

M U N I
M E D

Elastografie

Erik Staffa

Biofyzikální ústav

Přednáška převzata a doplněna z materiálů projektu FRVŠ 911/2013

Elastografie

- **Je neinvazivní metoda založená na diagnostickém ultrazvuku nebo magnetické rezonanci zobrazující elastické vlastnosti biologických tkání.**
- **Metoda je obdobou palpačního vyšetření.**
- **Vychází ze skutečnosti, že různé biologické tkáně mají různou elasticitu, a že změny elastických vlastností souvisejí s patologií a abnormalitami tkání.**
- **Podstatou metody je zkoumání odezvy tkání na silové působení.**

- **Mnoho patologických tkání (např. nádorových) vykazuje při UZ nebo MRI vyšetření slabý kontrast nebo je nelze zobrazit vůbec.**
- **Metody založené na mapování elastických vlastností jsou tedy velmi vhodné pro zobrazení struktury a patologie takových tkání.**
- **Měření elasticity přináší novou informaci o tkáních, kterou lze využít pro lékařskou diagnostiku.**
- **Elastografie se využívá zpravidla jako doplňková metoda pro zvýšení specifity diagnózy.**

Klinické aplikace

Játra (fibróza, cirhóza)

Rakovina prsu

Rakovina prostaty

Mozek

Srdeční dysfunkce

Šlachy

Neurodegenerativní

onemocnění

Selhání ledvin

Lymfatické uzliny

Štítná žláza

Mléčná žláza

Měkké tkáně

Pankreas

Kůže

Cévy

Gynekologie

Intravaskulární elastografie

Mechanické vlastnosti tkání

Mechanické vlastnosti tkání závisí především na molekulových vazbách jednotlivých prvků tkání a na jejich mikroskopickém i makroskopickém uspořádání.

- **Pevnost (tuhost):** Strukturní soudržnost a odolnost látky vůči působení vnější síly.
- **Pružnost (elasticita):** Schopnost látky vrátit se po odeznění deformující síly zpět do původního tvaru.
- **Tvárnost (plasticita):** Schopnost látky trvale změnit svůj tvar vlivem působení deformující síly.
- **Viskozita:** Odpor tekutiny ke smykové deformaci. Popisuje vnitřní tření a míru tekutosti kapalin a plynů.

Vlastnosti biologických tkání

Biologické tkáně jsou složité látky, které vykazují:

- Viskózně-elastické vlastnosti
- Anizotropní charakter
- Nelinearita
- Nehomogenita
- Paměťový efekt, adaptibilita
- Vliv stárnutí a kondice organismu

Popis mechanických a hlavně elastických vlastností tkání je tedy velmi složitý a pro modelování a výpočty vyžaduje značné aproximace a zjednodušení.

Hookeův zákon

Elastické vlastnosti tkání lze nejjednodušeji popsat Hookeovým zákonem. Vyjadřuje lineární vztah mezi deformací tělesa (ε) a vnějším napětím (σ) – silou, která tuto deformaci způsobuje. Youngův modul pružnosti

Konstantou úměrnosti je tzv. modul pružnosti.

$$\text{modul pružnosti} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Mechanické napětí

Mechanické napětí (σ) vzniká v tělese jako důsledek působení vnější síly a lze jej chápat jako tlak síly (F) působící na jednotku plochy tělesa (S):

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Podle směru působící síly rozlišujeme:

- Normálové napětí
- Tečné (smykové) napětí

deformace

Deformaci tělesa popisujeme jako změnu rozměrů, objemu a tvaru tělesa působením vnější síly.

Podle směru síly rozlišujeme několik deformací a každé přiřazujeme vlastní modul pružnosti:

- **Deformace tahem/tlakem:**

Youngův modul pružnosti v tahu/tlaku (E)

- **Smyková deformace:**

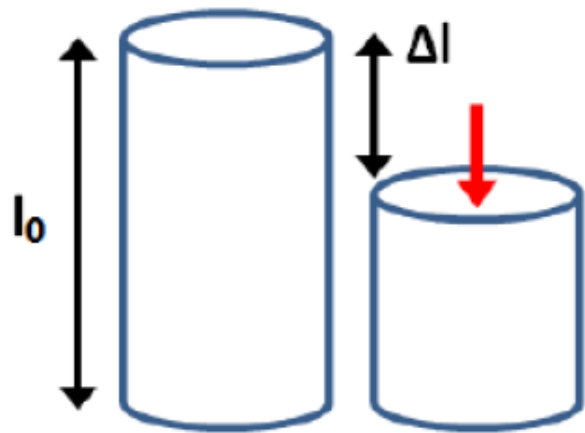
Modul pružnosti ve smyku (G)

- **Objemová deformace:**

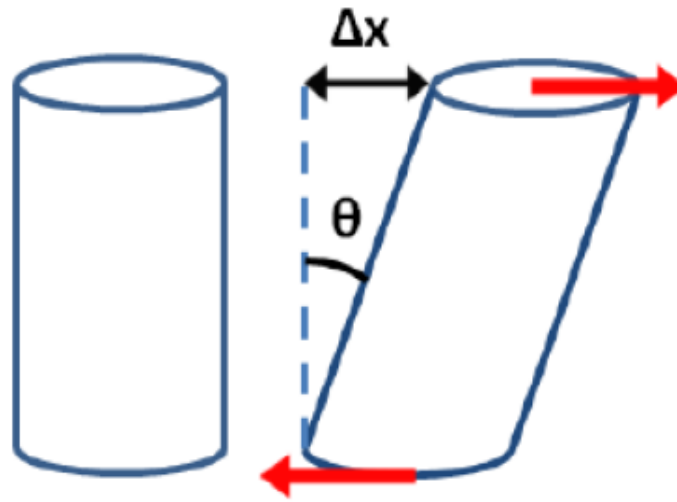
Modul objemové pružnosti (K)

deformace

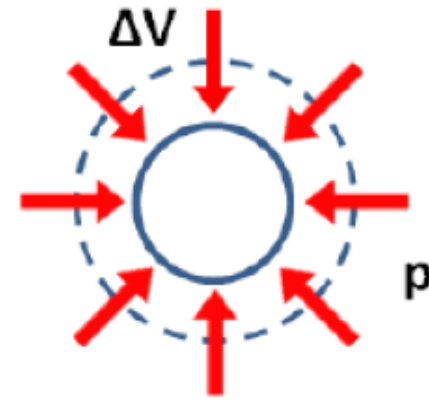
$$\varepsilon_E = \frac{\Delta l}{l_0}$$



$$\varepsilon_G = \frac{\Delta x}{l_0}$$



$$\varepsilon_K = \frac{\Delta V}{V_0}$$



Elasticita tkání

Šlachy jsou tvořeny paralelními svazky kolagenních vláken s malým zastoupením vláken elastických. Zprostředkovávají přenos mechanické síly ze svalu na kost. Mez pevnosti je u různých šlach odlišná, většinou se alespoň hrubě shoduje s mezí pevnosti kolagenních vláken (kolem 50 MPa). Průtažnost šlachy je 10–12 % s věkem, ale jejich pružnost klesá.

Vazy jsou svojí strukturou velmi podobné šlachám, mají tedy i podobné biomechanické vlastnosti. Vazy mají v pohybovém aparátu především zpevňovací funkci

Chrupavka tvořena podle stejného plánu jako vazivo, její biomechanické vlastnosti jsou tedy dány především složením mezibuněčné hmoty. Dle jejího složení se rozlišují 3 druhy chrupavky: hyalinní (4,5 Mpa), vazivová (3 Mpa), elastická (<3 Mpa).

Elasticita **tkáně epitelové** závisí na vlastnostech tkáně pojivové uložené pod ní. Ty jsou navzájem odděleny basální membránou složenou z vláken kolagenních, elastických a retikulárních.

Přímo ve **svalovém vlákně** je elasticita zajištěna proteinem titinem, největším proteinem v lidském těle. Titin se v sarkomeře váže na myosin a Z-linii a funguje jako pružina, pomáhající kontrakci. Působí proti nadměrnému natažení sarkomery (svalu) a podílí se i na udržování trvalého tonusu svalu (0,1-0,3 MPa). Na elasticitě svalů se podílí i jejich fascie složené z hustého uspořádaného kolagenního vaziva.

S věkem se všeobecně mez pevnosti snižuje

Elasticita tkání

Tabulka 4.1: Elasticita biologických tkání

Tkáň		Youngův modul (<i>kPa</i>)
Prsní tkáň	normální tuk	18-24
	normální žláza	28-66
	fibrózní tkáň	96-244
	karcinom	22-560
Prostata	normální anterior	55-63
	normální posterior	62-71
	BPH	36-41
	karcinom	96-241
Játra	normální	0,4-6,0
	cirhotická	15-100
Tepna		700-3000
Chrupavka		790
Šlacha		800
Zubní sklovina		20 000 000-84 000 000
Stehenní kost		11 000 000-20 000 000

Elasticita tkání

Zvýšená elasticita může být známkou patologických tkání. Snížená elasticita může značit místa s tekutým obsahem (např. cysty).

Rozdíly v tuhosti mohou odlišovat také benigní a maligní charakter ložisek.

- **Maligní nádory:** asi 30 až 270 kPa
- **Benigní ložiska:** asi 1 až 70 kPa

Ultrazvuková elastografie

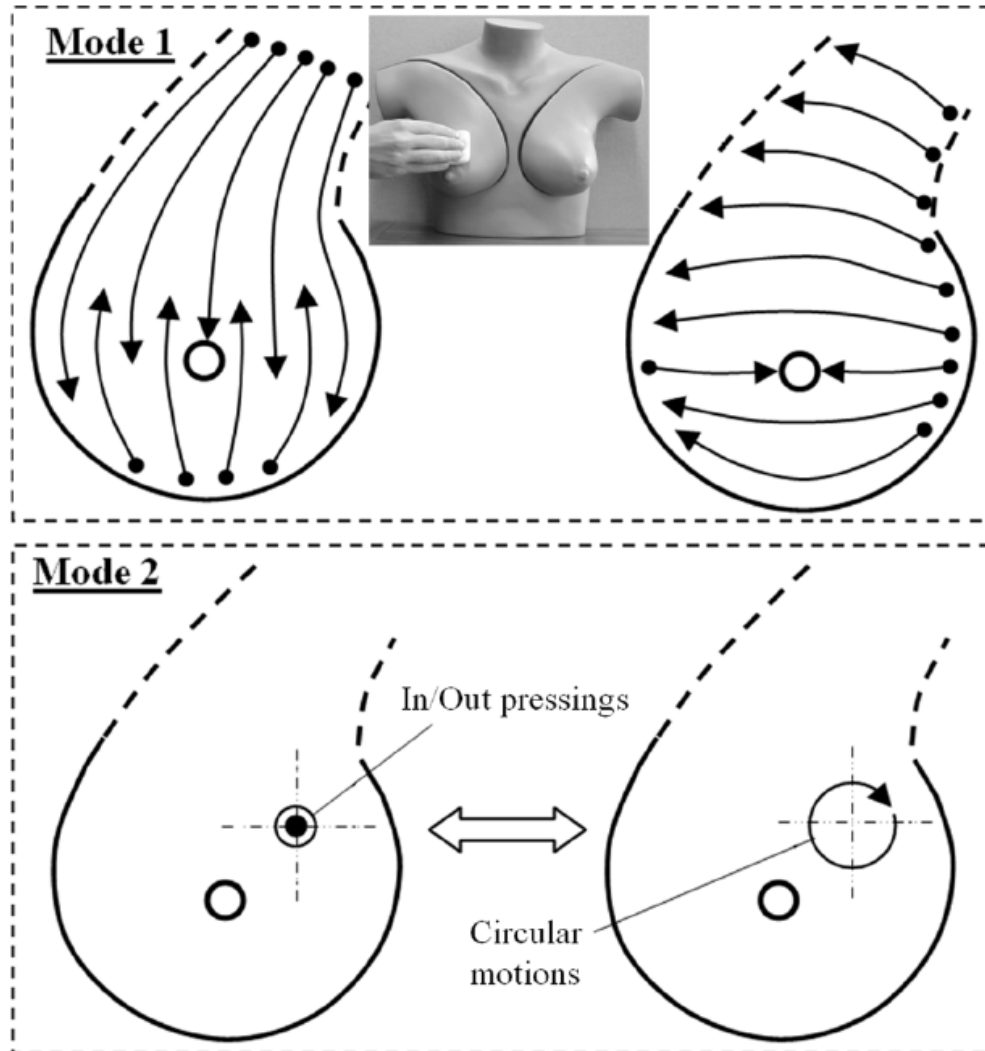
Výstupem ultrazvukové elastografie je ultrazvukový B-obraz překrytý barevnou mapou. Každému bodu tkáně je přiřazena určitá barva, která kóduje jeho elastické vlastnosti.

Měkké tkáně bývají obvykle kódovány teplými odstíny (červená, žlutá), tuhé tkáně pak studenými barvami (modrá, fialová).

- Statická (kompresní) elastografie
- Dynamická (shear waves) elastografie



Mechanické zobrazení

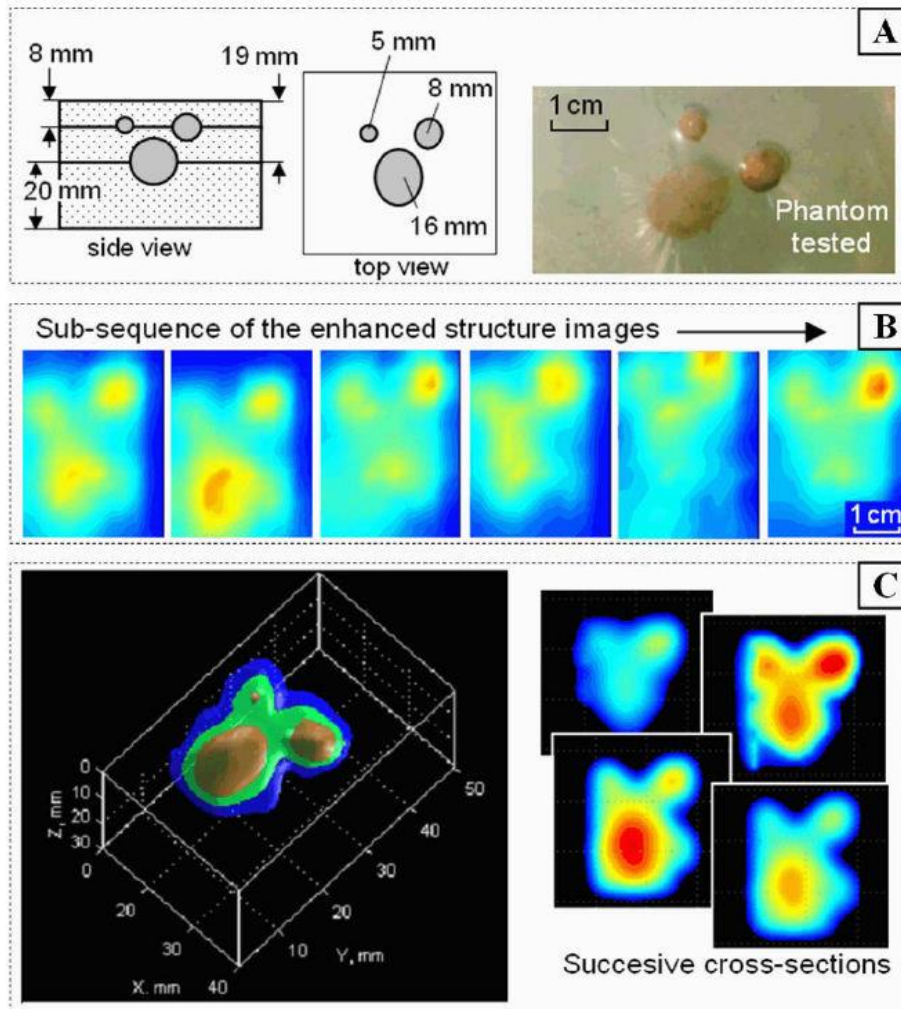


Model pro vyšetření prsu pomocí BMI.

Režim 1 zobrazuje celkové vyšetření prsu s cílem detekovat podezřelá místa pomocí lineárních kluzných pohybů.

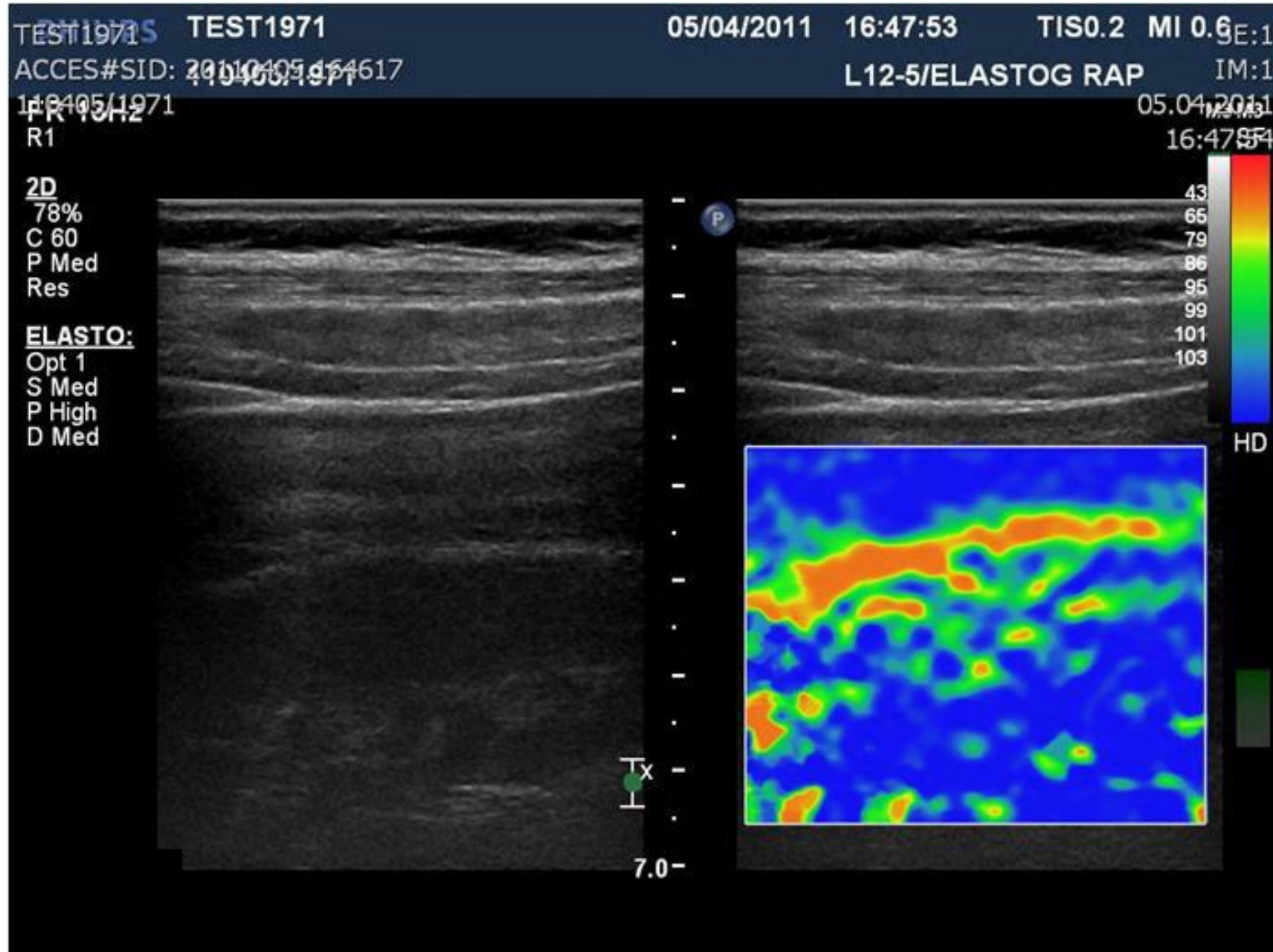
Režim 2 ukazuje lokální skenování podezřelých míst pomocí tlakových pohybů sondy svisle nahoru/dolů (vlevo) a krouživých pohybů (vpravo).

Mechanické zobrazení 3d



**Rekonstrukce
trojrozměrného obrazu (C)
z řady 2-D obrazů (B)
zaznamenaných při
kruhovém pohybu BMI
sondy nad vloženými
strukturami v tkáňovém
fantomu (A)**

Ultrazvuková elastografie

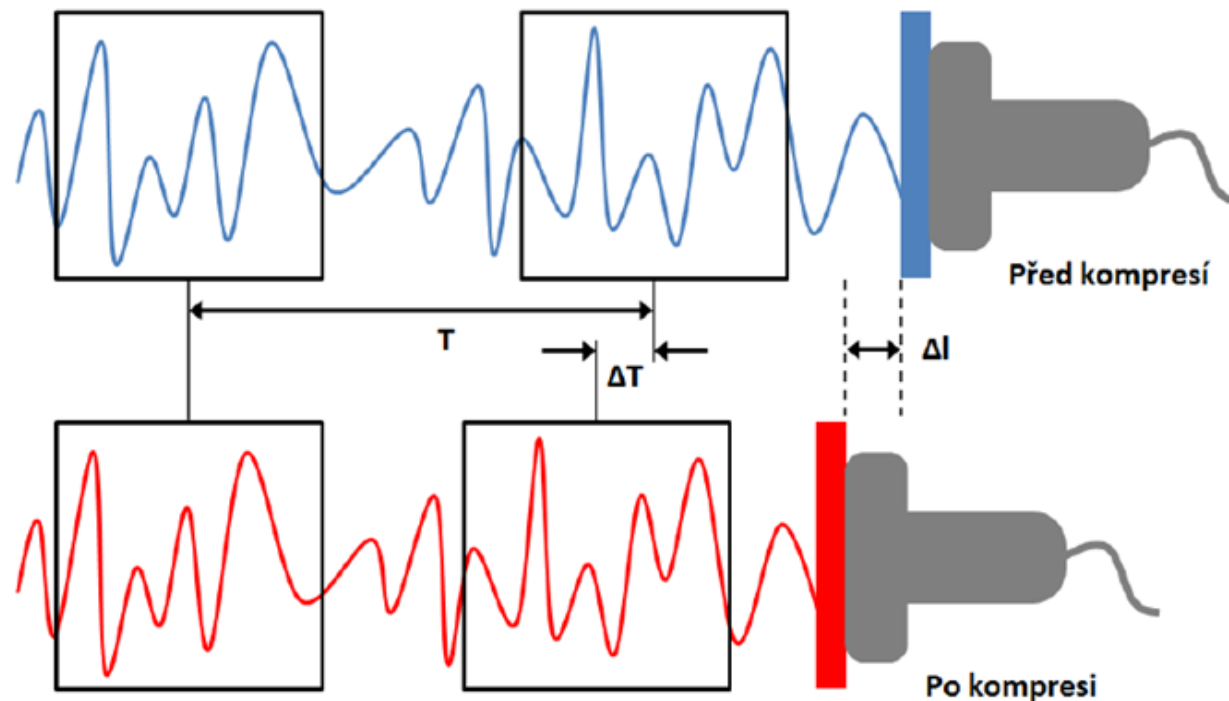


Statická (kompresní) elastografie

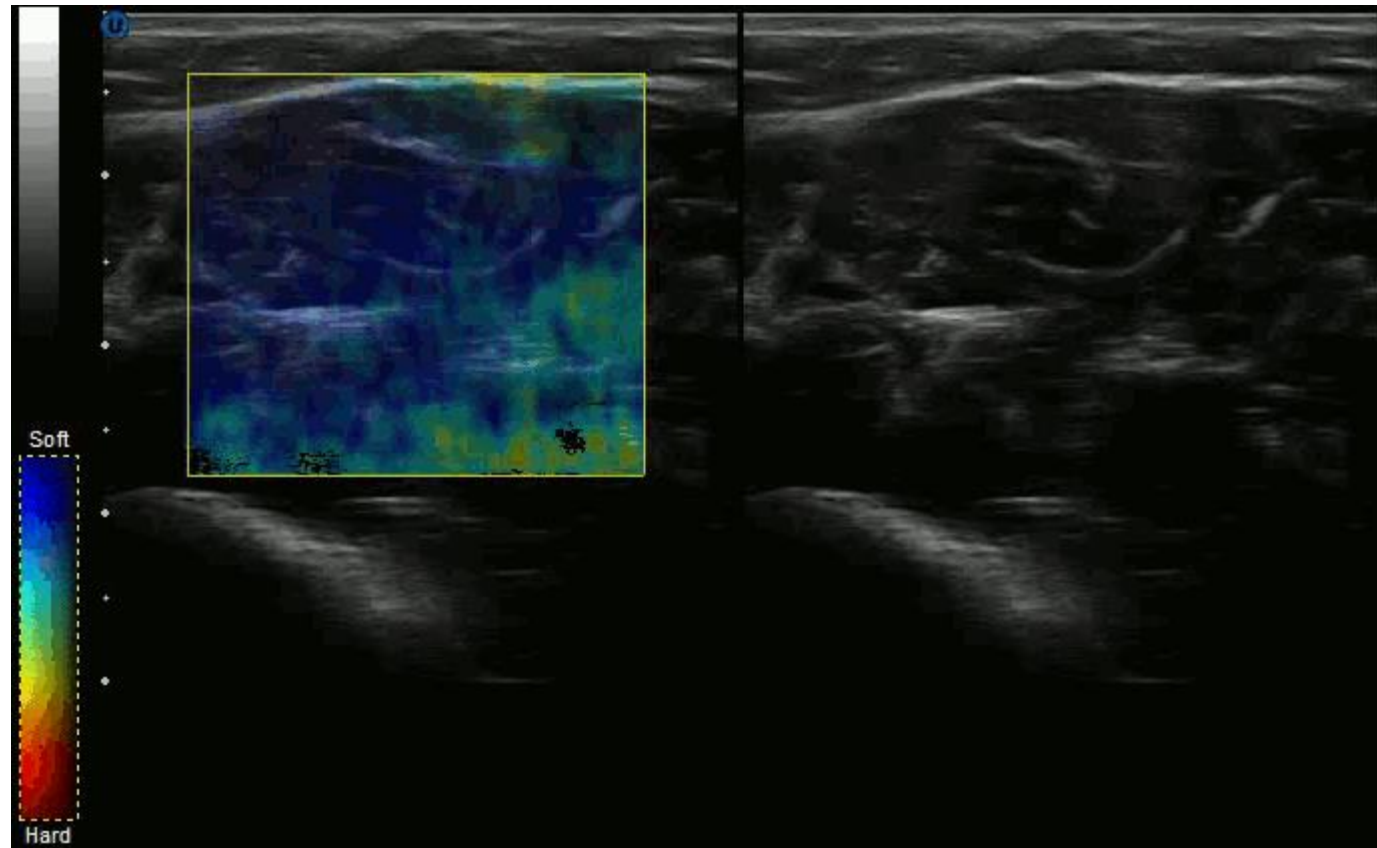
- Elasticita se určuje na základě rozdílu UZ signálu před a po kompresi tkáně.
- Stlačení tkáně: přímo měřící UZ sondou, externí zařízení, akustický tlak fokusovaného UZ paprsku nebo fyziologické pohyby v organismu.
- Deformace se pro každý bod tkáně určuje korelačními algoritmy z dvojic obrazů před a po kompresi.

Statická (kompresní) elastografie

Nejčastěji se posun tkáně vyhodnocuje jako časový rozdíl UZ signálů (paprsky A-módu) odražených v různých hloubkách tkáně před a po stlačení.



Manuální komprese



Statická (kompresní) elastografie

Metoda tkáňového Dopplera:

- Prostřednictvím dopplerovského měření je při deformaci počítána rychlost pohybu tkáně.
- Z časové sekvence obrazů rychlosti pohybu tkáně se následně vyhodnocuje gradient rychlosti.
- Na základě gradientu rychlosti je nakonec odhadována elasticita zobrazovaných tkání.
- Pro dosažení rychlostí pohybu dostatečných pro výpočet musí být tkáň stlačována až o několik milimetrů.

Statická (kompresní) elastografie

Metoda založená na radiační síle UZ paprsku (ARFI):

- Využívá velkého akustického tlaku fokusovaného UZ ke kompresi tkáně. Velikost radiační síly roste s intenzitou UZ a je největší ve fokusační zóně.
- K vytvoření měřitelných posunů tkáně je zapotřebí velmi intenzivního UZ pulzu.
- Posun tkáně se zjišťuje zobrazovacími (čtecími) pulzy vyslanými před a po aplikaci intenzivního pulzu.
- Posuny jsou vyhodnoceny jako změny UZ signálu (paprsky A-módu) před a po kompresi tkáně.

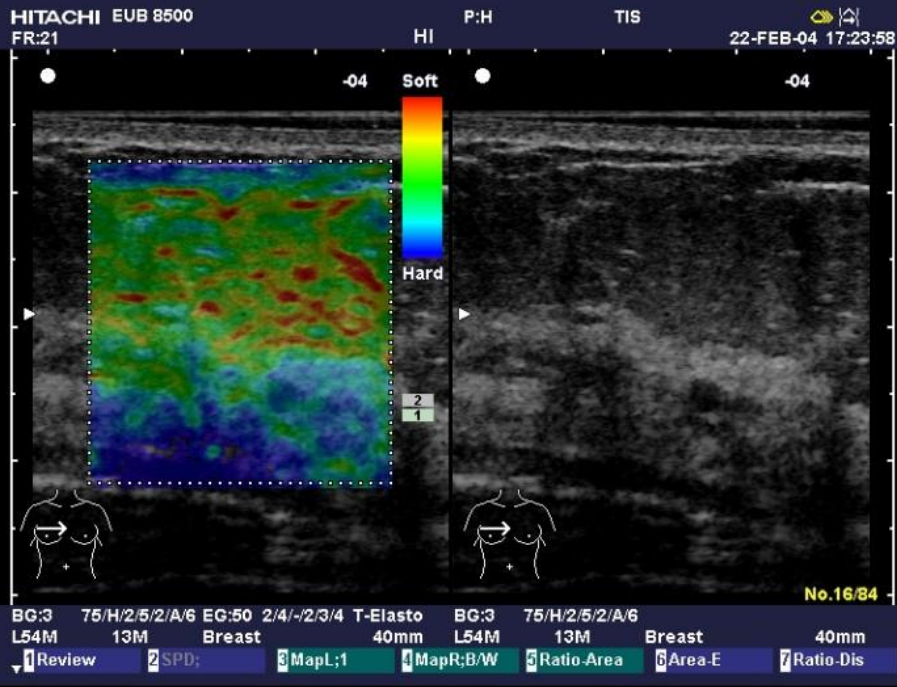
Statická (kompresní) elastografie

Výhody:

- Jednoduchost, dostupnost, cena.
- Zobrazení v reálném čase.

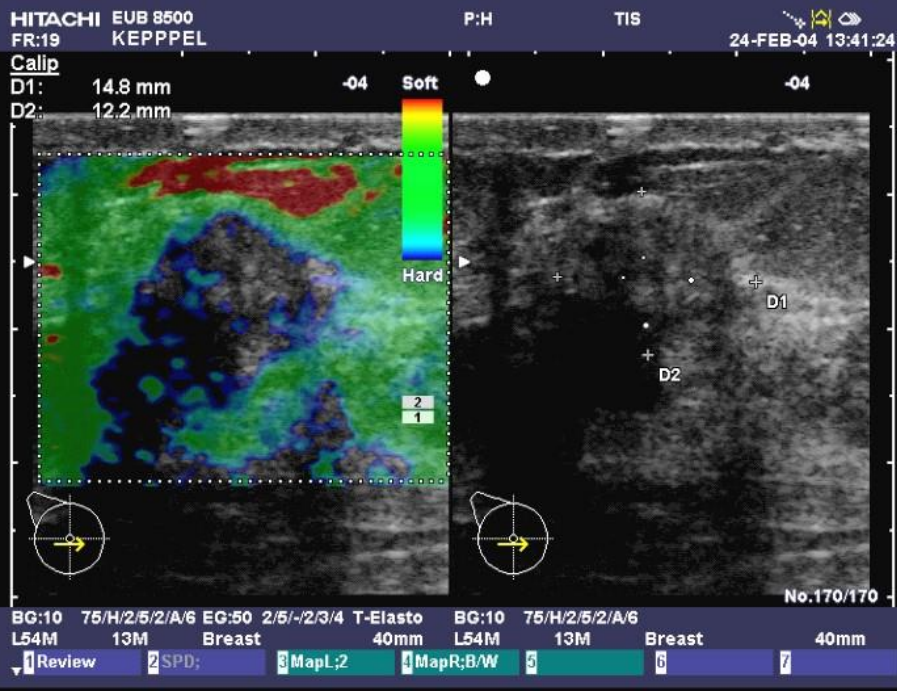
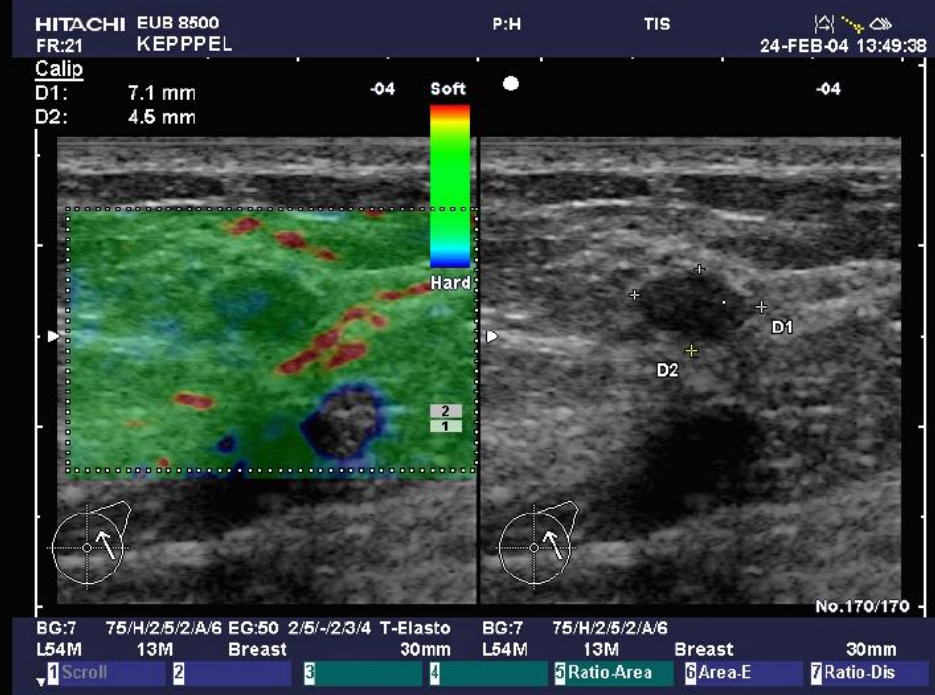
Nevýhody:

- Často neznáme velikost deformačního napětí, proto nelze elastické vlastnosti tkáně (E) určit kvantitativně. Elasticita se pak odhaduje pouze na základě deformace.
- Každý elastogram je víceméně originál, pořízený za daných podmínek. Problematické je srovnání elastogramů.
- Kvalita obrazu i jeho analýza závisí na zkušenostech lékaře.
- Elasticitu lze měřit pouze ve směru UZ paprsku.



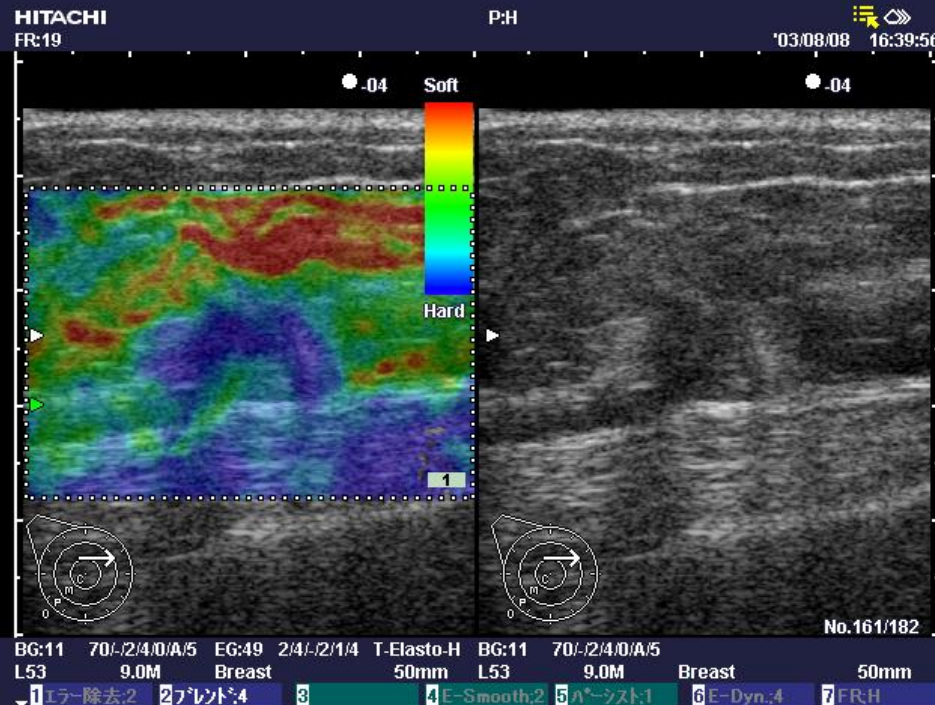
ELASTOGRAM
ZDRAVÉHO PRSU

ELASTOGRAM
BENIGNÍ LEZE V
PRSU



ELASTOGRAM
MALIGNÍ LEZE V PRSU

ELASTOGRAM MALIGNÍHO
LOŽISKA V PRSU



Dynamická (shear waves) elastografie

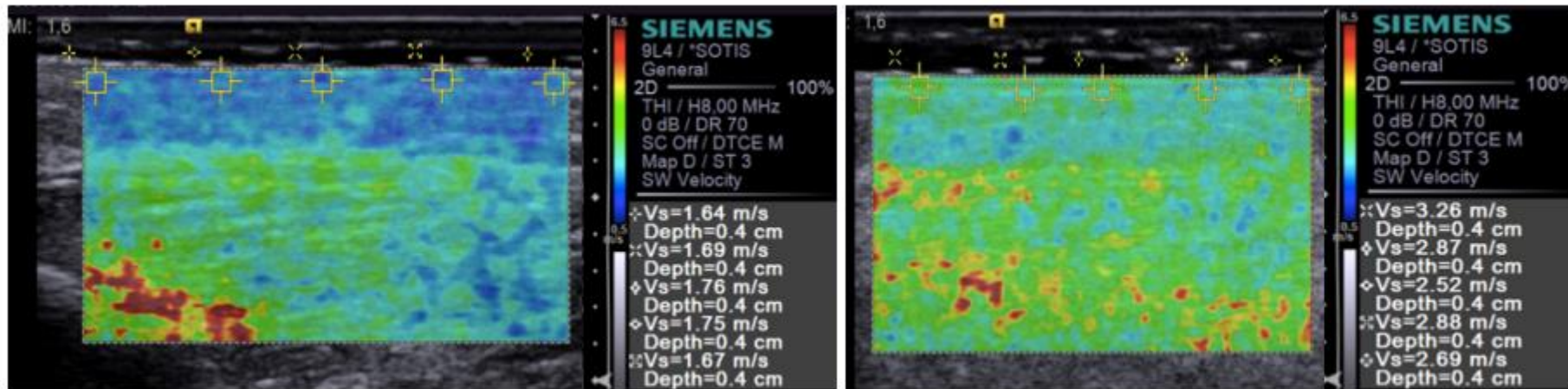
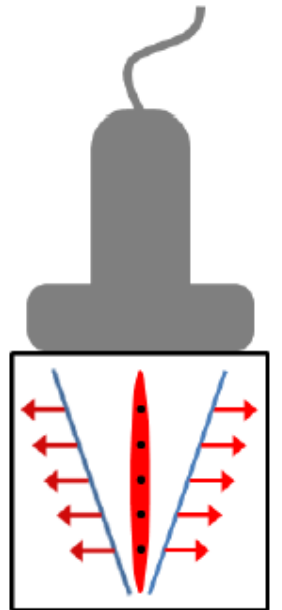
- Je založena na střižných vlnách (shear waves), které vznikají jako odezva tkáně na mechanické vibrace s nízkou frekvencí a šíří se tkáněmi v příčném směru.
- Zdroje vibrací: fyziologické pohyby v organismu, externí vibrátory nebo pulzy akustického tlaku vytvořené fokusovaným UZ paprskem.
- Rychlost šíření střižných vln je nízká (cca 1-10 m/s) a závisí hlavně na elasticitě (E) a hustotě (ρ) tkání:

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$$

Hustota tkání (ρ) je známá: asi 1047 ± 5 kg/m³.

Dynamická (shear waves) elastografie

- Vytvoření střížných vln pomocí akustického tlaku fokusovaného UZ paprsku.
- Sondy umožňují vytvořit více fokusačních zón v různých hloubkách tkáně.



(A) Healthy Control

(B) Patient

Dynamická elastografie – snímek dorsálního úseku ruky

Dynamická (shear waves) elastografie

Výhody:

- Kvantitativní popis elasticity (Youngův modul).
- Zobrazení v reálném čase.
- Detekce milimetrových lézi a velmi přesná lokalizace.
- Každý elastogram je pořízen stejným způsobem. Obrazy lze snadněji srovnávat a analyzovat (reprodukovatelnost).
- Jednoduchá obsluha. Kompresi tkáně provádí přístroj dle nastavených parametrů.

Dynamická (shear waves) elastografie

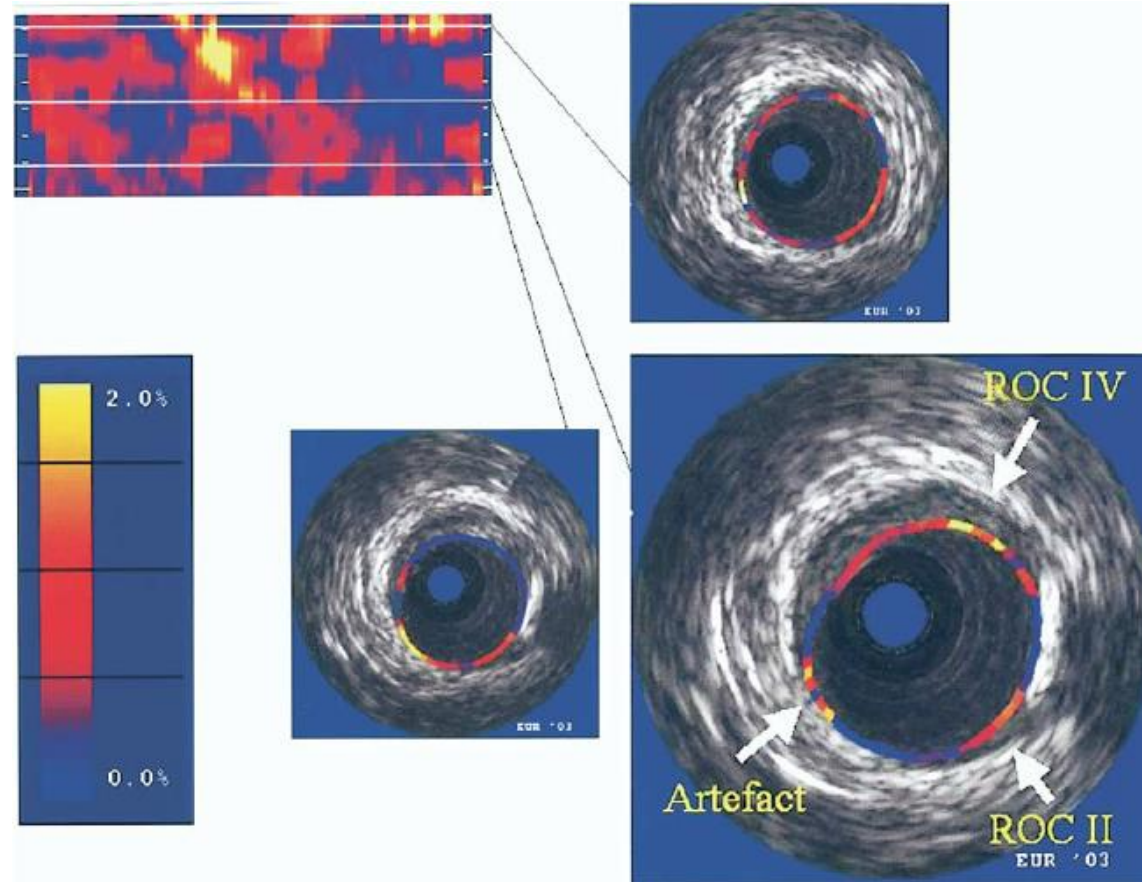
Nevýhody:

- Náročná technologie a vyšší cena. Vyžaduje ultrarychlé zobrazování a speciální UZ sondy.
- Při kompresi tkáně akustickým tlakem UZ vlnění je nutné volit dostatečnou intenzitu vln, aby měly generované střížné vlny delší dosah a menší útlum.
- S vyšší intenzitou UZ vln souvisí větší riziko biologických účinků UZ a konstrukční problémy (zahřívání sondy).

Intravaskulární elastografie

- Princip měření je obdobný jako u statické ultrazvukové elastografie.
- Ultrazvukový snímač se zavádí do snímané cévy v podobě katétru.
- Komprese: pulsace cévy nebo intravaskulární balónek.
- Detekce trombů a aterosklerotických plátů.

Intravaskulární elastografie



Elastografie Obecné limitace

- Chybné výsledky způsobují deformace vyvolané jinými silami (tlukot srdce, pulsace cév, dýchání, aj.).
- Chyby způsobené v blízkosti tuhých nepohyblivých struktur (např. kosti), kde se měkká tkáň deformuje jinak než stejná tkáň v jiném místě.
- Omezený dosah měření vzhledem ke krátkému dosahu kompresních sil.
- Obecné limitace ultrazvuku

KLINICKÝ VÝZNAM

- PRŮKAZ LOŽISEK NEDETEGOVATELNÝCH ANI KONVENČNÍ ULTRASONOGRAFIÍ ANI PALPACÍ
- OBJEKTIVIZACE SUBJEKTIVNÍ PALPACE
- DIFERENCIACE MEZI BENIGNÍMI A MALIGNÍMI LEZEMI, UMOŽŇUJÍCÍ:
 - včasnou diagnostiku
 - redukci biopsií
 - identifikaci celé oblasti zaujaté ložiskem
- POSOUZENÍ TERAPEUTICKÉHO EFEKTU
- **PŘES SNAHU O KVANTIFIKACI LZE VÝSLEDKY ZATÍM HODNOTIT JEN KVALITATIVNĚ**