

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH VĚD

Ústav radiologických metod

Simona Konečná

Nukleární neurologie

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Bc. Petr Vybíral, DiS.

Olomouc 2021

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jen uvedené bibliografické a elektronické zdroje.

V Olomouci 14.3.2022

Podpis

Děkuji Ing. Bc. Petrovi Vybíralovi, DiS za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při odborném vedení mé bakalářské práce.

ANOTACE

Typ závěrečné práce: Bakalářská práce

Téma práce: Nukleární neurologie

Název práce: Nukleární neurologie

Název práce v AJ: Nuclear neurology

Datum zadání: 2021-09-30

Datum odevzdání:

Vysoká škola, fakulta, ústav: Univerzita Palackého v Olomouci

Fakulta zdravotnických věd

Ústav radiologických metod

Autor práce: Simona Konečná

Vedoucí práce: Ing. Bc. Petr Vybíral, DiS.

Oponent práce: Ing. Bc. Jiří Horalík, DiS.

Abstrakt v ČJ: Tato bakalářská práce shrnuje poznatky o principech nukleární medicíny a věnuje se jednotlivým vyšetřením centrální nervové soustavy, které lze provést za využití zobrazovacích metod nukleární medicíny. Popisuje indikace, přípravu pacienta, provedení, radiační zátěž a hodnocení těchto vyšetření. Při psaní této bakalářské práce byla využita odborná literatura a články získané na základě rešeršní činnosti z databází Google Scholar, Medvik, PubMed a věstníku MZČR.

Abstrakt v AJ: This bachelor thesis summarizes the basic principles of nuclear medicine. It deals with individual examinations of the central nervous system by using imaging methods of nuclear medicine. It also describes indications, patient preparation, radiation exposure, treatment and data acquisition of these examinations. When writing this bachelor thesis, professional literature and articles from databases Googl Scholar, Medvik, PubMed and journal MZČR were used.

Klíčová slova v ČJ: mozek, neurologie, neurozobrazovací metody, PET, PET/CT, SPECT, MR

Klíčová slova v AJ: brain, neurology, neuroimaging methods, PET, PET/CT, SPECT, SPECT/CT, MRI

Rozsah: 49/4

Obsah

Úvod	8
1 Popis rešeršní činnosti	10
2 Nukleární medicína	11
2.1 Radionuklidy	12
2.2 Radiofarmaka	13
2.3 Zobrazovací metody	14
3 Neurologie v nukleární medicíně.....	19
4 Jednotlivá vyšetření CNS	22
4.1 Perfuzní scintigrafie mozku	22
4.2 Zobrazení dopaminových transportérů.....	26
4.3 Scintigrafie cerebrospinálních likvorových cest – cisternografie	28
4.4 PET mozku ¹⁸ F-FDG	30
4.5 PET mozku ¹⁸ F-FLT	34
Závěr	37
Referenční seznam	39
Seznam zkratk.....	43
Seznam příloh	45
Obrazová příloha.....	46

Úvod

Neuroradiologie prodělala v oblasti zobrazovacích metod v posledních letech velké změny. Moderní funkční neurozobrazování zcela jistě znamená významný přínos v rámci diagnostik různých neurologických onemocnění.

Velice významným trendem v oblasti funkčního neurozobrazování posledních let se však zdá být tzv. multimodální přístup, což v praxi znamená integraci výsledků dvou či více vyšetření, ke kterým bez pochyb metody nukleární medicíny patří. Multimodální přístup zpřesňuje anatomickou lokalizaci funkčních abnormalit a napomáhá k posouzení lokalizační spolehlivosti získaných informací.

Metody nukleární medicíny nám nabízejí diagnostikovat nejrůznější choroby týkající se centrální nervové soustavy. Daleko častěji je v dnešní době potřebná přesná diagnostika neurodegenerativních onemocnění, která patří mezi zdravotně a sociálně-ekonomicky nejzávažnější nemoci. Nejčastějšími neurodegenerativními onemocněními jsou Alzheimerova a Parkinsonova choroba. Vedle neurodegenerativních onemocnění existují i onemocnění jako tranzitorní ischemická mozková ataka, parciální fokální epilepsie či nádory mozku, které mohou být za použití zobrazovacích metod nukleární medicíny odhaleny. Časná diagnostika výše zmíněných onemocnění vede k zahájení správné léčby v co nejkratším čase, což může zlepšit jak kvalitu života pacienta, tak i jeho rodiny.

Cílem této bakalářské práce bylo dohledat a sumarizovat informace o základních principech nukleární medicíny, zobrazovacích metodách a jednotlivých vyšetřeních cévní nervové soustavy v nukleární medicíně.

Dílicí cíle bakalářské práce:

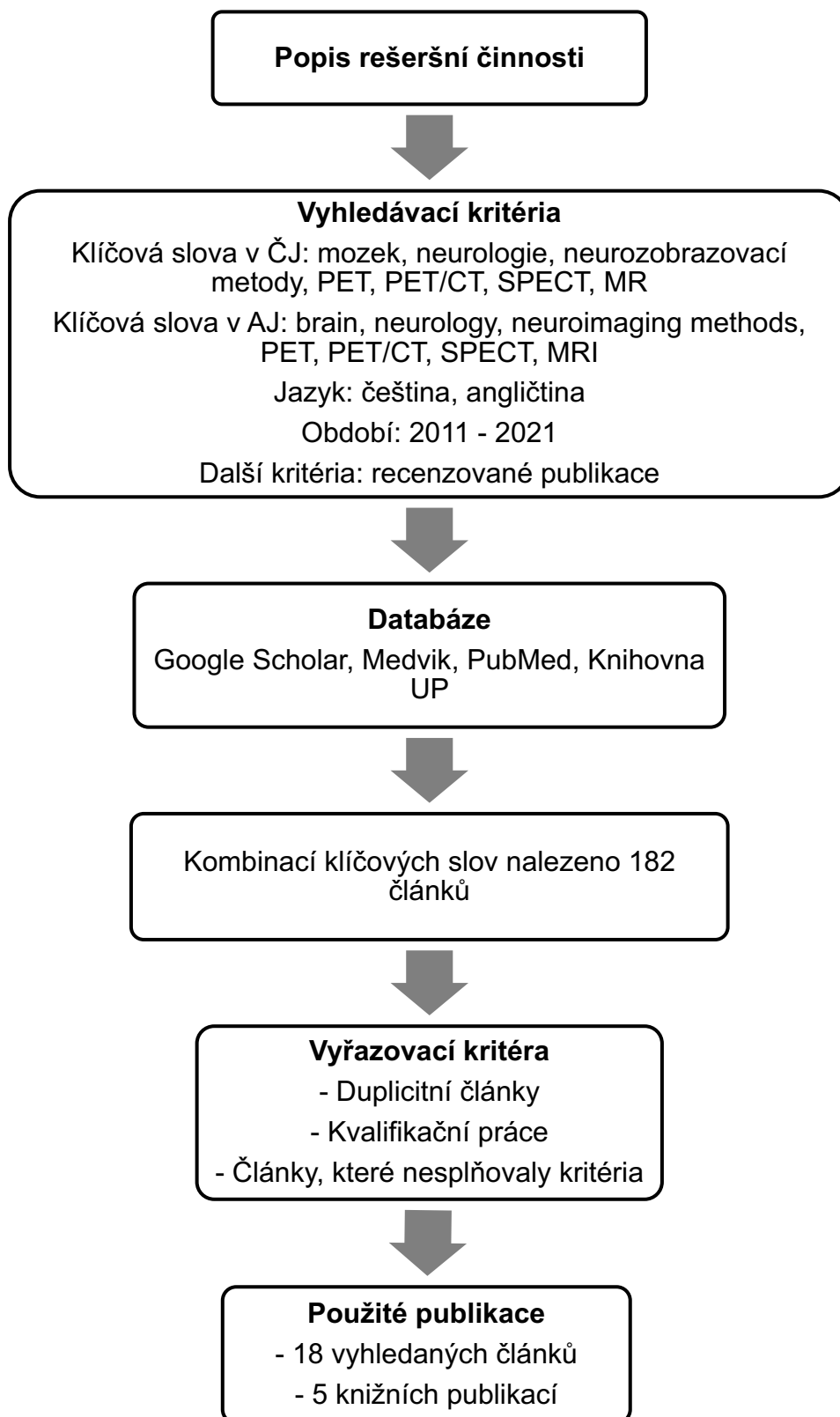
1. Představit základní principy nukleární medicíny.
2. Vytvořit přehled o zobrazovacích metodách nukleární medicíny.
3. Předložit dohledané informace o jednotlivých vyšetřeních nukleární medicíny se zaměřením na neurologii.

Vstupní literaturou pro tuto bakalářskou práci byly následující tituly:

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*. 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*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0168-9
4. SEIDL, Zdeněk. *Radiologie pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4108-6.

1 Popis rešeršní činnosti

V následující části je popsána rešeršní činnost, podle které došlo k dohledávání zdrojů této bakalářské práce.



2 Nukleární medicína

Nukleární medicína se zabývá diagnostikou a léčbou pomocí otevřených radioaktivních zářičů (Kupka, 2015, s. 13). Úzce spolupracuje s dalšími lékařskými obory, mezi které patří zejména onkologie, kardiologie, urologie, endokrinologie a ortopedie.

Její metody dělíme na dvě skupiny, in vivo a in vitro. Tyto metody se liší způsobem použití radioaktivní látky. V případě metody in vivo je vyšetřovací látka aplikována do těla pacienta, nejčastěji intravenózní injekcí. Po aplikaci radionuklidu dochází k emitaci fotonů záření, které jsou detekovány vnějšími detektory. Díky této metodě dokážeme rozlišit patofyziologické procesy od procesů fyziologických a spolehlivě určit polohu patologického ložiska v těle pacienta. Při vyšetření metodou in vitro pacient nepřichází do styku s radioaktivní látkou a analýza je prováděna na vzorcích tělní tekutiny. V rámci analýzy se zjišťuje koncentrace radioaktivní látky v odebraných vzorcích (Koranda, 2017, s. 7).

Vyšetření nukleární medicíny jsou neinvazivní, ve většině případů s velmi nízkou pravděpodobností alergické reakce a ve své podstatě u nich není doposud známá absolutní kontraindikace. Radiační zátěž je ve většině případů srovnatelná, mnohdy i nižší než u radiodiagnostických metod. Obecně mají zobrazovací metody nukleární medicíny široké využití. Využívají se k detekci patologických ložisek v rámci celotělových vyšetření (kostní přestavba, záněty, nádory a jejich metastázy), k zobrazení regionálních poruch perfuze (mozku, myokardu, plic), k diagnostice poruch funkce orgánů (ledvin, myokardu) nebo k prokázání poruch toku, drenáže a motility (jícen, dutý systém ledvin, lymfatické uzliny) (Seidl, 2012, s. 339).

Zobrazovací metody se na pracovištích nukleární medicíny provádějí na běžných scintilačních kamerách za použití radionuklidů emitujících gama záření nebo pomocí PET scanu, který k diagnostice využívá pozitronové zářiče a speciální přístrojovou techniku (Seidl, 2012, s. 339). Tyto přístroje vynikají schopností zobrazit funkci jednotlivých orgánů, ale mají malou schopnost zachytit anatomické detaily. Řešením těchto nedostatků jsou hybridní přístroje, které vznikly spojením radiodiagnostických metod a tomografických zobrazení nukleární medicíny (Koranda, 2017, s. 7). Hybridní systémy spojují výhody různých modalit a tvoří nedílnou součást zobrazovací diagnostiky (Seidl, 2012, s. 339).

2.1 Radionuklidy

Jedná se o nestabilní izotopy se stejným počtem protonů a různým počtem neutronů (Kupka, 2015, s. 17). Počet doposud známých radionuklidů se pohybuje okolo 2000 izotopů 104 chemických prvků. Radionuklidy dále dělíme na přirozené a umělé, přičemž nukleární medicína využívá pouze ty uměle vytvořené (Koranda, 2017, s. 8). Primárně jsou radionuklidy připravovány v jaderném reaktoru nebo cyklotronu. Sekundárním zdrojem těchto radionuklidů je radionuklidový generátor, ve kterém díky radionuklidové přeměně vzniká z mateřského prvku prvek dceřiný. Smyslem této přeměny je získání vhodných vlastností radionuklidu s následným využitím těchto charakteristik v nukleární medicíně (Koranda, 2017, s. 17).

Základními charakteristikami všech radionuklidů jsou poločas rozpadu, druh a energie emitovaného záření. Z důvodu nestability jader radionuklidů dochází k jejich samovolnému přeměňování, díky kterému současně vzniká ionizující záření (Kupka, 2015, s. 19). Existují tři typy radioaktivních přeměn: přeměna alfa, přeměna beta a přeměna gama.

Při přeměně α je z mateřského jádra emitována částice alfa (jádro helia), která je složena ze 2 protonů a 2 neutronů (dvojitý elektrický náboj) a disponuje schopností silně ionizovat okolní prostředí. Díky této vlastnosti můžeme využívat tyto částice pro terapii maligních nádorů.

U přeměny β se rozlišují přeměny β^- a β^+ . Přeměna β^- je typ radioaktivní přeměny, při které dochází k emisi elektronů. Po přeměně neutronu na proton následuje jev zvaný elektronový záchyt. Elektrony přecházejí z vyšších do nižších slupek obalu za vyzáření rozdílu vazebné energie. Jinými slovy zde vzniká charakteristické rentgenové záření, které se v nukleární medicíně využívá u scintigrafií a vyšetření in vitro při použití ^{201}Tl a ^{125}I . Tyto zářiče jsou často využívány při terapii nádorových a jiných onemocnění. Z pohledu radiační ochrany je výhodnější používat čisté β^- zářiče bez přimísené emise fotonů γ . Fotony γ zvyšují radiační zátěž pacienta, ale například při scintigrafii nám pomáhají kvalitněji zobrazit tkáň v průběhu terapie. Přeměna β^+ je doprovázena emisí kladně nabitých pozitronů. Při interakci pozitronu s elektronem jiného atomu dojde k anihilaci a vznikají dva anihilační fotony o energii 511 keV, které letí z místa anihilace

opačným směrem (Koranda, 2017, s. 8-10). Tato přeměna β^+ je typická pro radionuklidy ^{18}F a ^{15}O .

Přeměna γ . Emise záření γ velice často doprovází přeměny β . Tyto fotony jsou v nukleární medicíně využívány u všech vyšetření in vivo a ve velké většině vyšetření in vitro (Koranda, 2017, s. 8-10). Při přeměně γ nedochází ke změně počtu protonů ani neutronů. Dceřiné jádro je schopno v excitovaném stavu emitace záření γ o různých, ale přesně vymezených energiích (Kupka, 2015, s. 18).

Vedle druhů záření popisuje charakteristiku radionuklidu i poločas rozpadu. Ten odpovídá době, během které dojde k rozpadu poloviny jader a aktivita daného radionuklidu klesne na polovinu. Žádné fyzikální ani chemické faktory nedokážou průběh tohoto děje narušit. Poločas rozpadu se u jednotlivých radionuklidů různí. V nukleární medicíně se využívají radionuklidy, jejichž poločas přeměny se pohybuje v řádech sekund až dní (Kupka, 2015, s. 19).

2.2 Radiofarmaka

Radiofarmaka jsou léčivé přípravky, jejichž součástí jsou chemické nebo biologické aktivní látky. Mimo jiné obsahují atomy radionuklidu, díky kterým jsou zdrojem ionizujícího záření (Koranda, 2017, s. 17). Během procesu výroby radiofarmak je radionuklid převeden do podoby požadované značené sloučeniny, a ta je následně upravována tak, aby odpovídala požadavkům lékové formy. V poslední řadě se hodnotí jakost vyrobených radiofarmak. V rámci kontroly se hodnotí aktivita, radionuklidová čistota, radiochemická čistota, sterilita a bezpyrogenost.

Podle způsobu aplikace dělíme radiofarmaka na tři základní skupiny. Parenterální neboli injekční, mezi které patří roztoky, koloidní disperze nebo suspenze. Druhou skupinou jsou perorální přípravky, ty se aplikují ve formě roztoků, koloidů, emulzí nebo tuhých látek (tobolek). A třetí skupinou jsou přípravky inhalační. Do této skupiny řadíme radioaktivní plyny a nebulizátorem vytvořené aerosoly (Koranda, 2017, s. 19). Mechanismy lokalizace radiofarmak dělíme na specifické a nespecifické distribuce. U suspenzí podaných nitrožilně se zachytávají jednotlivé radioaktivní částice v kapilárách menších, než je průměr daných částic (například v plicích). Radiofarmaka ve formě pravých roztoků využívají k transportu na dané místo různých mechanismů. Na základě koncentračního spádu prochází

radiofarmaka ředěná v plazmě membránami. Avšak nejčastěji používaným radiofarmakem pro metabolická zobrazování je ^{18}F -fluordeoxyglukosa (^{18}F FDG) (Kupka, 2007, s. 31-35).

Stále významněji se uplatňují receptorově specifická radiofarmaka, která jsou schopna průchodu hematoencefalickou bariérou a umožňují zobrazení mozku. Jedná se zejména o struktury s afinitou k mozkovým receptorům a transportérům pro využití v neurologicko-psychiatrické diagnostice a o značené látky pro zobrazení neuroendokrinních tumorů. Patří sem například ^{123}I -iodobenzamid a ^{123}I -ioflupan a ^{111}In -pentetreotid (Kupka, 2015, s. 31-35).

2.3 Zobrazovací metody

Zobrazovací metody patří k technikám, které zaznamenaly za posledních roky největší rozvoj a inovaci, a to nejen přínosem nových vyšetřovacích zobrazovacích principů, ale také nepřetržitým zdokonalováním metod již stávajících (Brázdil, 2014, s. 10). Z dostupných neinvazivních zobrazovacích technologií jsou PET a SPECT nejcitlivějšími technikami pro zobrazování in vivo. Prostorové rozlišení získané pomocí PET a SPECT je však relativně nízké, z toho důvodu došlo ke vzniku hybridních zobrazovacích metod, jako jsou PET/CT, PET/MRI a SPECT/CT. Hybridní metody umožňují získat anatomické i funkční informace v průběhu jednoho vyšetření (Pimlott, 2011, s. 150).

Planární scintigrafie

Výsledkem planární scintigrafie je, stejně jako u prostého rentgenového vyšetření, snímek sumačního charakteru. Planární scintigrafický snímek zobrazuje projekci trojrozměrného objektu do dvourozměrného prostoru. V rámci vyhotovení sumačních snímků (planárních projekcí) dochází k překryvu obrazů vyšetřované oblasti s obrazy vrstev tkání, které se nacházejí nad a pod vyšetřovanou oblastí (Kupka, 2007, s. 40). Samotné planární projekce jsou velice často velmi užitečné, avšak někdy je nutné navíc doplnit i tomografické zobrazení pro získání potřebné diagnostické informace. Rozlišujeme dva typy režimů, kterými se planární scintigrafie zaznamenává – režim statické a režim dynamické scintigrafie. Výsledkem statické scintigrafie je prostý dvourozměrný scintigram nebo série scintigramů zobrazující rozložení radiofarmaka v tkáni. Při statické scintigrafii je možnost provést celotělovou scintigrafii, během které se pacient posouvá mezi detektory scintilační kamery

a v počítačové aparatuře se zároveň vytváří obraz ve dvou projekcích. Statická i dynamická scintigrafie jsou hojně využívány v rámci vyšetření ledvin. Dynamická scintigrafie je série v čase na sebe navazujících scintigramů. Například u dynamické scintigrafie ledvin tento druh vyšetření zachycuje fáze průchodu radiofarmaka a poskytuje přehled o jeho následném vyloučení močovými cestami. Po důkladné analýze těchto informací je možné vyhodnotit procentuální poměr funkce ledvin (Koranda, 2017, s. 34-35).

Scintigrafické vyšetření se provádí za použití scintilační kamery (gamakamery), kterou tvoří detektor a počítač sloužící k vyhodnocování dat. Detektor gamakamery je složen ze scintilačního krystalu, kolimátoru a souboru fotonásobičů (Koranda, 2017, s. 27). Scintilační detektor má vysokou citlivost při detekci gama a je základem většiny detekčních přístrojů v nukleární medicíně při in vitro a in vivo vyšetřeních. Scintilační krystal obsahuje detekční látku, která díky své hustotě a protonovému číslu velmi intenzivně absorbuje gama záření. Jedná se o anorganické scintilátory, nejčastěji jodid sodný aktivovaný thalliem NaI(Tl) . V průběhu vyšetření probíhá na základě fotoefektu a Comptonova jevu k interakci fotonového záření a dochází zde k uvolnění elektronů, které způsobuje excitaci atomů a následný vznik scintilací (záblesků). Scintilační krystal má tvar obdélníku, rozměr okolo 50 cm a tloušťku 9,5 mm (Kupka, 2015, s. 36-37). Světlovodivou hmotou, která zabraňuje lomu světla a zjednodušuje přestup scintilací z krystalu na fotonásobiče, je na zadní stranu krystalu opticky přilepeno cca 60 fotonásobičů (Koranda, 2017, s. 27). Při interakci fotonu s fotokatodou fotonásobiče vzniká fotoelektron. Fotoelektron po dopadu na dynodu způsobuje emisi několika dalších sekundárních elektronů a na každé z dalších dynod se počet těchto elektronů násobí. Ve výsledku na anodu fotonásobiče dopadá až 10^6 elektronů. Tyto elektrony vzápětí tvoří na výstupu fotonásobiče jednotlivé impulzy, které jsou zpracovávány elektronickým zařízením. V zesilovači je zesilována amplituda těchto impulzů a v amplitudovém analyzátoru jsou impulzy podle své výšky a zvolených parametrů (dolní a horní diskriminační hladina) třízeny tak, aby spadaly do zvoleného okna. V nukleární medicíně se hodnota okna nastavuje na význačný fotopík použitého radiofarmaka (Kupka, 2015, s. 36-37).

U scintilačních kamer pro planární, ale i tomografickou scintigrafii využíváme různých typů olověných kolimátorů, jejichž úkolem je vymežit svazek záření.

Kolimátory dělíme podle citlivosti, energie, tvaru nebo počtu otvorů. K tomografickému zobrazování mozku pak používáme kolimátor typu fan beam. Osy jeho otvorů se sbíhají do přímky v axiálním směru a v transaxiálním směru jsou jeho otvory paralelní. Tento typ kolimace je pro zobrazování mozku vhodný právě z důvodu vysoké citlivosti, která je až o 50 % vyšší než u kolimátoru s paralelními otvory (Kupka, 2015, s. 39).

Pozitronová emisní tomografie PET

Pozitronová emisní tomografie (PET) je diagnostická metoda, která umožňuje zobrazit fyziologické a patologické procesy probíhající v organismu. Právě z toho důvodu se zásadně liší od výpočetní tomografie (CT) nebo magnetické rezonance (MRI), jež naopak podávají informace o anatomické struktuře. V současnosti se PET klinicky využívá zejména v onkologii, kardiologii a v neurologii (Doležalová, 2014, s. 16).

Principem této zobrazovací metody je koincidenční detekce dvou anihilačních fotonů. Přístroj pozitronové emisní tomografie je složen z multidetektorového systému. Systém obsahuje až desítky tisíc detektorů malých rozměrů, které tvoří prsteneček okolo pacienta. V prostoru mezi detektory dochází po interakci pozitronu s elektronem k anihilaci. Anihilace je jev, při kterém původní částice zanikají a vznikají částice nové, v případě pozitronové emisní tomografie vznikají dva fotony záření γ o energii 511 keV. Tyto fotony γ pak letí v opačném směru rychlostí světla a dopadají na dva naproti sobě ležící detektory, kterými jsou registrovány. Detektory jsou zapojené v koincidenci a po detekci impulzů vyvolaných anihilací vyhodnocují její polohu (Koranda, 2017, s. 30-31).

Hybridní PET/CT

Hybridní systém PET/CT je metoda, která vznikla spojením funkčního PET zobrazení a anatomického CT zobrazení. Fúzí těchto dvou obrazů dosáhneme přesné lokalizace nálezu (Koranda, 2017, s. 31). Díky výhodám, které spojení těchto modalit přineslo, se samotné PET přístroje už v dnešní době nevyrábějí (Kubinyi, 2018, s. 213). Mezi nejčastější indikace k vyšetření PET/CT patří pátrání po neznámém primárním ložisku. Až 80 % vyšetřovaných tvoří onkologičtí pacienti. Dalšími významnými indikacemi jsou fokální záněty nebo chirurgické infekce. V rámci

neurologie je tato modalita velice často využívána jako pomocná metoda před epileptochirurgickým zákrokem (Kupka, 2015, s. 57).

Hybridní PET/MRI

Kombinace pozitronové emisní tomografie s magnetickou rezonancí je nově vznikající zobrazovací metoda, která si klade za cíl zužitkovat výhody magnetické rezonance včetně zvýšeného kontrastu měkkých tkání a snížení radiační zátěže pacienta (Ehman, 2017, s. 1). PET/MRI začíná být dostupnější zobrazovací metodou a pravděpodobně bude upřednostňována před PET/CT například v pediatrii nebo pro hodnocení specifických onemocnění, anatomických oblastí a orgánů (Jadvar, 2014, s. 10). Do budoucna je však ještě důležité optimalizovat vyšetřovací protokoly k využití veškerého potenciálu, kterým MRI/PET systém disponuje (Pail, 2014, s. 27).

Jednofotonová emisní tomografie SPECT

SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography – jednofotonová emisní tomografie) patří mezi funkčně-zobrazovací vyšetření, která umožňují zachytit funkční stav jednotlivých vyšetřovaných částí (Marusič, 2015, s. 22). Principem jednofotonové emisní tomografie je registrace záření γ emitovaného radioaktivní látkou nacházející se v těle pacienta. Přístroj, na kterém se provádějí vyšetření SPECT se nazývá scintilační kamera a je tvořena dvěma detektory, které se během vyšetření otáčejí kolem těla pacienta, vyšetřovacím lůžkem a gantry. Detektory obsahují scintilační krystal, který je klíčový při detekci gama záření. Konstrukce tohoto přístroje se postupem doby vyvíjela od jednoduchých jednodetektorových scintilačních kamer, přes dvoudetektorovou scintilační kameru až po hybridní přístroje. Díky tomuto vývoji se také zrychlilo snímkování a tím také zlepšil komfort pro pacienty. Následně jsou tyto projekce rekonstruovány počítačovou aparaturou a výsledkem je trojdimenzionální (3D) obraz, díky kterému jsme schopni zobrazit šíření radiofarmaka v jednotlivých tomografických řezech (Koranda, 2017, s. 29-30).

Hybridní SPECT/CT

Fúzované obrazy lze získat dvěma způsoby. Prvním je provedení dvou zobrazovacích modalit na jednom hybridním přístroji, anebo provedením fúze obrazů ze separátně provedených vyšetření. Zobrazení hybridními systémy je výhodnější než superpozice snímků dvou různých vyšetření v počítači, protože odpadá nutnost

složitých geometrických úprav těchto obrazů (Kupka, 2015. s. 55). Přístroje výpočetní tomografie spojené se SPECT se mohou lišit v konstrukci. Některé přístroje CT mají rentgenku pevně spojenou s gantry SPECT kamery a z důvodu tohoto spojení je rychlost rotace omezena. Tímto způsobem konstruované přístroje jsou provozovány pouze v nízkodávkovém režimu, který poskytuje orientační obrazy s nízkým rozlišením. Zato SPECT/CT přístroje s rychlou rotací rentgenky jsou schopny pracovat nejen v nízkodávkovém režimu, ale taky v plně diagnostickém režimu s vysokou kvalitou rozlišení. Jejich jedinou nevýhodou je vyšší radiační zátěž vyšetřovaného pacienta (Koranda, 2017, s. 30).

V rámci vyšetření mozku je diagnostický přínos SPECT/CT zanedbatelný. Spojení SPECT a CT nevedlo v neurozobrazování k průlomu, a to z důvodu, že CT není vhodnou zobrazovací modalitou pro zobrazování mozku. V tomto případě je lepší volbou magnetická rezonance (Israel, 2019, s. 11-12).

3 Neurologie v nukleární medicíně

Mozek je metabolicky neaktivnější tkáň lidského těla. Onemocnění centrálního nervového systému je pro současnou medicínu a diagnostické zobrazování výzvou. Populační incidence mozkových nádorů má v posledních letech rostoucí trend. U západní populace jsou neuroepiteliální nádory stále jedna z nejčastějších příčin úmrtí na rakovinu. Histologický typ, úroveň diferenciaci a možnost provedení radikálního odstranění nádoru jsou nejdůležitějšími faktory ovlivňující prognózu pacienta. Z toho důvodu se zvýšily nároky na provedení předoperačního zobrazení nádoru, stanovení celkové progrese onemocnění a biopsii (Ferda, 2017, s. 4).

Role nukleární medicíny se v neurologické diagnostice za posledních pár let razantně změnila. Dlouhá léta používanou statickou scintigrafií mozku pomalu nahrazují metody CT a MRI (Kupka, 2015, s. 84). Na pracovišti nukleární medicíny se provádí řada radionuklidových vyšetření, která mají velký význam pro pacienty potýkající se s cerebrovaskulárními chorobami, nádory mozku a různými druhy demence. Pomocí radionuklidových metod lze stanovit diagnózu jednotlivých onemocnění centrální nervové soustavy nebo vyhodnotit úspěšnost léčebných postupů (Doležal, 2019, s. 182).

Velice důležité je přistupovat k funkčnímu zobrazení mozku multimodálně. Multimodálním neurozobrazováním se rozumí vzájemná kombinace jednotlivých modalit, která může v některých případech odkrýt dříve skryté vztahy a vést k úspěšnému stanovení diagnózy. V mozku, systému natolik složitém a komplexním, je nepředstavitelné, aby informace obsažené v jedné modalitě (za použití jednoho fyziologického parametru) mohly tak spleťtý systém plně a smysluplně popsat. V poslední době je tedy snahou slučovat analýzy různých modalit mezi sebou a získat lepší a komplexní vhled do celého systému, který by mohl usnadnit pochopení fyziologického a patologického fungování lidského mozku (Pail, 2014, s. 26).

Aby bylo radionuklidové vyšetření mozku provedeno správně, je třeba dodržovat přesné postupy týkající se aplikace radiofarmaka, provedení scintigrafie a v poslední řadě je nutné řídit se zásadami pro hodnocení vyšetření. Metabolismus i perfuze mozku jsou závislé na kvalitě cévního řečiště a funkční aktivitě mozku,

z toho důvodu je nutné aplikovat radiofarmaka za standardních podmínek. Radiofarmaka by měla být podávána v tiché, zatemněné místnosti, tak aby nedocházelo vlivem variabilní funkční aktivity ke zkreslení výsledků vyšetření. Nitrožilní kanylu je doporučeno zavést s dostatečným časovým odstupem před scintigrafií, a to z důvodu eliminace bolestivých podnětů. Důležitou roli hraje i výběr adekvátní tomografické techniky PET nebo SPECT. V rámci vyšetření SPECT se doporučuje využití dvou-, popřípadě třídetektorové scintilační kamery, díky které je vyšetření provedeno v nejvyšší kvalitě za co nejkratší čas. Aby byly výsledky PET nálezu v korelaci s anatomickým substrátem, je nutné provádět tato vyšetření hybridním PET/CT (Koranda, 2017, s. 106). U vyšetření mozku je velice důležité, aby se pacient během vyšetření nehýbal. Z toho důvodu je pohodlí pacienta klíčové. Pacientovi je poskytnuta kolenní opěrka a popruhy fixující hlavu ho zajistí v pohodlné poloze a zabrání jeho pohybu v průběhu vyšetření (Noble, 2021, s. 211). Během PET i SPECT vyšetření jsou vytvářeny tomografické řezy ve 3 rovinách: transverzální, koronární a sagitální. Tato série řezů je výsledkem vyšetření a následně se hodnotí jednak vizuálně (se záměrem detekce viditelného ložiska či asymetrie hemisfér), ale také semikvantitativně, kdy se srovnávají počty impulsů v jednotlivých oblastech, nebo se vytváří statistická parametrická mapování. (Koranda, 2017, s. 106).

V klinické praxi je PET využíván především v neuroonkologii k odlišení maligních nádorů od benigních lézí, lokalizaci primárního nádoru u pacientů s metastatickým postižením, ke stanovení stupně malignity, posouzení rozsahu onemocnění, zhodnocení efektu chemoterapie a záchytu rekurence. Dále se pak uplatňuje v rámci předoperační diagnostiky u pacientů s epilepsií, kde dochází s jeho pomocí k lokalizaci epileptogenní zóny. Na oblast výzkumu je zatím limitováno jeho využití u extrapyramidových onemocnění, demencí nebo mozkových infarktů. Kromě hojného využití v oblasti neuroonkologie a epileptologie se v budoucnu očekává i klinické využití PET v rámci časně diagnostiky neurodegenerativních onemocnění. Toto využití by mělo význam až v době, kdy by byly dostupné látky s neuroprotektivním účinkem, díky kterým by byl rozvoj těchto onemocnění možný zastavit, nebo alespoň výrazně zpomalit. Další možností by mohla být mimo jiné i individualizace přístupu u pacientů s mozkovými infarkty (Doležalová, 2015, s. 16-17).

SPECT se v neurologické diagnostice využívá zejména u pacientů s farmakorezistentní epilepsií v rámci vyšetřovacího programu před epileptochirurgickým zákrokem, dále také v diferenciální diagnostice parkinsonského syndromu a v neposlední řadě k posouzení funkčního stavu cévního řečiště u pacientů s uzávěrem arterie carotis interna nebo stenózou intrakraniálních tepen (Marusič, 2014, s. 22).

I přesto, že jsou PET i SPECT obě metodami nukleární medicíny, každá z nich odráží odlišné aspekty neuronální a mozkové funkce. Díky PET získáváme informaci o stavu metabolismu mozku, SPECT oproti tomu znázorňuje změny v jeho krevní perfuzi. V případě porovnání se SPECT vyšetřením má pozitronová emisní tomografie vyšší prostorové rozlišení a nižší aktivitu pozadí. Velice významným považujeme využití PET v rámci onkologického screeningu, kde se naopak SPECT jeví jako méně spolehlivá zobrazovací metoda (Pail, 2014, s. 27).

4 Jednotlivá vyšetření CNS

4.1 Perfuzní scintigrafie mozku

Indikacemi pro perfuzní SPECT vyšetření mozku je určení cerebrovaskulární insuficience a cerebrovaskulární rezervy za využití hyperkapnie (inhalace CO₂ nebo podání vazodilatačních látek), hodnocení demencí (například multiinfarktová demence a fronto-temporální demence), hodnocení epileptogenního ložiska, a to zejména v iktálním stadiu, průkaz smrti mozku, a posouzení regionální perfuze mozku po poranění (Doležal, 2019, s. 178).

Pro stanovení regionální cerebrální perfuze (rCP) se používá radiofarmakum ^{99m}Tc-HMPAO (hexametylpropylenaminoxim) nebo ^{99m}Tc-ECD (etylcysteinátdimer) (Marusič, 2014, s. 22). Obvykle se aktivita těchto radiofarmak aplikovaných dospělým pacientům pohybuje okolo 555-800 MBq (MZČR, 2016, s. 245). Při použití ^{99m}Tc-značených radiofarmak je třeba dbát na správnou premedikaci pacienta. Před vyšetřením je nutné provést blokaci akumulace volného ^{99m}Tc v chorioideálních plexech, tak aby jejich aktivita neztěžovala hodnocení nálezu. Standardně se tedy před vyšetřením pacientovi podává chloristan draselný – Chlorigen (Kupka, 2015, s. 95). Obě z výše zmíněných látek se aplikují intravenózně, v mozkovém řečišti bez problému prostupují hematoencefalickou bariérou a následně jsou vychytávány v závislosti na aktuálním prokrvení jednotlivých oblastí mozku. To vše probíhá v řádu desítek vteřin po aplikaci a vzniklý obraz rCP je pak zafixován po dobu až několika hodin, a to i přesto, že se mezitím jednotlivé úrovně perfuze dále mění (Marusič, 2014, s. 22).

^{99m}Tc-HMPAO a ^{99m}Tc-ECD jsou lipofilní a díky tomu jsou schopny rychle proniknout skrze hematoencefalickou membránu a navázat se ireverzibilně v šedé kůře mozkové (neuronech), dále v bazálních gangliích, a nakonec v mozečku. Intenzita akumulace nitrožilně podaného radiofarmaka v mozku závisí na intenzitě průtoku krve mozkiem, což je dáno stavem cévního řečiště a úrovní regionálního metabolismu centrální nervové soustavy (CNS), ale i viabilitou samotných neuronů (Doležal, 2019, s. 178).

Příprava pacienta vyžaduje nepožit před vyšetřením nápoje s obsahem kofeinu nebo alkoholu. Dále není pacientovi před samotným vyšetřením povoleno kouřit či užít léky, které by mohly mít vliv na prokrvení mozku. Velice důležité je

pacienta s předstihem náležitě poučit o délce a průběhu celého vyšetření. Před aplikací radiofarmaka je potřeba ujistit se, že je pacient schopný vydržet v klidu po celou dobu vyšetření. Pro maximální komfort se pacientovi doporučuje, aby se šel před samotným začátkem vyšetření vymočit. Pokud není pacient schopný spolupracovat, je možné podat sedativa, a to minimálně 5 minut před podáním radiofarmaka (MZČR, 2016, s. 245).

V průběhu vyšetření je hlava pacienta fixována ve speciálním držáku a pro přesnost centrace je využíván laserový zaměřovač (Kupka, 2015, s. 96). Pacient leží na zádech, kantomeatální linie je kolmá na podložku (MZČR, 2016, s. 245). S časovým odstupem po podání radiofarmaka probíhá snímání pomocí SPECT kamery za použití speciálních kolimátorů typu fan-beam (Kupka, 2015, s. 96). Při použití ^{99m}Tc -HMPAO se doporučuje zahájit akvizici scintigramů přibližně 90 minut po podání radiofarmaka a při použití ^{99m}Tc -ECD se tato doba zkracuje na zhruba 45–60 minut (MZČR, 2016, s. 245). Detektory rotují v těsné blízkosti hlavy pacienta plynule nebo v režimu „step and shoot“ (Kupka, 2015, s. 96). Úhel rotace SPECT je 360° , snímáno je 120 projekcí po 3° , přičemž doba záznamu jedné projekce činí 30 sekund a celkový počet nashromážděných impulzů by neměl překročit hodnotu 5 miliónů (MZČR, 2016, s. 246). Metodou filtrované zpětné projekce jsou tyto snímky rekonstruovány. Po rekonstrukci obrazů planární distribuce vznikají obrazy perfuze v sagitálním, trasverzálním a koronálním řezu (Kupka, 2015, s. 96)

Z hlediska radiační zátěže pacienta v rámci vyšetření mozkové perfuze ^{99m}Tc -HMPAO (0,0093 mSv/MBq), jsou orgánem s nejvyšší absorbovanou dávkou právě ledviny (0,034 mGy/MBq). Při použití ^{99m}Tc -ECD (0,0074 mSv/MBq) se jedná o močový měchýř (0,049 mGy/MBq). Odhad dávky v orgánu s nejvyšší absorbovanou dávkou lze stanovit vynásobením hodnoty v závorce s hodnotou aktivity aplikovaného radiofarmaka (MZČR, 2016, s. 246).

Snížená akumulace radiofarmaka je při SPECT zobrazení viditelná v místě ischemie, mozkového infarktu, u demence, v místě epileptogenního ložiska v interiktálním stadiu a v místech, kde došlo k poranění mozku. Naopak zvýšenou akumulaci radiofarmaka pozorujeme v epileptogenním fokusu v iktálním stadiu (Doležal, 2019, s. 178). Při vyhodnocování vyšetření se doporučuje využít techniku definované oblasti (ROI) s následným srovnáním regionálních abnormalit mozkové

perfuze s perfuzí, která koresponduje strukturou v jedné z referenčních oblastí – mozeček, hemisféra, celý mozek (MZČR, 2016, s. 246).

Vyšetření mozkové smrti

Mozkovou smrtí se rozumí nenávratné poškození funkcí celého mozku, včetně funkcí mozkového kmene. Diagnostikovat mozkovou smrt lze na základě klinických příznaků s následným provedením neurologických vyšetření. Mezi hlavní klinické známky mozkové smrti patří kóma, absence reflexů mozkového kmene a apnoe (Rizvi, 2018, s. 515). Hlavní zobrazovací metodou nukleární medicíny využívanou pro stanovení mozkové smrti je SPECT vyšetření prováděné za použití radiofarmak ^{99m}Tc -HPO₄ nebo ^{99m}Tc -ECD. Za normálních podmínek se radiofarmaka hromadí v parenchymu mozku v závislosti na stupni regionální perfuze (Rizvi, 2018, s. 526).

V průběhu vyšetření je nutné i nadále zabezpečit pokračování anesteziologicko-resuscitační péči, přičemž je brán zvýšený zřetel na udržování ideální výše krevního tlaku. Vzhledem k tomu, že součinnost pacienta nelze předpokládat, správná poloha pacienta je záležitostí zdravotnického personálu. Pacient leží na zádech, kantomatální linie je kolmá na podložku a zároveň je zabezpečena stabilní poloha hlavy vyšetřovaného (MZČR, 2016, s. 251).

Pro vyšetření mozkové smrti je oproti jednodetektorové kameře vhodnější volbou gama kamera se dvěma detektory za použití kolimátorů low-energy-high-resolution (LEHR) s paralelními otvory. Energetické okno je nastaveno na fotopík 140keV (MZČR, 2016, s. 251). Během vyšetření se provádí planární scintigrafie, která zaznamenává průtok radiofarmaka, a po ní následuje SPECT vyšetření mozku (Koranda, 2017, s. 109). Statické planární scintigramy hlavy jsou zhotoveny ve čtyřech základních projekcích, a to nejdříve 20 minut po aplikaci radiofarmaka. Vyšetření SPECT je vhodné doplnit, ale nejedná se o standard. Ideální nastavení režimu SPECT je 120 projekcí po 3°, celkový úhel rotace činí 360° a přibližná doba záznamu jedné projekce se pohybuje okolo 25-30 sekund (MZČR, 2016, s. 251).

Nálezem, kterým lze prokázat mozkovou smrt, je absolutní absence akumulace perfuzních radiofarmak, ke které dochází blokádou průtoku krve mozkem vlivem edému (Koranda, 2017, s. 109). Pokud při dynamické scintigrafii pozorujeme známky přítoku radiofarmaka do intrakraniálních tepen, tak tento typ nálezu svědčí proti diagnóze mozkové smrti. To stejné platí i v případě, kdy jsou v některé ze

struktur mozku při statické scintigrafii či SPECT vyšetření přítomny známky rozložení radiofarmaka (MZČR, 2016, s. 252).

Identicky jako u vyšetření mozkové perfuze, jsou v rámci radiační zátěže vyšetřovaného pacienta orgánem s nejvyšší absorbovanou dávkou ledviny a močový měchýř (MZČR, 2016, s. 252).

Scintigrafický průkaz mozkové smrti je neinvazivní alternativou angiografie. Výhodou při volbě tohoto vyšetření je jednoduchá aplikace radiofarmaka, a navíc zde není nutné podávat pacientovi jodovou kontrastní látku (Doležal, 2019, s. 178).

Scintigrafie mozkové perfuze s acetazolamidovým testem

Cerebrovaskulární rezerva (CVR) je velice důležitým parametrem, který upravuje postupy léčby u chronických pacientů s cerebrovaskulárním onemocněním. (Acker, 2018, s. 2) Například rozhoduje o indikaci invazivního výkonu za předpokladu, že se u pacienta prokázala stenóza tepny zásobující mozek (Koranda, 2017, s. 108).

V průběhu vyšetření je pacient uveden do stavu hyperkapnie, a to inhalací CO₂ nebo intravenózním podáním acetazolamidu, který funguje na principu blokování enzymu karboanhydrázy a jeho funkce. Za normálních okolností způsobuje vzniklá acidóza spuštění kompenzatorních mechanismů, díky kterým následně dochází k dilataci mozkových cév a zvýšení průtoku krve mozkem. V případě stenózy některé z arterií je dilatace tohoto řečiště již na svém maximu, tudíž hyperkapnie nevede v tomto případě k znatelné změně mozkové perfuze, což má za následek zobrazení této oblasti jako okrsek se sníženou perfuzní rezervou (Koranda, 2017, s. 108).

Vyšetření slouží k zobrazení rozložení regionální mozkové perfuze a s acetazolamidovým testem je prováděno jednofotonovou emisní tomografií za aplikace ^{99m}Tc-HMPAO nebo pozitronovou emisní tomografií za využití ¹⁵O (Acker, 2018, s. 2).

Mozkovou perfuzi hodnotíme po srovnání dvou vyšetření – vyšetření s farmakologickou zátěží a vyšetření, které proběhlo v klidovém stavu pacienta. Výsledkem je zobrazení regionálního cerebrálního krevního průtoku (Acker, 2018, s. 2).

4.2 Zobrazení dopaminových transportérů

Zobrazovací metody nukleární medicíny dokážou jako jediné zajistit zobrazení transportérů a receptorů v mozku metodou in vivo (Kupka, 2015, s. 97).

U zobrazení dopaminových transportérů rozlišujeme dvě různá funkční zobrazení. Zobrazuje se presynaptická nebo postsynaptická část dopaminergního systému (Marusič, 2014, s. 23). Presynapticky lokalizována je porucha, ke které dochází u idiopatické Parkinsonovy choroby (IPN). IPN se projevuje postižením aferentních drah vedoucích ze substantia nigra až do striata neboli bazálních ganglií. Při onemocněních jako je multisystémová atrofie (MSA) nebo progresivní supranukleární obrna (PSP) je místem postižení přímo striatum. Z toho vyplývá, že je porucha lokalizovaná presynapticky a zároveň i postsynapticky. Vyjímkou je esenciální tremor či parkinsonský syndrom, který vznikl jako nežádoucí efekt některé z medikamentózních terapií. V tomto případě není ani jedna z částí dopaminové synapse postižena (Koranda, 2017, s. 111).

V současnosti máme přístup ke dvěma radiofarmakům se schopností zobrazit dopaminergní systém. Jedná se o ^{123}I -FP-CIT (^{123}I -loflupan – DaTSCAN) využívaný k zobrazení dopaminových presynaptických neurotransportérů a druhým radiofarmakem je ^{123}I -IBMZ (iodobenzamid), který se využívá k zobrazení postsynaptických D_2 dopaminových neuroreceptorů (Kupka, 2015, s. 97). Aplikovaná aktivita těchto radiofarmak se pohybuje u dospělých v rozmezí 150-200 MBq (MZČR, 2016, s. 247). Obě radiofarmaka se podávají nitrožilně a za 3-6 hodin po aplikaci se provádí SPECT mozku (Doležal, 2019, s. 178). Poměrnou kontraindikací je gravidita, ale pokud je nutné provést vyšetření z vitální indikace, je to po minimalizaci aplikované aktivity radiofarmaka možné (MZČR, 2016, s. 247).

^{123}I -loflupan je derivát kokainu značený radioaktivním jódem. Má schopnost vázat se na dopaminové transportéry nacházející se na membránách presynaptických zakončení dopaminergních neuronů v kaudatu a v putamen. To znamená, že na základě hustoty transportérů se dá předpokládat jejich množství a funkční stav. Aby nedocházelo ke zkreslení výsledku vyšetření, je nutné před aplikací ^{123}I -FP-CIT a samotným vyšetřením s dostatečným předstihem vysadit následující léčiva – psychostimulancia, anorektika, anticholinergika a antidepresiva (Marusič, 2014, s. 23). Pomocí ^{123}I -loflupanu lze prokázat výše zmíněnou IPN, ale

také Parkinson plus syndromy, mezi které se řadí například již zmíněné MSA a PSP. Nově se uvádí, že lze pomocí ^{123}I -Ioflupanu diagnostikovat i demenci s Lewyho tělísky, jelikož při této chorobě také dochází k výraznému snížení množství transportérů (Koranda, 2017, s. 111). Dokonce se s jeho pomocí dá odlišit tato demence od Alzheimerovy choroby (AD) (Doležal, 2019, s. 178). Nedostatek dopaminových transportérů je znatelný již v časných klinických fázích Parkinsonovy choroby, právě proto se vyšetření využívá nejčastěji v rámci diferenciální diagnostiky (Koranda, 2017, s. 111).

Naopak radiofarmakum ^{123}I -IBMZ se váže na receptory typu D_2 , které jsou umístěny na membránách neuronů ve striatu. V případě zobrazení pomocí radiofarmaka ^{123}I -IBMZ je nutné vysadit pacientovi veškerá léčiva, která by potencionálně mohla interferovat s vazbou radiofarmaka na receptory D_2 . Jedná se především o klasická a atypická neuroleptika a kalciové blokátory, dále je nutné vysadit na dobu 12–24 hodin léčiva na bázi agonistů dopaminových neuroreceptorů nebo nepřímo působící dopaminergní látky (Marusič, 2014, s. 23). Díky této scintigrafii lze odlišit presynapticky lokalizovanou IPN od chorob z Parkinson plus okruhu, u kterých dochází k postsynaptické alteraci (Koranda, 2017, s. 111).

V omezené míře se u nás využívá i ^{18}F -DOPA (dihydroxy- ^{18}F -fluorophenylalanin). ^{18}F -DOPA je prekurzorem dopaminu a slouží k zhodnocení integrity nigrostriatální cesty (Kupka, 2015, s. 97). U tohoto vyšetření je důležitá fúze obrazů s CT vyšetřením, protože je nutné vyloučit místní či vzdálená ložiska, která by mohla být příčinou přerušení nigrostriatální dráhy (Salmon, 2015, s. 547).

Zobrazení dopaminových transportérů se mimo využití v rámci diferenciální diagnostiky Parkinsonovy choroby v případě výskytu neúplných nebo atypických symptomů využívá i pro odlišení tremor dominantního typu Parkinsonovy choroby od méně často vyskytujícího se esenciálního tremoru (Marusič, 2014, s. 23). Dále je toto zobrazení významné v diagnostice neurologických a psychiatrických onemocnění, monitoraci úspěšnosti léčby a vyhodnocování účinnosti léčiv (agonistů a antagonistů výše zmíněných receptorů) (Kupka, 2015, s. 97).

V nukleární medicíně se hodnota okna nastavuje na význačný fotopík použitého radiofarmaka (Kupka, 2015, s. 36-37). U vyšetření dopaminových transportérů je hodnota okna nastavena na fotopík 159 keV. Akvizice scintigramů se

zahajuje cca 3-6 hodin po aplikaci radiofarmaka. Z důvodu možnosti komparace výsledků v rámci sledování pacientů se doporučuje stanovit a dodržovat fixní čas mezi aplikací radiofarmaka a samotným začátkem akvizice. Detektory rotují v režimu „step and shoot“, nebo je možné použít kontinuální rotaci, díky které je zkrácena doba akvizice a minimalizují se otřesy celého systému. Úhel rotace činí 360°, snímáno je 120 projekcí po 3°. Celé snímání trvá okolo 50 minut, doba záznamu jedné projekce je 34-45 sekund a celkový počet zaznamenaných impulzů by u zdravého jedince neměl překročit hranici 3 milionů (MZČR, 2016, s. 247).

Co se týká radiační zátěže dospělého pacienta, u tohoto vyšetření je orgánem s nejvyšší absorbovanou dávkou stěna močového měchýře a tlusté střevo. U dětí se toto vyšetření neprovádí, z toho důvodu nejsou žádné bližší údaje k dispozici (MZČR, 2016, s. 248).

Následná interpretace nálezu se u obou metod nijak zvlášť neliší. Nálezy se hodnotí vizuálně, a to na základě akumulace radiofarmaka ve striatu nebo semikvantitativně, kdy se určuje poměr dvou aktivit – striatální a extrastriatální (Marusič, 2014, s. 24). Výpočtem tohoto indexu ověřujeme hustotu receptorů či transportérů (Kupka 2015, s. 97). Rozlišujeme 3 stupně míry postižení, které zjednodušují následnou interpretaci vizuálního hodnocení.

1. stupeň – je značně viditelné poškození v oblasti putamen
2. stupeň – počet dopaminových transportérů je snížen a vzniká jejich těžký deficit v putamen (bazální ganglia lze v tomto stádiu stále diferenciovat)
3. stupeň – snížený počet transportérů registrujeme i v bazálních gangliích (Koranda, 2017, s. 111).

4.3 Scintigrafie cerebrospinálních likvorových cest – cisternografie

Mozkomíšní mok je produkován chorioidálními plexy postranních komor. Protéká přes foramen Monroi a dostává se do III. mozkové komory a odtud přes aqueductus Sylvii do IV. mozkové komory. Následovně opouští ventrikulární systém přes foramen Magendí a dvě foramina Lushke, tudy odtéká do subarachnoidálního systému mozku a míchy. Rozšíření subarachnoidálního prostoru při bázi mozku se říká bazální cysterny. Místa, ve kterých dochází ke vstřebání většiny množství mozkomíšního moku, se nazývají velké nitrolebeční venózní siny (Doležal, 2019, s. 181).

Ke sledování toku likvoru využíváme radiofarmakum ^{111}In -DTPA (diethylentriaminpentaacetát india). Díky dlouhému poločasu přeměny ^{111}In (67 hodin) je možné provádět vyšetření několik dnů. Jelikož není radiofarmakum ^{111}In -DTPA rozpustné v tucích, nedochází k jeho metabolismu ani vstřebání ependymálními buňkami (ependym tvoří výstelku dutin CNS) (Doležal, 2019, s. 181). Pokud chceme snížit radiační zátěž pacienta (tuto volbu provádíme zejména při vyšetřování dětí), volíme radiofarmakum $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA (Kupka, 2015, s. 104).

Indikacemi pro radionuklidovou cisternografii je diferenciální diagnostika různých forem hydrocefalu, posouzení průchodnosti arteficiálně založených likvorových drenáží (shuntů) komorového systému a v poslední řadě průkaz likvorových píštělí (Kupka, 2015, s. 104).

Aplikace radiofarmaka se provádí lumbální punkcí (intratekálně) a musí být zajištěna jeho absolutní sterilita a apyrogenost (Doležal, 2019, s. 182). ^{111}In -DTPA se aplikuje ve 2-3 ml 10% glukózy (Kupka, 2015, s. 104). Obvyklá aktivita radiofarmaka se pohybuje okolo 40 MBq (MZČR, 2016, s. 249). Po aplikaci leží pacient ideálně na zádech v Trendelenburgově poloze až několik hodin (Kupka, 2015, s. 104). Scintigrafie likvorových prostor se provádí během 24-48 hodin jako série statických scintigramů (Doležal, 2019, s. 182). Jednotlivé série scintigramů jsou snímány po 2, 4-6 a 24 hodinách a v případě potřeby se doplňují jednotlivá vyšetření i za 48 a 72 hodin. V případě, že je dojde k přímé detekci likvorových píštělí, je vhodné doplnit vyšetření o dodatečnou statickou scintigrafii oblasti břicha, a to z důvodu průkazu potencionálního spolknutí radioaktivity (MZČR, 2016, s. 250).

Planární kamerou se snímá standardně v přední, zadní a boční projekci (Kupka, 2015, s. 104). Pokud je prováděna přední projekce, je důležité, aby byla hlava pacienta orientována orbitomeatální linií kolmo na čelo detektoru. Při bočních projekcích je hlava pacienta rotována ideálně tak, aby snímaná strana hlavy byla rovnoběžně s detektorem (MZČR, 2016, s. 104).

Nejvíce zatíženým orgánem je při radionuklidové cisternografii mícha (0, 95 mGy/MBq). Efektivní dávku lze vypočítat vynásobením uvedené hodnoty (0,14 mSv/MBq) aplikovanou aktivitou, která se uvádí v jednotkách MBq (MZČR, 2016, s. 250).

Přibližně 1 hodinu po aplikaci dosáhne ^{111}In -DTPA bazálních cisteren, za 12 hodin mozkových konvexit, za 24 hodin sinus sagitalis a po 26 hodinách lobus frontalis. Existují případy, ve kterých se likvorea může jevit jako diskrétní. Pak je i scintigraficky těžko detekovatelná, a v tomto případě je vhodné podezřelé místo (ucho,nos) zatamponovat. Po vyjmutí tamponu se změří aktivita radiofarmaka a následně se určí měrná aktivita tekutiny absorbované v tamponu. Tato aktivita se ve výsledku srovnává s měrnou aktivitou séra pacienta. Výrazně vyšší aktivita v tekutině z tamponu potvrzuje likvoreu (Doležal, 2019, s. 182).

V případě hydrocefalu, který vzniká buď extrakomorovou blokádou toku likvoru nebo poruchou vstřebávání likvoru arachnoidálními klky (např. po subarachnoidálním krvácení), je na scintigramech viditelný průnik radiofarmaka do postranních mozkových komor. V tomto případě je příčinou otočení tlakového gradientu (Doležal, 2019, s. 182).

4.4 PET mozku ^{18}F -FDG

Pomocí metody PET je možné zobrazit fyziologické a patologické procesy, které probíhají v organismu. Jedná se o takzvanou vizualizaci funkce (Doležalová, 2014, s. 16). Pozitronová emisní tomografie (PET) se za použití radiofarmaka fluorodeoxyglukózy (^{18}F FDG) v neurologii využívá k zobrazení cerebrálního metabolismu glukózy. Metabolismus glukózy se zvyšuje s regionální synaptickou aktivitou, a naopak se snižuje synaptickou dysfunkcí nebo neurální degenerací (Kato, 2016, s. 3).

^{18}F FDG je analogem glukózy. Stejně jako glukóza, dokáže ^{18}F FDG prostoupit hematoencefalickou membránou a je po vstupu do buňky fosforylována v neuronech enzymem hexokinázou. Na rozdíl od glukózy ale nadále nedochází u ^{18}F FDG k metabolizaci s uvolněním energie v podobě adenosintrifosfátu (ATP). ^{18}F FDG v buňce zůstává a postupně se zde hromadí. Podle množství akumulované ^{18}F FDG lze určit úroveň energetického metabolismu konkrétní struktury (Doležalová, 2014, s. 16).

Hypermetabolismus je při vyšetření ^{18}F FDG PET přítomný jak u nádorových buněk, tak i v místech zánětu, infekce a procesů hojení. Zvýšená či snížená akumulace radiofarmaka v nádorové tkáni může být v jisté míře ovlivněna různými stavy. Pokud jde o zvýšenou akumulaci ^{18}F FDG, může k ní dojít v krátkém časovém

intervalu od radioterapie či chemoterapie. Naopak ke snížené akumulaci ^{18}F FDG dochází v důsledku hyperglykémie nebo po aplikaci inzulínu. Tyto zmíněné determinanty mohou mít dopad na průběh vyšetření a může dojít k vzniku falešně pozitivních nebo v jiném případě falešně negativních výsledků. Z toho důvodu se v rámci výzkumu stále pracuje na vývoji dalších radionuklidů, které by svými vlastnostmi přispívaly k zpřesnění výsledků vyšetření (Doležalová, 2014, s. 18).

V případě radiační terapie může zvýšená aktivita přetrvávat až 15 měsíců po jejím ukončení. Aby se minimalizovali falešně negativní a pozitivní nálezy související s léčbou, doporučuje se, aby bylo vyšetření PET/CT provedeno alespoň 2 týdny po skončení posledního cyklu chemoterapie, 6-8 týdnů po operaci a 12 týdnů po radiační terapii (Surasi, 2014, s. 12).

^{18}F FDG PET mozku poskytuje přínosné informace o patofyziologii a diagnóze demence (Kato, 2016, s. 3). Díky ^{18}F FDG lze odlišit jednotlivé typy demence (Doležalová, 2014, s. 17). V oblasti neuroonkologie je ^{18}F FDG PET zvláště užitečné pro detekci recidivy, zejména u asymptomatických pacientů, kterým se podezřele zvyšují hladiny nádorových markerů, nebo u pacientů s negativními či nejednoznačnými nálezy (Almuhaideb, 2011, s. 3). Dále lze pomocí tohoto vyšetření odlišit maligní nádory od benigních lézí. A v neposlední řadě jsou indikacemi pro provedení tohoto vyšetření lokalizace epileptogenní zóny, odlišení jednotlivých extrapyramidových onemocnění (zde je jeho využití limitováno na oblast výzkumu) a monitorace přítomnosti penumbry v rámci cévní neurologie (Doležalová, 2014, s. 17).

Správná příprava a dodržování radiologických standardů je klíčové pro získání kvalitních snímků (Surasi, 2014, s.12).

Je dokázáno, že hladina glukózy v krvi má značný vliv na vychytávání radiofarmaka ^{18}F FDG nádorovými buňkami, jelikož ^{18}F FDG a glukóza mezi sebou „soutěží“ o transport s následnou fosforylací. Zvýšená krevní glukóza zvyšuje translokaci GLUT4 (přenašeč glukózy), čímž se ^{18}F FDG velice rychle hromadí v orgánech s vysokou hustotou inzulínových receptorů (konkrétně se jedná o kosterní svalstvo a myokard). Pokud není pacient na lačno, ale je bezprostředně před vyšetřením zatížen glukózou, v porovnání s nádory je ve svalové tkáni nahromaděno více ^{18}F FDG, což má za následek rozmazání okrajů nádorů (Surasi,

2014, s.9). Z důvodu minimalizace akumulace ^{18}F FDG v tělesných tkáních (zejména ve výše zmiňovaném kosterním svalstvu) a snížení hladiny inzulínu, je pacientům doporučeno lačnit po dobu minimálně 6 hodin před samotným vyšetřením. Během lačnění by pacient neměl konzumovat žádné tekutiny kromě čisté, neochucené vody. Parenterální výživa a intravenózní podávání tekutin, které obsahují glukózu, by měly být přerušeny alespoň 4 hodiny před PET/CT vyšetřením. Pacient by měl dodržovat pitný režim, a to z důvodu radiační ochrany a s tím spojeným zajištěním nízké koncentrace radiofarmaka v moči. Doporučuje se vypít 1 litr vody 2 hodiny před aplikací radiofarmaka ^{18}F FDG a další 0,5 litru vody po podání vyšetřovací látky (Surasi, 2014, s. 6).

Dietu s vysokým obsahem bílkovin a nízkým obsahem sacharidů je vhodné dodržet 24 hodin před vyšetřením, minimalizuje se tím požití glukózy ve stravě. Dále je vhodné neužívat produkty obsahující alkohol či nikotin, a to minimálně 12 hodin před začátkem vyšetření (Surasi, 2014, s. 6).

Premedikace je v některých případech nevyhnutelná. Pacientům s karcinomy hlavy a krku, klaustrofobií, úzkostí nebo potřebou uvolnit kosterní svalstvo je před vyšetřením, současně s aplikací ^{18}F FDG, podán medikament z třídy benzodiazepinů. V tomto případě by měl být pacient řádně poučen a varován před řízením kvůli sedativním účinkům léčiva. Všechny předepsané léky, které pacient užívá, by měly být i před vyšetřením užívány beze změny. Toto doporučení zahrnuje i léčiva, která by potencionálně mohla zapříčinit zvýšení hladiny glukózy. Jedná se zejména o glukokortikoidy, fenothiaziny, litium, tricyklická antidepresiva, fenytoin, efedrin nebo isoniazid (Surasi, 2014, s. 6-7). Pacienti s diabetes mellitus jsou zpravidla objednávaní na ranní termíny vyšetření. Důležitou součástí přípravy pacienta na vyšetření je kontrola glykemie. Poslední aplikaci inzulínu by měl diabetik provést večer před vyšetřením. V případě, že večer diabetik užívá inzulín, který se následně uvolňuje po dobu 24 hodin, je nutné, aby jej večer již neaplikoval. Pacient, který nedodrží pravidla týkající se aplikace inzulínu musí být přeobjednán na jiný den (MZČR, 2016, s. 320).

Pacientovi je aplikováno radiofarmakum ^{18}F FDG o aktivitě 185-555 MBq (MZČR, 2016, s. 323). Během vyšetření je nutné zajistit, aby se pacient nehýbal, jinak by mohlo dojít ke zkreslení výsledků. Aplikovaná aktivita by se špatně zobrazila v jednotlivých mozkových strukturách a ztížila by nebo dokonce znemožnila

interpretaci výsledků (Salmon, 2015, s. 542-543). Pacient leží po celou dobu vyšetření na zádech a hlava je fixovaná popruhy. Ideální je pozice, která je orientovaná podle infraorbitomeatální linie. Pokud je vyšetřován pacient s indikací k průkazu nádoru mozku, snímání PET skenů je zahájeno ideálně 90 minut po podání radiofarmaka. V případě indikací k zobrazení mozkové tkáně se snímání zahajuje nejdříve 60 minut po aplikaci radiofarmaka. CT fáze vyšetření se standardně provádí v režimu velmi nízké dávky, a to z důvodu, že slouží pouze pro účely korekce zeslabení PET signálu. Pokud je nutné v rámci PET/CT vyšetření provést plnohodnotné CT, musí se tento požadavek zvlášť odůvodnit. V tomto případě se doporučuje řídit se národními radiologickými standardy pro náležitý typ CT vyšetření (MZČR, 2016, s. 321).

Optimální CT, které je součástí hybridního přístroje, by mělo být multidetektorové spirální CT, které nabízí dostatečné množství nastavitelných parametrů umožňujících skenovat pacienta v režimu low-dose (s nízkou radiační zátěží). Nastavení CT skeneru jsou následující, napětí se pohybuje okolo 120-130 kV, pitch v rozmezí 1,0-2,0. Jestliže přístroj umožňuje v rámci svého nastavení režim snížení dávky za pomoci modulace proudu, je nutné ho využít (MZČR, 2016, s. 319-321).

V rámci vyšetření FDG-PET mozku je orgánem s nejvyšší absorbovanou dávkou u dětí i dospělých močový měchýř (MZČR, 2016, 322). U dospělého člověka představuje aplikace 300MBq ¹⁸FDG efektivní dávku cca 6mSv a typická efektivní dávka z CT (odhadnuto s pomocí normalizovaných hodnot EDLP) vyšetření je 5-7 mSv. Z toho vyplývá, že celková efektivní dávka vyšetření PET/CT s ¹⁸FDG představuje pro dospělého člověka přibližně 12-15 mSv (Kubinyi, 2018, s. 227). Podle studie o radiační dozimetrii PET/CT jsou pět orgánů s nejvyšší ekvivalentní orgánovou dávkou ¹⁸FDG, v pořadí od nejvyšší po nejnižší dávku, močový měchýř, srdce, mozek, játra a plíce. A pokud jde o dávky záření CT, orgány s nejvyšší orgánovou ekvivalentní dávkou, v pořadí od nejvyšší po nejnižší, jsou štítná žláza, osteogenní buňky, brzlík a plíce (Quinn, 2016, s. 5). Pro urychlení eliminace radiofarmaka je pacient poučen o vhodnosti zvýšeného příjmu tekutin po skončení vyšetření (MZČR, 2016, s. 320).

Nálezy se hodnotí vizuálně a kvantitativně. Patří sem například analýzy založené na voxelu. Nejznámější voxelový analytický program byl vyvinut

v londýnské nemocnici Hammersmith a nese název Statistical Parametric Mapping (statická parametrická mapování). Tento program (a další) poskytuje výsledky, které jsou vyjádřeny jako statistická pravděpodobnost regionální abnormality. Dalším způsobem hodnocení je morfometrie založená na voxelu. Jedná se o výpočetní přístup k neuroanatomii, který měří rozdíly v koncentracích mozkové tkáně srovnáváním více snímků mozku (Salmon, 2015, s. 548).

Při hodnocení předoperačního vyšetření u pacientů, kteří jsou diagnostikováni s farmakorezistentní epilepsií, je v oblasti epileptogenní zóny (EZ) přítomen hypometabolismus, který má velmi často velikost větší než samotná EZ a může pronikat i do jiných oblastí mozku (Doležalová, 2014, s. 19).

Mezi jednotlivými typy demencí jsou zjištěny odlišnosti v lokalizaci hypometabolismu. Počáteční fáze AD se projevuje jako hypometabolismus v temporoparietálních oblastech a v rámci progresu onemocnění se pak objevuje i ve frontálních lalocích. Nález u demence s Lewyho tělísky (DLB) je obdobný jako u AD, liší se pouze tím, že již od samého počátku se u DLB vyskytuje hypometabolismus i v okcipitálních oblastech mozku. U frontotemporální demence (FTD) je hypometabolismus přítomen ve frontálních či temporálních oblastech, u vaskulární demence (VD) jsou přítomna vícečetná ložiska hypometabolismu v různých oblastech a u Parkinsonovi choroby se hypometabolismus nachází v temporálních oblastech, a naopak zvýšený metabolismus se může, ale nemusí nacházet ve striatu. Interpretaci výsledku je vhodné provádět v rámci klinického kontextu (Doležalová, 2014, s. 19-20).

V rámci interpretace demencí existují různé kvantitativní a semikvantitativní přístupy, nicméně pro predikci konverze z mírné kognitivní poruchy na AD jsou tyto přístupy méně citlivé, i když stále více specifické než vizuální hodnocení. Kombinací vizuálního a semikvantitativního hodnocení můžeme dosáhnout lepší diagnostické přesnosti (Kato, 2016, s. 5).

4.5 PET mozku ¹⁸F-FLT

Základní součástí DNA jsou čtyři báze (adenin, cytosin, guanin a thymin). V rámci vyšetření nukleární medicíny se využívají především radiofarmaka, která jsou odvozena od thyminu. Je to hlavně proto, že thymidin je nukleotid, který se vyskytuje pouze v DNA, na rozdíl od ostatních nukleotidů, jež jsou zároveň součástí

ribonukleové kyseliny (RNA). Díky němu lze kvantitativně hodnotit syntézu DNA, kterou vypovídá o proliferaci buněk (Doležalová, 2014, s. 18). Proliferační aktivita nádorové tkáně je přímo úměrná populaci buněk, které se nacházejí v přípravné nebo dělicí fázi buněčného cyklu a nekontrolované buněčné dělení je hlavním mechanismem růstu nádorové tkáně u nádorů z glií (gliomů). Typickými procesy buněčného dělení jsou replikace DNA a syntéza buněčných membrán (Ferda, 2017, s. 11).

Při PET vyšetření, které umožňuje zobrazení regioovenálních změn syntézy deoxyribonukleové kyseliny (DNA) v mozku, se používá radiofarmakum fludeoxythymidin (^{18}FLT), což je analog báze DNA thymidinu značený ^{18}F (Doležal, 2019, s. 180). Vyšetření dále umožňuje nejen zobrazení astrocytomů, ale i jejich grading, což zvyšuje přesnost zacílení biopsie a umožňuje prokázání up-gradingu nádoru s následnou změnou managementu pacienta. Vysoký up-take (absorbce) radiofarmaka ^{18}FLT představují anaplastický astrocytom (grading dle WHO – III) a glioblastom (grading dle WHO – III). Astrocytomy s nižším gradingem vykazují nižší up-take ^{18}FLT (Doležal, 2019, s. 180).

Význam provedení tohoto vyšetření spočívá ve vyvrácení či potvrzení nádorového onemocnění v případě klinického podezření v rámci neuroonkologie (Doležalová, 2014, s. 17). ^{18}FLT má schopnost akumulovat se v high-grade maligních tumorech a míra jeho akumulace odpovídá proliferační aktivitě nádoru. Lze díky němu hodnotit terapeutickou odpověď a interpretovat míru úspěšnosti léčby (Doležal, 2019, s. 180).

Velkým benefitem oproti PET vyšetření ^{18}FDG je, že se ^{18}FLT neváže v neokortexu (šedé kůře mozkové), jehož spotřeba glukózy je fyziologicky na velice vysoké úrovni. Díky tomu vykazuje vyšetření s ^{18}FLT vyšší diagnostickou přesnost než PET/CT či PET/MR s ^{18}FDG (Doležal, 2019, s. 180). PET s využitím ^{18}FLT oproti ^{18}FDG mimo jiné umožňuje časně vyhodnocení odpovědi karcinomu na chemoterapii (Doležalová, 2014, s. 18).

Pacientovi je před vyšetřením nitrožilně aplikováno 100-300 MBq ^{18}FLT . Pacient je po celou dobu vyšetření v poloze v leže na zádech a hlava je zabezpečena fixačními popruhy. Ideální je pozice, která je orientovaná podle infraorbitomeatální linie (MZČR, 2016, s. 325-326). Doba mezi aplikací radiofarmaka

¹⁸FLT a zahájením akvizice dat by měla být co nejkratší, jelikož je nutné absolvovat vyšetření ideálně v rozmezí 40-60 minut od nitrožilního podání ¹⁸FLT za účelem zachycení pronikání nekonjugovaného ¹⁸FLT poškozenou hematoencefalickou bariérou. Pozdní fáze vyšetření nezvyšuje detekční schopnosti tkání se zvýšenou proliferativní aktivitou u primárně diagnostikovaných mozkových nádorů, ale může značně ovlivnit akumulaci ¹⁸FLT v rámci reparačních procesů gliózy (zmnožení buněk glie, především astrocytů) (Ferda, 2017, s. 11-12).

Hodnotí se kinetika radiofarmaka, z toho důvodu se dynamická akvizice zahajuje po aplikaci tohoto radiofarmaka a doba akvizice činí cca 60 minut (popřípadě i déle). Po dokončení vyšetření jsou obrazy rekonstruovány iterativní rekonstrukcí PET dat. Jednotlivé parametry jsou nastaveny tak, aby splňovaly jednotlivé doporučení výrobce kamery a obecně doporučené postupy (MZČR, 2016, s. 326).

Efektivní dávku CT lze vypočítat s pomocí normalizovaných hodnot a odhad efektivní dávky a dávky v orgánu s nejvyšší absorbovanou dávkou (u PET/CT-¹⁸FLT jsou tímto orgánem játra) lze provést na základě vynásobení daných hodnot (játra – 0,048 mGy/MBq, efektivní dávka 0,015 mSv/MBq) aktivitou radiofarmaka, které bylo pacientovi aplikováno (podle váhy pacienta cca 100-300 MBq) (MZČR, 2016, s. 327).

Pokud se vyšetření provádí zároveň s chemoterapií nebo dokonce v krátké době po chemoterapii či radioterapii, dbáme zvýšené pozornosti při hodnocení, protože může dojít k chybné interpretaci nálezu. Pokud je dostupné aktuální MR vyšetření, je na místě provést fúzi PET/MRI (MZČR, 2016, s. 327). Co se týká recidivy nádoru, zobrazuje se jako ložisko se zvýšenou akumulací radiofarmaka ¹⁸FLT (Doležal, 2017, s. 180). U semikvantitativního hodnocení vyšetření lze použít výpočet SUV (standartized uptake volume), který má význam při hodnocení změn během terapie pacienta, či podpůrný význam v rámci diferenciální diagnostiky lézí (MZČR, 2016, s. 326).

Závěr

Cílem této přehledové bakalářské práce byla rešeršní činnost a následná sumarizace dostupných informací týkajících vyšetření centrální nervové soustavy v nukleární medicíně. Tohoto cíle bylo dosaženo dohledáním jednotlivých článků, studií a publikací.

Prováděním radionuklidových vyšetření mozku získáváme informace o funkci a metabolismu mozku, na rozdíl od ostatních zobrazovacích postupů, které poskytují zejména anatomické informace. Nedílnou součástí jsou dnes v zobrazovací diagnostice hybridní přístroje, díky kterým se nabízí fúze obrazů dvou různých zobrazovacích modalit. Jedná se o kombinaci nukleárně medicínských a radiologických metod.

V této bakalářské práci jsou u každého z jednotlivých vyšetření popsány indikace, charakteristika použitého radiofarmaka, příprava pacienta, provedení samotného vyšetření včetně akvizičních parametrů, radiační zátěž pacienta a v poslední řadě je uveden popis postupu hodnocení vyšetření či interpretace potencionálních nálezů. U vybraných vyšetření se vyskytuje i zmínka o premedikaci, která je v některých případech nevyhnutelná. Dále jsou zde uvedena doporučení, které léky je vhodné před vyšetřením vysadit nebo které potraviny či nápoje by mohly zkreslit výsledky vyšetření, a v tom případě je není vhodné nějaký čas před vyšetřením konzumovat.

Pacientovi je na klinice nukleární medicíny v rámci vyšetření aplikováno radiofarmakum, z toho důvodu se nukleární medicína vyznačuje přísným dodržováním radiační ochrany. U vyšetření je v částech zabývajících se radiační zátěží pacienta uvedena efektivní dávka (z CT či aplikovaného radiofarmaka) a výčet orgánů, které jsou absorbovanou dávkou nejvíce zatíženy (kritické orgány).

Při tvorbě přehledové práce bylo čerpáno z českých i zahraničních článků. Každá země, dokonce každá nemocnice, má své vlastní standardy, které se mohou v jednotlivých parametrech a průběhu vyšetření lišit. Všechna důležitá akviziční data a parametry uvedené v této přehledové práci jednotně vychází z národních radiologických standardů pro nukleární medicínu vydaných Ministerstvem zdravotnictví ČR ve spolupráci se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost.

Co se týká vývoje zobrazovacích metod v neurologii, můžeme v budoucnu očekávat další řadu zlepšení technické kvality zobrazovacích systémů, zvýšení jejich dostupnosti pro rutinní diagnostiku v neurovědách a vývoj nových programů, které budou stále spolehlivější v rámci hodnocení distribuce radiofarmak v mozku.

Referenční seznam

ACKER, Güliz, Catharina LANGE, Imke SCHATKA, Andreas PFEIFER, Marcus A. CZABANKA, Peter VAJKOCZY a Ralph BUCHERT. Brain Perfusion Imaging Under Acetazolamide Challenge for Detection of Impaired Cerebrovascular Reserve Capacity: Positive Findings with 15 O-Water PET in Patients with Negative 99m Tc-HMPAO SPECT Findings. *Journal of Nuclear Medicine* [online]. 2018, **59**(2), 294-298 [cit. 2021-12-12]. ISSN 0161-5505. Dostupné z: <https://jnm.snmjournals.org/content/59/2/294.long>

ALMUHAIDEB, Ahmad, Nikolaos PAPATHANASIOU a Jamshed BOMANJI. 18 F-FDG PET/CT Imaging In Oncology. *Annals of Saudi Medicine* [online]. 2011, **31**(1), 3-13 [cit. 2022-01-26]. ISSN 0256-4947. Dostupné z: <https://www.ansaudimed.net/doi/full/10.4103/0256-4947.75771>

BRÁZDIL, Milan. Funkční zobrazovací metody v neurologii a neurochirurgii. *Neurologia pre prax*. Bratislava: SOLEN, 2014, **15**(1), 7. ISSN 1335-9592. Dostupné z: https://www.solen.cz/artkey/neu-201401-0002_Funkcni_zobrazovaci_metody_v_neurologii_a_neurochirurgii.php

DOLEŽAL, Jiří a Eva KRČÁLOVÁ. Radionuklidová vyšetření CNS. *Česká radiologie*. 2019, **73**(3), 177-182. ISSN 1210-7883. Dostupné také z: <http://www.cesradiol.cz/vydanacisla.php>

DOLEŽALOVÁ, Irena, Karol BOLČÁK a Robert KUBA. Využití pozitronové emisní tomografie (PET) v neurologii. *Neurologia pre prax*. Bratislava: SOLEN, 2014, **15**(1), 13-18. ISSN 1335-9592. Dostupné z: <https://www.solen.sk/casopisy/neurologia-pre-prax/vyuziti-pozitronove-emisni-tomografie-pet-v-neurologii>

EHMAN, Eric C., Geoffrey B. JOHNSON, Javier E. VILLANUEVA-MEYER, Soonmee CHA, Andrew Palmera LEYNES, Peder Eric Zufall LARSON a Thomas A. HOPE. PET/MRI: Where might it replace PET/CT?. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*

[online]. 2017, **46**(5), 1247-1262 [cit. 2022-02-10]. ISSN 10531807. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jmri.25711>

FERDA, Jiří, Eva FERDOVÁ, Ondřej HES, Jan MRAČEK, Boris KREUZBERG a Jan BAXA. PET/MRI: Multiparametric imaging of brain tumors. *European Journal of Radiology* [online]. 2017, **94**, A14-A25 [cit. 2022-01-30]. ISSN 0720048X. Dostupné z: [https://www.ejradiology.com/article/S0720-048X\(17\)30086-4/fulltext](https://www.ejradiology.com/article/S0720-048X(17)30086-4/fulltext)

ISRAEL, Ora, O. PELLET, L. BIASSONI, et al. Two decades of SPECT/CT – the coming of age of a technology: An updated review of literature evidence. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging* [online]. 2019, **46**(10), 1990-2012 [cit. 2022-02-10]. ISSN 1619-7070. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6667427/>

JADVAR, Hossein a Patrick M. COLLETTI. Competitive advantage of PET/MRI. *European Journal of Radiology* [online]. 2014, **83**(1), 84-94 [cit. 2021-12-12]. ISSN 0720048X. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3800216/>

KATO, Takashi, Yoshitaka INUI, Akinori NAKAMURA a Kengo ITO. Brain fluorodeoxyglucose (FDG) PET in dementia. *Ageing Research Reviews* [online]. 2016, **30**(1), 73-84 [cit. 2022-01-26]. ISSN 15681637. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568163716300113?via%3Dihub>

KORANDA, Pavel. *Nukleární medicína*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4031-6.

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.

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.

KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína: [učební text]*. [Praha]: P3K, 2007. ISBN 9788090358492

MARUSIČ, Petr, Kateřina ZÁRUBOVÁ a Aleš TOMEK. Klinické využití SPECT v neurologii. *Neurologia pre prax*. Bratislava: SOLEN, 2014, **15**(1), 19-22. ISSN 1335-9592. Dostupné z: https://www.neurologiepropraxi.cz/artkey/neu-201401-0005_Klinicke_vyuziti_SPECT_v_neurologii.php

MZČR. 2016. Věstník MZ ČR. Praha, 364 s. Dostupné z: <https://www.mzcr.cz/vestnik/vestnik-c-2-2016/>

PAIL, Martin. Multimodální přístup k funkčnímu zobrazení mozku. *Neurologia pre prax*. Bratislava: SOLEN, 2014, **15**(1), 23-26. ISSN 1335-9592. Dostupné z: https://www.neurologiepropraxi.cz/artkey/neu-201401-0006_Multimodalni_pristup_k_funkcnimu_zobrazeni_mozku.php

PIMLOTT, Sally L. a Andrew SUTHERLAND. Molecular tracers for the PET and SPECT imaging of disease. *Chem. Soc. Rev* [online]. 2011, **40**(1), 149-162 [cit. 2021-11-14]. ISSN 0306-0012. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/CS/B922628C>

QUINN, Brian, Zak DAUER, Neeta PANDIT-TASKAR, Heiko SCHODER a Lawrence T. DAUER. Radiation dosimetry of 18F-FDG PET/CT: incorporating exam-specific parameters in dose estimates. *BMC Medical Imaging* [online]. 2016, **16**(1) [cit. 2022-01-28]. ISSN 1471-2342. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4912712/>

RIZVI, Tanvir, Prem BATCHALA a Sugoto MUKHERJEE. Brain Death: Diagnosis and Imaging Techniques. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI* [online]. 2018, **39**(5), 515-529 [cit. 2022-01-10]. ISSN 08872171. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0887217118300088?via%3Dihub>

SALMON, Eric, Claire BERNARD IR a Roland HUSTINX. Pitfalls and Limitations of PET/CT in Brain Imaging. *Seminars in Nuclear Medicine* [online]. 2015, **45**(6), 541-551 [cit. 2022-01-28]. ISSN 00012998. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001299815000537?via%3Dihub>

SEIDL, Zdeněk. *Radiologie pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4108-6.

SURASI, D. S., P. BHAMBHVANI, J. A. BALDWIN, S. E. ALMODOVAR a J. P. O'MALLEY. 18F-FDG PET and PET/CT Patient Preparation: A Review of the Literature. *Journal of Nuclear Medicine Technology* [online]. 2014, **42**(1), 5-13 [cit. 2022-01-28]. ISSN 0091-4916. Dostupné z: <https://tech.snmjournals.org/content/42/1/5.long>

Seznam zkratek

3D	trojrozměrné zobrazení
AD	Alzheimerova choroba
Bq	becqueler
CNS	centrální nervový systém
CO ₂	oxid uhličitý
CT	počítačová tomografie
CVR	cerebrovaskulární rezerva
DLB	demence s Lewyho tělísky
DNA	deoxyribonukleová kyselina
EDLP	normalizovaná efektivní dávka
EZ	epileptogenní zóna
FDG	fluorodeoxyglukóza
FTD	frontotemporální demence
IPN	Parkinsonova choroba
keV	kiloelektronvolt
LEHR	nízkoenergetický kolimátor s vysokým rozlišením
MBq	megabecquerel
mGy	miligray
MRI	magnetická rezonance
MSA	multisystémová atrofie
mSv	milisievert
PET	pozitronová emisní tomografie
PSP	progresivní supranukleární obrna
rCP	regionální cerebrální perfuze
RNA	ribonukleová kyselina

ROI	technika definované oblasti
SPECT	jednofotonová emisní výpočetní tomografie
VD	vaskulární demence

Seznam příloh

Příloha č. 1: Statická scintigrafie – průkaz mozkové smrti

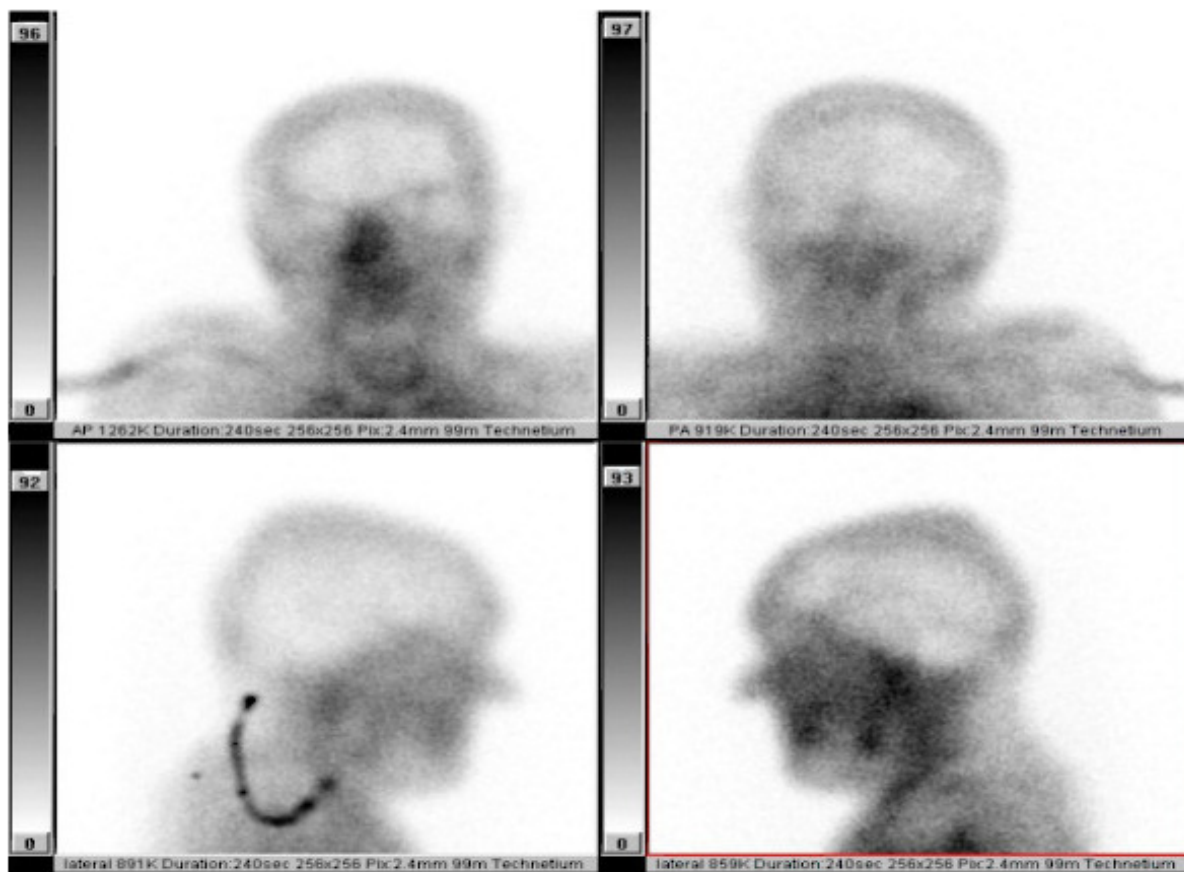
Příloha č. 2: Magnetická rezonance, PET-FLT a jejich fúze

Příloha č. 3: Statická scintigrafie likvorových prostorů

Příloha č. 4: SPECT DaTscan vyšetření

Obrazová příloha

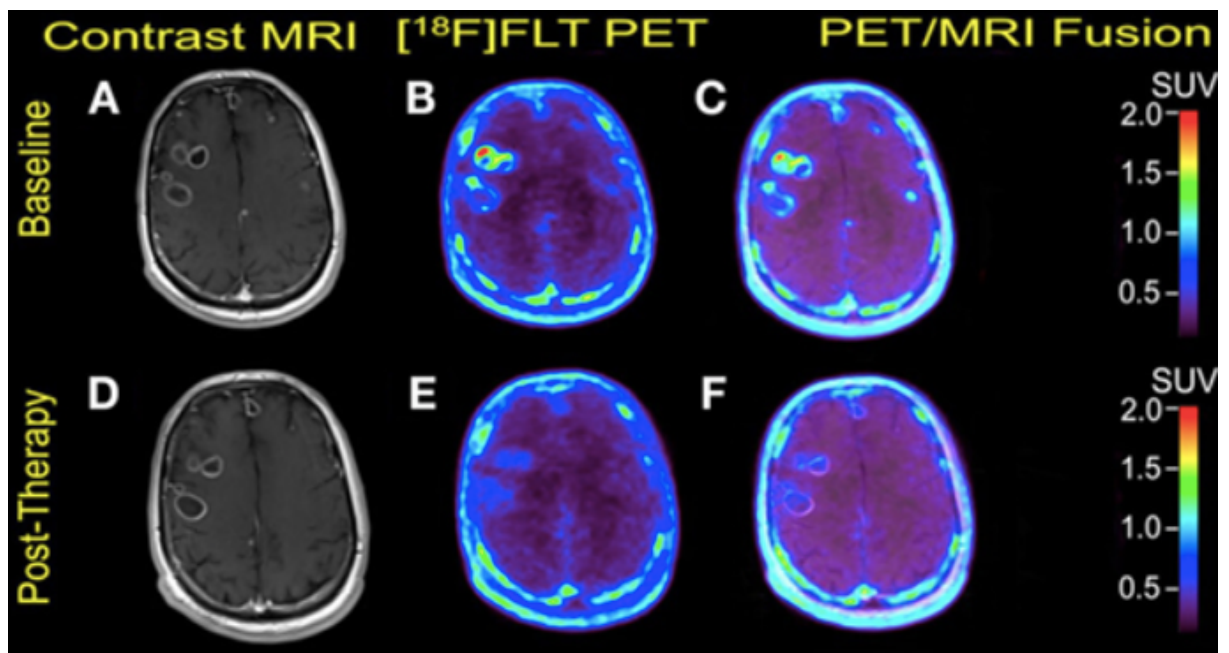
Příloha 1



Obrázek 1: Statická scintigrafie – průkaz mozkové smrti

Zdroj: http://www.kcsolid.cz/zdravotnictvi/klinicka_kapitola/neu/neu-11/neu-11-text.htm

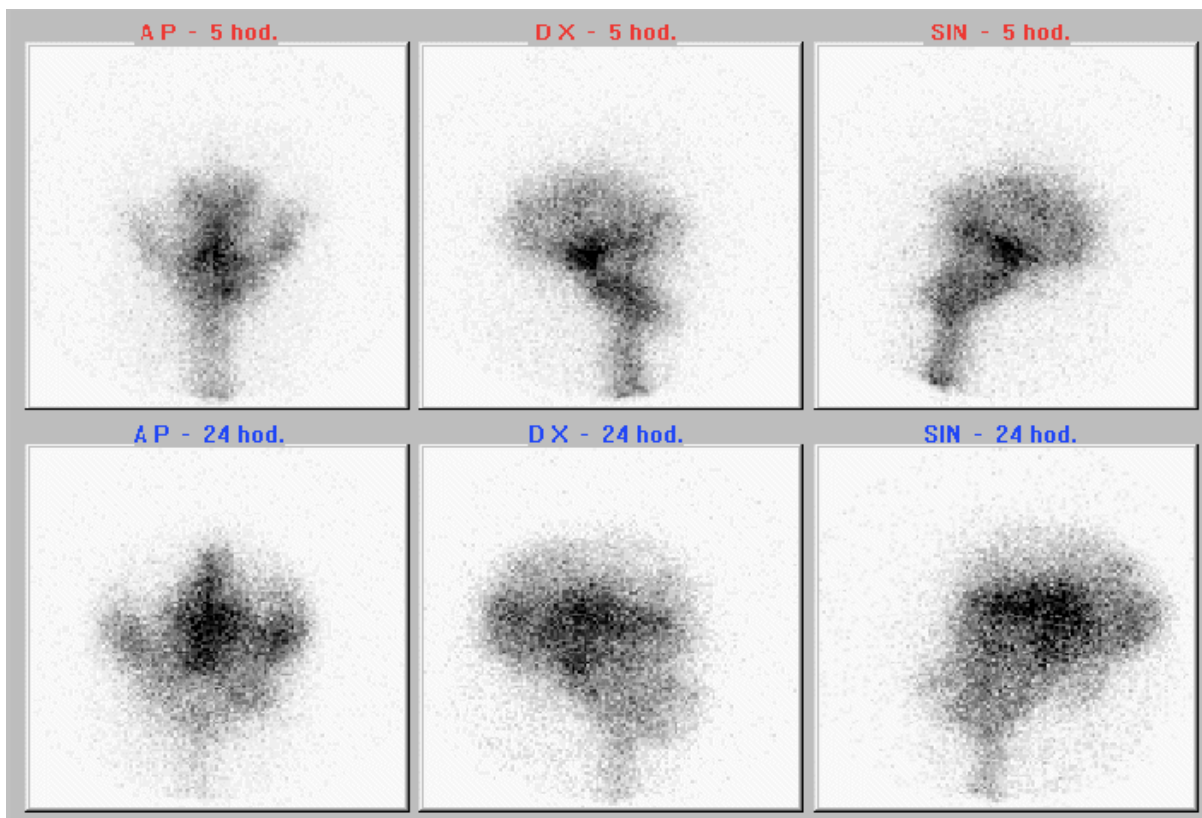
Příloha 2



Obrázek 2: Magnetická rezonance, PET-FLT a jejich fúze. Vyšetření metastáz melanomu do mozku před a po terapii kortikosteroidy a inhibitory BRAF a MEK, s odstupem 3 týdnů mezi vyšetřeními.

Zdroj: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fonc.2018.00018/full>

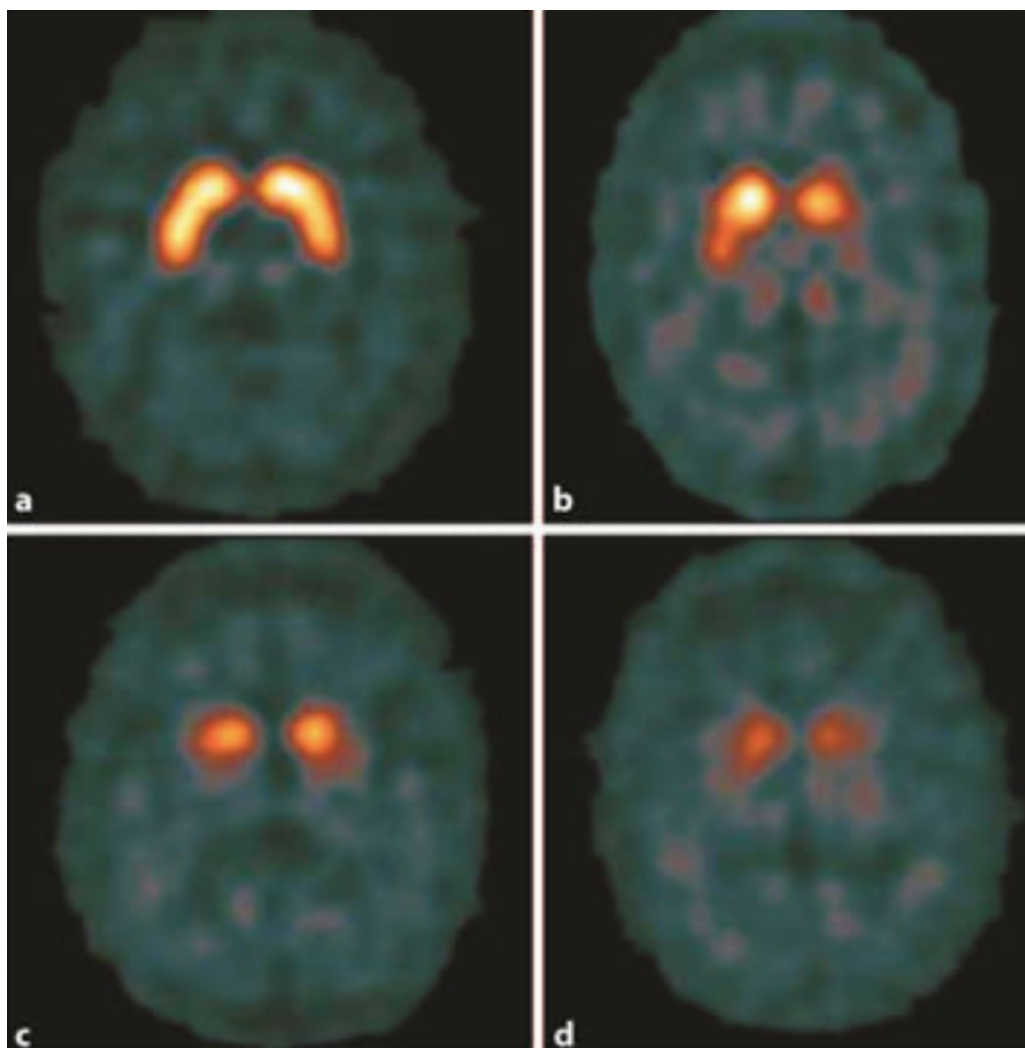
Příloha 3



Obrázek 3: Statická scintigrafie likvorových prostorů

Zdroj: <https://astronuklfyzika.cz/Cister.htm>

Příloha 4



Obrázek 4: SPECT DaTscan vyšetření

Zdroj: https://www.researchgate.net/figure/Normal-and-abnormal-DaTscan-SPECT-images-a-Normal-DaTscan-SPECT-image-b-d-Abnormal_fig2_224932013