



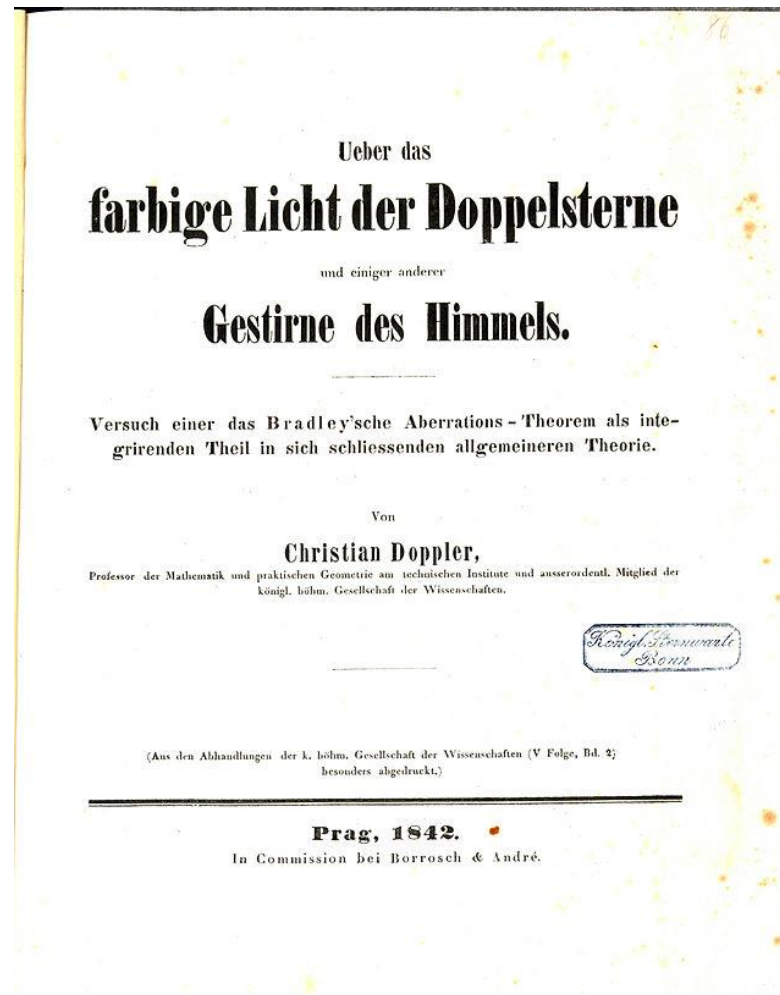
Dopplerovská echokardiografie - principy, limitace, normální hodnoty

Tomáš Paleček

II. interní klinika kardiologie a angiologie, 1. LF UK a VFN, Praha
ICRC, Brno



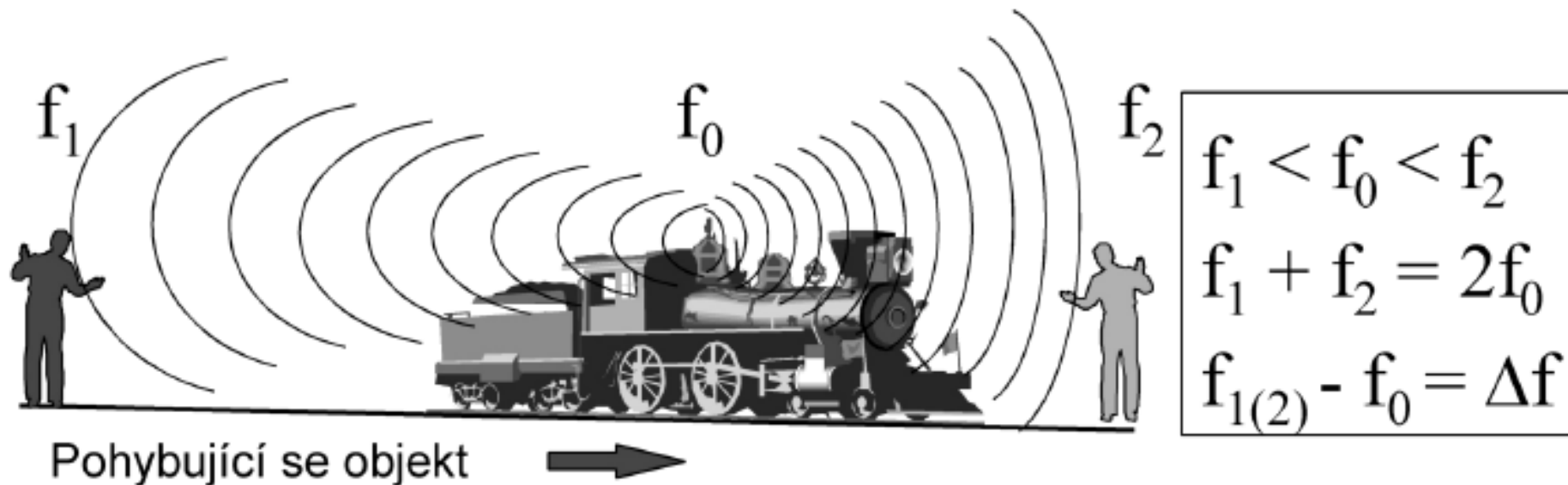
Christian Doppler
1803-1853



„O barevném světle dvojhvězd
a některých dalších hvězd na nebi“

Dopplerův jev

~ frekvence jakéhokoli vlnění se mění,
pohybuje-li se jeho zdroj vůči pozorovateli či naopak



Δf = Dopplerovský posun, frekvence

Dopplerův jev - echokardiografie

stacionární vysílač UZ vlnění (f_0)

odražený signál od erytrocytů:

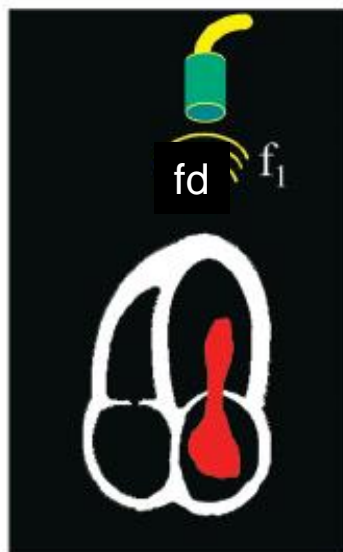
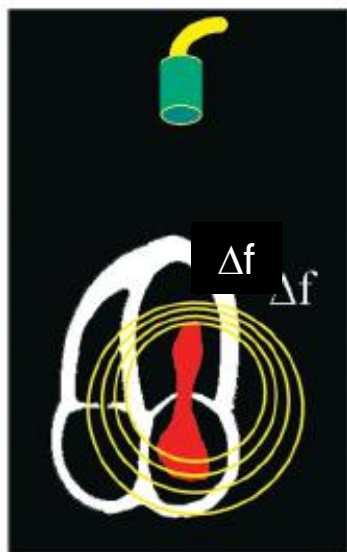
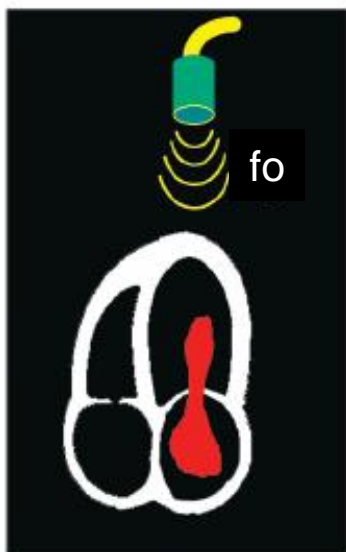
- pohyb směrem k sondě: $f_1 > f_0$

- pohyb od sondy: $f_1 < f_0$

Vysílaná
frekvence

Odraz od pohybujících
se erytrocytů

Přijímaná
frekvence

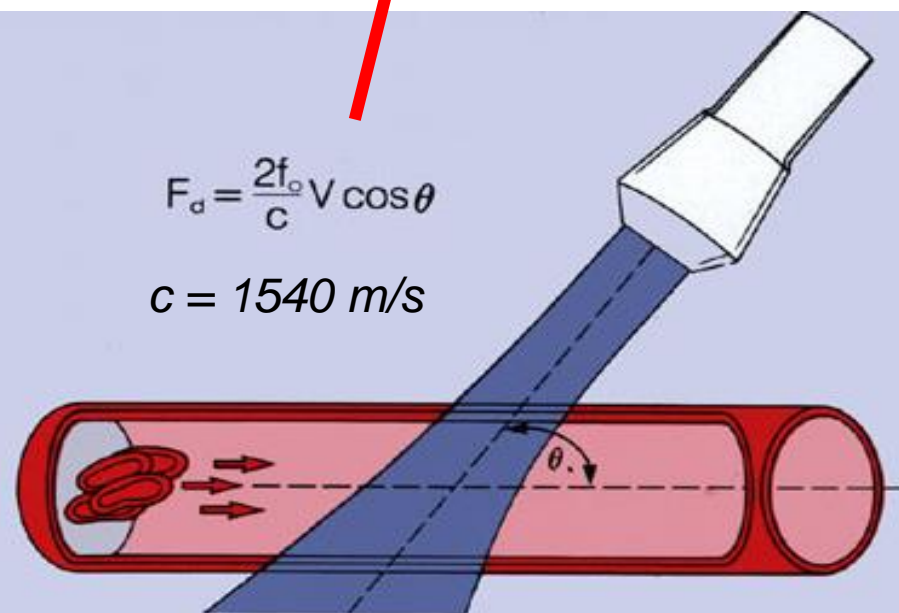


rychlost pohybu erytrocytů

$$V = \frac{c}{2f_0 \cos \theta} F_d$$

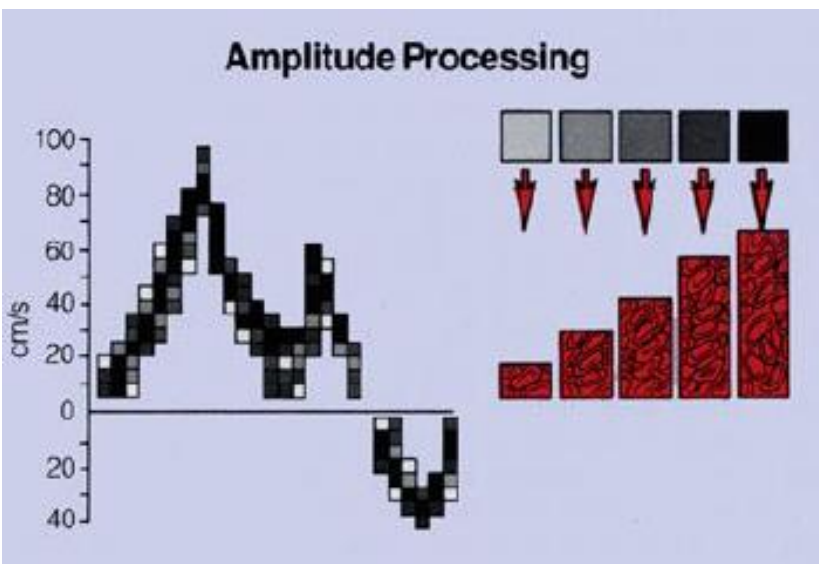
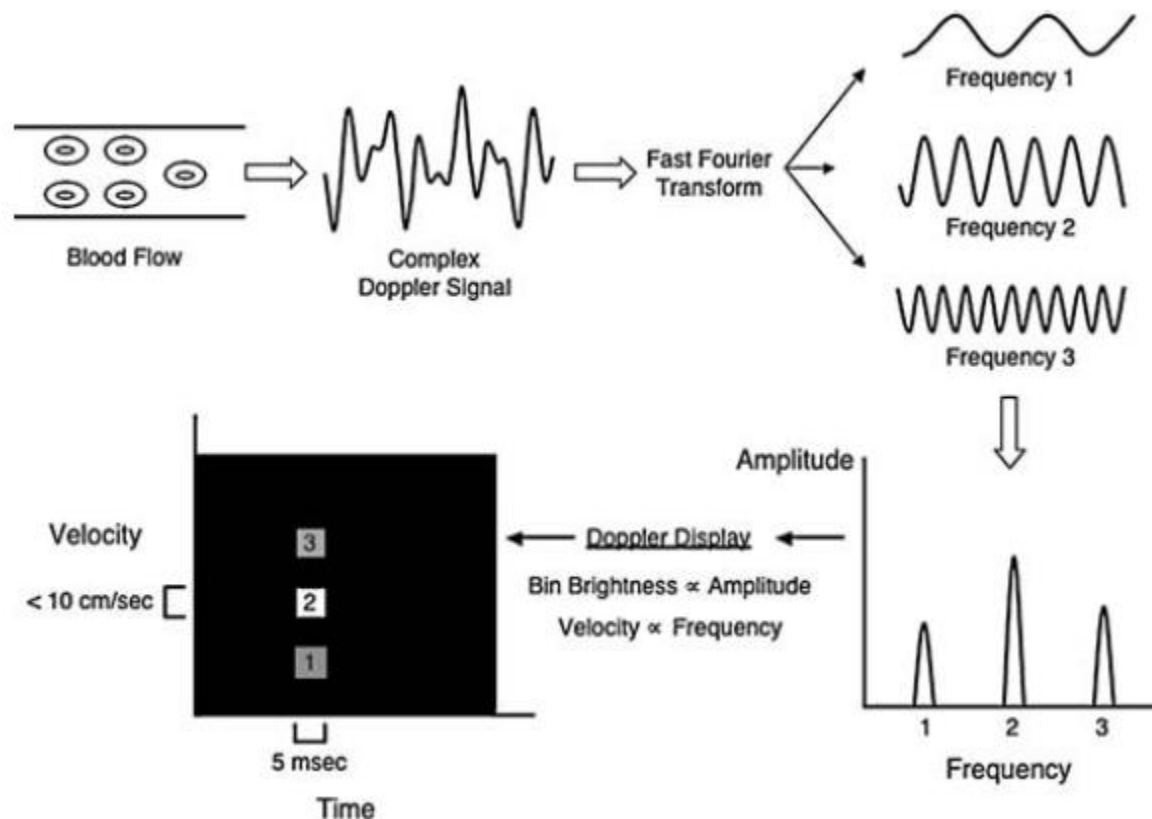
$$F_d = \frac{2f_0}{c} V \cos \theta$$

$$c = 1540 \text{ m/s}$$



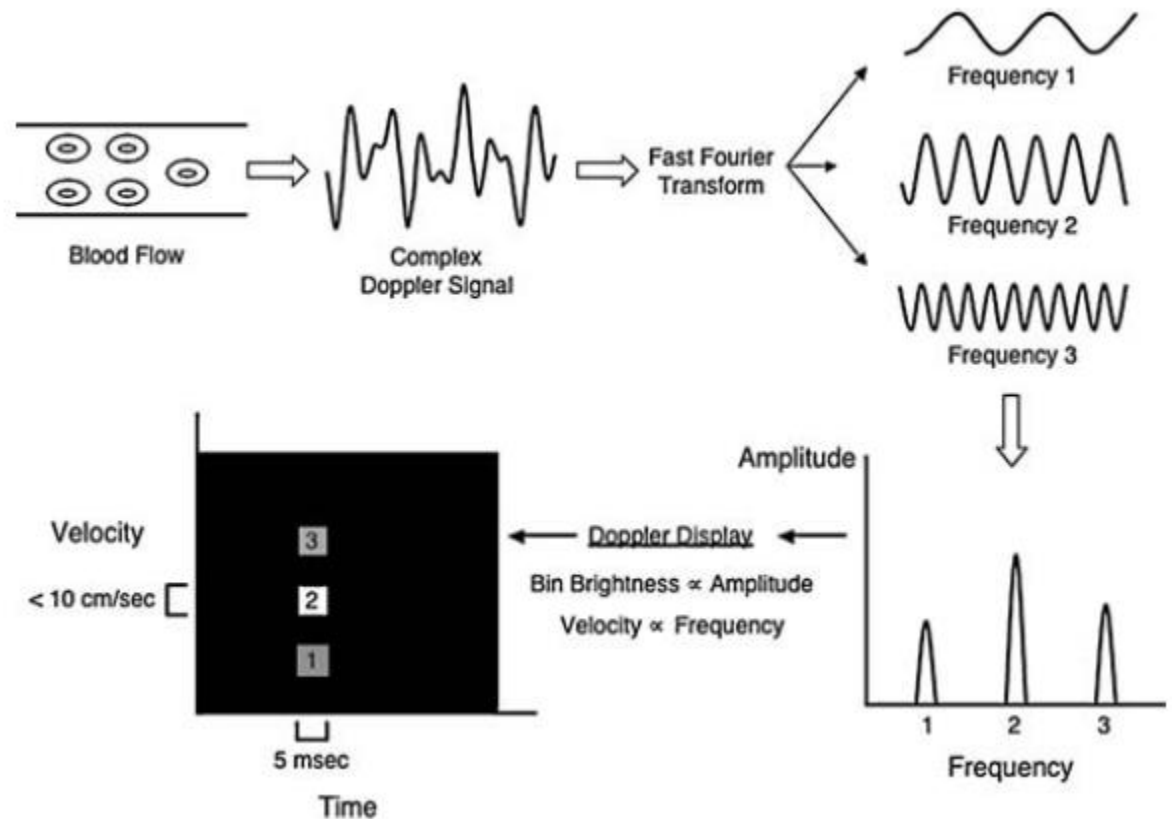
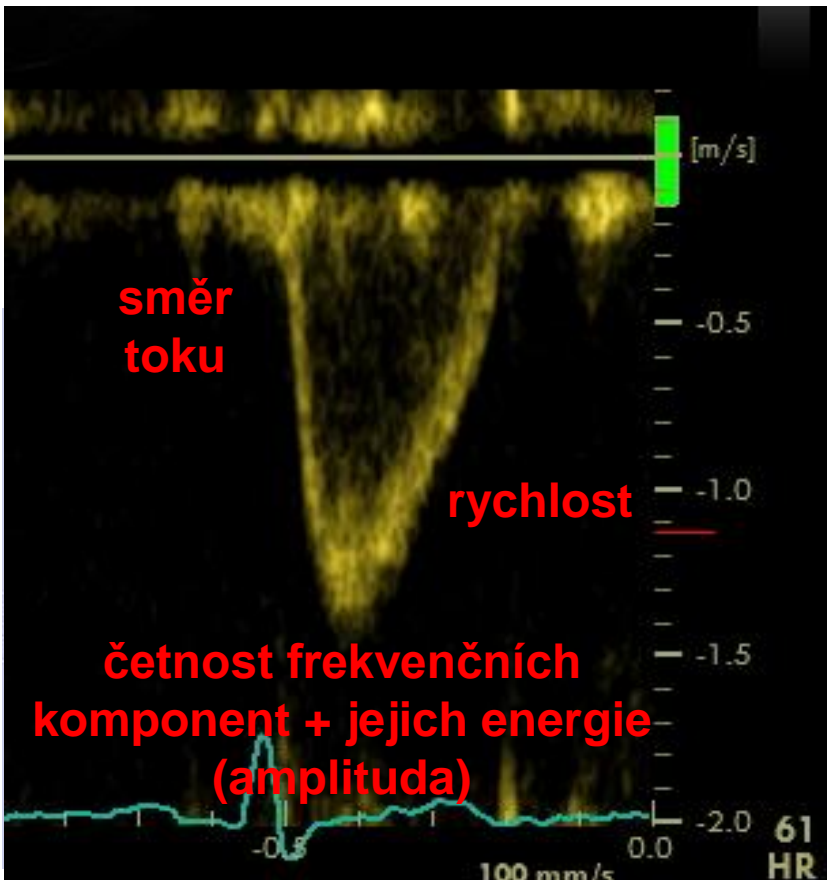
Grafická reprodukce Dopplerova posunu

výsledná rychlostní křivka ← spektrální analýza pomocí
rychlé Fourierovy transformace



Grafická reprodukce Dopplerova posunu

výsledná rychlostní křivka ← spektrální analýza pomocí
rychlé Fourierovy transformace





Dopplerovská echokardiografie

✓ Klasické „blood-pool“ dopplerovské techniky:

spektrální analýza: **kontinuální dopplerovský způsob (CW)**

pulzní dopplerovský způsob (PW)

PW s vysokou frekvencí vzorkování (HPRF-PW)

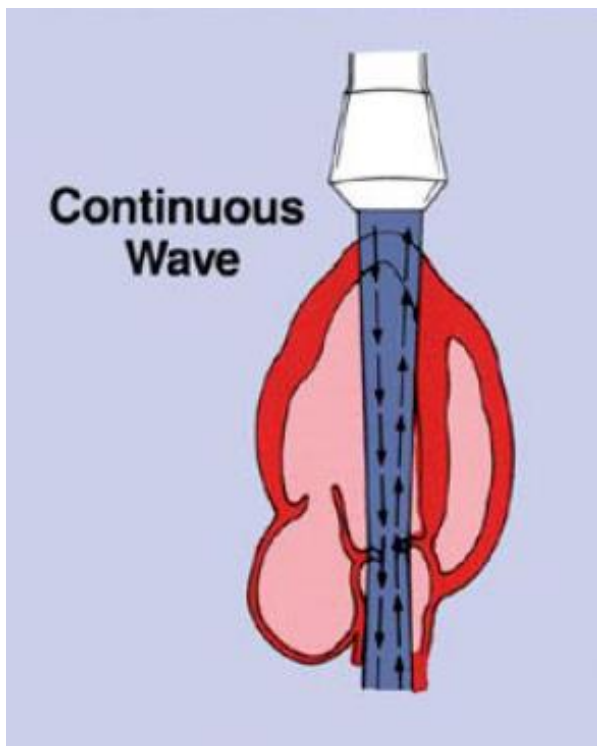
barevné dopplerovské mapování (CFM)

✓ Tkáňová dopplerovská echokardiografie (TDE, TDI, TVI ...):

barevné mapování

pulzní dopplerovský způsob

Kontinuální dopplerovský způsob (CW)



2 krystaly: jeden vysílač, druhý přijímač
→ **kontinuální vysílání a příjem** signálu

signály odražené od všech struktur
pohybujících se v ose Dopplerovského svazku

☺ není limitace maximální měřitelnou rychlostí
→ **detekce vysokých rychlostí toku**

☹ absence hloubkového rozlišení

Pulzní dopplerovský způsob (PW)

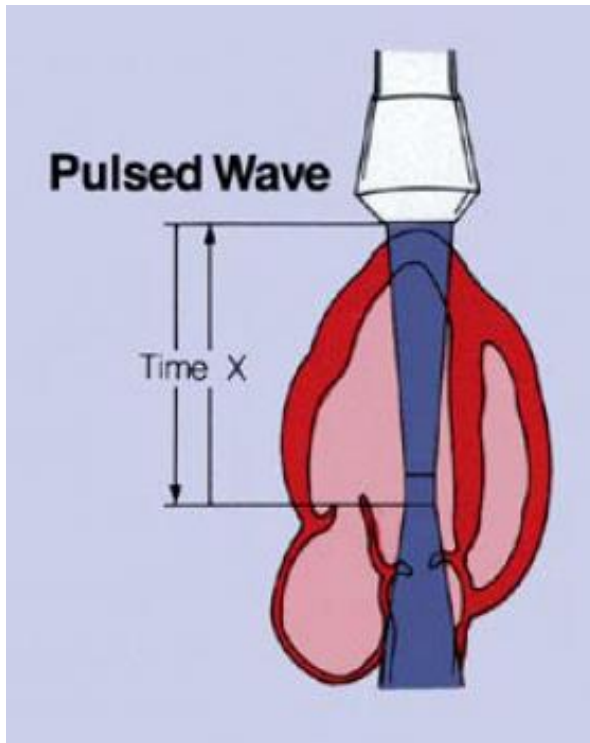
1 krystal funguje jako vysílač i přijímač
→ **pulzní vysílání a příjem** signálu

Signál je vyslán a přijímán do/z **definované hloubky, místa vzorkovací objemu**

$T = 2xD/c$ → **pulzní repetiční frekvence (PRF)**

☺ **měření rychlostí v přesně definované lokalizaci (hloubce)**

☹ **limitace měření vysokých rychlostí (< 1,5 m/s), daná PRF**





Nyquistův limit, aliasing

Maximální měřitelný Doppler. posun
je $\frac{1}{2}$ PRF

Překročení tohoto limitu:

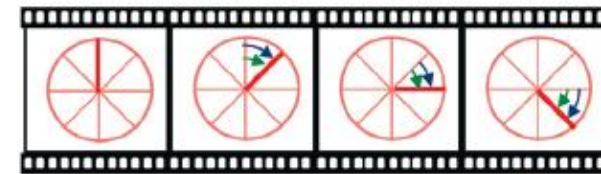
→ **fenomén nejednoznačnosti, aliasing**
(analogie s filmovou kamerou)

Maximální měřitelná rychlost:

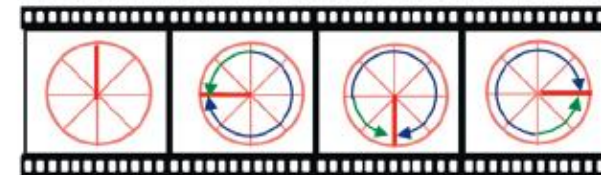
- hloubka měření (→ PRF)
- frekvence sondy (čím ↓, tím vyšší V_{max})

Kamera 16 obr./s

Nyquistův limit = 8



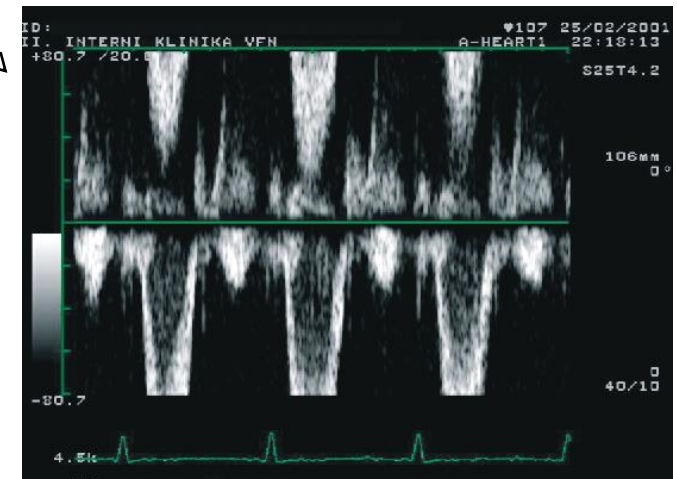
Kolo 2 ot./s
($\Phi < \pi$)



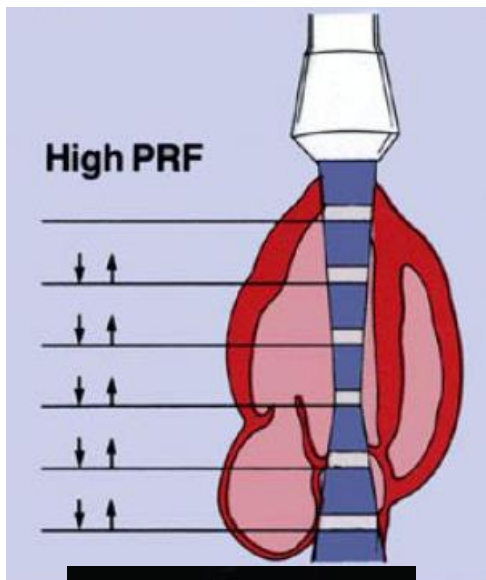
Kolo 12 ot./s
($\Phi > \pi$)

→ Pohyb skutečný

→ Pohyb vnímaný okem



PW systém s vysokou frekvencí vzorkování (HPRF)



částečné překonání Nyquistova limitu

Mnohočetné vzorkovací objemy (s vlastní PRF)
v ose paprsku před místem vlastního měření

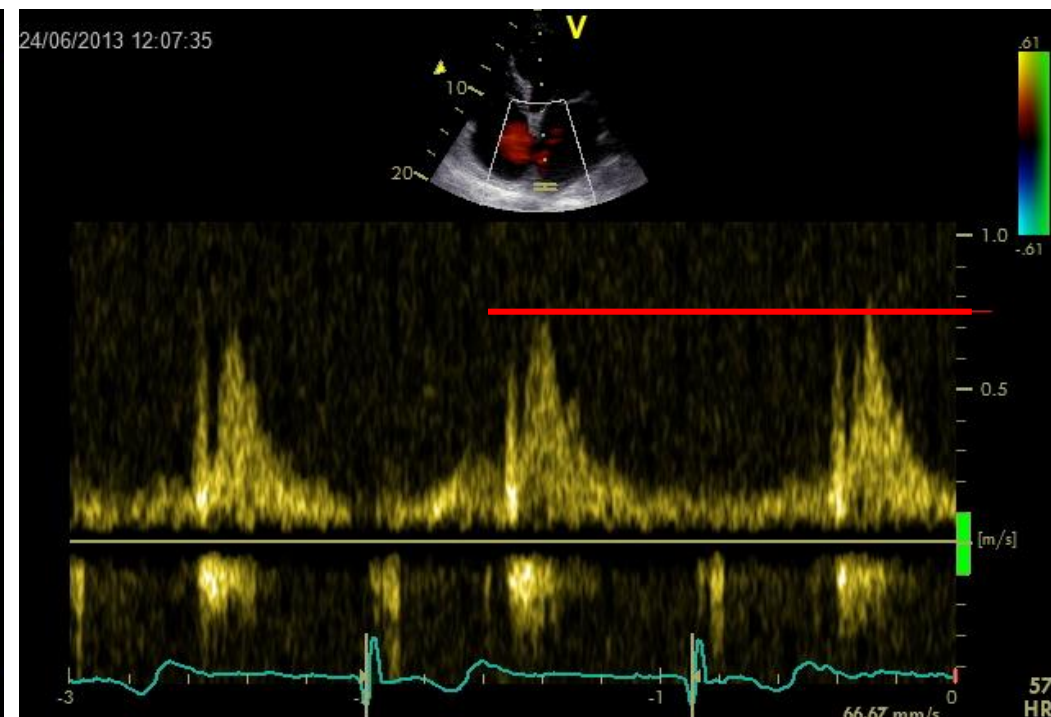
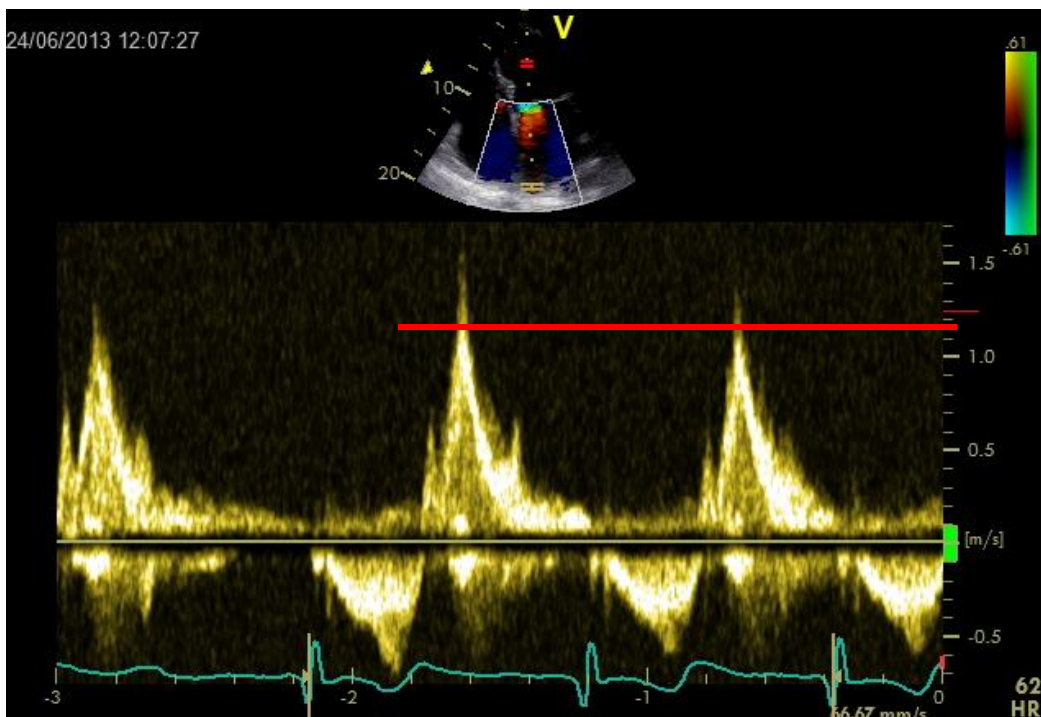
☺ ↑ PRF

☹ ztráta osově / hloubkové rozlišovací schopnosti
~ sumace rychlostí ze všech vzorkovacích objemů

PW systém s vysokou frekvencí vzorkování (HPRF)

ztráta osově rozlišovací schopnosti

- falešně vysoká rychlost toku v plicní žíle



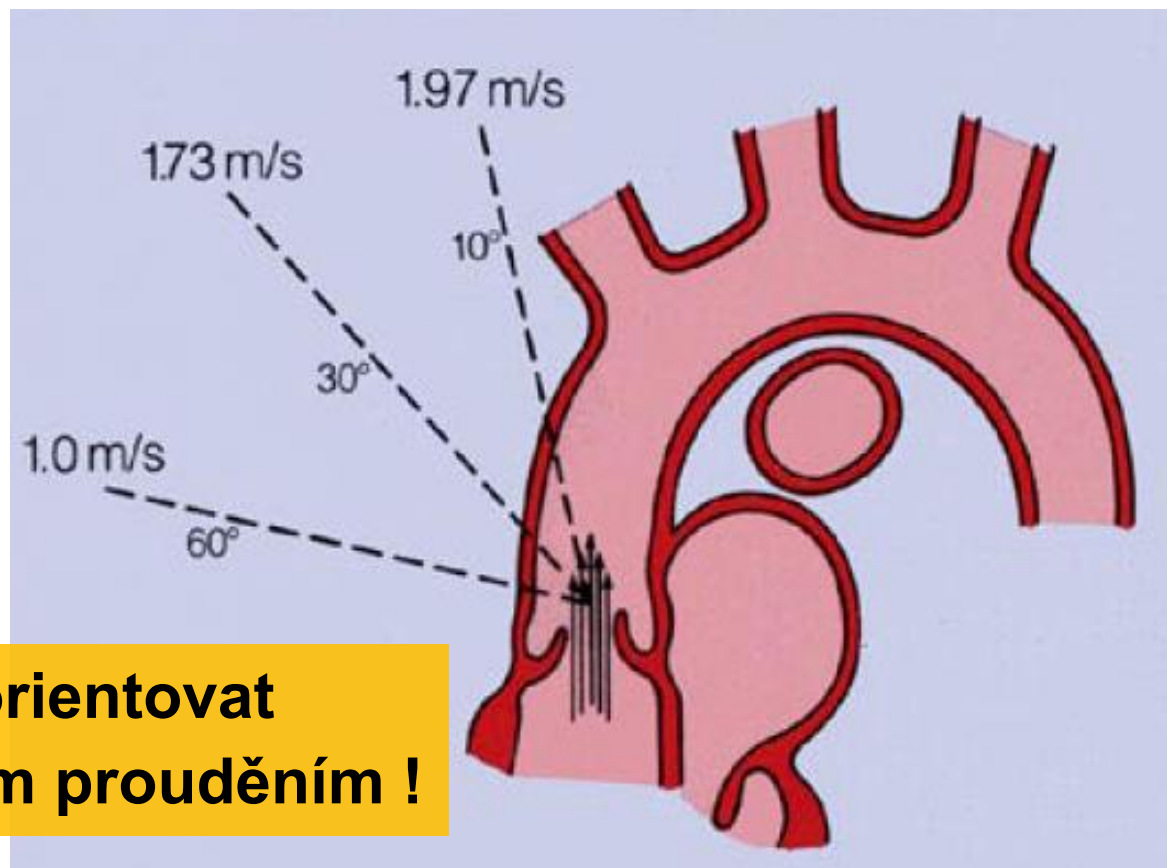
Význam úhlu v dopplerovské echokardiografii

$$V = \frac{c}{2f_0 \cos \theta} F_d$$



Chyba měření je zanedbatelná,
tj. < 6%,
do incidenčního úhlu 20°
(45° – 30%, 60° – 50%)

**Dopplerovský paprsek orientovat
co nejvíce paralelně s krevním prouděním !**





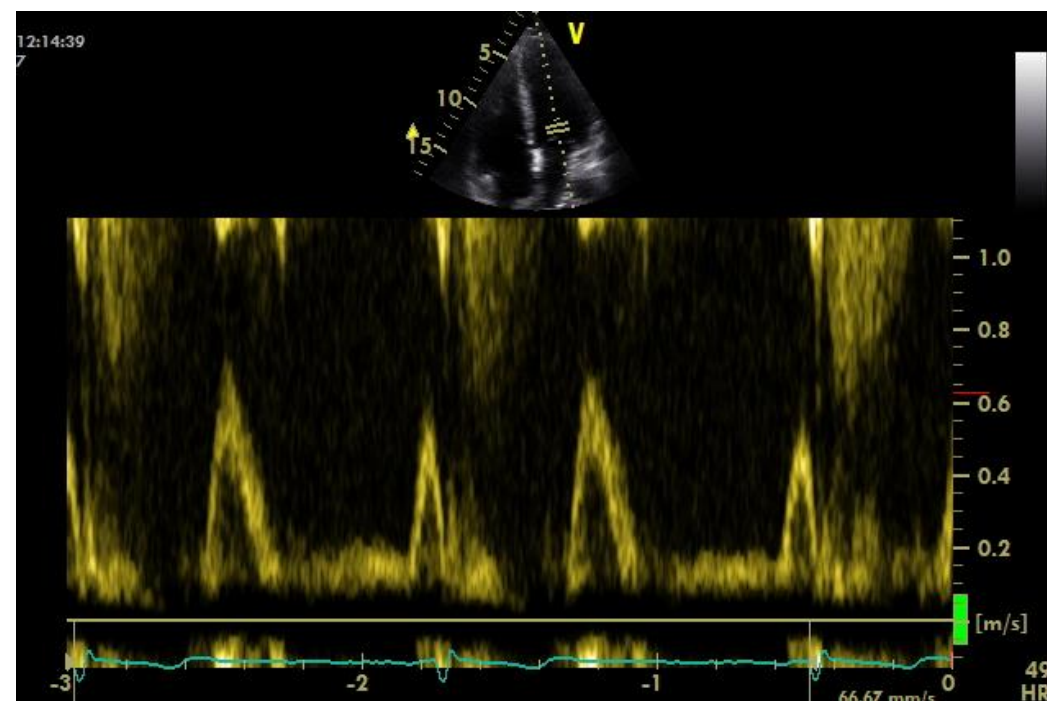
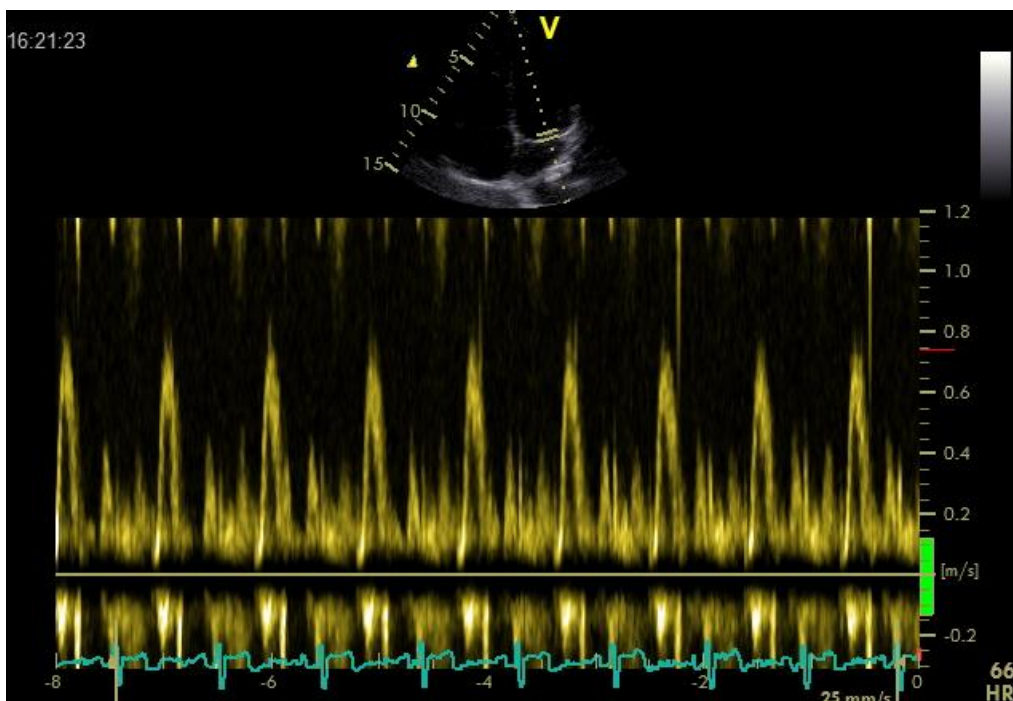
Ovládací prvky spektrálního dopplerovského způsobu

- výkon
- zisk ~ míra zesílení přijímaných signálů
- wall / high-pass filtry ~ odstranění nízkofrekvenčních signálů
(myokard, chlopně)
- rychlostní škála (PRF)
- pozice nulové linie (baseline)
- komprese, dynamický rozsah ~ úprava zobrazení ve stupni šedi
ve vztahu k přijaté intenzitě signálu
- PW: hloubka, velikost vzorkovacího objemu (typicky 5mm)
(úhlová korekce – v kardiologii se neužívá)

Spektrální dopplerovský záznam: rychlost posunu

Minimálně 50 mm/s

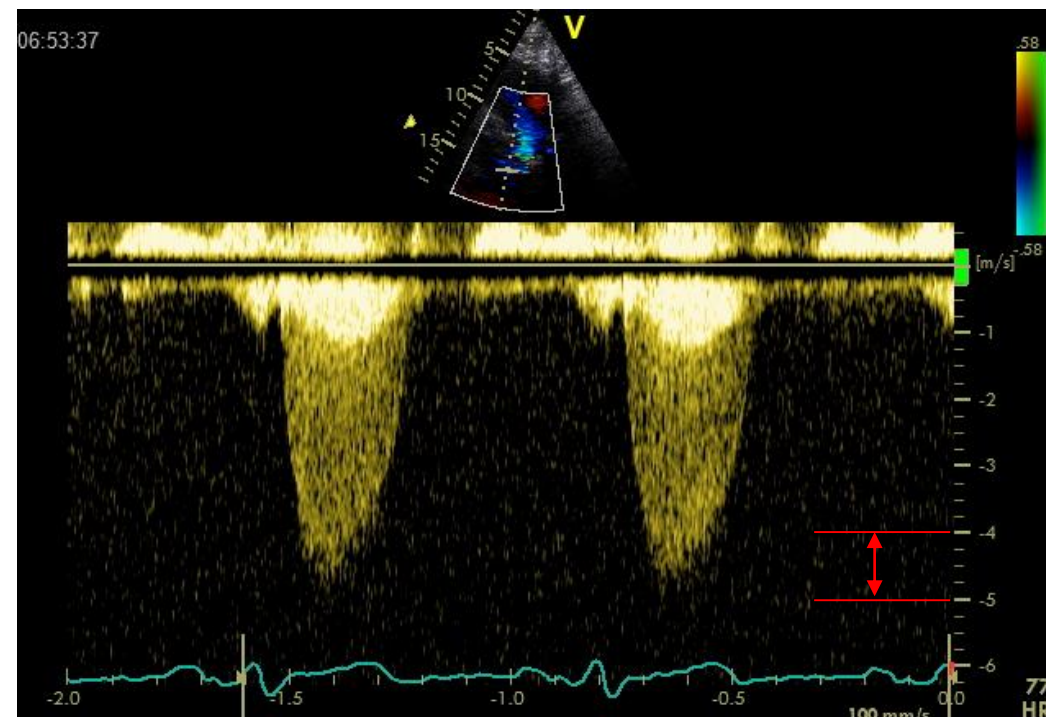
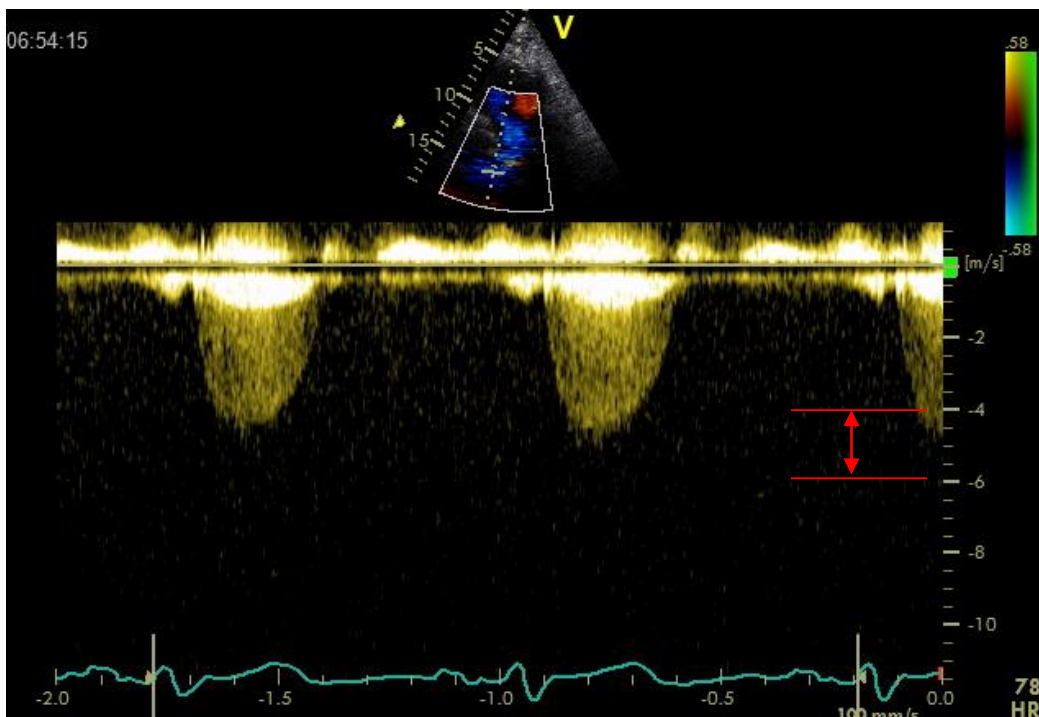
→ správné měření časových intervalů



Spektrální dopplerovský záznam (CW): rychlostní škála

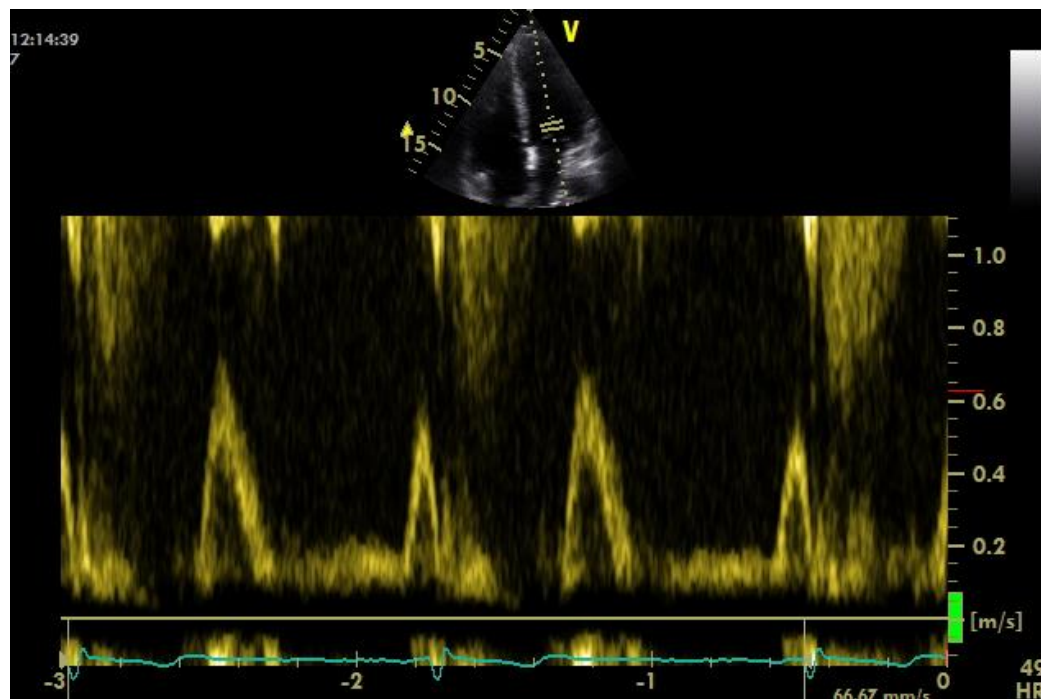
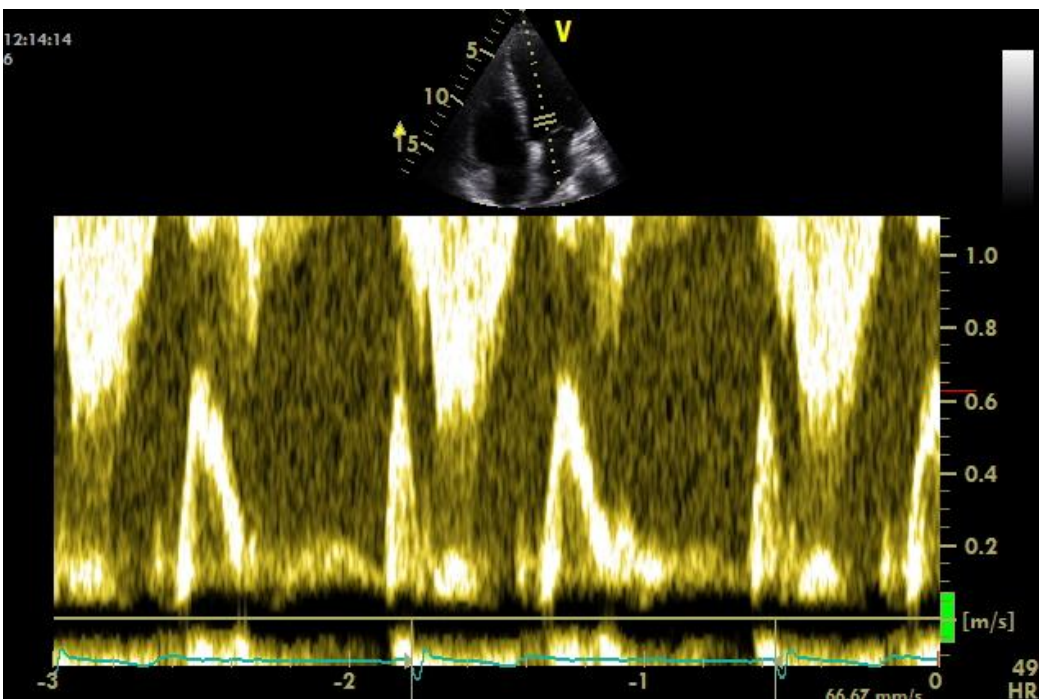
příliš velká rychlostní škála
(větší chyba v měření)

adekvátně nastavená rychlostní škála
(menší chyba v měření)



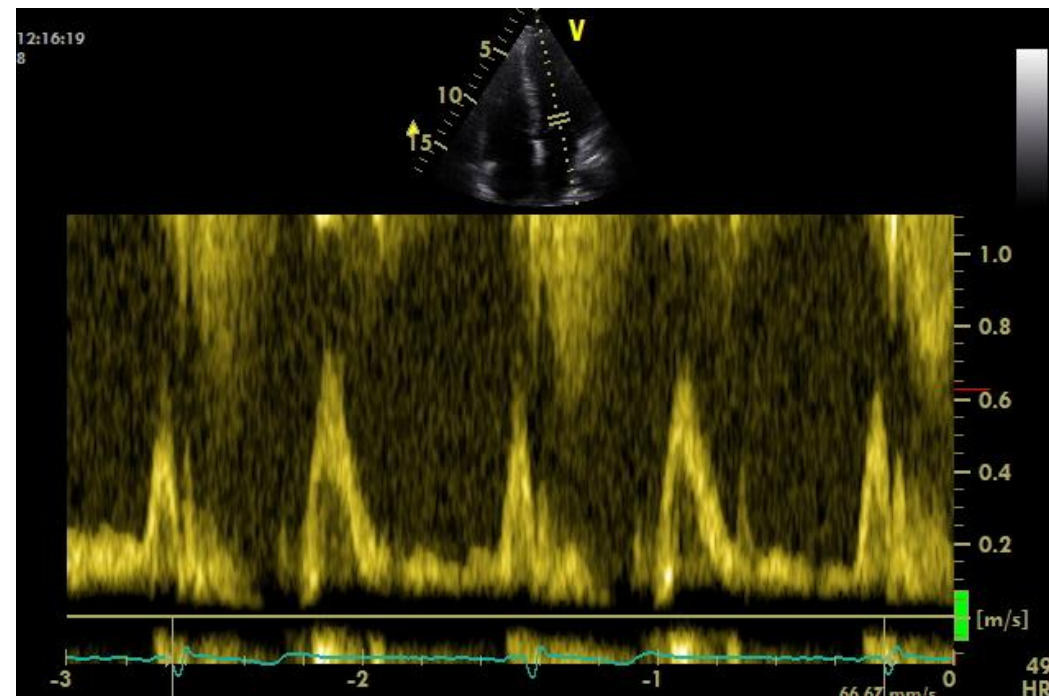
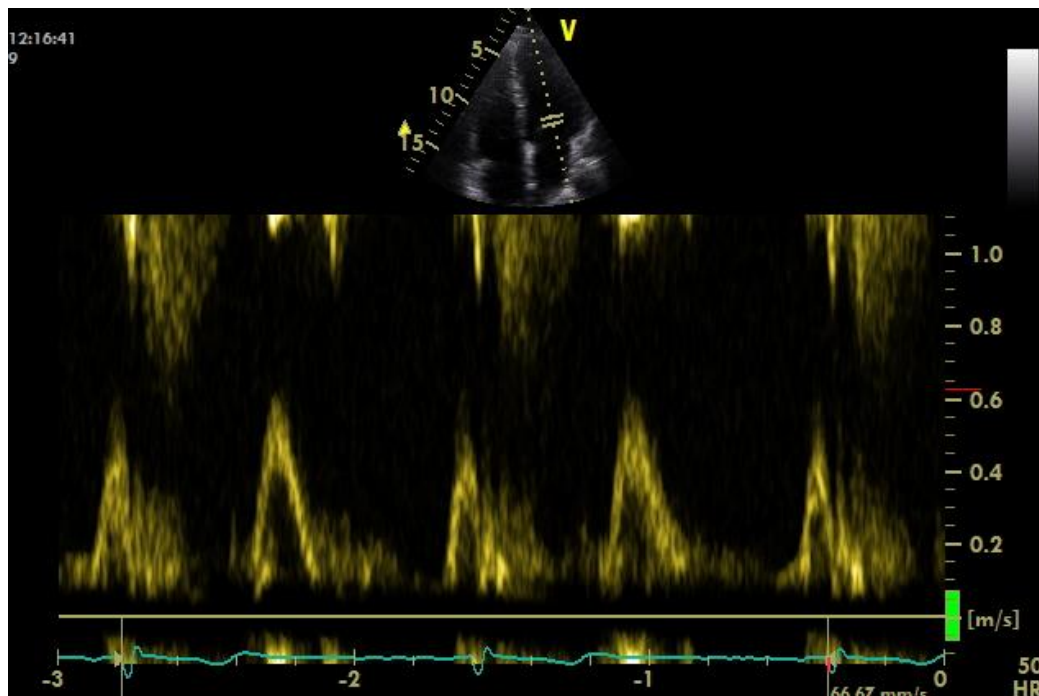
Spektrální dopplerovský záznam: nastavení zisku (gain)

Příliš vysoký zisk → zhoršení poměru signál/ šum



Spektrální dopplerovský záznam: komprese

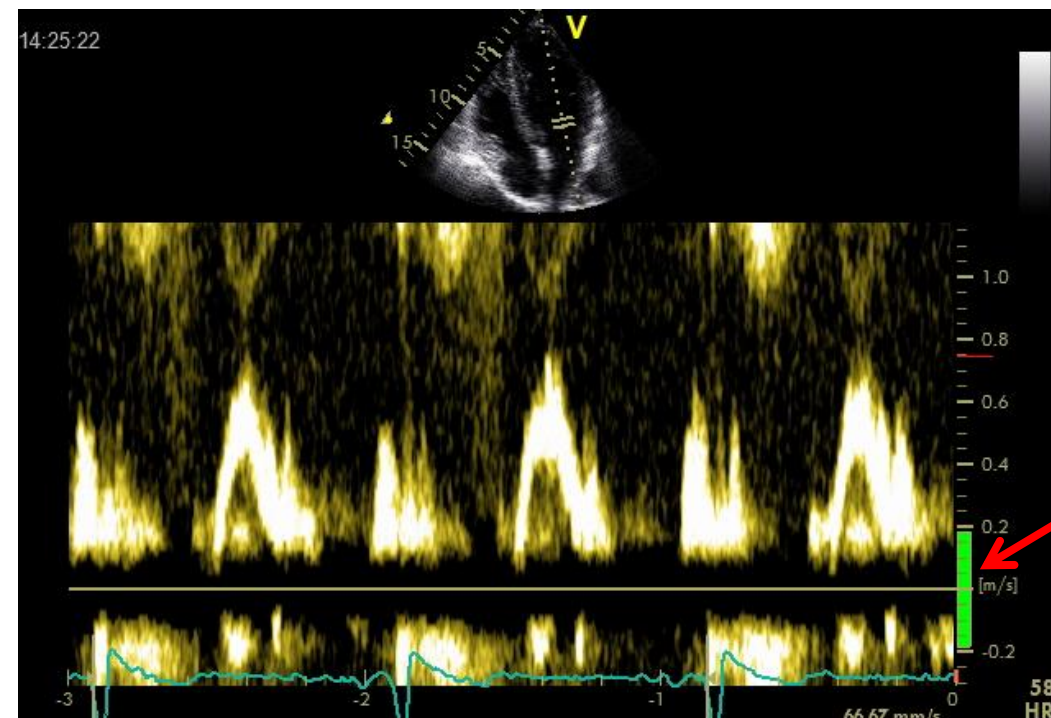
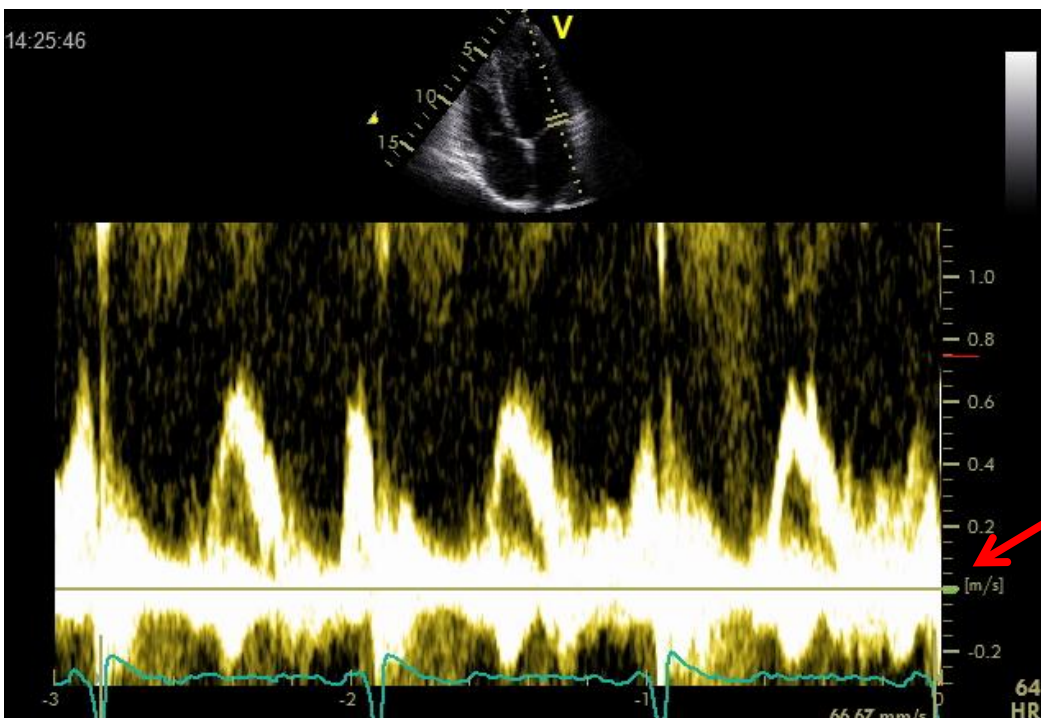
↓ komprese → zlepšení kontrastu zobrazení (méně odstínů šedi)



Spektrální dopplerovský záznam: high-pass filtr

Vypnut: ☹️ nízkofrekvenční signály
(myokard, chlopně)

Maximální: ☹️ měření časových intervalů



Barevné dopplerovské mapování (CFM)

Autokorelace fáze vyslaného a přijatého UZ vlnění

Pulzní vysílání s hodnocením středních rychlostí erytrocytů v mnoha oblastech podél paprsku, resp. **v úhlové výseči**, v níž je vychylován

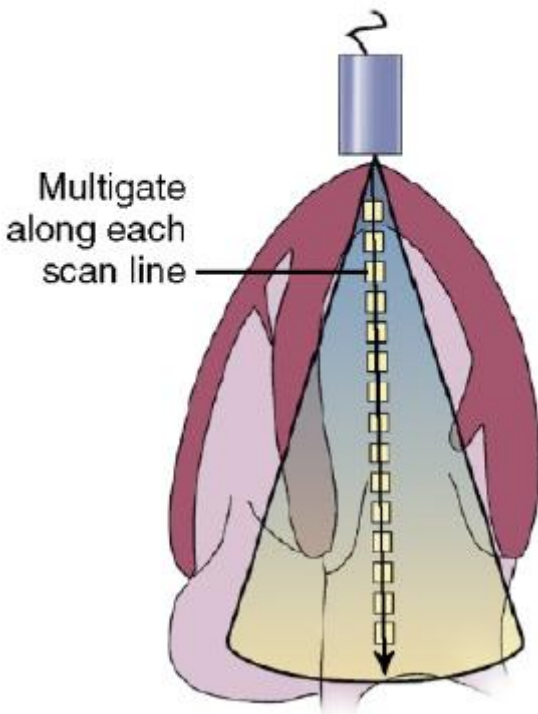
Superimponace CFM do 2D obrazu v reálném čase

Každý pixel: informace o směru toku, střední rychlosti a přítomnosti variance (turbulence)

☺ **prostorová informace o rychlosti a směru toku, jeho vztah k anatomickým strukturám**

☹ **Nyquistův limit**

Color Flow Imaging



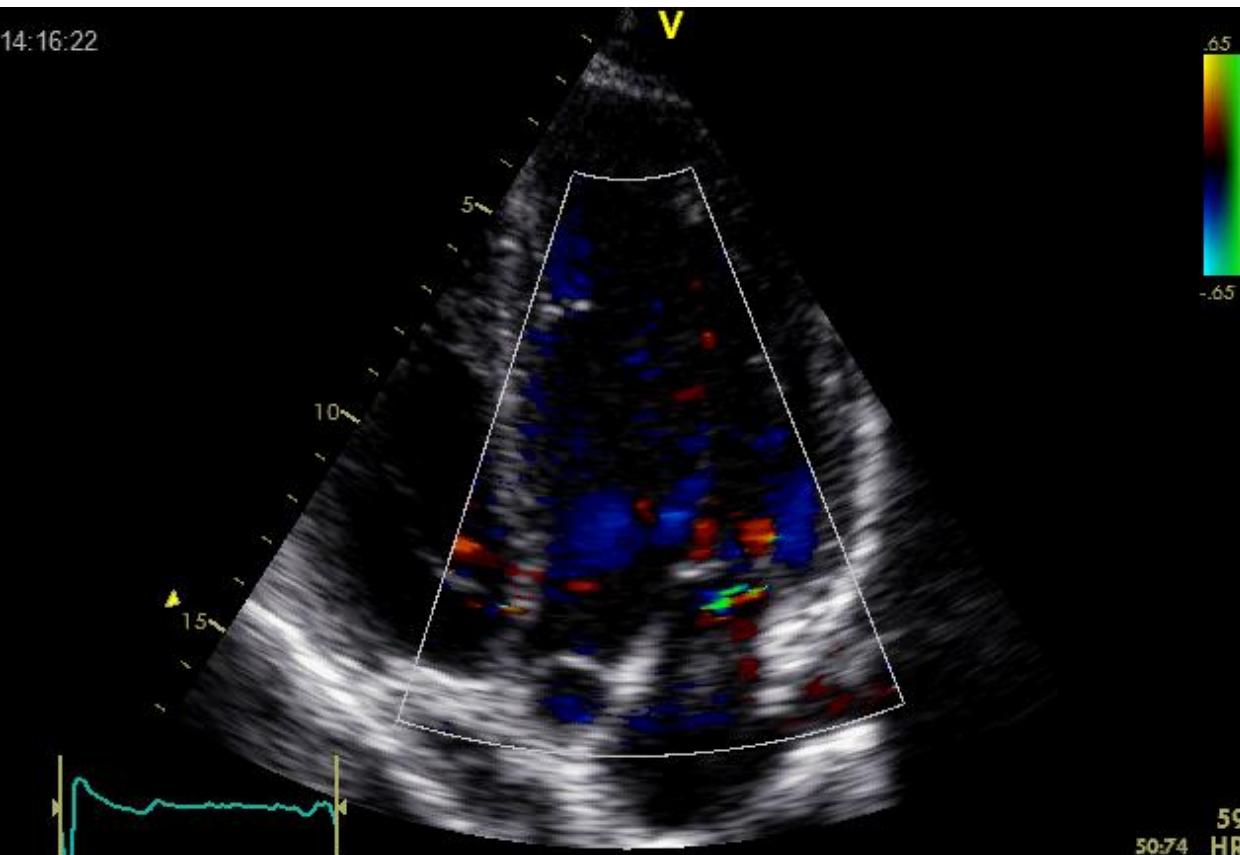
Barevné dopplerovské mapování: BART

Laminární proudění:

Blue Away the probe
Red Towards

Světlejší odstín
červené a modré barvy
~ vyšší rychlost

Turbulentní proudění:
~ variance rychlostí
příměs zelené barvy





Ovládací prvky barevného dopplerovského způsobu

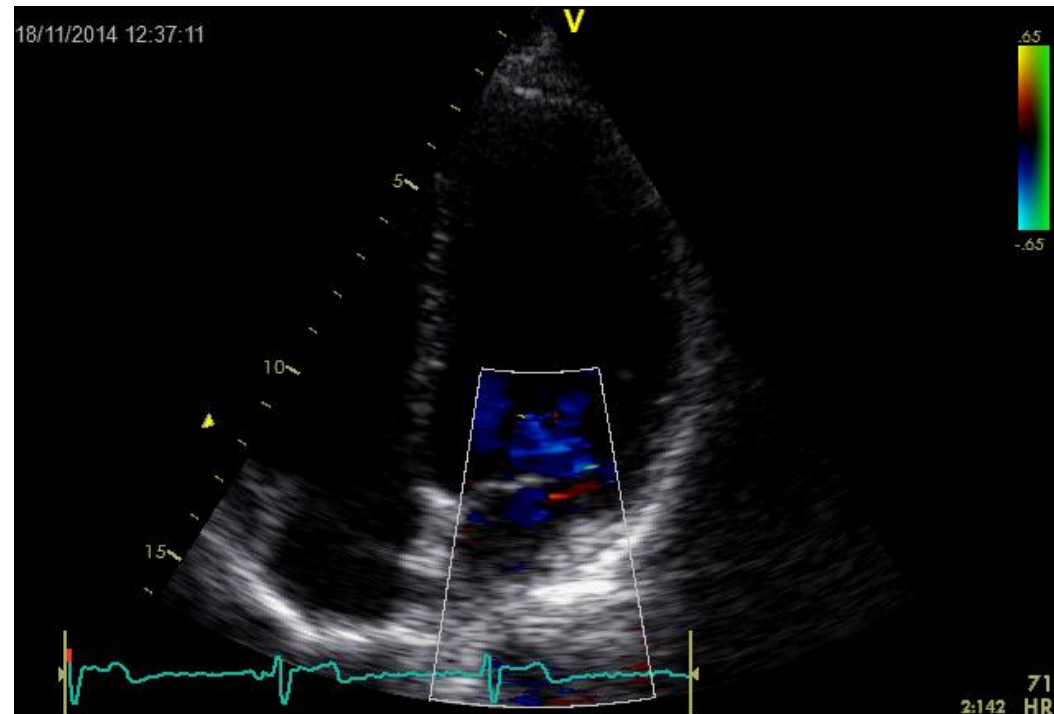
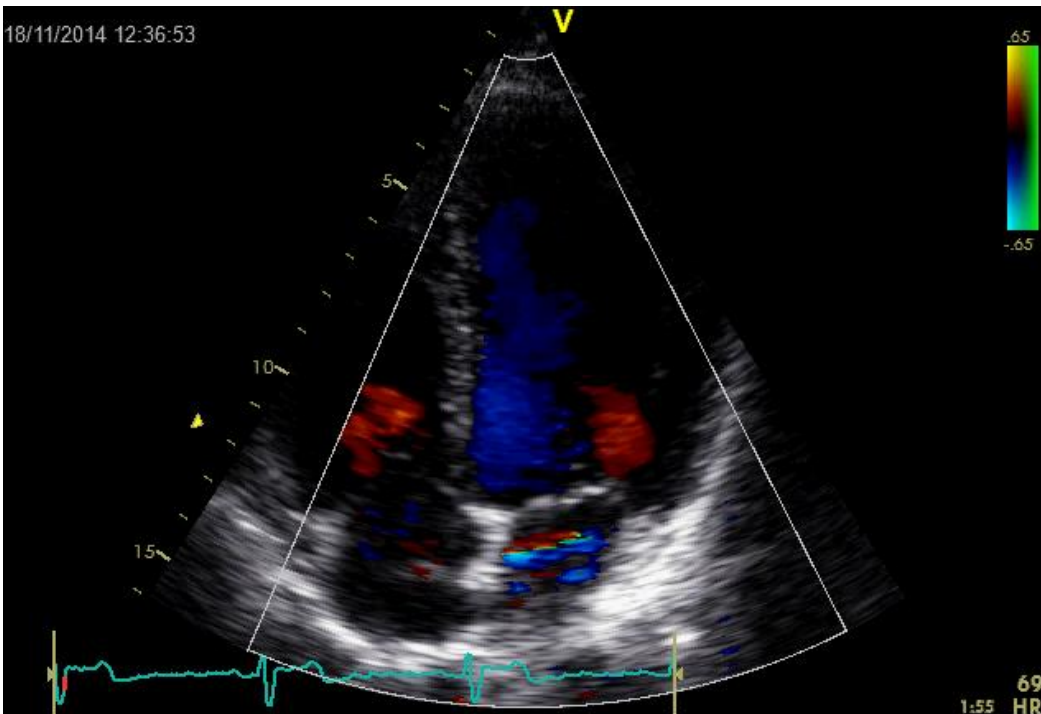
- **zisk** ~ míra zesílení přijímaných signálů
- **velikost sektoru**
- **typ barevné mapy** (výběr barev)
- **rychlostní škála**
- **pozice nulové linie** (baseline)
- **variance** ~ míra turbulence / variability střední rychlosti proudění

Barevné dopplerovské mapování: velikost sektoru

Čím menší sektor (a hloubka), tím vyšší snímkovací frekvence !

19 fps

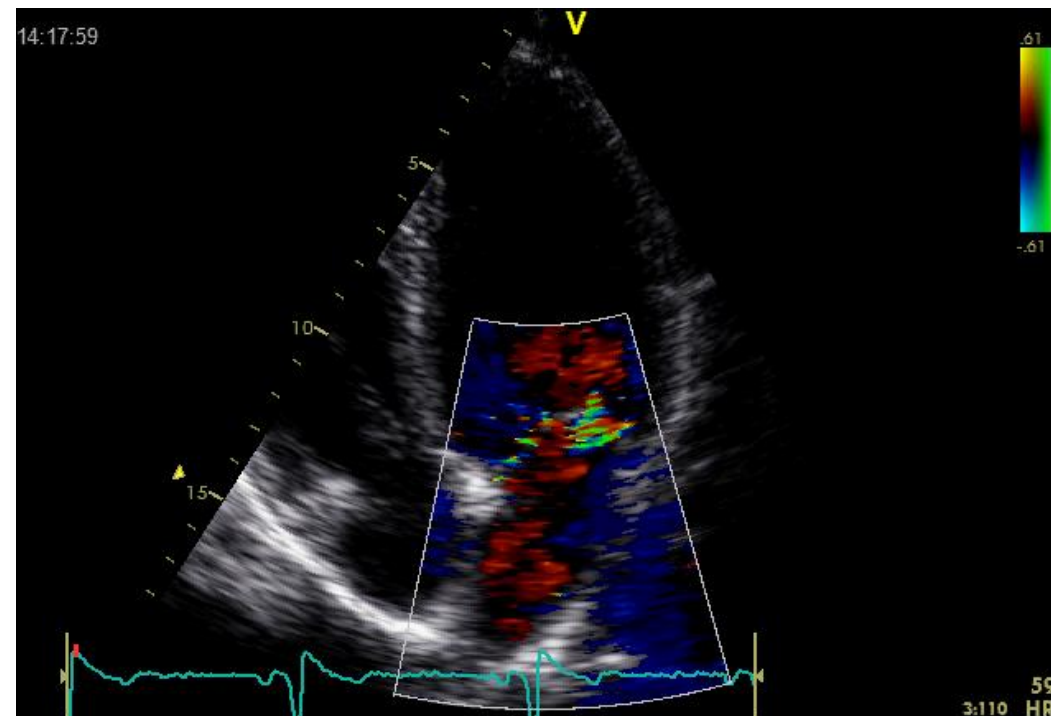
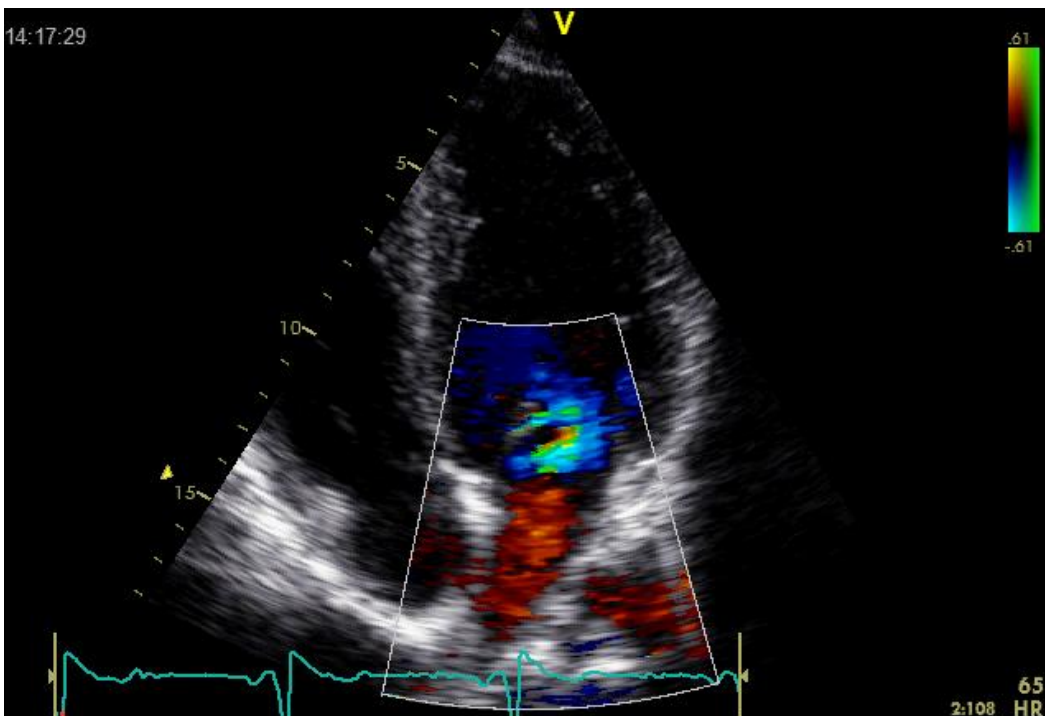
50 fps



Barevné dopplerovské mapování: zisk (gain)

správně nastavený zisk CFM
(v okamžiku, kdy přestane „zrnění“)

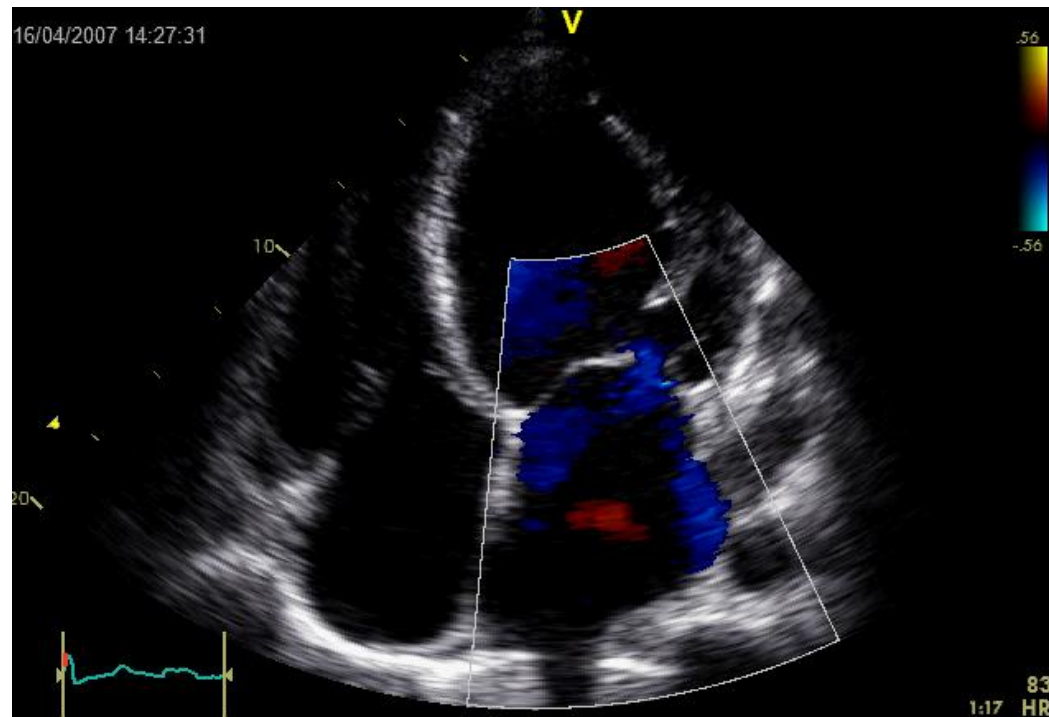
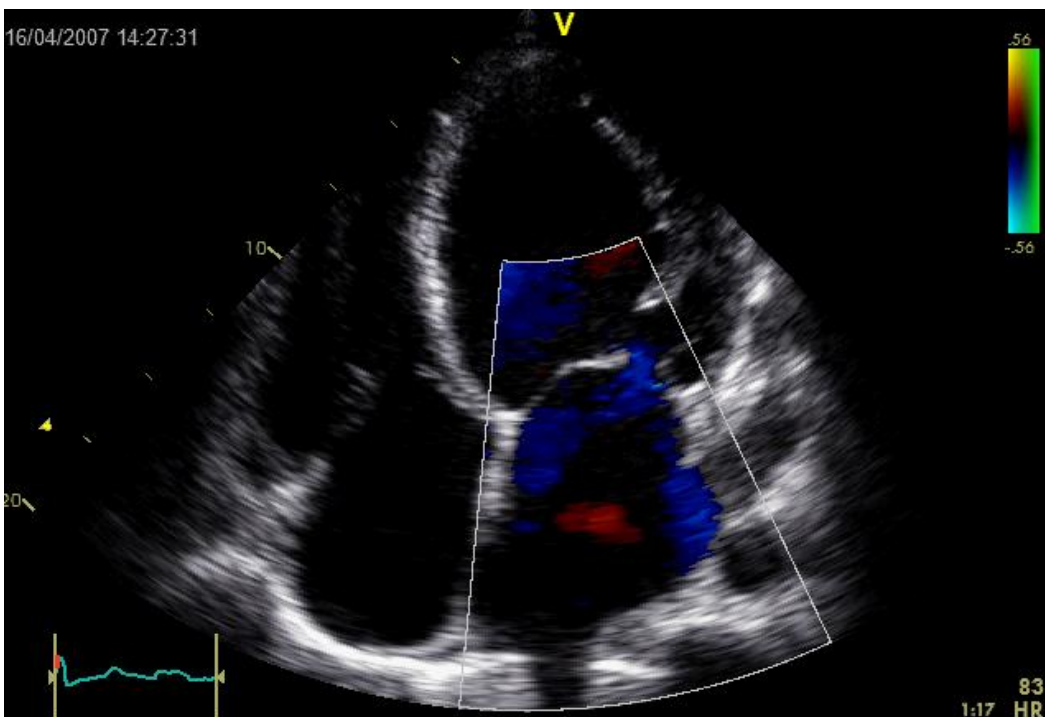
příliš vysoký zisk CFM



Barevné dopplerovské mapování: variance

Přidatná škála zelené barvy
→ zvýraznění turbulencí toku

Vypnutá variance



Bernoulliho rovnice

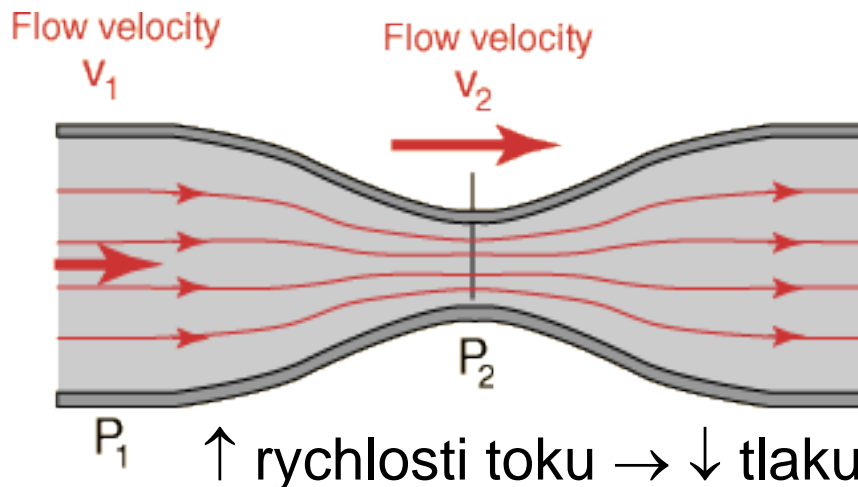
Zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální tekutiny
~ součet kinetické a potenciální energie je ve všech místech trubice stejný

Convective acceleration Flow acceleration Viscous friction

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho (V_2^2 - V_1^2) + \rho_1 \int \frac{d\vec{V}}{dt} d\vec{s} + R(\vec{V})$$

Modifikovaná rovnice
(zanedbání viskózních ztrát
a proximální akcelerace)

$$\Delta P = 4(V_2^2 - V_1^2)$$



$$A_2 < A_1$$

$$V_2 > V_1$$

$$P_2 < P_1$$

Zjednodušená rovnice

(zanedbání proximální rychlosti V_1)

$$\Delta P = 4V_2^2$$

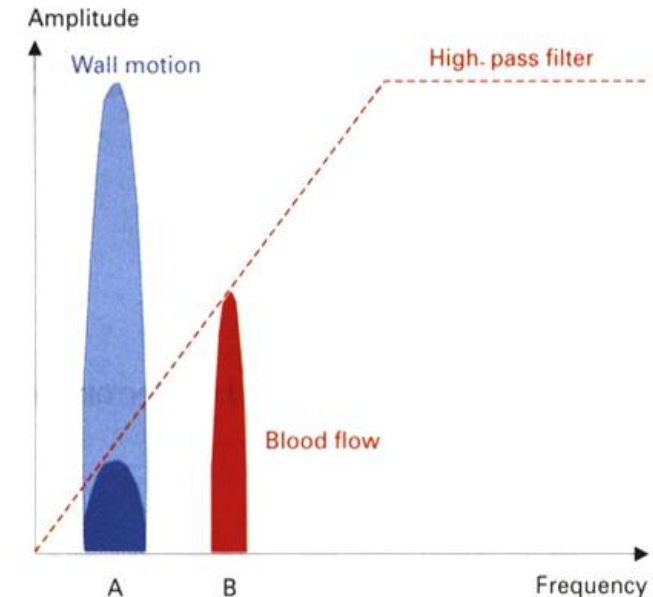
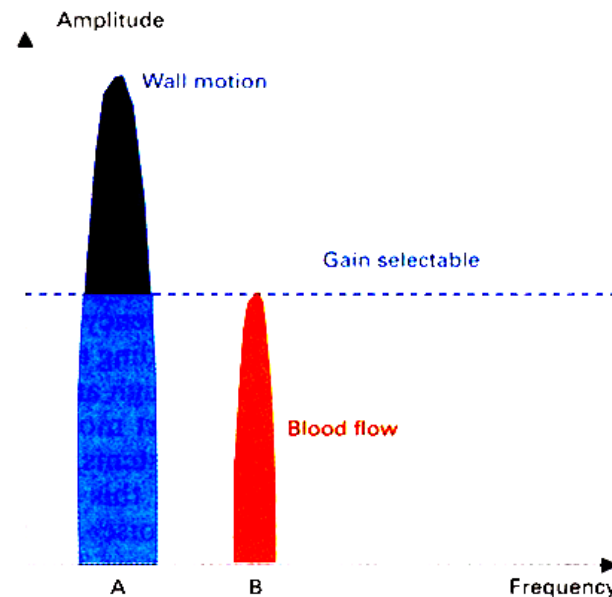
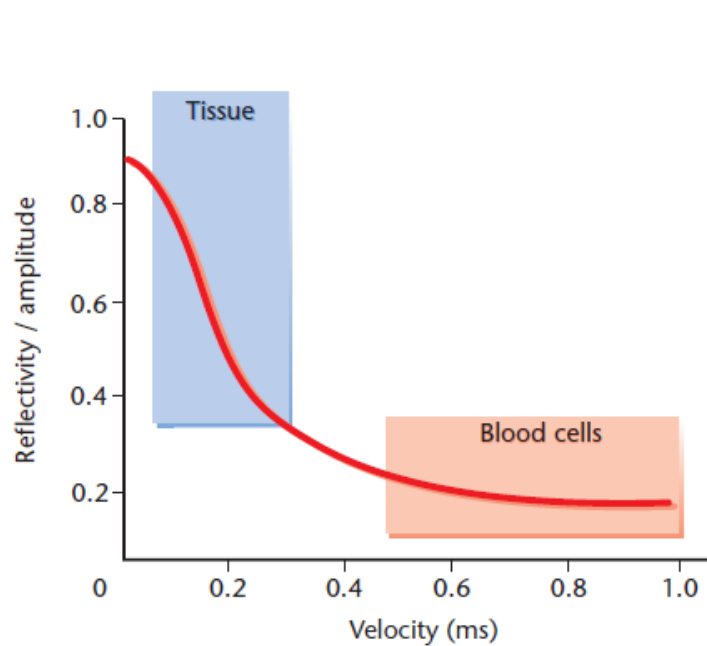
Platí jen při $V_1 \ll V_2$!

Tkáňová dopplerovská echokardiografie

Myokard vs. erytrocyty:

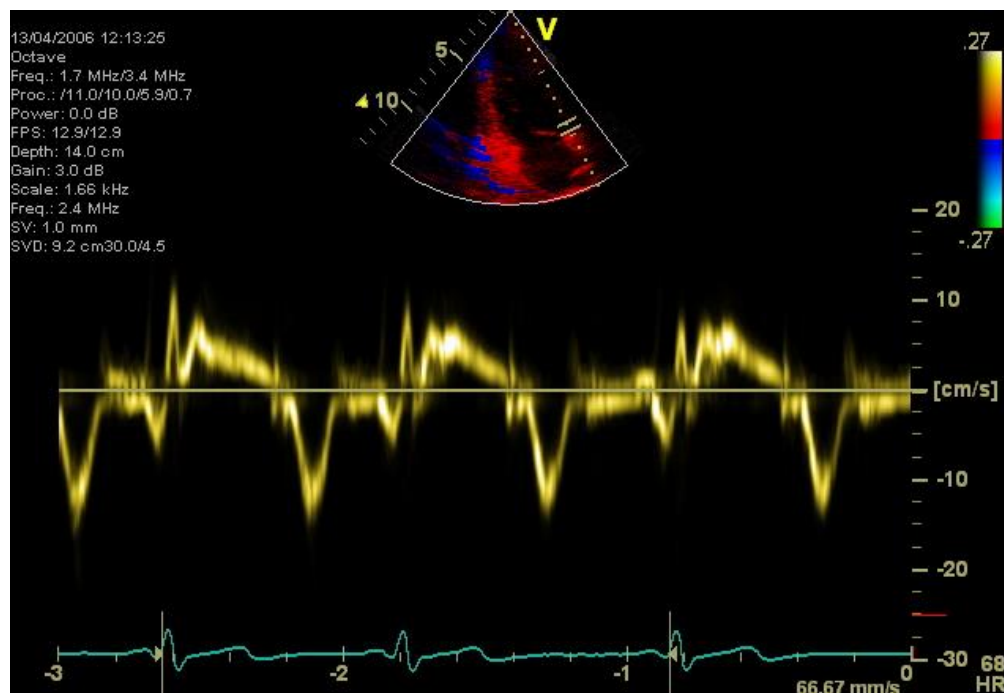
Dopplerovský signál o **vyšší amplitudě a nižší frekvenci**

Tkáňový doppler: → snížení zisku → odstranění high-pass filtru



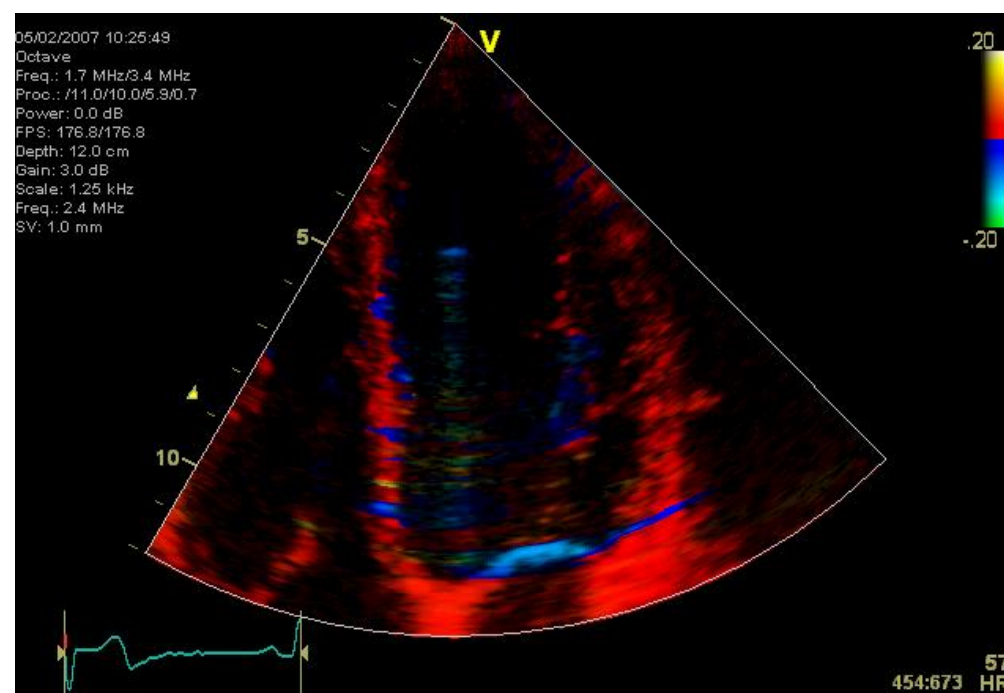
Tkáňová dopplerovská echokardiografie

Pulzní dopplerovská TDE



Maximální rychlosti myokardu

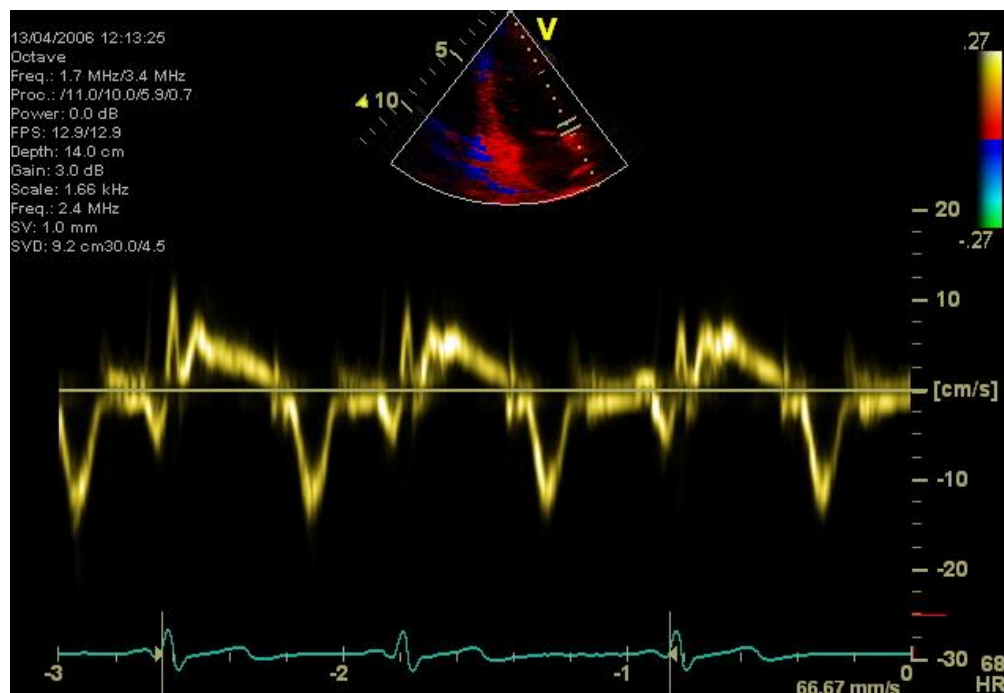
barevná TDE



Střední rychlosti myokardu

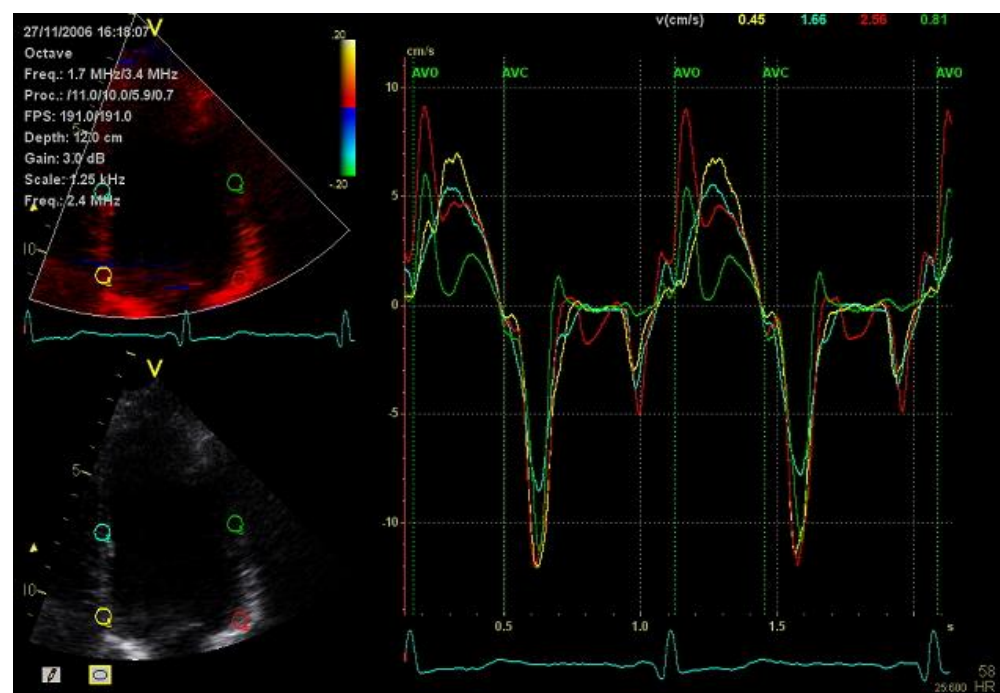
Tkáňová dopplerovská echokardiografie

Pulzní dopplerovská TDE



Maximální rychlosti myokardu

barevná TDE



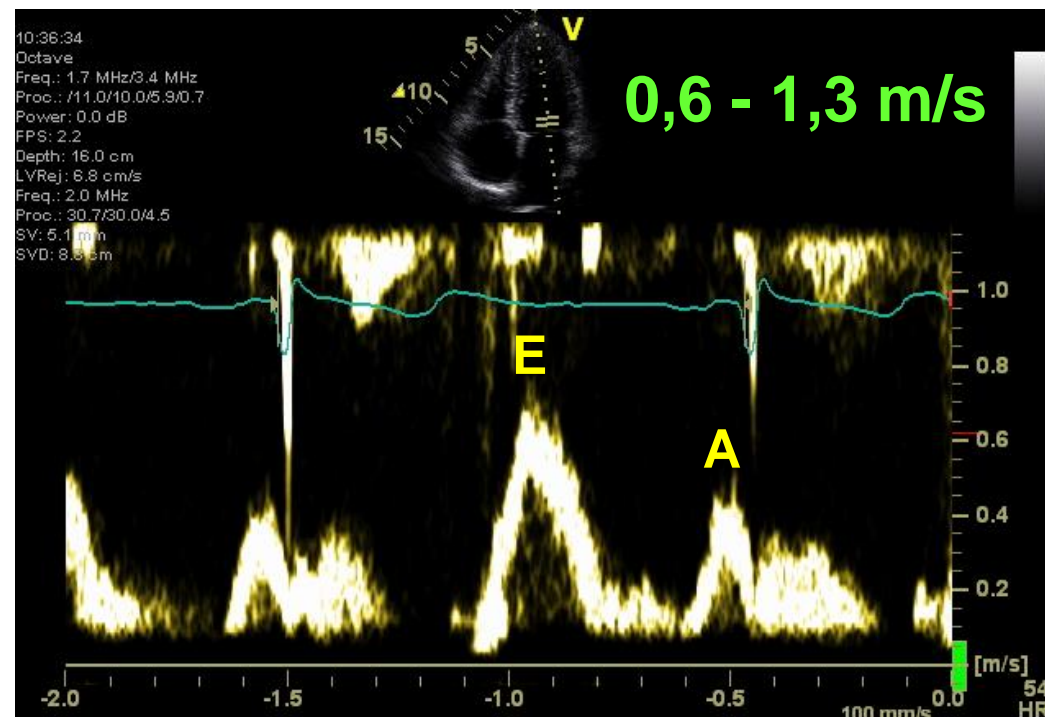
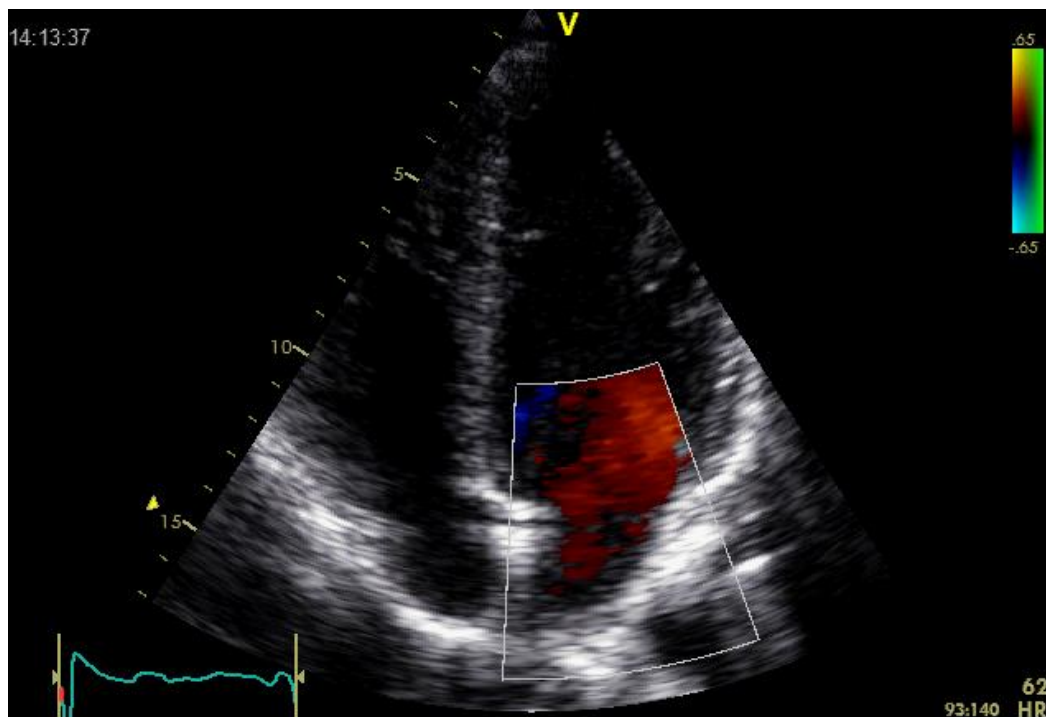
Střední rychlosti myokardu

Normální dopplerovské nálezy: mitrální chlopeň

PW záznam transmitrálního toku
(mezi vrcholy cípů)

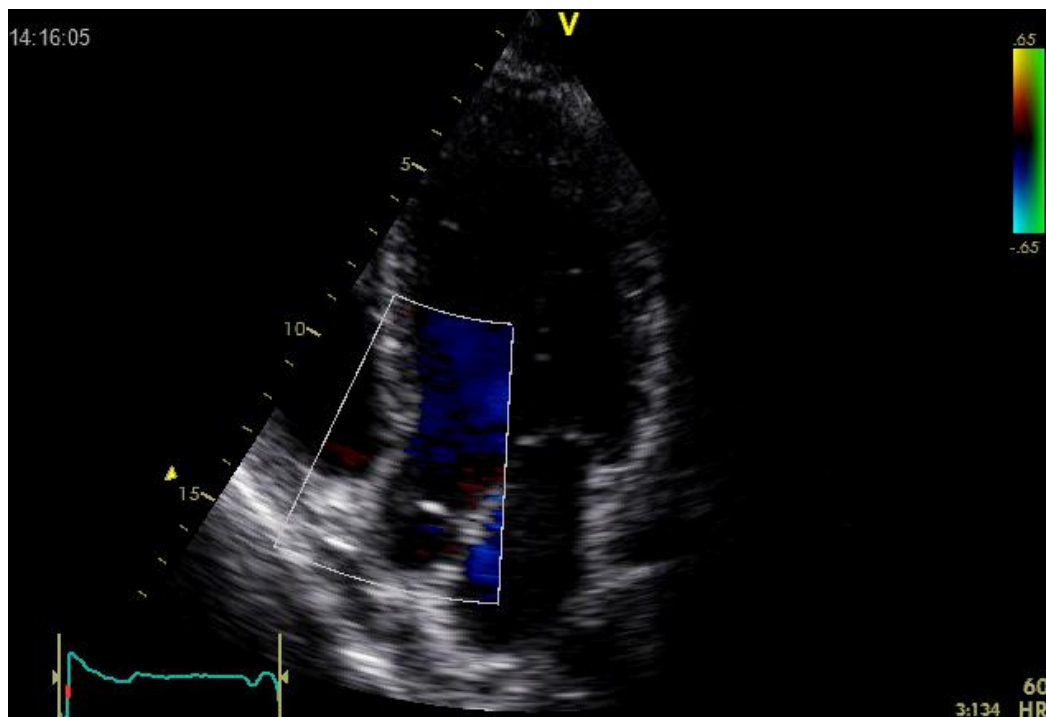
Apikální 4-dutinová projekce

Stopová mitrální regurgitace v CFM



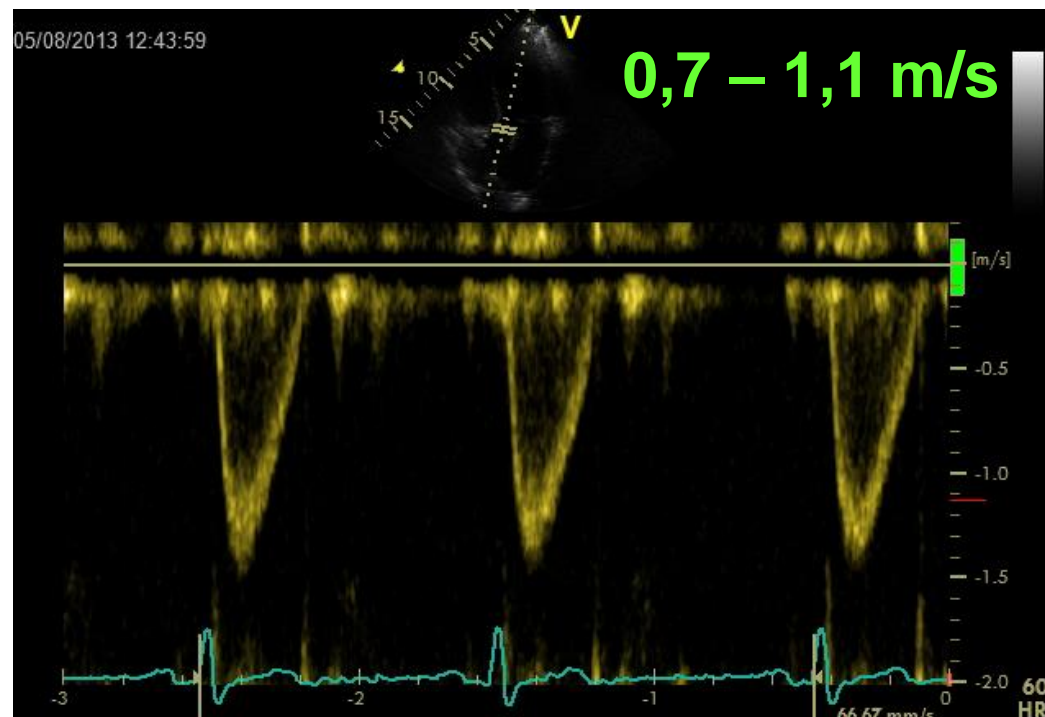
Normální dopplerovské nálezy: LVOT, aortální chlopeň

LVOT a aortální chlopeň v CFM



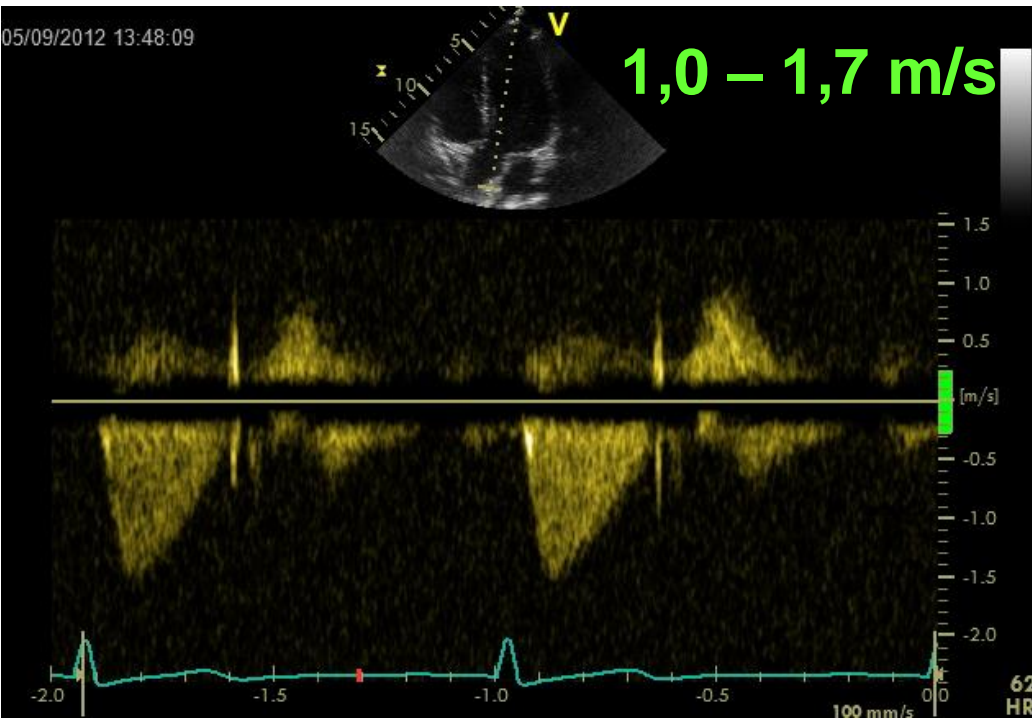
PW záznam toku v LVOT
(0,5-1cm pod chlopní)

Apikální 5-dutinová projekce

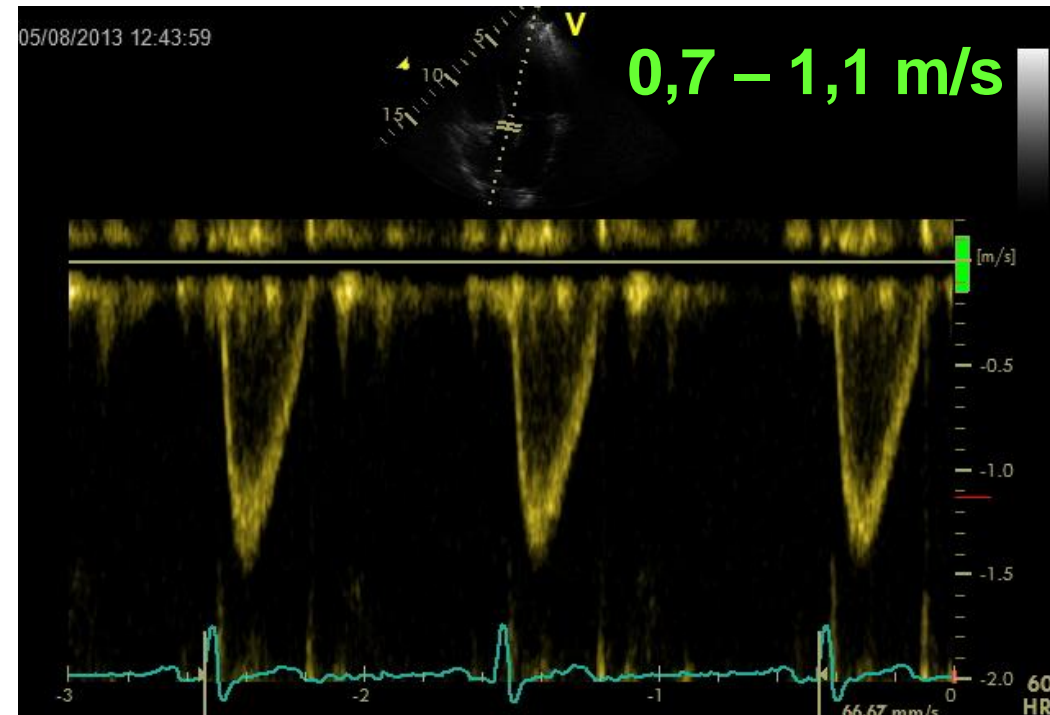


Normální dopplerovské nálezy: LVOT, aortální chlopeň

CW záznam toku přes aortální chlopeň
Apikální 5-dutinová projekce



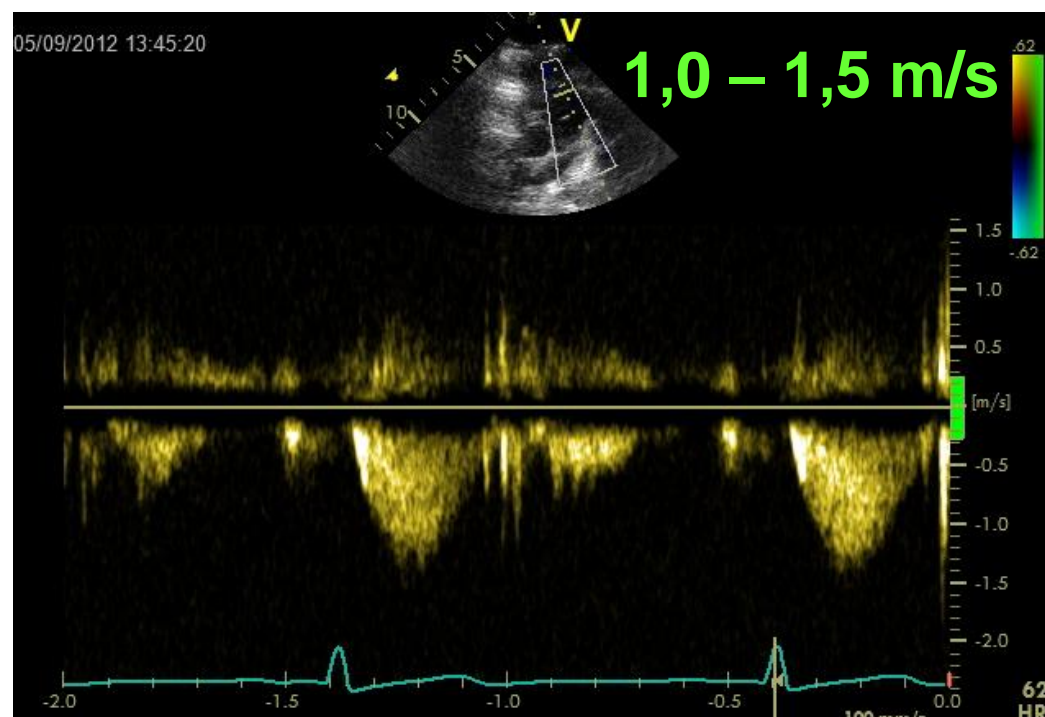
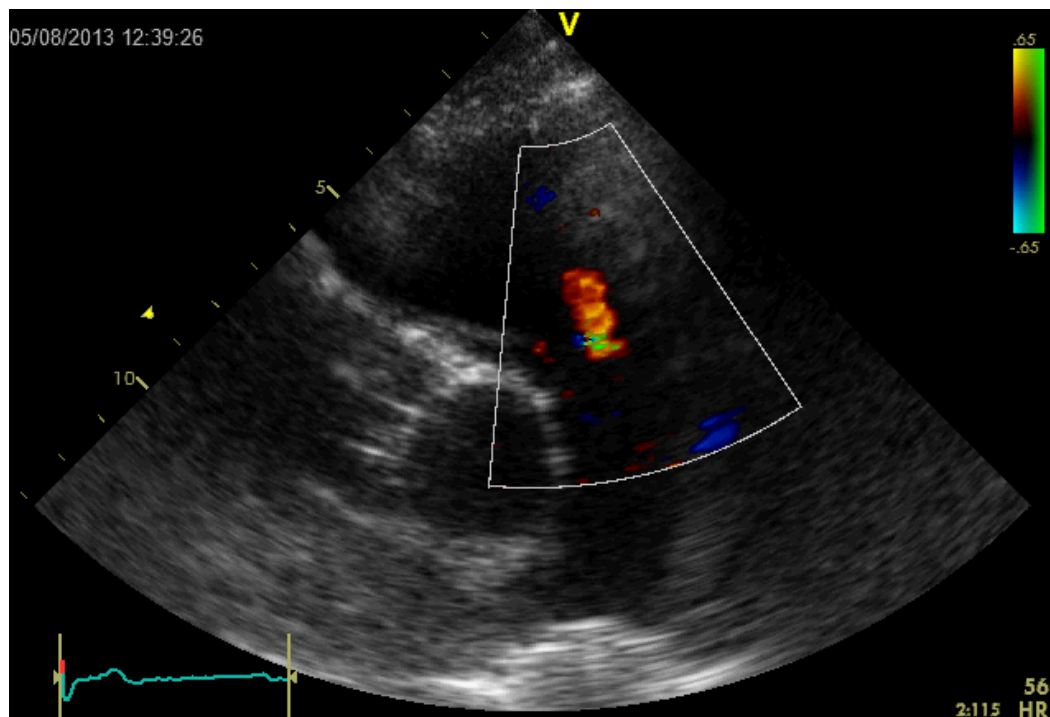
PW záznam toku v LVOT
(0,5-1cm pod chlopní)
Apikální 5-dutinová projekce



Normální dopplerovské nálezy: RVOT, chlopeň plicnice

RVOT a pulmonální chlopeň v CFM

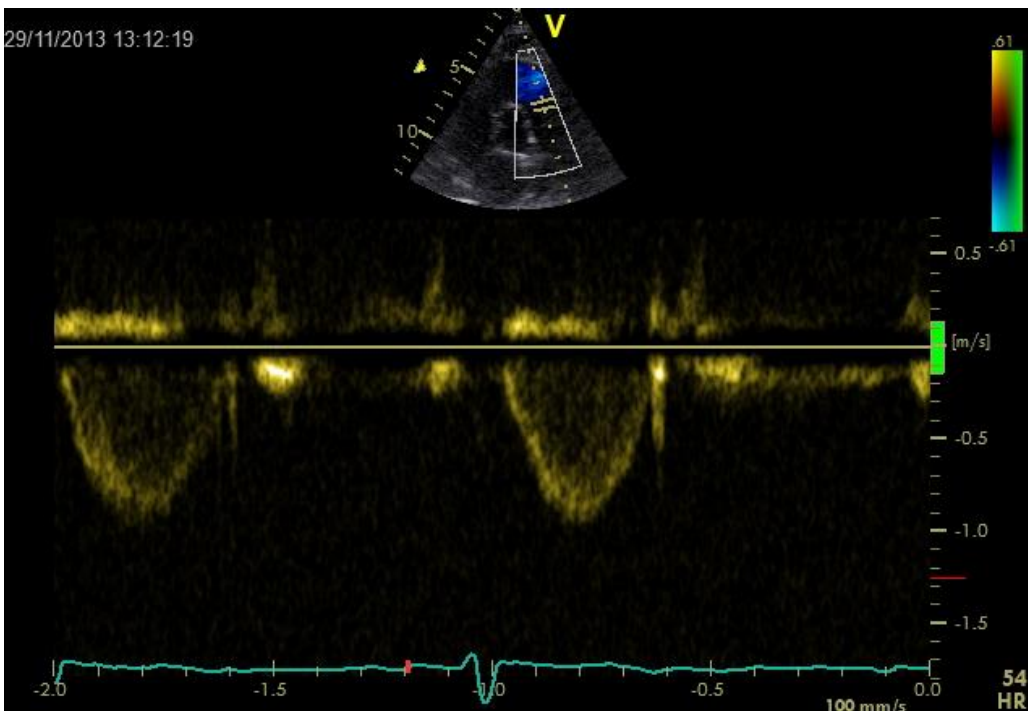
CW záznam toku přes chlopeň plicnice
Parasternální projekce na krátkou osu



Normální dopplerovské nálezy: RVOT, chlopeň plicnice

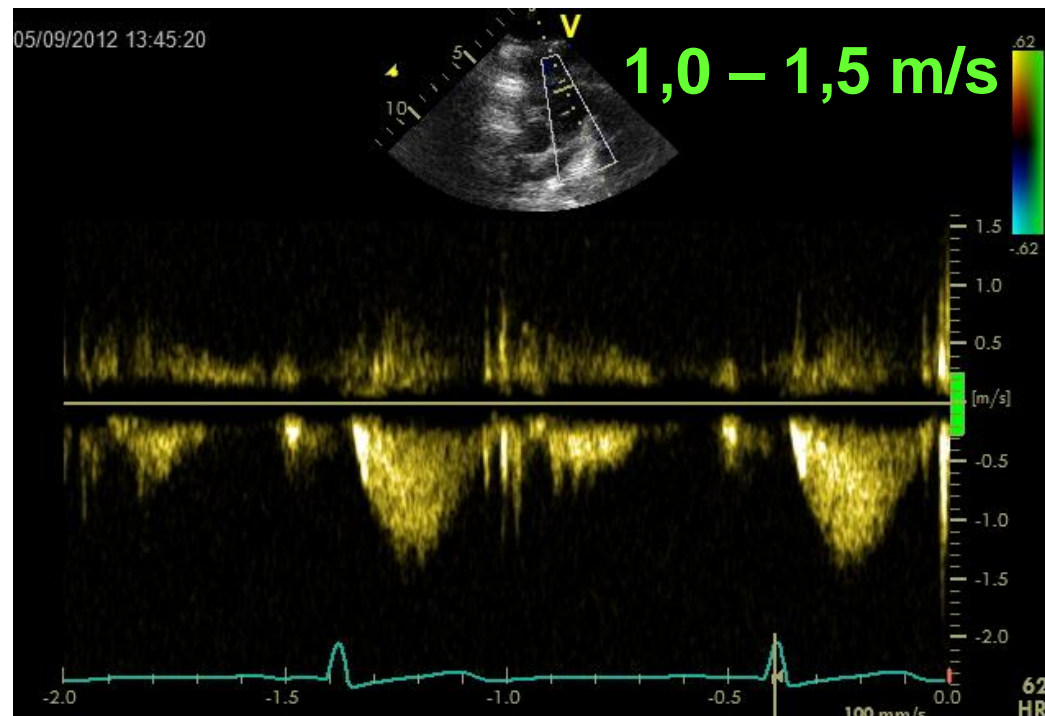
PW záznam toku v RVOT

Parasternální projekce na krátkou osu



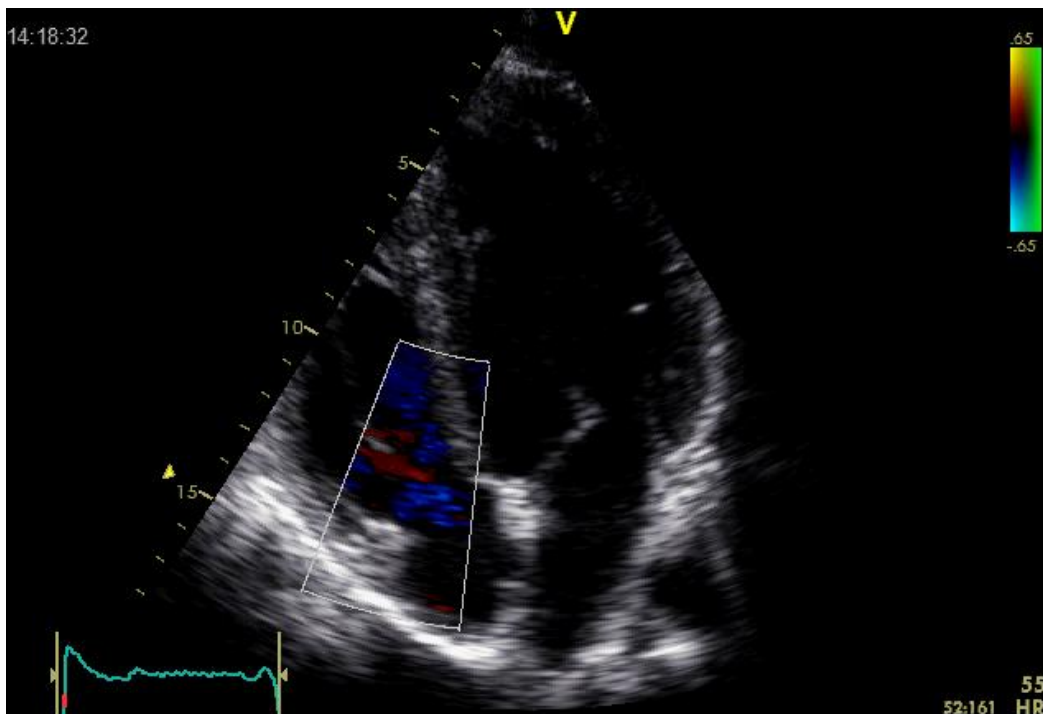
CW záznam toku přes chlopeň plicnice

Parasternální projekce na krátkou osu

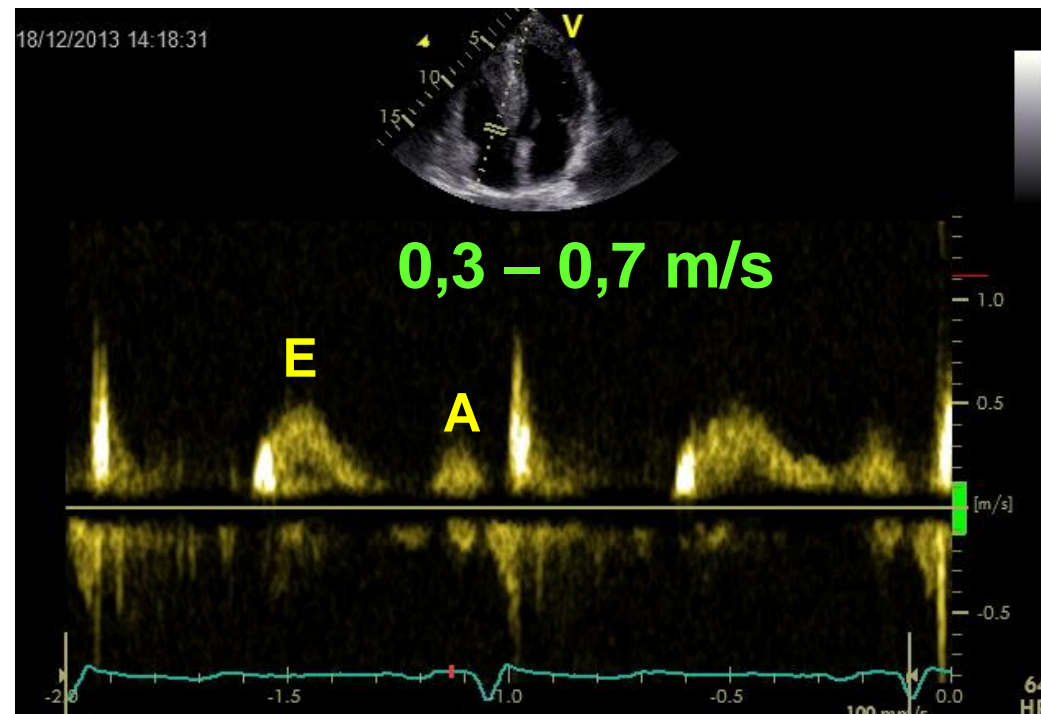


Normální dopplerovské nálezy: trikuspidální chlopeň

Stopová trikuspídální regurgitace v CFM



PW záznam transtrikuspidálního toku
Apikální 4-dutinová projekce



Normální dopplerovské nálezy: plicní žíly, jaterní žíly

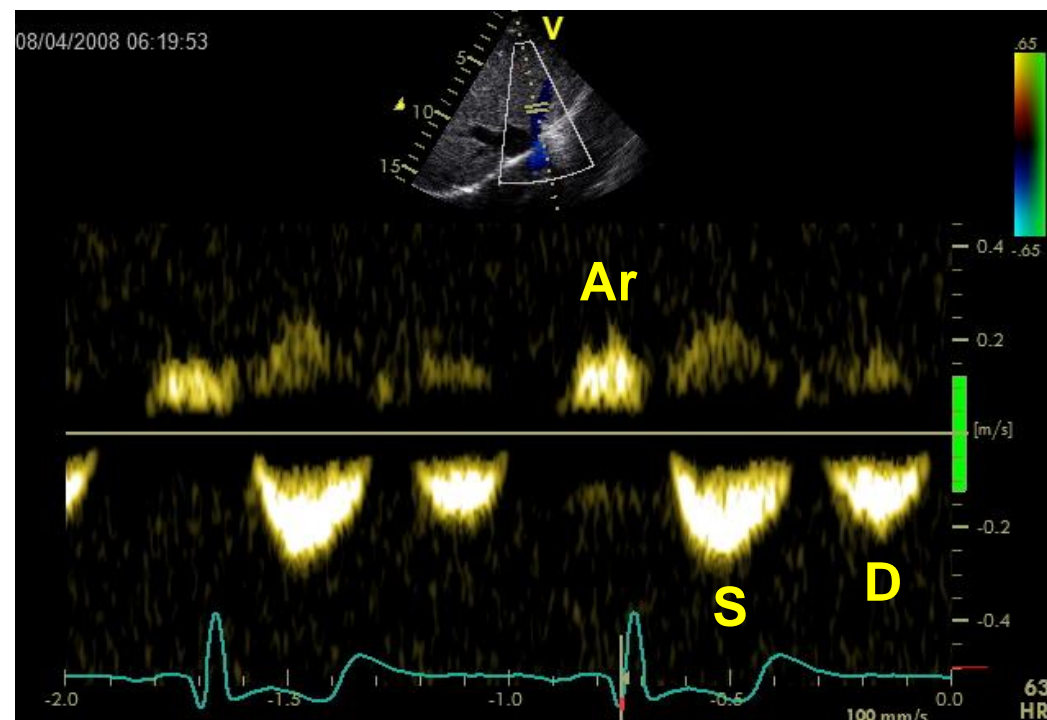
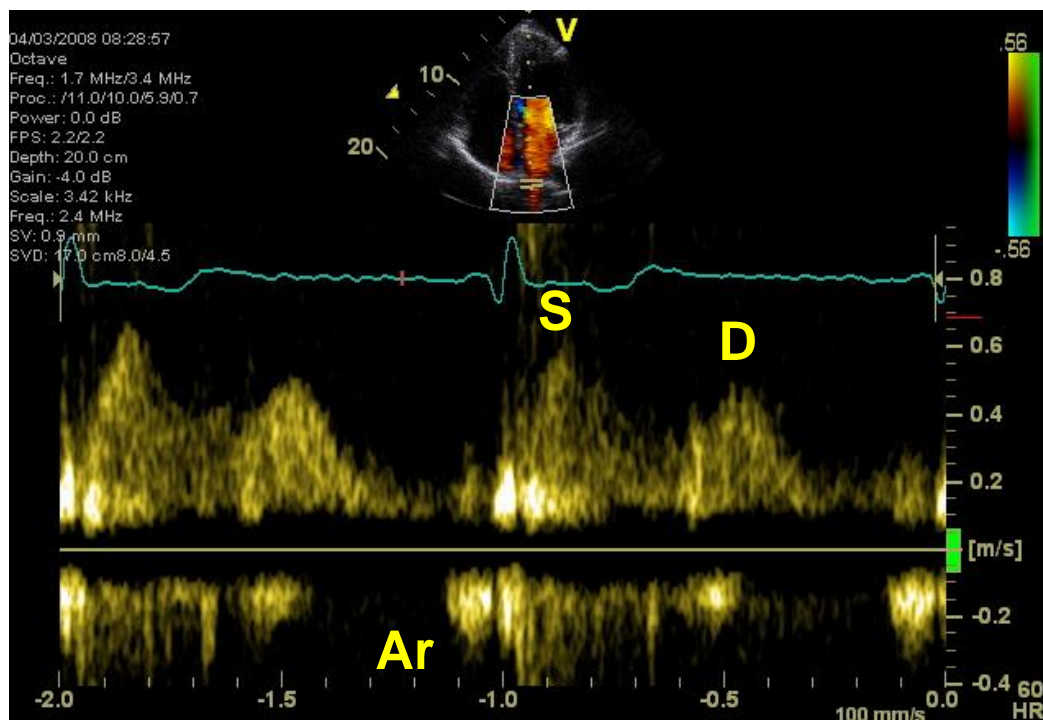


PW záznam



Apikální 4-dutinová projekce

Subkostální projekce





Závěry

- ✓ Co nejmenší incidenční úhel při spektrálním dopplerovském vyšetření
- ✓ Nejvhodnější dopplerovské vyšetřovací okno / projekce \neq ideální projekce morfologická (~ incidenční úhel)
- ✓ Spektrální dopplerovské vyšetření provádět pod vedením CFM
- ✓ Pro zlepšení kvality zobrazení spektrálního dopplerovského záznamu zmrazit 2D zobrazení
- ✓ Velikost CFM sektoru ~ snímkovací frekvence
- ✓ Kvalita dopplerovského záznamu \leftarrow optimální nastavení zisku signálu a dalších kontrolních prvků (rychlostní škála, rychlost záznamu, ...)



Děkuji za pozornost !