

LEVOPRAVÁ ZKRATOVÁ CIRKULACE S PRVNÍMI KLINICKÝMI PŘÍZNAKY V DOSPĚLÉM VĚKU, HODNOCENÍ MAGNETICKOU REZONANCÍ POMOCÍ FÁZOVÉHO KONTRASTU

LEFT-TO-RIGHT SHUNT CIRCULATION WITH FIRST CLINICAL SYMPTOMS IN ADULTHOOD, ASSESSMENT WITH PHASE CONTRAST MAGNETIC RESONANCE

původní práce

Jiří Ferda¹
Josef Vymazal²
Michal Šmíd³
Dagmar Slípková⁴
Jan Baxa¹
Ivo Bernát⁵
Richard Rokyta⁵
Boris Kreuzberg¹

¹Radiodiagnostická klinika LF UK a FN, Plzeň

²Radiodiagnostické oddělení Nemocnice na Homolce, Praha

³Kardiologické oddělení LF UK a FN, Plzeň

⁴Oddělení nukleární medicíny Bory LF UK a FN, Plzeň

⁵I. interní klinika LF UK a FN, Plzeň

Přijato. 15. 8. 2007

Korespondenční adresa:

doc. MUDr. Jiří Ferda, PhD.
Radiodiagnostická klinika LF UK a FN
Alej Svobody 80, 306 40 Plzeň
e-mail: ferda@fnplzen.cz

Práce byla podpořena výzkumnými záměry MSM 0021620817 a MSM 0021620819.

SOUHRN

Ferda J, Vymazal J, Šmíd M, Slípková D, Baxa J, Bernát I, Rokyta R, Kreuzberg B. Levoprávní zkratová cirkulace s prvními klinickými příznaky v dospělém věku, hodnocení magnetickou rezonancí pomocí fázového kontrastu

Cíl. Zhodnotit možnosti kvantifikace zkratové cirkulace magnetickou rezonancí s fázovým kontrastem.

Metoda. Bylo provedeno celkem 11 vyšetření u nemocných s levoprávním zkratem s prvními klinickými projevy vzniklými v dospělosti. Kvantifikace zkratu byla provedena na základě poměru mezi průtokem kmenem plicnice (Q_p) a ascendentní aortou (Q_s) měřené pomocí gradientní sekvence s měřením toku fázovým kontrastem (PC MRI), v jednom případě byl kvantifikován intrakoronární zkrat mezi pravou a levou věnčitou tepnou. V 9 případech bylo možné nález porovnat změřením zkratu pomocí radiocirkulografie.

Výsledky. U pěti nemocných byl identifikován hemodynamicky významný zkrat s poměrem $Q_p/Q_s > 1,5$ pomocí PC MRI i pomocí radiocirkulografie, ostatní zkraty byly shodně označeny jako nevýznamné. U nemocných s intrakoronárním zkratem intrakoronární zkrat z plicnice anomálně odstupující koronární tepnou byl příčinou zátěžové ischemie myokardu levé komory. **Závěr.** Metodu fázového kontrastu s přímým měřením průtoku plicnicí a aortou a nepřímou kalkulací zkratu je možné

SUMMARY

Ferda J, Vymazal J, Šmíd M, Slípková D, Baxa J, Bernát I, Rokyta R, Kreuzberg B. Left-to-right shunt circulation with first clinical symptoms in adulthood, assessment with phase contrast magnetic resonance

Aim. To assess the feasibility of the flow quantification in left-to-right shunts with phase contrast magnetic resonance.

Method. Eleven examinations were performed in patients suffering from the left-to-right shunt with clinical onset of symptoms in adulthood. The shunt flow quantification was based on the ratio between the pulmonary arterial flow (Q_p) and ascending aorta flow (Q_s) measured with phase contrast magnetic resonance imaging (PC MRI). Intracoronary shunt flow quantification was calculated between the right and left coronary arteries. A comparison with the results of the shunt measurements with radiocirculography was possible in 9 cases.

Results. The hemodynamically important shunt flow was identified in five patients with $Q_p/Q_s > 1.5$, both with PC MRI and radiocirculography, the rest of the shunts were assessed as non-significant by both methods. The left ventricle myocardial ischemia was caused by significant intracoronary shunt in one patient with anomalous pulmonary origin of the coronary artery.

Conclusion. PC MRI, as a direct measurement technique of the pulmonary and

v klinické praxi využít k posouzení recirkulujícího plicního průtoku. Měření Qp/Qs fázovým kontrastem při MRI může díky srovnatelným výsledkům plně nahradit radiocirkulografii.

Klíčová slova: levoprávní zkrat, fázový kontrast, magnetická rezonance srdce.

aortic blood flow, and the indirect calculation of the recirculated pulmonary flow, are valuable clinical tools in assessment of the left-to-right shunts. Due to their comparable results, the Qp/Qs PC MRI can completely substitute radiocirculography.

Key words: left-to-right shunt, phase contrast, cardiac magnetic resonance.

ÚVOD

Zkratová cirkulace na úrovni plicního oběhu je důsledkem častěji vrozené nebo vzácněji získané srdeční vady, která má za následek recirkulaci okysličené krve v plicním oběhu. Objem cirkulující krve v plicním oběhu pak přesahuje objem krve cirkulující v oběhu systémovém. Přestože vhodnějším označením je alternativní termín vycházející z anglosaského názvosloví – recirkulující plicní průtok – recirculated pulmonary flow (RPF), vžitým a v písemnictví českém i světovém je převažujícím termínem levoprávní zkrat (angl. left-to-right shunt).

Za fyziologických okolností je levoprávní (L/P) zkrat tvořen přímými výstěny bronchiálních tepen do větví plicní tepny, tento zkrat představuje za normálních okolností jen méně než 1 % srdečního výdeje a nemá vliv na celkovou globální cirkulaci. K patologické plicní recirkulaci vrozené dochází u srdečních vad s nitrosrdeční komunikací, jako jsou defekty septa síní i komor, a dále u vrozených vad typu perzistující tepenné dučeje, parciálního anomálního návratu plicních žil a také u anomálního odstupu jedné z větví tepen z plicnice (1, 2).

Nejčastěji v dospělosti zjištěnou vrozenou srdeční vadou je defekt septa síní, kolem 75 % všech defektů septa síní tvoří typ ostium secundum (ASD-II) tvořený otvorem ve střední části atriálního septa, typ ostium primum (ASD-I) je lokalizovaný v přední části přepážky tvoří cca 15 % defektů síňové přepážky. Nejméně častým typem je v 10 % defekt septa síní tvořený otvorem v blízkosti vena cava inferior (VCI) nazývaný defekt typu sinus venosus (ASD-SV) často spojený s parciálním anomálním návratem plicních žil (PAVR – partial anomalous venous return). U nemocných s defekty septa síní je typický pozdní vznik symptomů s počátky kolem 40. roku života (1). Patří k nim námahová dušnost, síňové arytmie, paradoxní embolizace. Vada se může komplikovat Eisenmengerovým syndromem, kdy zvýšený tlak v pravostřanných srdečních oddílech převyšuje tlak vlevo a zkrat se změní z levoprávního na pravolevý (1).

Získanými vadami vedoucími k L/P zkratu mohou být defekty septa síní či komory vzniklé po penetrujícím traumatu či po ischemické nekróze septa komor. Patologická recirkulace v plicním řečišti vede u vysokoprůtokových zkratů k objemovému přetížení pravé srdeční komory s možným následným vznikem hyperkinetické plicní hypertenze s přestavbou plicního kapilárního řečiště. Okysličená krev cirkulující v systémovém řečišti je normální.

Při rozhodování o terapii levoprávních zkratů je zásadním kritériem podíl mezi průtokem systémovým a plicním řečištěm, který kvantifikuje L/P zkrat. Tradičními metodami ke kvantifikaci L/P zkratu jsou invazivní metody oxymetrické a diluční indikátorové využívající srdeční katetrizace (3). Neinvazivní indikátorové diluční metody jsou metody nukleární medicíny nazývané radiocirkulografie nebo radionuklidová angiokardiografie s použitím indikátoru značeného techneciem ^{99m}Tc (agregovaného albuminu, erytrocytů nebo chelátu technecia) (4, 5). Echokardiografie s aplikací echoktrastních látek je vysoce spolehlivá metoda k určení pravolevých zkratů, při L/P zkratu je však detekce často problematická (6).

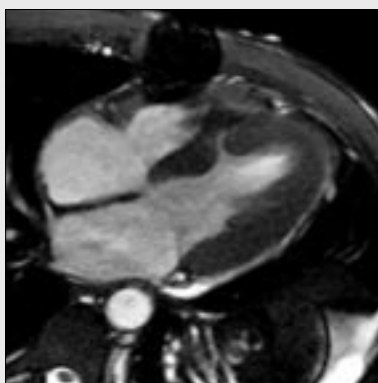
Možnosti zobrazení proudící tekutiny pomocí fázového kontrastu při vyšetření magnetickou rezonancí nabízí v současné době alternativní metodu ke znázornění i kvantifikaci zkratových vad. Při zobrazení fázovým kontrastem s kódováním rychlosti (velocity encoded images) nese každý z voxelu informaci o rychlosti a směru proudění, signální intenzita je pak přímo úměrná rychlosti. Pomocí stanovení průměrné rychlosti v průřezu cévy a stanovením plochy průřezu je možné stanovit průtok cévou v ml/s, zohledněním srdeční frekvence i minutový průtok cévou v ml/min (7–11).

Cílem práce je zhodnotit vlastní zkušenosti s kvantifikací L/P zkratu metodou fázového kontrastu při vyšetření magnetickou rezonancí, porovnat výsledky s hodnocením zkratu pomocí radiocirkulografie a posoudit přínos metody u jednotlivých typů levoprávních zkratů prvně se manifestujících v dospělém věku.

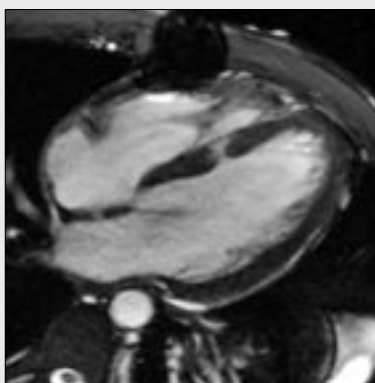
MATERIÁL A METODA

Soubor nemocných

V průběhu 24 měsíců bylo provedeno celkem 11 vyšetření nemocných s L/P zkratem (3 muži, 8 žen, průměrný věk 48,6 let, rozpětí 20–68 let) pomocí magnetické rezonance. U všech nemocných se symptomy levoprávního zkratu objevily až v dospělém věku. Vyšetření byla indikována z kardiologického oddělení kvůli posouzení indikace kardiologické operace. U 9 nemocných byla porovnána hodnota zkratu stanovená pomocí MRI a pomocí radiocirkulografie. Byl získán rutinní informovaný souhlas. Pokud byla prokázána vada typu PAVR, byla vždy po provedení MRI doplněna CT-angiografie hrudníku s EKG synchronizací.



▲ Obr. 1A



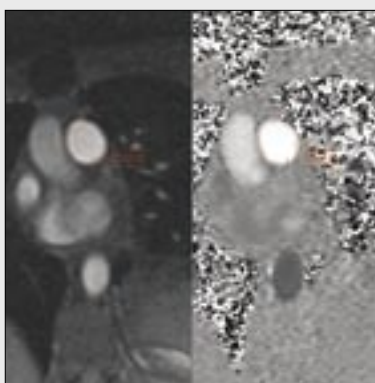
▲ Obr. 1B



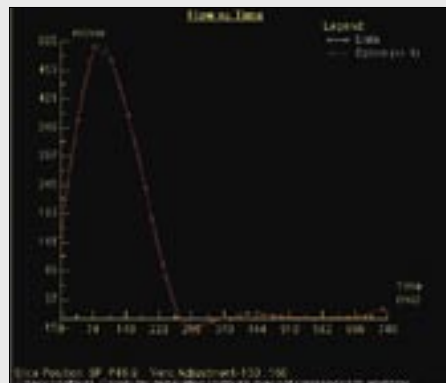
▲ Obr. 1C



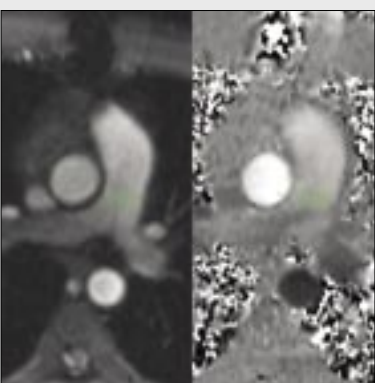
▲ Obr. 1D



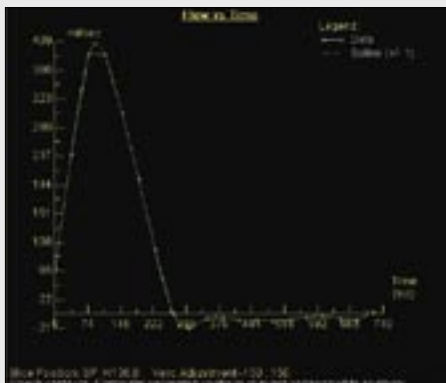
▲ Obr. 1E



▲ Obr. 1F



▲ Obr. 1G



▲ Obr. 1H

Obr. 1. Získaný defekt septa komor po bodném poranění hrudníku s rozvojem levoprávého zkratu charakterizovaného poměrem $Q_p/Q_s = 1,16$

A – trueFISP obraz ve čtyřdutinové projekci v systole; B – trueFISP obraz ve čtyřdutinové projekci v diastole; C – trueFISP obraz v krátké ose v systole; D – trueFISP obraz v krátké ose v diastole; E – through-plane magnitudový a fázový obraz, měření plicního průtoku v kmeni plicnice; F – grafické znázornění křivky průtoku plicnicí; G – through-plane magnitudový a fázový obraz, měření systémového průtoku a ascendentní aortě; H – grafické znázornění křivky průtoku aortou

Fig. 1. Acquired ventricular septal defect after chest stabbing injury with developed left-to-right shunt characterized by $Q_p/Q_s = 1.16$ ratio

A – trueFISP image, four-chamber projection in systole; B – trueFISP image, four-chamber projection in diastole; C – trueFISP image, short axis projection in systole; D – trueFISP image, short axis projection in diastole; E – through-plane magnitude and phase images, measurement of pulmonary flow in pulmonary trunk; F – plot of the pulmonary flow curve; G – through-plane magnitude and phase images, measurement of systemic flow in ascending aorta; H – plot of the systemic flow curve

AKVIZICE DAT

Vyšetření byla prováděna na přístroji Magnetom Avanto 76 × 18 (Siemens, Erlangen, Německo) s použitím šesti-kanálové body phase array cívk. Nejprve bylo provedeno anatomické kinetické zobrazení v čtyřdutinové projekci, v projekci dvouvýtokové, v projekci dvoudutinové pro levo-

stranné oddíly a poté zobrazení celého objemu srdce v rovinách kolmých na interventrikulární septum. Pokud nebylo místo zkratu detekováno, byla použita i zobrazení v rovinách rovnoběžných s čtyřdutinovou projekcí nad a pod její úrovní. K anatomickým kinetickým zobrazením byla použita sekvence koherentního echa – steady state free precession – trueFISP se zpětnou segmentací dat dle synchronizace s EKG. Po lokalizaci zkratu byla provedena zobrazení pomo-

cí fázového kontrastu sekvencí gradientního echa (fast low angle single shot – FLASH) se zobrazením proudu v rovině (in-plane, PC-IP) k přímému zobrazení toku ve zkratu a dále pomocí zobrazení proudu skrze rovinu (through-plane, PC-TP) ke kvantifikaci průtoku, základní interval nastavení zobrazené rychlosti toku byl (-150, +150) cm/s, v případě objevení se aliasingu byly hodnoty upraveny. Globální tok plicním řečištěm byl hodnocen pomocí PC-TP v rovině kolmé na průběh kmene plicnice, globální tok systémovým řečištěm byl hodnocen v rovině kolmé na průběh ascendentní aorty s vědomím, že do kalkulace není zahrnut průtok věnčitými tepnami tvořící za normálních okolností kolem 5 % srdečního výdeje (11–13). V případě, že byly identifikovány anomálně ústící plicní žíly spolu s defektem septa síní typu sinus venosus, byla provedena hodnocení průtoku i v obou dutých žilách, a pokud to bylo možné, i v anomálně ústící žíle. Všechny akvizice dat byly provedeny v jediné apnoe.

Pro hodnocení průtoku krve z PC-TP zobrazení bylo použito modulu Flow programu Argus (Siemens, Erlangen, Německo), stanoven byl vždy minutový průtok plicnicí a aortou a ve čtyřech případech i přímý průtok zkratem.

METODA KALKULACE ZKRATU

Výpočet průtoku zkratovou, plicní a systémovou cirkulací vychází z rovnovážné rovnice:

$$Q_p - Q_l/p = Q_s - Q_p/l,$$

kde Q_p je celkový průtok plicním řečištěm, Q_l/p je průtok levoprávním zkratem, Q_s je celkový průtok systémovým řečištěm a Q_p/l je průtok pravolevním zkratem. K vypočtení poměru mezi průtoky plicním a systémovým oběhem byly použity hodnoty naměřeného minutového průtoku ascendentní aortou a kmenem plicnice (14) a byly porovnány s průtokem měřeným přímo v defektu, pokud to bylo možné. K odhalení bidirekcionálního zkratu u ASD-II byla posouzena pravolevá i levoprávná složka přímým měřením v místě zkratu. U anomálně odstupující koronární tepny z plicnice byl vypočítán poměr mezi průtokem tepnou odstupující z aorty a průtokem tepnou odstupující z plicnice (15, 16).

Jako kontrola správnosti výpočtu byla provedena srovnání kvantifikace zkratu přímým měřením defektu a metodou nepřímou z průtoku aortou a plicnicí u všech vad, pokud přímé měření bylo možné provést. Za významný zkrat bylo považováno dosažení obecně uznávaného poměru recirkulace 1,5 : 1 mezi plicním a systémovým oběhem.

VÝSLEDKY

Výsledky naměřených poměrů mezi plicním a systémovým objemem a jednotlivé příčiny zkratové cirkulace shrnuje tabulka 1.

U celkem 5 nemocných s jednoduchou zkratovou cirkulací (VSD 1×, ASD-II 4×) byl vypočítán poměr mezi systémovým a plicním oběhem a vypočtený průtok se pak shodoval s průtokem zkratem vypočteným z přímého měření průtoku zkratem. V 6 případech nebylo možné přímo měřit průtok zkratem díky komplikovanému anatomickému utváření

Tab. 1. Srovnání anatomické příčiny a poměru Q_p/Q_s měřeného magnetickou rezonancí a metodou nukleární medicíny radiocirkulografií; přítomnost částečného pravolevého zkratu

Tab. 1. Comparison of the morphological cause and Q_p/Q_s ratio measured by magnetic resonance and by method of nuclear medicine – radiocirculography; presence of the partially right-to-left recirculation

Pacient	Věk	Vada	Q_p/Q_s MRI	Q_p/Q_s NM	P/L MRI	P/L NM
muž	25	potraumatický VSD	1,16	1,18	ne	ne
muž	61	VSD + PAVR	1,35	1,32	ne	ne
muž	29	ASD-SS + PAVR	1,44	1,42	ano	ano
žena	53	ASD-SS + PAVR	1,60	1,65	ano	ano
žena	62	ASD-SS + PAVR	1,55	1,58	ano	ano
žena	56	PAVR	1,38	1,35	ne	ne
žena	59	ASD-II	1,50	1,52	ne	ne
žena	66	ASD-II	1,50	1,50	ano	ano
žena	68	ASD-II	1,58	1,62	ano	ano
žena	20	ASD-II	1,42	–	ne	–

Pacient	Věk	Vada	Q_{rca}/Q_{lca} MRI		
žena	36	intrakoronární zkrat	1,74		

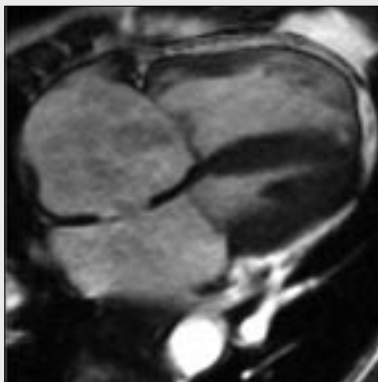
izolovaného PAVR (1×), PAVR kombinovaného s VSD (1×) a PAVR kombinovaného s ASD-SV (3×). U všech vyšetření byla prokázána dobrá shoda s radiocirkulografií s téměř lineárním rozložením regresní korelace zobrazení v grafu 1, všechny čtyři hemodynamicky významné zkraty byly shodně označeny pomocí magnetické rezonance i radiocirkulografie. U všech 5 případů bidirekcionality zkratu bylo dosaženo stejných výsledků mezi MRI a radiocirkulografií.

V jediném případě byl kalkulován zkrat mezi anomálně odstupující levou věnčitou tepnou přímo z kmene plicnice, tato tepna byla analogií ramus interventricularis anterior a mezi pravou věnčitou tepnou, ze které odstupoval ramus circumflexus. Poměr průtoku pravou a levou věnčitou tepnou Q_{rca}/Q_{lca} byl 1,72. Zkratová cirkulace mezi věnčitými tepnami byla příčinou recirkulujícího plicního průtoku, který neměl vliv na globální cirkulaci, avšak byl příčinou bolesti na hrudi s rozvojem zátěží indukované bolesti na hrudi.

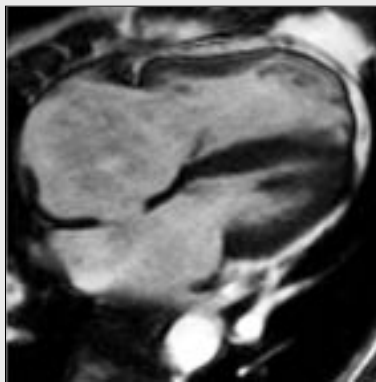
DISKUZE

Kvantifikace průtoku pomocí magnetické rezonance byla umožněna díky objevu fázově kontrastních sekvencí v polovině 80. let minulého století.

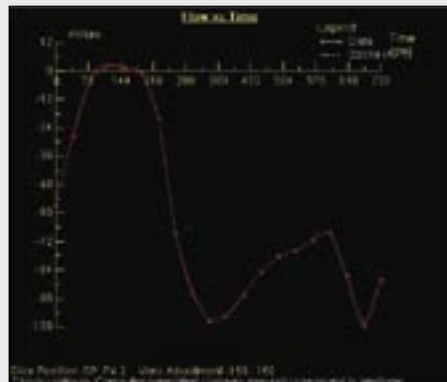
Technika námi používaná jako základní měření, tedy hodnocení průtoku v rovině kolmé na kmen plicní tepny a v rovině kolmé na průběh ascendentní aorty pracuje s vědomou chybou, že do systémového oběhu není započten průtok koronární cirkulací, který však tvoří jen přibližně 5 % srdečního výdeje (11–13). Kalkulace recirkulujícího oběhu z rozdílu mezi systémovým a plicním oběhem je považována Beerebaumem et al. (12) za spolehlivější než přímé měření průtoku přímo v anatomickém místě zkratu. Autoři udávají značnou citlivost metody ke změnám vzájemné polohy roviny měření a zkratového kanálu během srdeční revoluce.



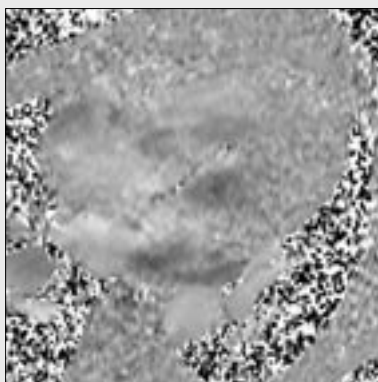
▲ Obr. 2A



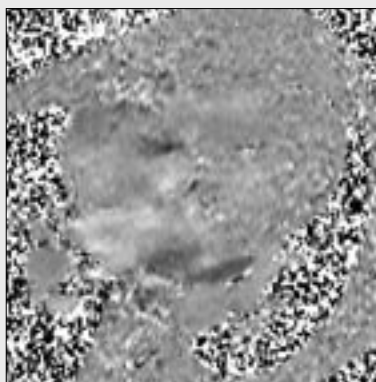
▲ Obr. 2B



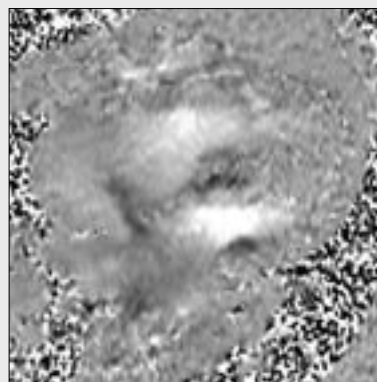
▲ Obr. 2C



▲ Obr. 2D



▲ Obr. 2E



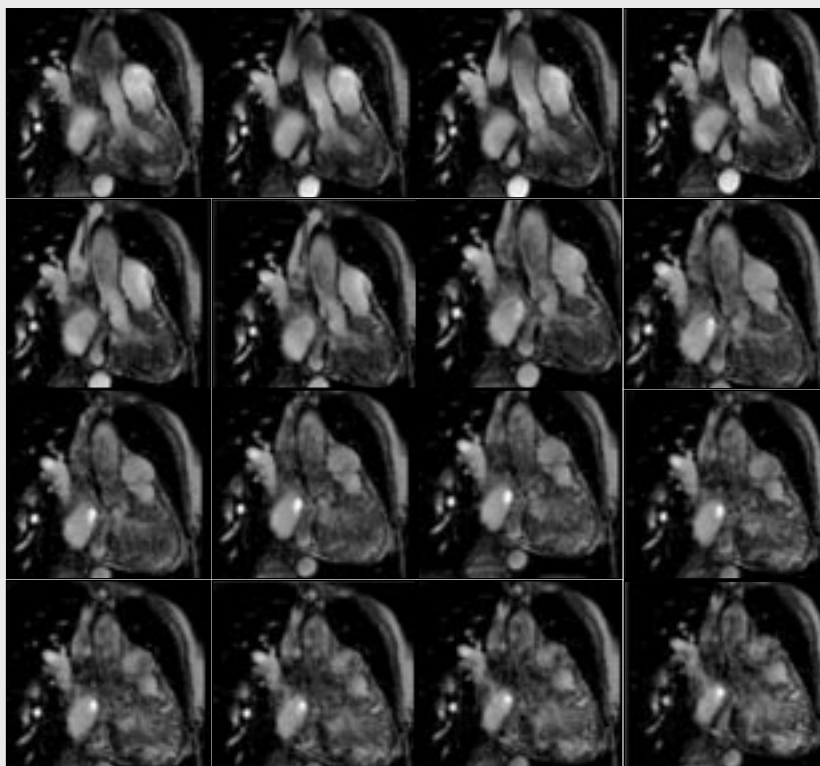
▲ Obr. 2F

Obr. 2. Defekt septa síní typu ostium secundum s bidirekčním, dominantně levo-pravým zkratem charakterizovaným poměrem $Q_p/Q_s = 1,58$

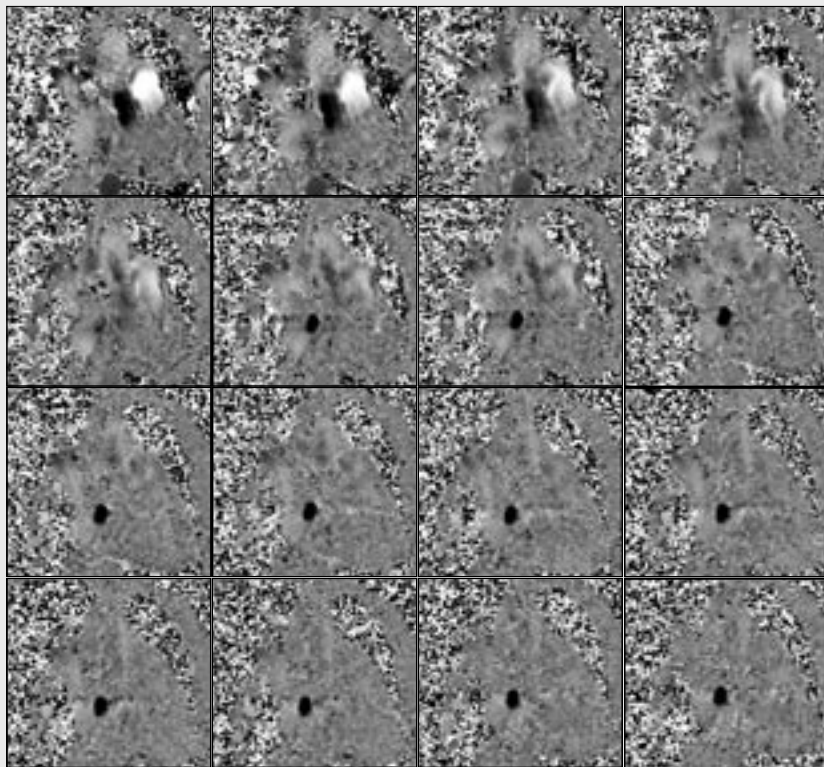
A – trueFISP obraz ve čtyřdutinové projekci v systole; B – trueFISP obraz ve čtyřdutinové projekci v diastole; C – grafické znázornění křivky průtoku zkratem; D–F – in-plane fázové obrazy ve čtyřdutinové projekci v systole, telesystole a diastole; G, H – through-plane magnitudové a fázové zobrazení toku zkratem; I – dynamické zobrazení v průběhu aplikace kontrastní látky ukazuje časný průnik do levé síně při parciálním pravolevém zkratu

Fig. 2. Atrial septal defect, ostium secundum type with bidirectional, mainly left-to-right, shunt characterized by $Q_p/Q_s = 1.58$ ratio

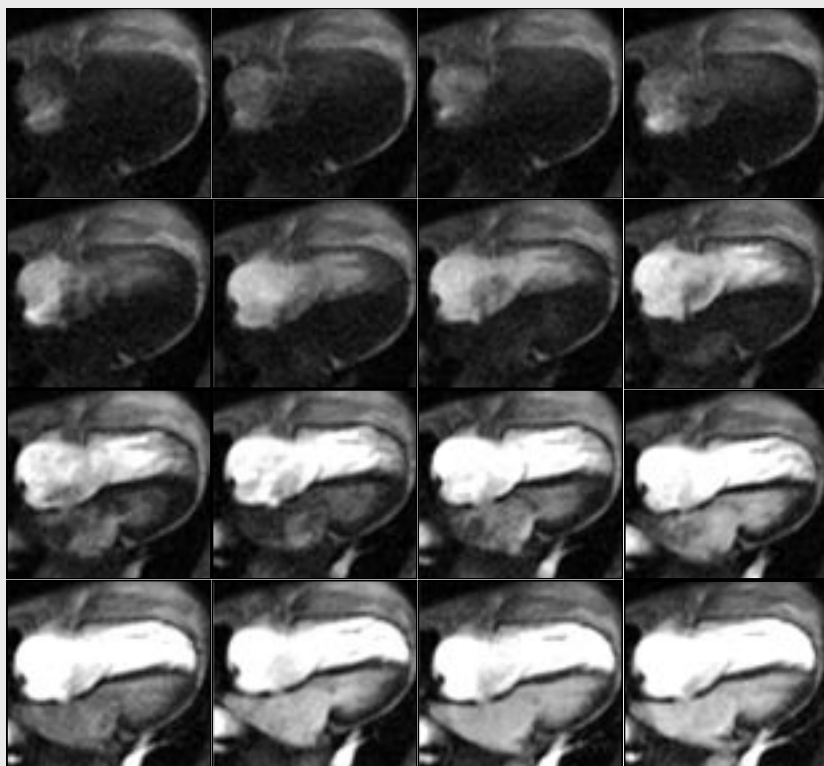
A – trueFISP image, four-chamber projection in systole; B – trueFISP image, four-chamber projection in diastole; C – plot of the flow curve; D–F – in-plane phase images, four-chamber projection in systole, tele systole and diastole; G,H – through-plane magnitude and phase images of the septal defect flow; I – dynamic data acquisition through the contrast agent application



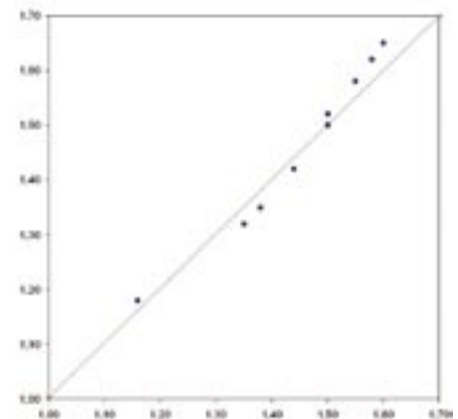
▲ Obr. 2G



▲ Obr. 2H



▲ Obr. 2I

Graf 1: **Porovnání nálezů PC MRI (osa x) a radiocirkulografie (osa y)**Graph 1: **Comparison of the findings measured by PC MRI (x - axis) and radiocirculography (y - axis)**

Na chybách měření se pak projevuje nekonzantní úhel mezi proudem krve a rovinou měření. V našem malém souboru se poměrně dobře shodovalo měření přímo ve zkratu, pokud to bylo možné u ASD-I a u VSD s měřením nepřímou metodou rozdílem v průtoku plicnicí a aortou. U ASD-SS a u PAVR není možné validní měření provést vůbec vzhledem k šikmému a turbulentnímu toku.

Při porovnání kalkulace zkratového objemu pomocí fázového kontrastu a oxymetrie dospěli Beerebaum et al. (12) k výborné shodě v měření mezi oběma metodami a lineárnímu rozložení naměřených hodnot v regresní křivce. Porovnání měření zkratu pomocí fázového kontrastu a radiocirkulografie dochází k podobnému závěru.

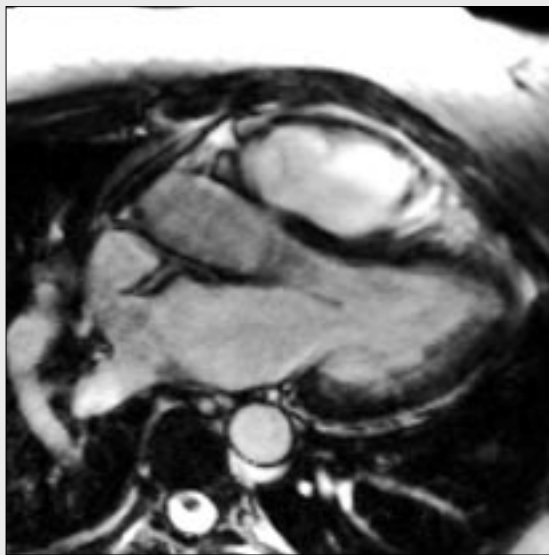
Porovnání minutového srdečního výdeje pravého a levého srdce pomocí objemové kalkulace tepových objemů obou komor z morfologických kinematografických záznamů používali ke srovnání fázového kontrastu a oxymetrie Rebergen et al. (17) a dospěli v souboru 12 dětí k dobré shodě mezi všemi třemi metodami.

Hundley et al. (18) provedli srovnání detekce intrakardiálního zkratu pomocí magnetické rezonance s fázovým kontrastem, inhalace vodíku, etážové oxymetrie a aplikací indokyanové zeleně. V 21členném souboru bylo 12 nemocných s levoprávním zkratem s poměrem Q_p/Q_s menším než 1,5. U zkratů byla pomocí fázového kontrastu správně hodnocena závažnost L/P zkratu.

Nejzásadnějším metodickým problémem měření zkratové cirkulace je přítomnost pravolevého zkratu a určení jeho podílu ve zkratové cirkulaci. Pravo-



▲ Obr. 3A



▲ Obr. 3B

Obr. 3. Částečný anomální návrat plicních žil kombinovaný s defektem septa síní typu sinus venosus, bidirekcionální dominantně levo-pravý zkrat charakterizovaný poměrem $Q_p/Q_s = 1,45$

A – PA snímek hrudníku, plicní hypertenze; B – trueFISP šikmý obraz vtoku plicních žil do horní duté žíly a otevřený vstup do levé síně přes defekt ve venózním sinu; C, D, E – měření plicního průtoku v kmeni plicnice – through-plane fázový obraz, toková křivka a výsledek měření; F, G, H – měření systémového průtoku v ascendentní aortě – through-plane fázový obraz, toková křivka a výsledek měření; I, J, K – měření průtoku horní dutou žilou – through-plane fázový obraz, toková křivka a výsledek měření; L, M, N – měření průtoku dolní dutou žilou – through-plane fázový obraz, toková křivka a výsledek měření

Fig. 3. **Partial venous return combined with atrial septal defect, sinus venosus type, bidirectional, mainly left-to-right shunt characterized by $Q_p/Q_s = 1.45$ ratio**

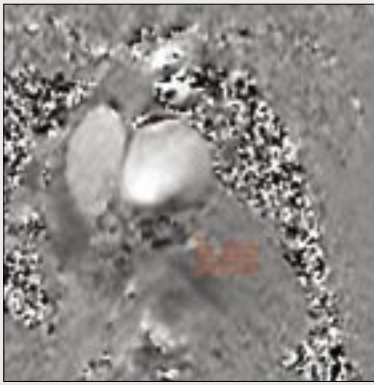
A – PA X-ray image of the chest with pulmonary arterial hypertension; B – trueFISP oblique image, imaging of the pulmonary venous inflow into superior vena cava and opened entry to the left atrium through sinus venosus septal defect; C, D, E – measurement of pulmonary flow in pulmonary trunk – through-plane phase images, plot of the flow curve, table of measurement results; F, G, H – measurement of systemic flow in ascending aorta – through-plane phase images, plot of the flow curve, table of measurement results; I, J, K – measurement of flow in superior vena cava – through-plane phase images, plot of the flow curve, table of measurement results; L, M, N – measurement of flow in inferior vena cava – through-plane phase images, plot of the flow curve, table of measurement results

levý zkrat vzniká postupným převýšením tlaku v pravostranných oddílech při plicní hypertenzi u tzv. Eisenmengerova syndromu nejčastěji u vad typu ASD-II. Pokud jde o izolovaný defekt s jasně definovaným místem zkratu, je možné měřením v této rovině zhodnotit i pravolevou složku (11, 12). Zkrat při ASD-SS spojený s parciálním anomálním návratem je mnohem složitějším problémem, protože buď VCS často nasedá nad defekt septa ve venózním sinu a proud krve z ní přitékající se velmi často dělí na větší část proudu směřující do pravé síně a menší směřující do síně levé. Tuto skutečnost dle našich zkušeností je obtížné zachytit pomocí zobrazení fázovým kontrastem jak typu PC-IP tak PC-TP, natož ji kvantifikovat. Proud krve směřující do levé síně je možné identifikovat pomocí dopplerovského signálu použitím echokonstrastních látek (6) nebo, jak ukazují naše zkušenosti, je možné tento tok zobrazit i pomocí kinematických obrazů koherentního echa truFISP. U nemocných s ASD-SS jsme při CT s EKG synchronizací zachytili pronikání kontrastní látky přitékající horní dutou žilou do levé síně na vrcholu systoly a vrcholu diastoly. První studie s použitím dynamického zobrazení srdce s aplikací paramagnetické látky u nemocných ASD-II Mohrse et al. (19) ukazuje potenciál i k posuzování pravolevé složky touto metodou.

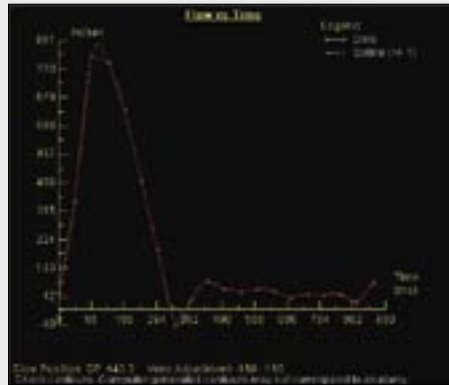
Limitacemi přesnosti měření toku jsou jednak technické problémy, jednak problémy s nekonstantní vzájemnou polohou mezi proudem krve a rovinou měření. Při kalkulaci průtoku oběma velkými tepnami nedochází během srdeční revoluce k podstatnému ovlivnění měření změnou směru toku, a proto není tato metoda k tomuto typu chyby tolik náchylná (20, 21). Pro potenciální chyby měření pomocí fázového kontrastu platí všechny známé problémy. Ztráty signálu vznikají díky disperzi fáze uvnitř jediného voxelu díky pohybovým komponentám vyššího řádu (22). Vířivé proudy jsou elektromagnetickými příčinami rozfázování (22). Chyby měření mohou být zapříčiněny špatným nastavením roviny měření a špatným nastavením gradientu kódujícího směru toku (flow-encoding gradient) (20, 21). Problémem může být i efekt částečného objemu na pomezí statických a tekoucích spinů (21). Chybným nastavením rychlost kódující hodnoty dochází při zvolení příliš nízké hodnoty k pestřelování – aliasingu, nebo naopak při příliš vysokém nastavení kóduvaných rychlostí ke ztrátě signálu (20, 21). Rovněž chyby výše uvedené vzhledem k poměrně velké ploše průřezu, relativně konstantnímu toku aortou a plicnicí mohou být považovány za zanedbatelné (23–25).

Měření intrakoronárního zkratu mezi anomálně z plicnice odstupující přední interventrikulární větví a společně z aorty odstupující pravou věnčitou tepnou s ramus circumflexus jsme použili fázový kontrast jednak k průkazu směru proudění krve směrem do plicnice, jednak bylo možno kalkulovat přímo objem zkratu, který způsoboval steal syndrom v myokardu (15, 16). Přes limitace s malým počtem voxelů použitelným k měření, bylo možné dospět neinvazivním způsobem k průkazu zkratu, který byl potvrzen později katetrizací.

U pacientů s PAVR je nesnadné pomocí nativního zobrazení identifikovat všechny patologicky ústící žíly. Potenciálním ústím je kromě horní duté žíly také v. azygos, jaterní žíly a obě podklíčkové žíly. Aby byla správně zhodnocena anatomie vstupu plicních žil, byla na našem pracovišti volena vždy CT angiografie, která navíc umožnila u celkem 2 ne-



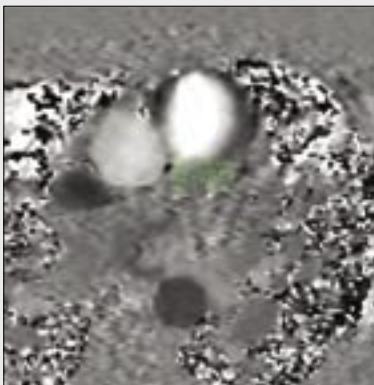
▲ Obr. 3C



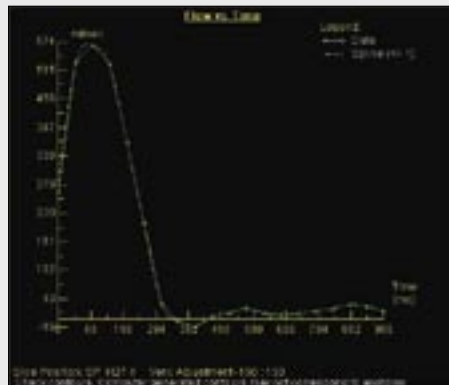
▲ Obr. 3D

Data Position: DP 443.3		Region: 1
Range (mm)	0 to 344	Time Adjustment: -139 (min) 190 (max)
Flow Surface Area (cm ²)	2.20	cm ²
Velocity		
Peak Velocity	78.53	cm/min
Average Velocity	7.88	cm/min
Flow		
Average Flow Over Range	199.19	ml/min
Average Flow Per Minute	13.92	ml/min
Forward Volume	199.73	ml
Reverse Volume	0.553	ml
Net Forward Volume	199.18	ml
Net Forward Volume / CSA	18.78	cm/min
Area		
Average Area	25.23	cm ²
Minimum Area	21.98	cm ²
Maximum Area	28.47	cm ²

▲ Obr. 3E



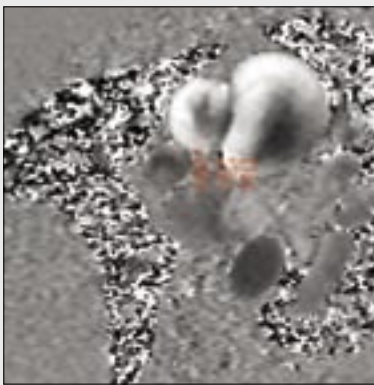
▲ Obr. 3F



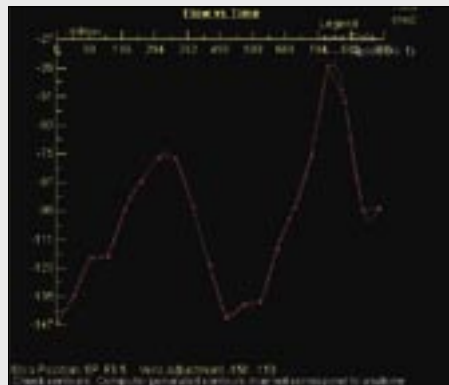
▲ Obr. 3G

Data Position: DP 427.6		Region: 2
Range (mm)	0 to 378	Time Adjustment: -133 (min) 190 (max)
Flow Surface Area (cm ²)	3.29	cm ²
Velocity		
Peak Velocity	113.26	cm/min
Average Velocity	12.11	cm/min
Flow		
Average Flow Over Range	132.74	ml/min
Average Flow Per Minute	7.51	ml/min
Forward Volume	133.08	ml
Reverse Volume	0.025	ml
Net Forward Volume	133.06	ml
Net Forward Volume / CSA	18.41	cm/min
Area		
Average Area	18.13	cm ²
Minimum Area	8.71	cm ²
Maximum Area	13.82	cm ²

▲ Obr. 3H



▲ Obr. 3I



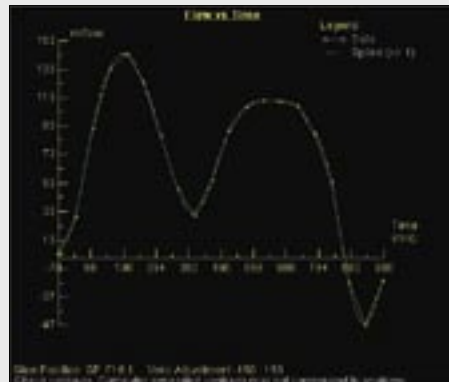
▲ Obr. 3J

Data Position: DP 425.5		Region: 1
Range (mm)	0 to 360	Time Adjustment: -133 (min) 190 (max)
Flow Surface Area (cm ²)	2.23	cm ²
Velocity		
Peak Velocity	-88.83	cm/min
Average Velocity	-26.21	cm/min
Flow		
Average Flow Over Range	-160.48	ml/min
Average Flow Per Minute	-9.25	ml/min
Forward Volume	0.550	ml
Reverse Volume	93.11	ml
Net Forward Volume	-92.56	ml
Net Forward Volume / CSA	-45.73	cm/min
Area		
Average Area	3.89	cm ²
Minimum Area	2.12	cm ²
Maximum Area	4.82	cm ²

▲ Obr. 3K



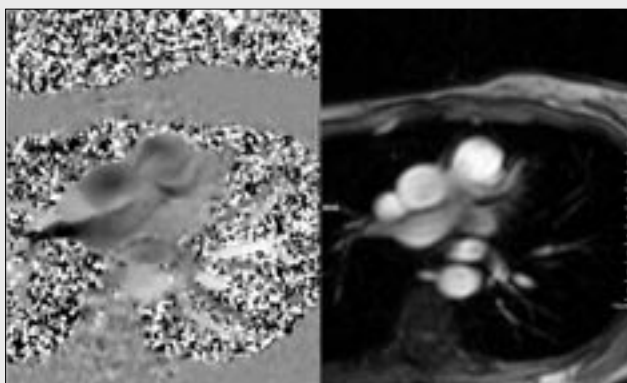
▲ Obr. 3L



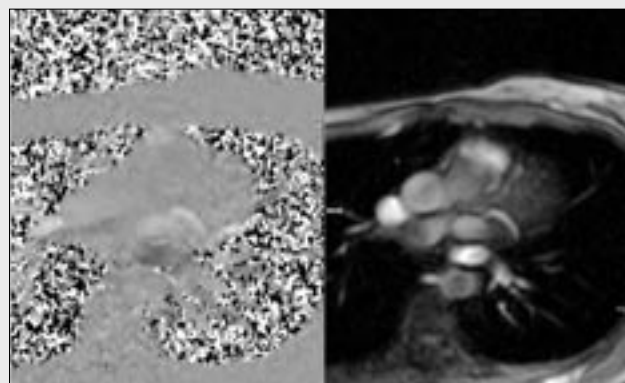
▲ Obr. 3m

Data Position: DP 718.1		Region: 2
Range (mm)	0 to 377	Time Adjustment: -190 (min) 193 (max)
Flow Surface Area (cm ²)	2.26	cm ²
Velocity		
Peak Velocity	23.31	cm/min
Average Velocity	12.83	cm/min
Flow		
Average Flow Over Range	76.89	ml/min
Average Flow Per Minute	4.56	ml/min
Forward Volume	77.23	ml
Reverse Volume	1.36	ml
Net Forward Volume	75.87	ml
Net Forward Volume / CSA	31.41	cm/min
Area		
Average Area	8.98	cm ²
Minimum Area	8.00	cm ²
Maximum Area	9.98	cm ²

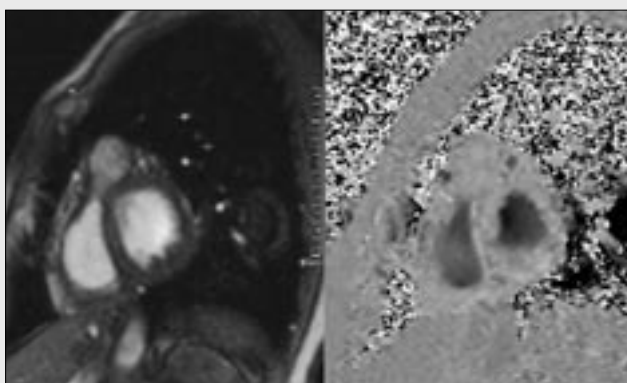
▲ Obr. 3n



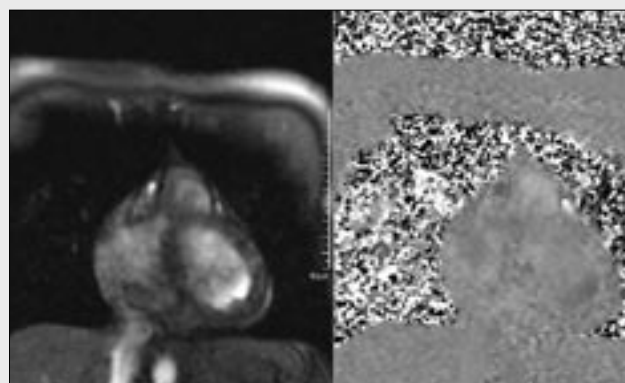
▲ Obr. 4A



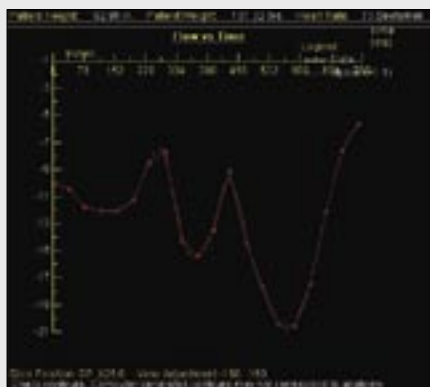
▲ Obr. 4B



▲ Obr. 4C



▲ Obr. 4D



▲ Obr. 4E

Patient Height: 178 cm, Patient Weight: 81.0 kg, Heart Rate: 71 bpm	
Flow Position: DP A14.8	Region: 1
Range (ml): 1 to 303	Area Adjusted: 183 cm² (183 cm²)
Area Surface Area (cm²):	1.81 cm²
Velocity	
Peak Velocity:	44.27 cm/sec
Average Velocity:	19.71 cm/sec
Flow	
Average Flow Over Range:	42.04 ml/sec
Average Flow Per Width:	0.314 ml/cm
Forward Volume:	0.86 ml
Reverse Volume:	0.85 ml
Net Forward Volume:	-0.01 ml
Net Forward Volume (QCA):	4.08 ml/min
Area	
Average Area:	0.881 cm²
Reverse Area:	0.881 cm²
Net Area:	1.76 cm²

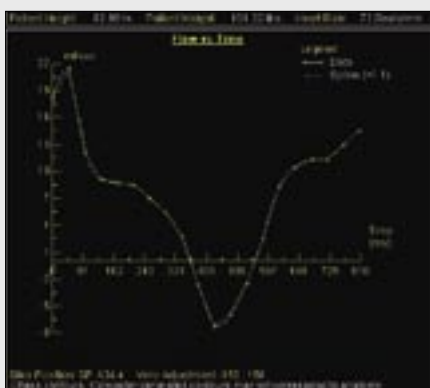
▲ Obr. 4F

Obr. 4. Intrakoronární zkrat, jehož příčinou byl odstup ramus interventricularis anterior (angl. Left anterior descending artery – LAD) z plicnice charakterizovaný poměrem $Q_{lca}/Q_{rca} = 1,74$

A, B – in-plane fázový obraz ukazující odlišný směr toku v r. interventricularis anterior a r. circumflexus (u pacientky větve pravé věnčité tepny) v systole (A) a diastole (B); C – through-plane měření v systole – stejný směr proudu v obou tepnách; D – through-plane měření diastole – opačný směr proudu v obou tepnách; E, F – měření průtoku pravou věnčitou tepnou v oblasti kmene, toková křivka a výsledek měření; G, H – měření průtoku ramus interventricularis anterior, toková křivka a výsledek měření

Fig. 4. Intracoronary left-to-right shunt caused by pulmonary origin of the left anterior descending artery (LAD) characterized by $Q_{lca}/Q_{rca} = 1.74$ ratio

A, B – in-plane phase images in diastole showed different orientation of the systolic (A) and diastolic (B) flow in LAD and circumflex (a branch of the right coronary artery in this patient); C – through-plane systolic measurement in the RCA and LAD – direction of the flow is the same; D – through-plane diastolic measurement in the RCA and LAD – direction of the flow is opposite; E, F – measurement of flow in RCA – plot of the flow curve, table of measurement results; G, H – measurement of flow in LAD – plot of the flow curve, table of measurement results



▲ Obr. 4G

Patient Height: 178 cm, Patient Weight: 81.0 kg, Heart Rate: 71 bpm	
Flow Position: DP A14.8	Region: 2
Range (ml): 1 to 303	Area Adjusted: 183 cm² (183 cm²)
Area Surface Area (cm²):	1.81 cm²
Velocity	
Peak Velocity:	51.34 cm/sec
Average Velocity:	19.55 cm/sec
Flow	
Average Flow Over Range:	0.81 ml/sec
Average Flow Per Width:	0.414 ml/cm
Forward Volume:	0.38 ml
Reverse Volume:	0.722 ml
Net Forward Volume:	-0.34 ml
Net Forward Volume (QCA):	0.81 ml/min
Area	
Average Area:	0.415 cm²
Reverse Area:	0.353 cm²
Net Area:	0.712 cm²

▲ Obr. 4H

mocných jednoznačně prokázat i pravolevou složku zkratu. Alternativou v současné době se stává možnost použití intravaskulární kontrastní látky pro ceMRA celé hrudní oblasti.

ZÁVĚR

Naše zkušenosti ukazují, že je možné metodu fázového kontrastu při magnetické rezonanci využít k posouzení recirkulujícího plicního průtoku. Největším úskalím je problém s detekcí malých defektů septa síní typu sinus venosus kombinovaných s parciálním anomálním návratem plicních žil

a s hodnocením podílu pravolevé recirkulace u této vady. U hodnocení zkratu s jednoduchou anatomii – při defektu septa síní typu ostium secundum a u defektů septa komor – jde o relativně jednoduché vyšetření, které umožňuje posoudit i bidirekcionální zkratovou cirkulaci.

Zkratky:

VSD – defekt septa komor; ASD-II – defekt septa síní typu ostium secundum; ASD-SV – defekt septa síní typu sinus venosus; PAWR – částečný anomální návrat plicních žil; P/L – pravolevý zkrat
Abbreviations:
VSD – ventricular septal defect; ASD-II – atrial septal defect, ostium secundum type; ASD-SV – atrial septal defect, sinus venosus type; PAWR – partial anomalous venous return; P/L – right-to-left recirculation

LITERATURA

1. Fejfar Z, Přerovský I. Klinická fyziologie krevního oběhu. Praha: Galén 2002; 361.
2. Wang JZ, Reddy GP, Gotway MB, Yeh BM, Higgins CB. Cardiovascular shunt: MR imaging evaluation. Radiographics 2003; 23: S181–S194.
3. Hillis LD, Winniford MD, Jackson JA, Firth BG. Measurements of left-to-right intracardiac shunting in adults: oximetric versus indicator dilution techniques. Cathet Cardiovasc Diagn 1985; 11: 467–472.
4. Maltz DL, Treves S. Quantitative radionuclide angiocardiology: determination of Qp:Qs in children. Circulation 1973; 47: 1049–1056.
5. Tian JH, Murray IP, Walker B, et al. First-pass radionuclide angiocardiology in the determination of left-to-right cardiac shunt site in children. Cathet Cardiovasc Diagn 1982; 8(5): 459–467.
6. Rees AH, Rao PS, Rigby JJ, Miller MD. Echocardiographic estimation of a left-to-right shunt in isolated ventricular septal defects. Eur J Cardiol 1978; 7(1): 25–33.
7. O'Donnell M. NMR blood flow imaging using multiecho, phase contrast sequences. Med Phys 1985; 12(1): 59–64.
8. Walker MF, Souza SP, Dumoulin CL. Quantitative flow measurement in phase contrast MR angiography. J Comput Assist Tomogr 1988; 12(2): 304–313.
9. Boesiger P, Maier SE, Kecheng L, Scheidegger MB, Meier D. Visualization and quantification of the human blood flow by magnetic resonance imaging. J Biomech 1992; 25: 55–67.
10. Sechtem U, Pflugfelder P, Cassidy MC, et al. Ventricular septal defect: visualization of shunt flow and determination of shunt size by cine MR imaging. Am J Radiol 1987; 149: 689–692.
11. Brenner LD, Caputo GR, Mostbeck G, et al. Quantification of left to right atrial shunts with velocity-encoded cine nuclear magnetic resonance imaging. J Am Coll Cardiol 1992; 20: 1246–1250.
12. Beerbaum P, Korperich H, Barth P, et al. Noninvasive quantification of left-to-right shunt in pediatric patients: phase-contrast cine magnetic resonance imaging compared with invasive oximetry. Circulation 2001; 103(20): 2476–2482.
13. Ley S, Ley-Zaporozhan J, Kreitner KF, et al. MR flow measurements for assessment of the pulmonary, systemic and bronchoscopic circulation: impact of different ECG gating methods and breathing schema. Eur J Radiol 2007; 61(1): 124–129.
14. Kveder M, Bajzer Z, Nosil J. A mathematical model for the quantitative study of left to right cardiac shunt. Phys Med Biol 1985; 30(3): 207–215.
15. Clarke GD, Eckels R, Chaney C, et al. Measurement of absolute epicardial coronary artery flow and flow reserve with breath-hold cine phase-contrast magnetic resonance imaging. Circulation 1995; 91(10): 2627–2634.
16. Bermudez GA, Abdelnur R, Midell AI, Replogle R. Anomalous origin of the right coronary artery from the pulmonary artery with large left-to-right shunt (anomalous right coronary artery). Cathet Cardiovasc Diagn 1979; 5(4): 371–384.
17. Rebergen SA, van der Wall EE, Helbing WA, et al. Quantification of the pulmonary and systemic blood flow by magnetic resonance velocity mapping in the assessment of the atrial-level shunts. Int J Card Imaging 1996; 12: 143–152.
18. Hundley WG, Li HF, Lange RA, et al. Assessment of left-to-right intracardiac shunting by velocity-encoded, phase difference magnetic resonance imaging. A comparison with oximetric and indicator dilution techniques. Circulation 1995; 91: 2955–2960.
19. Mohrs OK, Petersen SE, Erkapic D, et al. Diagnosis of patent foramen ovale usány kontrast-enhanced dynamic MRI: A pilot study. AJR 2005; 184: 234–240.
20. Greil G, Geva T, Maier SE. Effect of acquisition parameters on the accuracy of velocity encoded cine magnetic resonance imaging blood flow measurements. J Magn Reson Imaging 2002; 15: 420–437.
21. Laffon E, Valli N, Latrabe V, et al. A validation of a flow quantification by MR phase mapping software. Eur J Radiol 1998; 27(2): 166–172.
22. Wolf RL, Hangianreou NJ, Felmlee JP. Error in MR volumetric flow measurements due to ordered phase encoding in the presence of flow varying with respiration. Magn Reson Med 1995; 34: 470–475.
23. Beerbaum P, Korperich H, Gieseke J, et al. Rapid left-to-right shunt quantification in children by phase-contrast magnetic resonance imaging combined with sensitivity encoding (SENSE). Circulation 2003; 108(11): 1355–1361.
24. Beerbaum P, Korperich H, Gieseke J, et al. Blood flow quantification in adults by phase-contrast MRI combined with SENSE – a validation study. J Cardiovasc Magn Reson 2005; 7(2): 361–369.
25. Gatehouse PD, Keegan J, Crowe LA, et al. Applications of phase-contrast flow and velocity imaging in cardiovascular MRI. Eur Radiol 2005; 15(10): 2172–2184.