický nález perfúze myokardu levé komory	54
Obrázek 18 Scintigrafie perfúze myokardu při klidové a zátěžové studii, na snímku jsou patrná drobná ložiska snížené četnosti v oblasti r. circumflexus levé koronární tepny	56

Obrázek 19 Porovnání klidové a zátěžové studie perfúzní scintigrafie myokardu, na snímcích je patrné ložisko v bazální části septa, které v klidu mizí	57
Obrázek 20 Porovnání zátěžové (polární mapa nahoře) a klidové (polární mapa uprostřed) studie vleže, na obou snímcích je zobrazeno ložisko na přední stěně LK, při klidové studii je na boční stěně zaznamenám artefakt	59
Obrázek 21 Porovnání zátěžové a klidové studie vsedě, na snímku zátěžové studie je patrné ložisko na přední stěně, které v klidu mizí	59
Obrázek 22 Porovnání zátěžové a klidové studie perfúze myokardu, při zátěži je zobrazeno velké ložisko hypoperfúze, které v klidu mizí	61
Obrázek 23 Zátěžová a klidová studie perfúze myokardu, po zátěžovém vyšetření je zaznamenám velký reverzibilní defekt v oblasti apexu s přesahem na septum a spodní stěnu	63
Obrázek 24 Koronarografie, kmen bez stenózy, ve střední části RIA je patrná 90% stenóza	63
Obrázek 25 Scintigrafické hodnocení LK srdeční po zátěži vleže (nahore) a vsedě (uprostřed). Na polárních mapách a 3D zobrazení LK je patrná rozsáhlá hypoperfúze spodní a laterální stěny.	65
Obrázek 26 Porovnání zátěžové a klidové studie v polárních mapách a 3D modelu LK srdeční. Je znázorněn rozsáhlý perfúzní fixní defekt.	66
Obrázek 27 Na polární mapě a 3D modelu LK je po zátěžové studii patrný drobný perfúzní reverzibilní defekt	68
Obrázek 28 Scintigraficky zhodnotitelná viabilita srdečního svalu	69
Obrázek 29 Parametrické obrazy hradlované ventrikulografie (fyziologický nález)	70
Obrázek 30 Porovnání scintigrafie myokardu pomocí ^{99m}Tc -MIBI (řádek A) a ^{123}I -MIBG (řádek B) v trojrozměrném zobrazení a v polárních mapách, upraveno z [22]	71

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Porovnání citlivosti D-SPECT a běžné gamakamery, upraveno z [7]	21
Tabulka 2 Viabilita myokardu u různých typů ischemického postižení, upraveno z [2].....	49