



Úvod do biomechaniky stromu – trojúhelník statiky



Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a Státním rozpočtem ČR InoBio – CZ.1.07/2.2.00/28.0018

Stromy – otevřené disipativní *) systémy

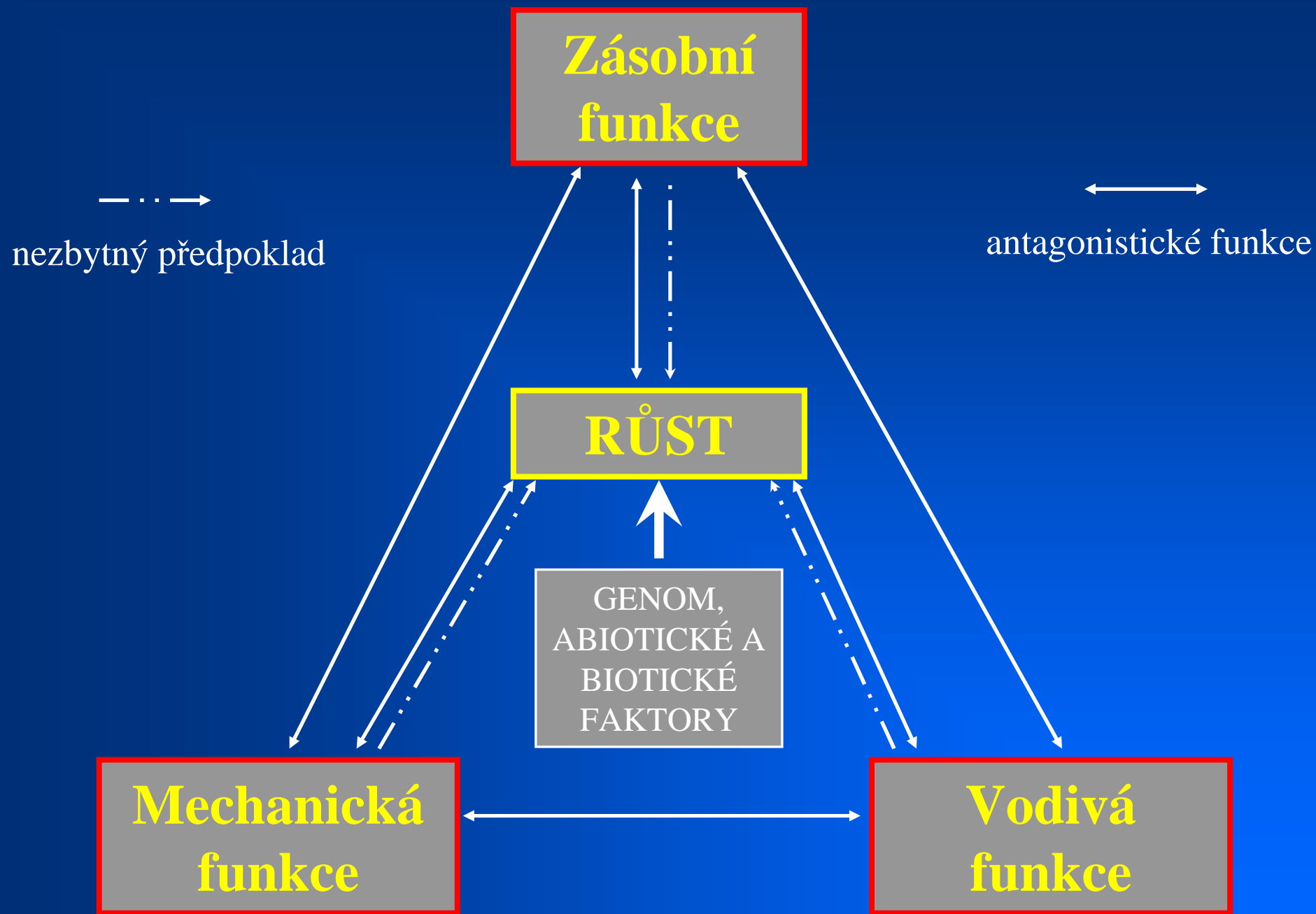
*) Disipace - přeměna jedné energie v jiné druhy energie

Stromy zabezpečují současně několik životně důležitých funkcí:

- (1) musí růst
- (2) musí vykazovat stabilitu pro nesení asimilačních orgánů
- (3) voda a minerální látky musí být vedeny od kořenů k listům
- (4) musí být zásobárnou pro vodu a organické zásobní látky

Všechny funkce jsou úzce propojeny:

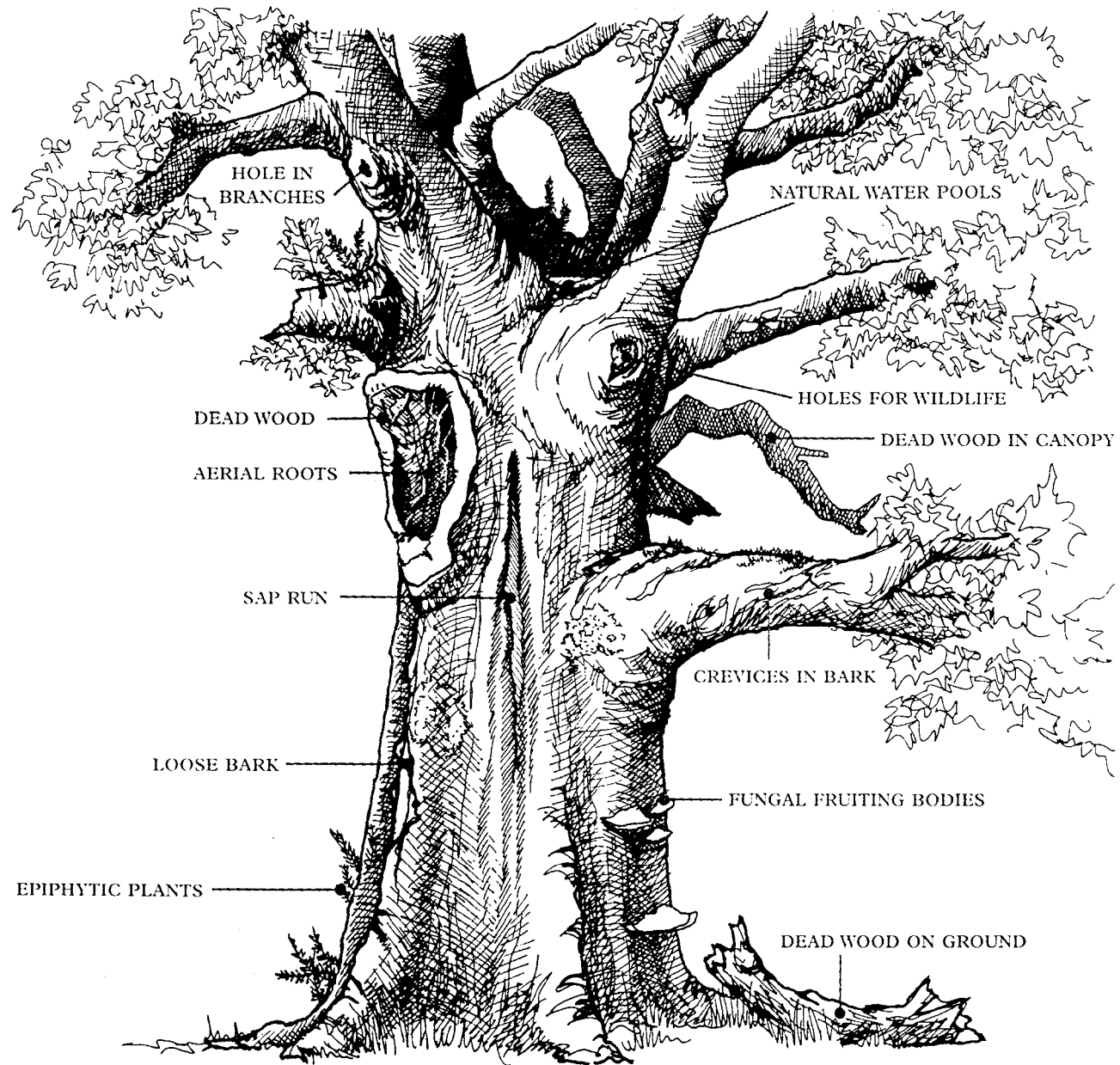
- Mechanická, vodivá a zásobní funkce jsou nepostradatelné pro vlastní růst stromů.
- Komplex genetických, abiotických a biotických faktorů ovlivňuje chování celého systému.



- Uvedené funkce musí být zabezpečovány na orgánové úrovni **každou částí stromu** (kořeny, kmen, větve, listy); každý orgán má ale různý význam pro celek.
- Např. stavba **kmene** by měla reprezentovat energeticky nejméně náročný *kompromis* mezi optimálním plněním funkcí mechanické, vodivé a zásobní.
- Kmen je tvořen zejména zdřevnatělým pletivem – xylémem. Dřevo je ale také měřítkem „**nadbytku**“ asimilačních látek tvořených během růstového období.

Stabilita ↔ Vitalita

Diagram to show the features characteristic of a veteran tree.



Biomechanika stromu

1. Stromy jsou biologickými nosníky, které **optimalizují svůj tvar** adaptabilním (adaptačním) růstem.
2. Optimálního, ustáleného stavu je dosaženo v okamžiku, kdy je **mechanické napětí rovnoměrně rozloženo** po povrchu kmene v daném průřezu a žádná diferenciální plocha průřezu není vystaveny většímu napětí než jiná.
3. Pokud je strom vychýlen z optimálního stavu napjatosti, je tento obnoven excentrickým růstem v místech **maximálního napětí**.
4. Tvorba hojivých pletiv (i dřeva) je nejaktivnější v místech nejvyššího **lokálního napětí**. Tato místa, která jsou nejnáchylnější k porušení, jsou obnovována nejrychleji a nejdříve.

Biomechanika stromu

5. **Letokruhy** se vytvářejí podle rozložení trajektorií **napětí** v podélném i příčném směru. To vede k minimalizaci smykového a ohybového napětí a naopak k maximalizaci tahového a tlakového napětí podél letokruhů.
6. Stromy se snaží převést externě působící namáhání na rovnoměrně rozložené napětí. Další strategií pro snižování vznikajícího napětí, které je indukováno externími silami, je umístění těžiště nad střed kořenového systému. To je zaručeno tvorbou **reakčního dřeva**, tahového u listnáčů a tlakového u jehličnanů. Výjimkou proti tomuto pravidlu je fototropický růst stimulovaný světlem.
7. Stromy reagují na jakoukoliv změnu v zatížení nebo působícím napětí svým **adaptačním růstem**, který umožňuje modifikovat tvar kmene (orgánové koralce).

Optimalizační a adaptační růst

- Fototropismus (dlouživý růst prýtů)
- Geotropismus (dlouživý růst kořenů)
- Orgánové korelace (tloušťkový růst kmene, epinastie)

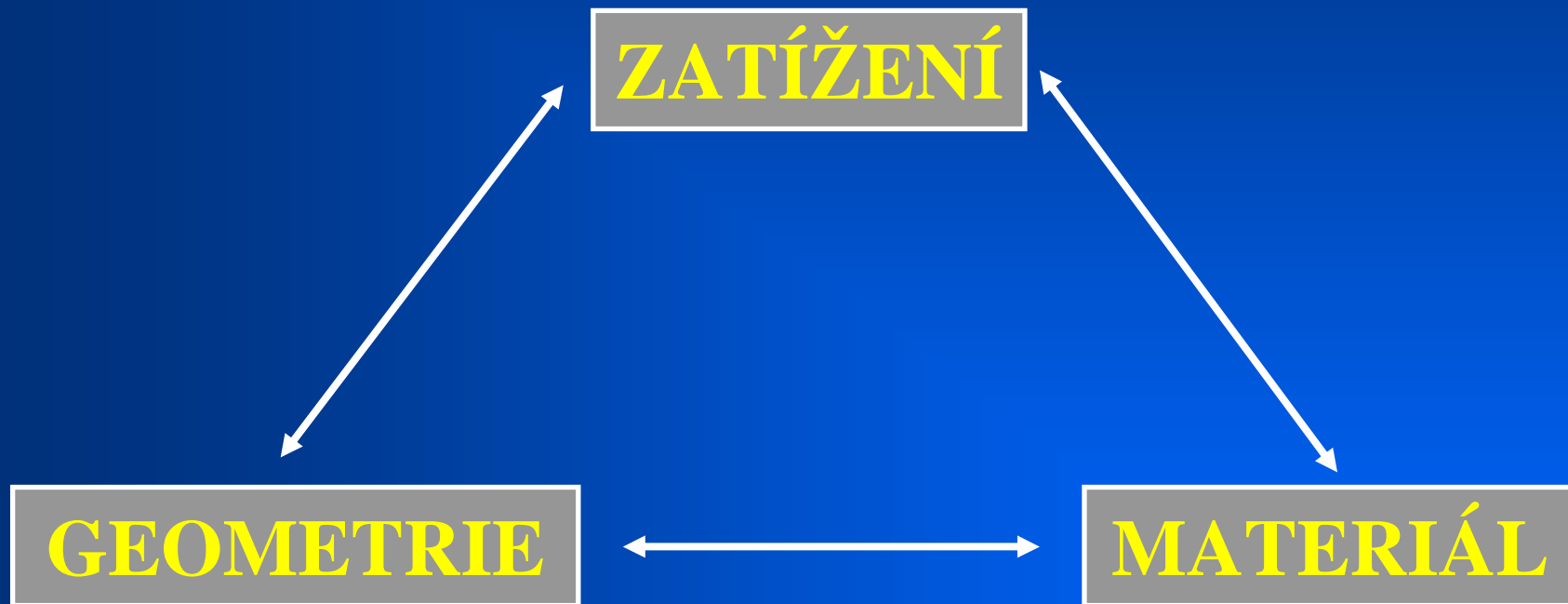
Tvorba dřeva je měřítkem „nadbytku“ asimilačních látek vytvořených během vegetačního období.

Může být vhodným ukazatelem vitality stromu.

Dotazy ?



Trojúhelník stability



Materiálové vlastnosti dřeva

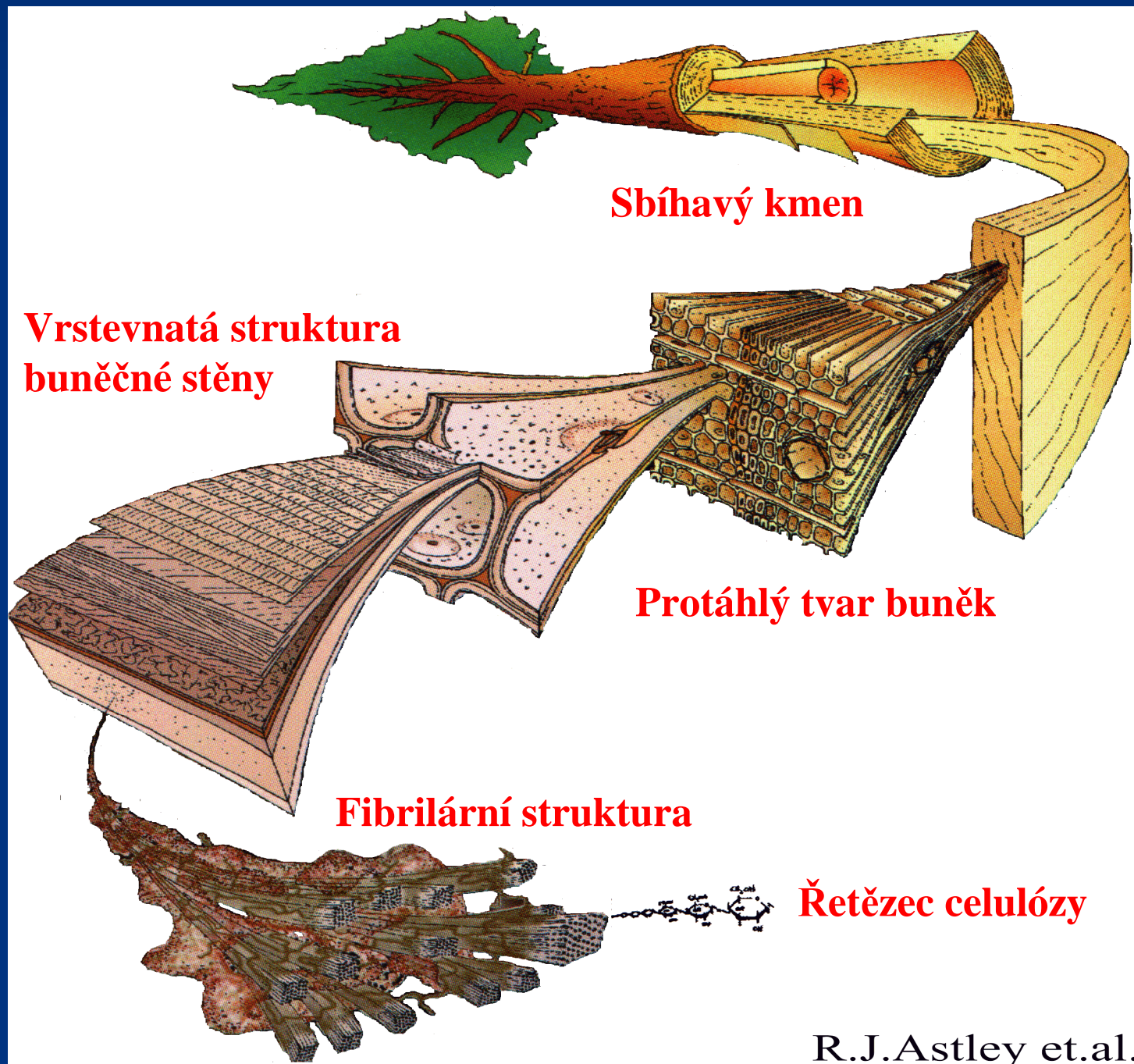
(1. vrchol trojúhelníku statiky)

- a) Dřevo je materiálem s **anisotropním** charakterem všech fyzikálních a mechanických vlastností
- b) Anizotropie vlastností vychází z chemického složení a anatomické stavby dřeva
- c) Anizotropní charakter zaručuje nejlepší kompromis při plnění základních funkcí dřeva (mechanická, vodivá, zásobní)

Jak tedy dřevo vypadá ...



- Dřevo je **biomolekulární kompozit** s podobnou hierarchickou strukturou na všech organizačních úrovních.
- Pro stavbu dřeva platí princip podobnosti – na všech úrovních se opakuje stejná orientace a tvar strukturálních jednotek = makromolekul, nadmakromolekulárních struktur, buněk a pletiv. Jednotlivé struktury jsou navzájem propojeny a vytvářejí vláknitý kompozit.
- Vlákenný kompozit je postaven zejména ze dvou základních komponent - **celulózy** a **ligninu**. Vzájemná vazba mezi makromolekulami určuje následně vlastnosti dřeva a stromu.



Sbíhavý kmen

**Vrstevnatá struktura
buněčné stěny**

Protáhlý tvar buněk

Fibrilární struktura

Řetězec celulózy

R.J.Astley et.al.

Chemická stavba dřeva a funkce chemických komponent

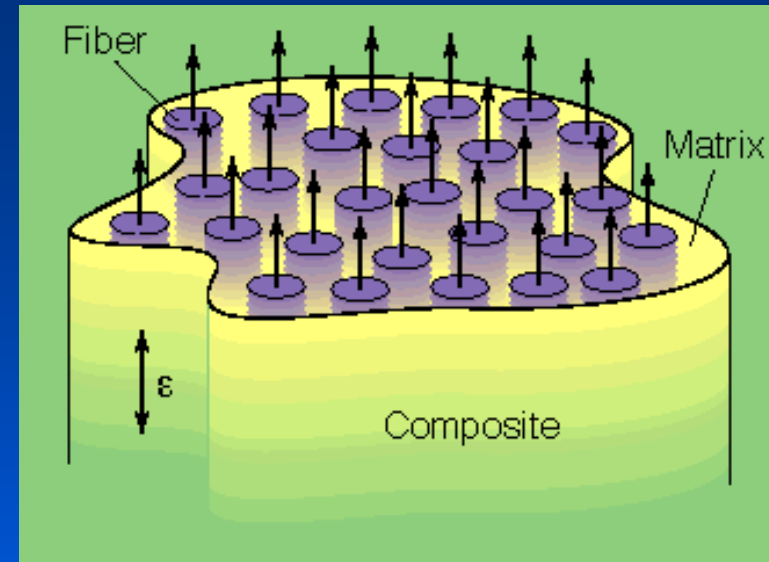
Lignin tvoří matrici, do které je uložena vláknitá celulóza.

Celulóza

- je nositelem pružnosti dřeva
- chová se jako křehký materiál (např. skla)
- zabezpečuje tuhost dřeva
- omezuje deformovatelnost dřeva

Lignin

- je nositelem plasticity dřeva
- chová se jako kujný materiál (např. kovy)
- zabezpečuje pevnost dřeva
- slouží k absorpci energie (deformační)



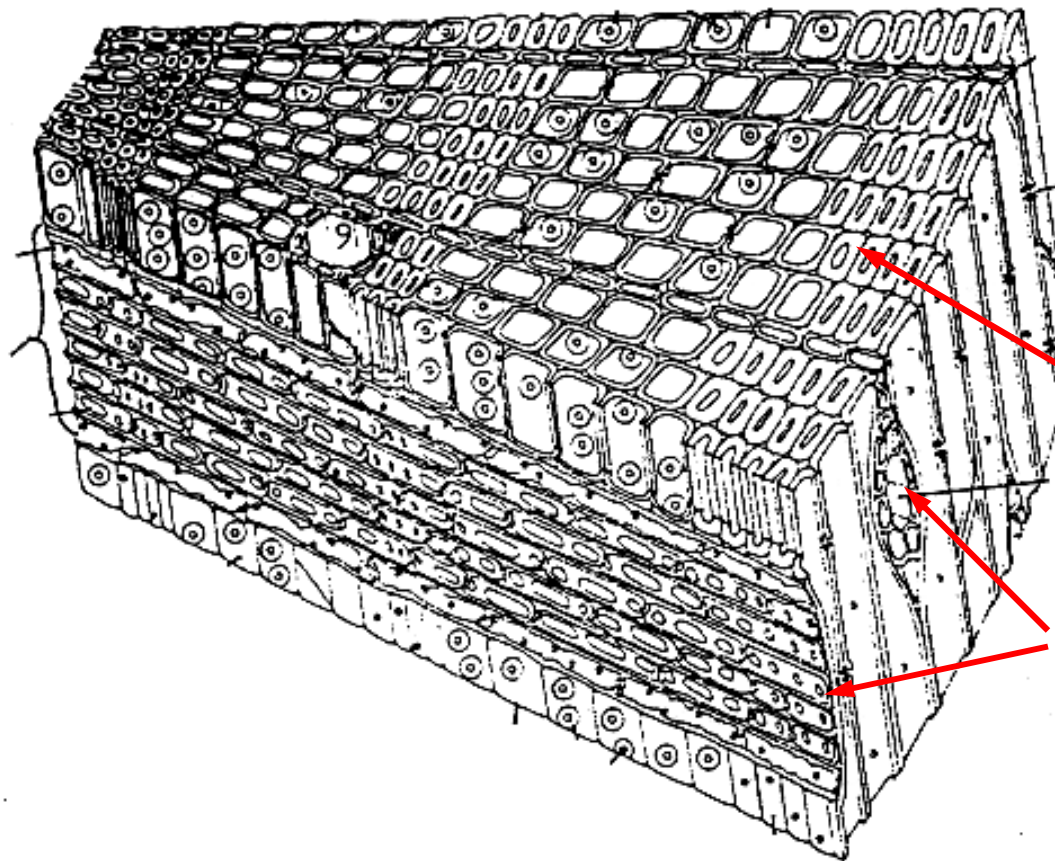
Chemické složení vybraných druhů dřeva

Chemická komponenta	SMRK (<i>Picea abies</i> Karst.) [%]	BOROVICE (<i>Pinus sylvestris</i> L.) [%]	BUK (<i>Fagus sylvatica</i> L.) [%]
Cellulóza	45,6	43,2	39,2
Hemicelulóza	27,6	28,0	35,3
Lignin	26,9	26,6	20,9

Blažej et al (1975) in Požgaj et al (1997)

Anatomická stavba dřeva - jehličnany

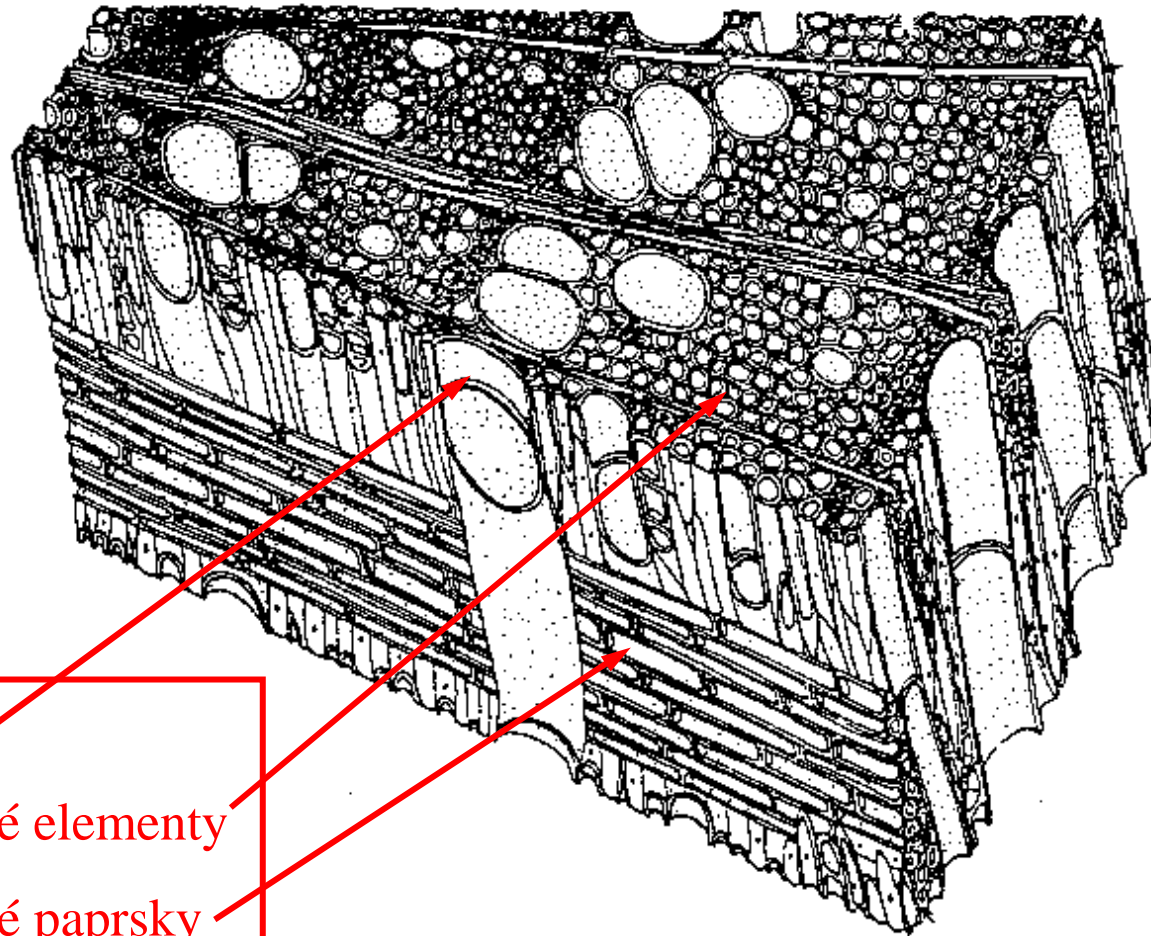
„homogenní“ stavba



95 % tracheidy
5 % dřeňové paprsky

Anatomická stavba dřeva - listnáče

„nehomogenní“ porézní stavba



20-60% cévy

5-70% vláknité elementy

5-50% dřevňové paprsky

Mechanické vlastnosti dřeva

- dřevo je **anizotropním** materiálem z důvodu jeho chemické stavby
- mechanické vlastnosti se liší podle **způsobu zatížení** – tlak, tah, smyk, ohyb, krut – a **směru zatížení** – v podélném a příčných směrech
- díky biologické povaze dřevo vykazuje značnou **variabilitu**
- vlastnosti jsou dále ovlivněny řadou faktorů - vlhkost, hustota dřeva, délka trvání zatížení,

Důležité mechanické vlastnosti materiálu

- *Modul pružnosti* – popisuje **tuhost** materiálu (odolnost proti zdeformování). Je určen silou potřebnou na jednotkové přetvoření materiálu. [MPa]. $E = d\sigma/d\varepsilon$
- *Pevnost dřeva na mezi pevnosti* – maximální **napětí**, které může na těleso působit než se poruší. [MPa].
- *Pevnost dřeva na mezi úměrnosti* – maximální napětí, které může na těleso působit a deformace zůstala vratná. [MPa]. $\sigma = dF/dA$
- *Deformace na mezi pevnosti* – relativní **přetvoření** materiálu v okamžiku selhání (porušení). [%].
- *Deformace na mezi úměrnosti* – relativní přetvoření materiálu, které je ještě vratné. [%]. $\varepsilon = \Delta u/x$

Mechanické vlastnosti chemických konstituent dřeva

	Modulus of elasticity parallel to grain (MPa)	Modulus of rigidity (shear modulus) (MPa)	Tensile strength parallel to grain (MPa)
Cellulose	150 000 – 250 000	4 500	8 000 – 25 000
Lignin	4 000	1 500	
Wood fibre	75 000	3 000	1 000
Average wood	10 000	500 – 1 000	70 – 130

Mez pevnosti vybraných druhů dřeva

Wood species	Moisture content	Specific gravity	Static bending	Compression parallel to grain	Tension parallel to grain	Shear parallel to grain
	(%)	(kg.m ⁻³)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Norway spruce <i>Picea abies</i>	Green 12	330 350	36 66	17 35	 84	5 9
European beech <i>Fagus sylvatica</i>	Green 12	550 600	65 110	28 54	 130	9 16
Sycamore <i>Acer pseudoplatanus</i>	Green 12	490 510	66 99	28 48	 100	10 17

Tuhost dřeva

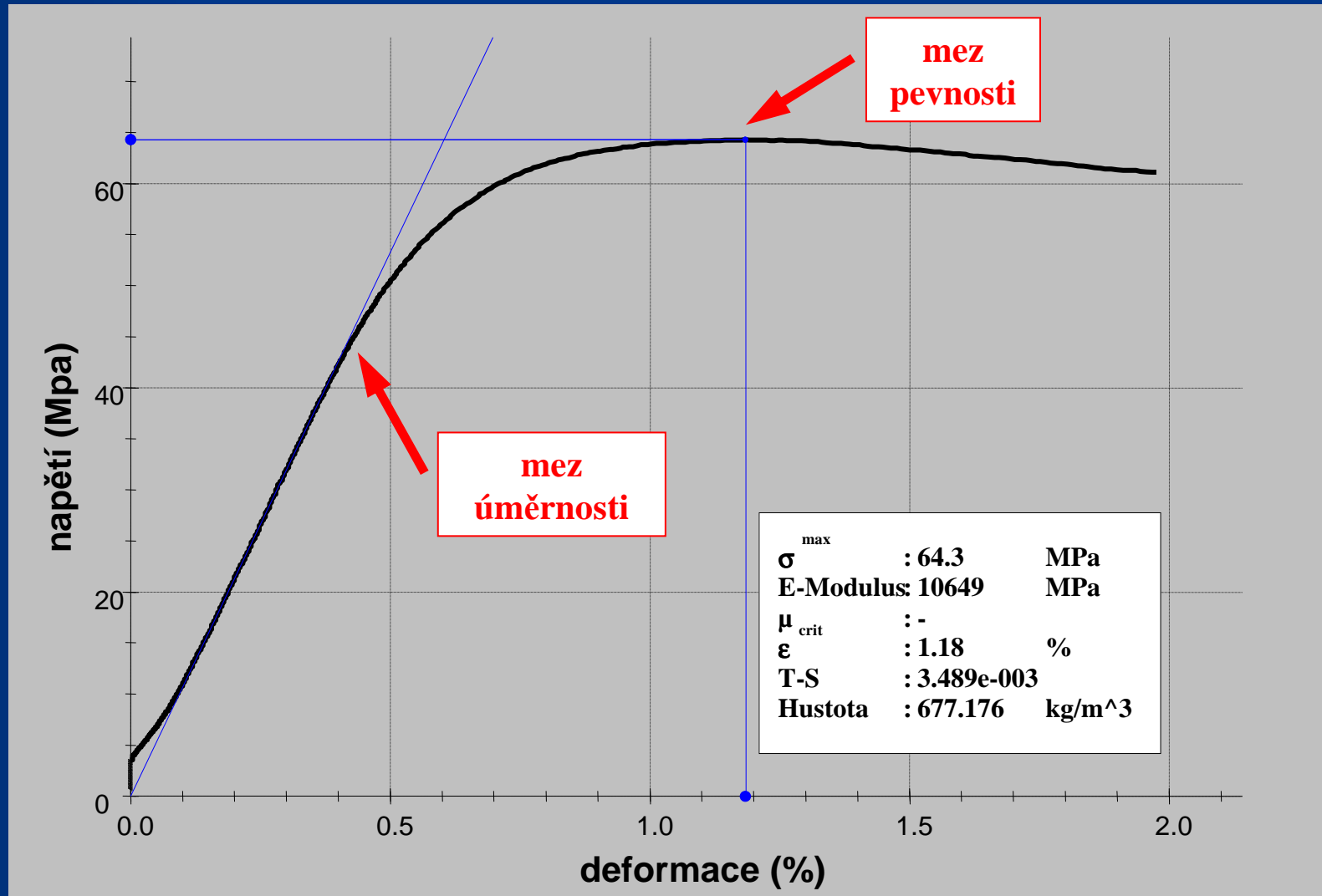
Wood species	Moisture content	Specific gravity	Modulus of elasticity	Modulus of rigidity
	(%)	(kg.m ⁻³)	(MPa)	(MPa)
Norway spruce <i>Picea abies</i>	Green 12	330 350	7 300 9 500	400 500
European beech <i>Fagus sylvatica</i>	Green 12	550 600	9 800 12 600	800 1 100
Sycamore <i>Acer pseudoplatanus</i>	Green 12	490 510	8 400 9 400	750 900

Variabilita (variační koeficienty) mechanických vlastností dřeva – malá zkušební tělíska

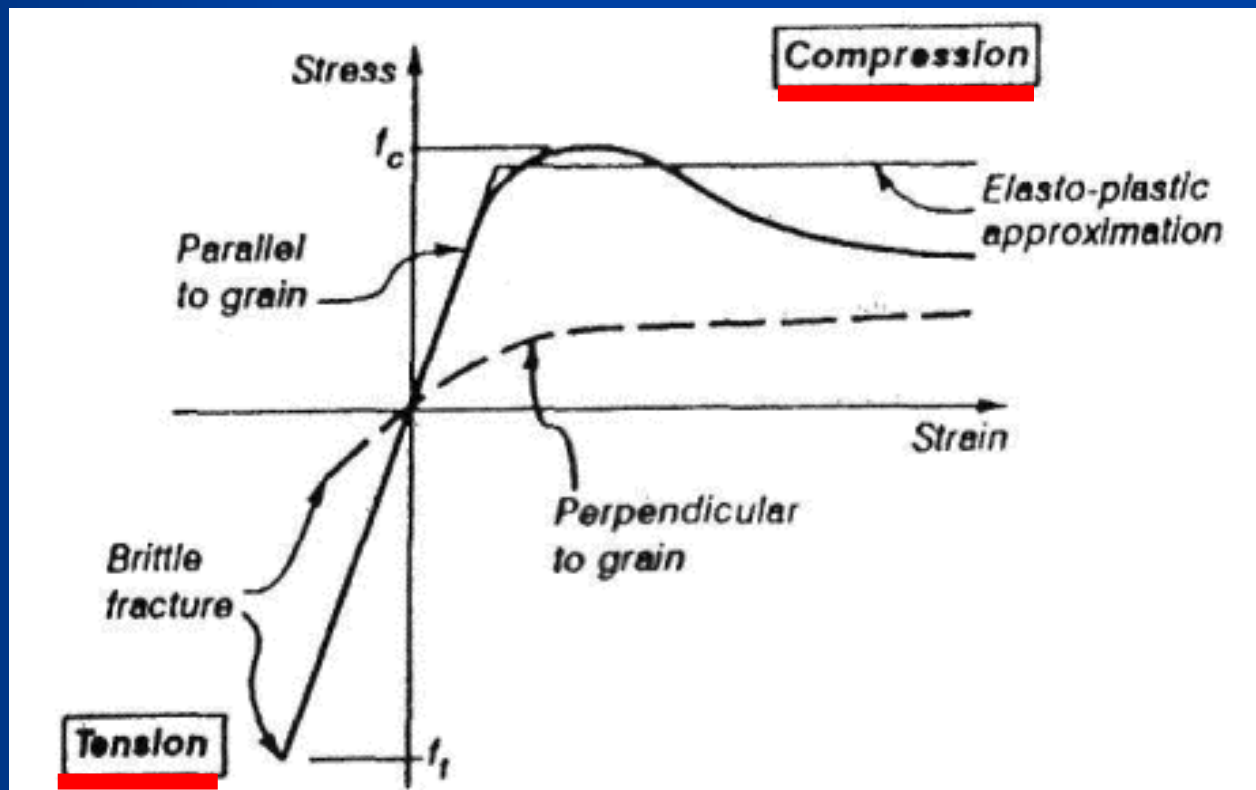
Property	Coefficient of variation ^a (%)
Static bending	
Modulus of rupture	16
Modulus of elasticity	22
Work to maximum load	34
Impact bending	25
Compression parallel to grain	18
Compression perpendicular to grain	28
Shear parallel to grain, maximum shearing strength	14
Tension parallel to grain	25
Side hardness	20
Toughness	34
Specific gravity	10

^aValues based on results of tests of green wood from approximately 50 species. Values for wood adjusted to 12% moisture content may be assumed to be approximately of the same magnitude.

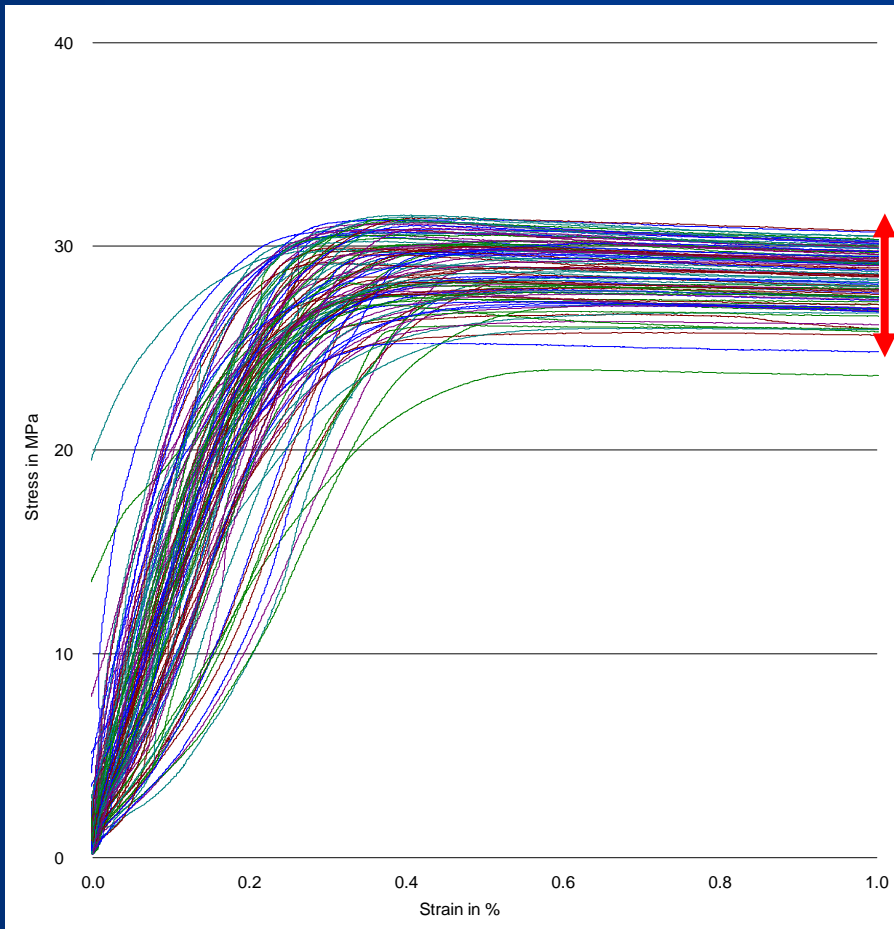
Pracovní (napětí-ově-deformační) diagram (tlak ve směru vláken)



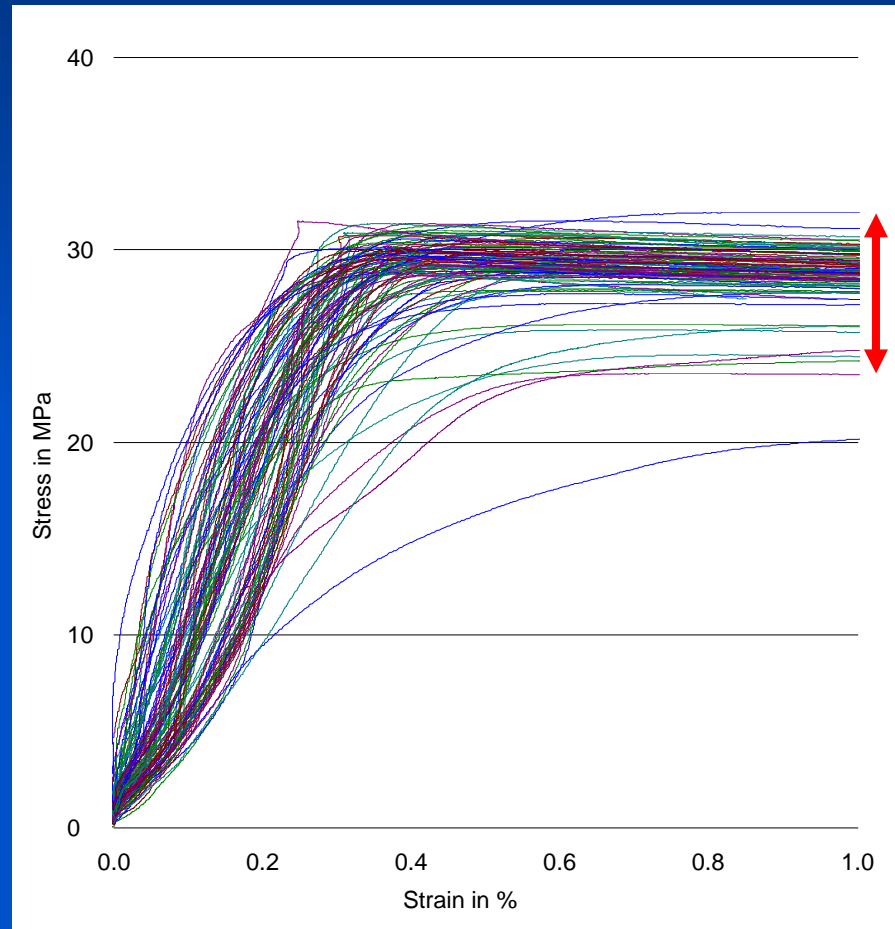
Pracovní diagramy (vztah mezi napětím a deformací) pro malá zkušební tělíska namáhaná tlakem a tahem



Pracovní diagramy v tlaku ve směru vláken u javoru (*Acer platanoides*)

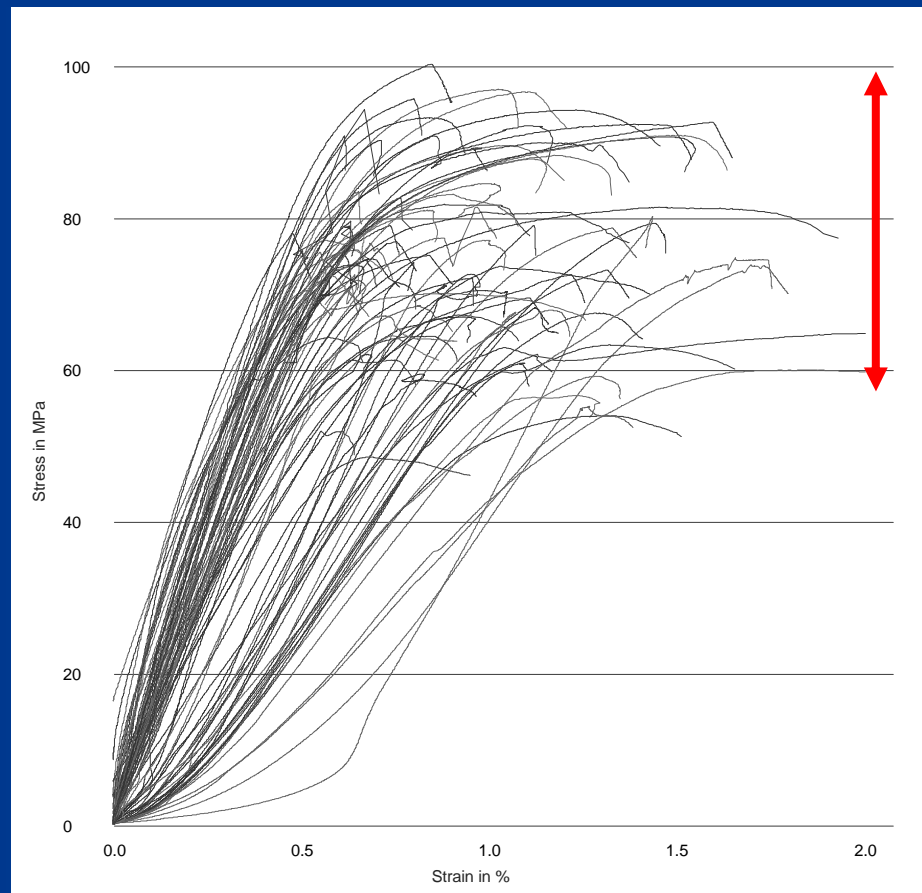


Mokrá, fyziologicky neaktivní tělíska



Mokrá, fyziologicky aktivní tělíska

Pracovní diagramy v tlaku ve směru vláken u javoru (*Acer platanoides*)

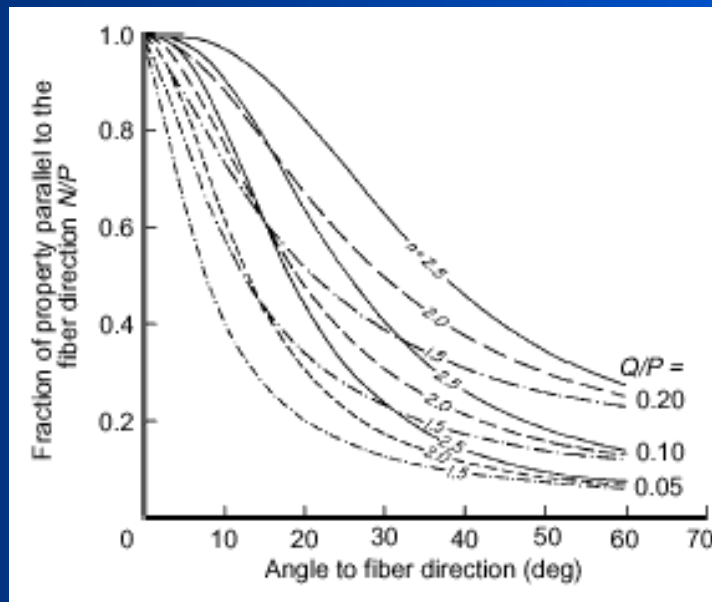
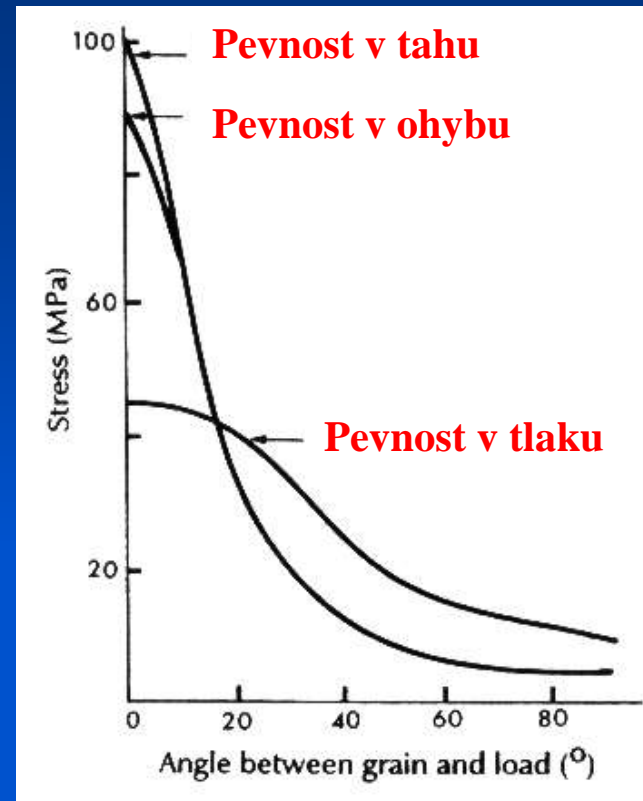


Standardní tělíska při $w = 12\%$ (ČSN, ISO, ASTM, DIN)

Vliv odklonu vláken na pevnost dřeva

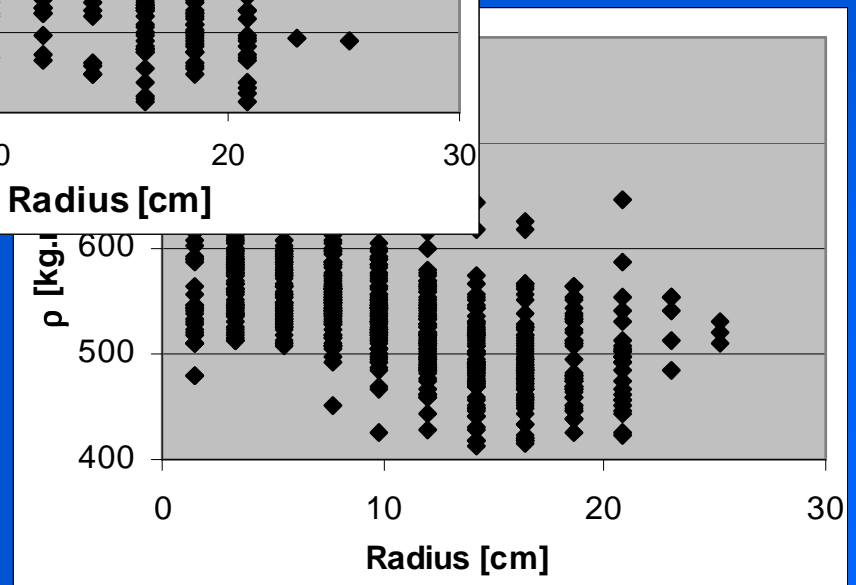
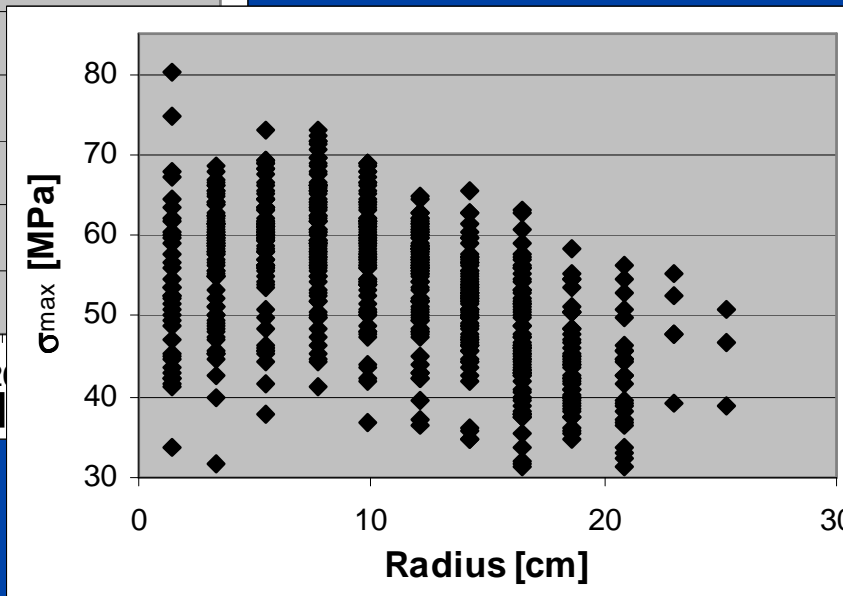
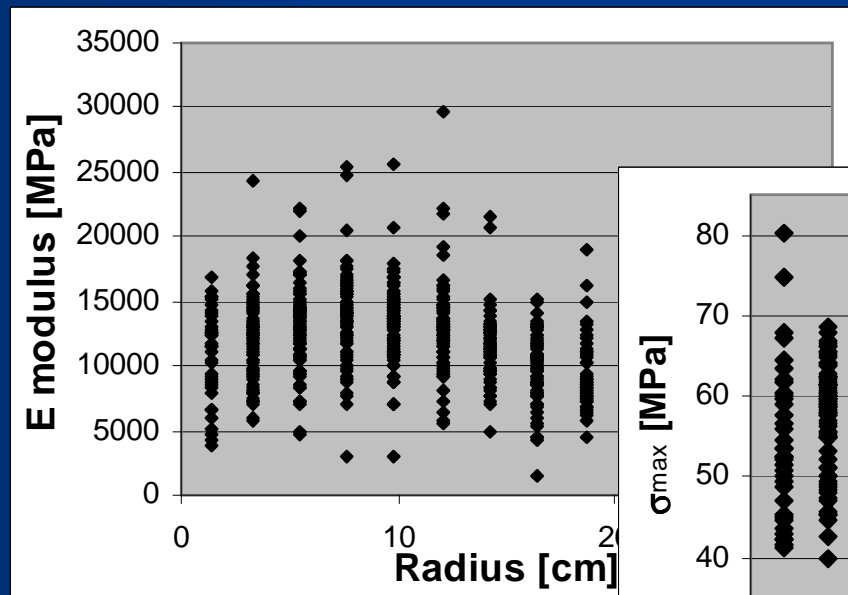
Maximum slope of grain in member	Modulus of rupture (%)	Impact bending (%)	Compression parallel to grain (%)
Straight-grained	100	100	100
1 in 25	96	95	100
1 in 20	93	90	100
1 in 15	89	81	100
1 in 10	81	62	99
1 in 5	55	36	93

^aImpact bending is height of drop causing complete failure (0.71-kg (50-lb) hammer); compression parallel to grain is maximum crushing strength.



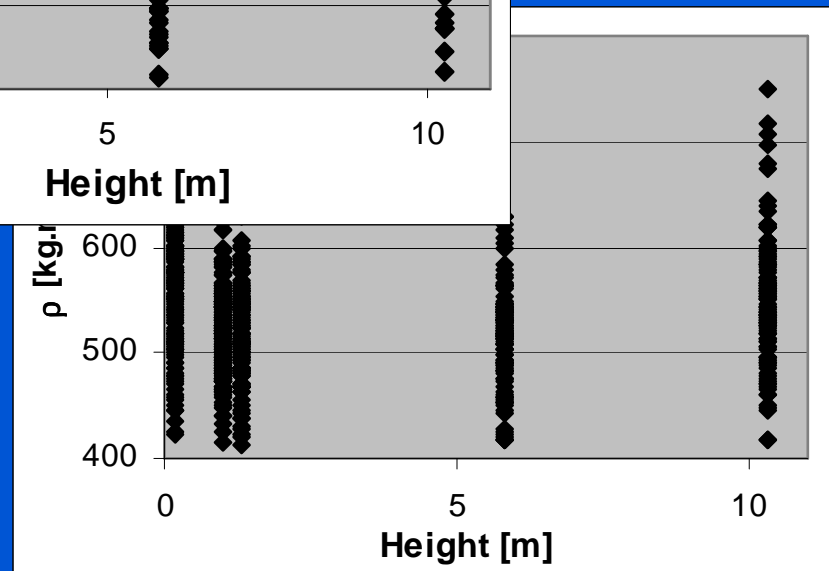
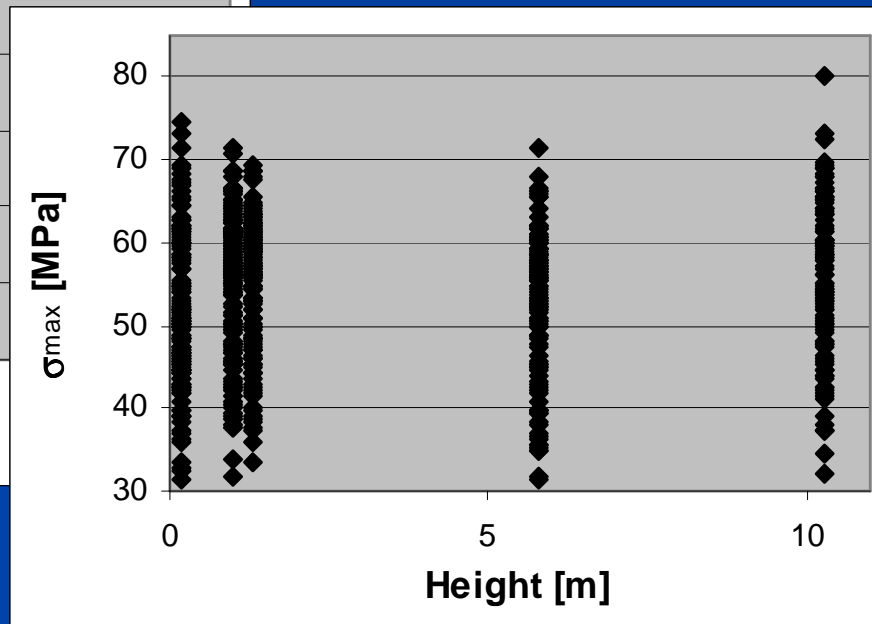
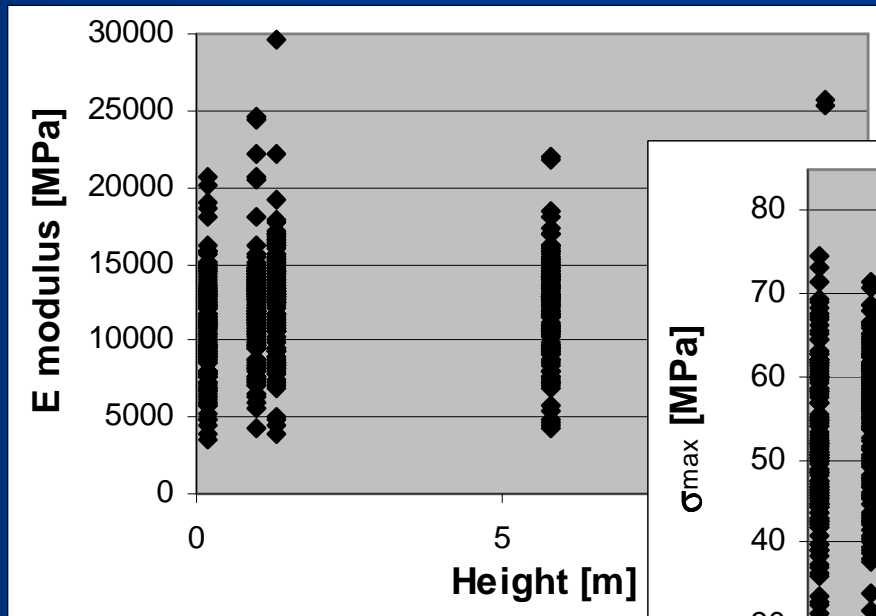
Závislost pevnosti dřeva na různém odklonu vláken od podélného směru a/nebo odklonu působící síly.

Rozložení mechanických vlastností v rámci kmene (*Juglans nigra*)



- **horizontální** distribuce pevnosti a tuhosti dřeva

Rozložení mechanických vlastností v rámci kmene (*Juglans nigra*)



- **vertikální** distribuce pevnosti a tuhosti dřeva

Dotazy ?

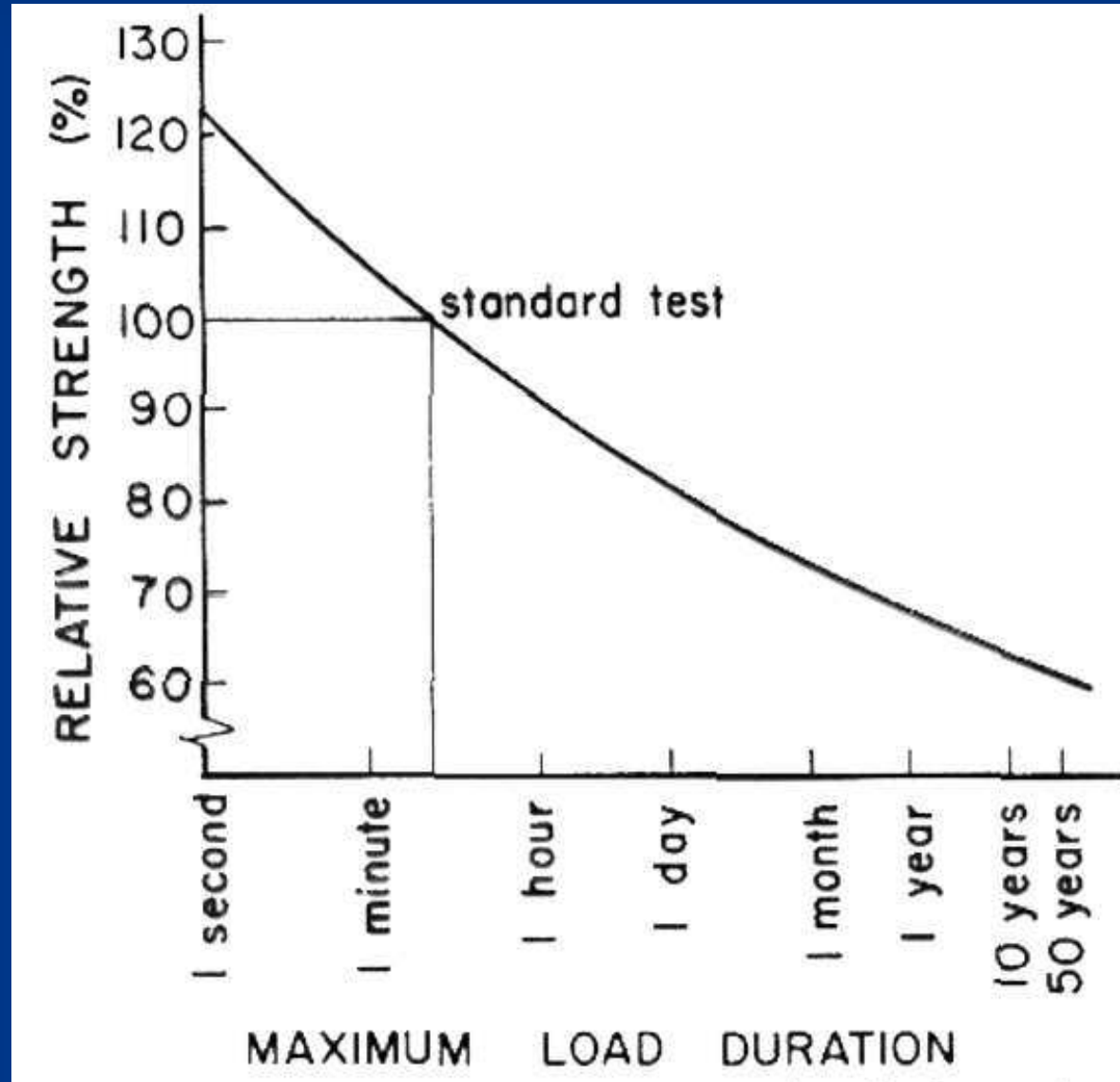


Statické a dynamické zatížení stromu – aplikace klasické mechaniky materiálů

(2. vrchol trojúhelníku statiky)

1. porozumění působení osových sil (tlak, tah a smyk) a momentů (ohybového a kroucího) na strom a jeho orgány
2. určení napětí, deformací a pootočení v nosných prvcích
3. pochopení způsobu přenosu sil (napětí) v nosných prvcích
4. určení vlivu a působení různých zátěžových stavů (kombinace sil)
5. užití mechaniky materiálů ke strukturální analýze
6. snaha o co největší realistické zjednodušení poskytující výsledky odpovídající skutečnosti

Vliv délky působení zatížení na dřevo

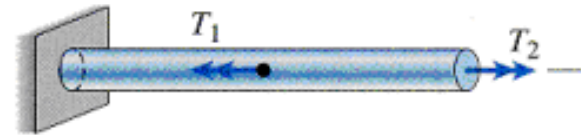


Nejběžnější předpoklady:

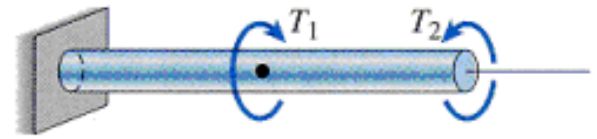
- *prismatický* nosník (průběžný nosník mající konstantní průřez – rozměry – po celé délce) ☹
- zatížení (silová výslednice) působí v *těžišti* průřezu ☺
- materiál je *homogenní* (ve všech částech nosníku stejné vlastnosti) ☹
 - **homogenní** – materiál má stejnou stavbu v každém svém bodě
 - **isotropní** – vlastnosti jsou ve všech směrech stejné
 - **anisotropní** – vlastnosti se v každém směru liší
 - **ortotropní** – vlastnosti se liší pouze ve třech navzájem kolmých směrech (např. **vláknité kompozity = DŘEVO**)

Typy zatížení – osové síly (normálová a smyková napětí) a momenty (ohybové a kroutecí)

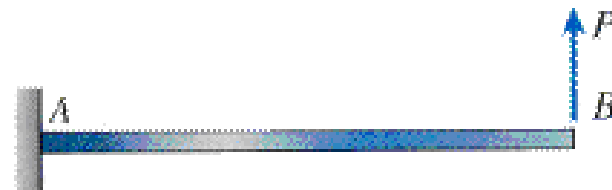
- Tlak a tah



- Krot

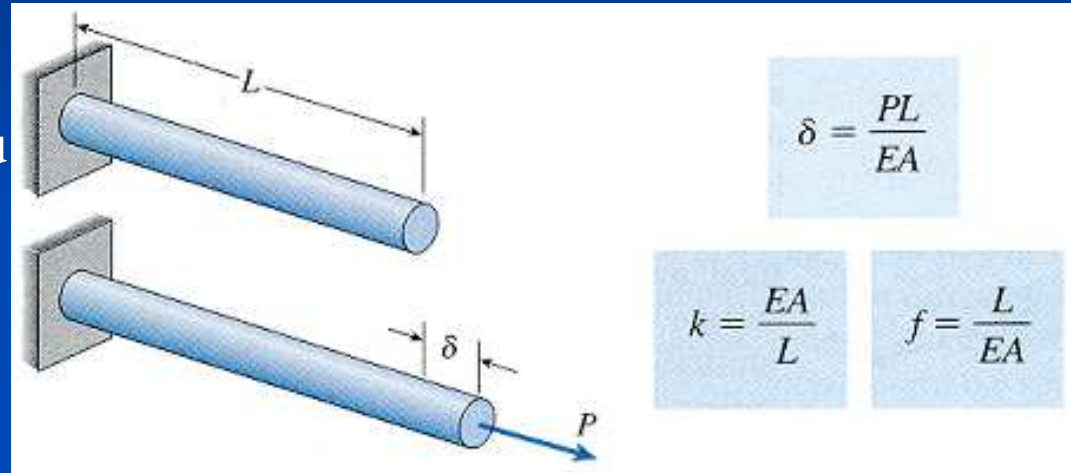


- Ohyb



Zatížení osovými silami - stojící sloup

1. Prismatický sloup –
mechanický prvek mající přímou
průběžnou podélnou osu a
konstantní průřez po celé délce



Předpoklady:

- o zatížení působí v těžišti průřezu
- o homogenní materiál
- o lineárně-elastický materiál (platí Hookeův zákon)
- o chování charakterisuje osová tuhost, AE

2. Sloup s prismatickými částmi

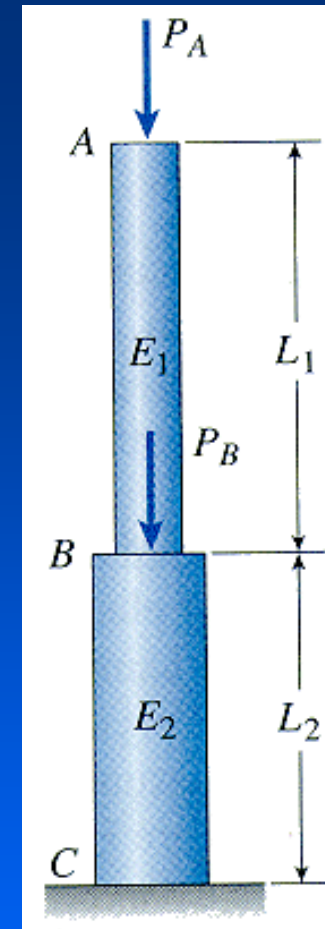
Sloup může být zjednodušeně popsán sérií několika prismatických částí, které se navzájem liší:

- o osovými silami (ZATÍŽENÍM)
- o rozměry (GEOMETRIÍ)
- o vlastnostmi (MATERIÁLEM)

**Trojúhelník
statiky**

Postup řešení (**HODNOCENÍ**):

1. identifikace segmentů ($i=1,2,\dots,n$)
2. určení vnitřních sil v každém segmentu
3. stanovení změn rozměrů (dimenzí) jednotlivých segmentů
4. odhad chování celku (+ tah (prodloužení), - tlak (zkrácení))



$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{N_i L_i}{E_i A_i}$$

3. Sbíhavý sloup

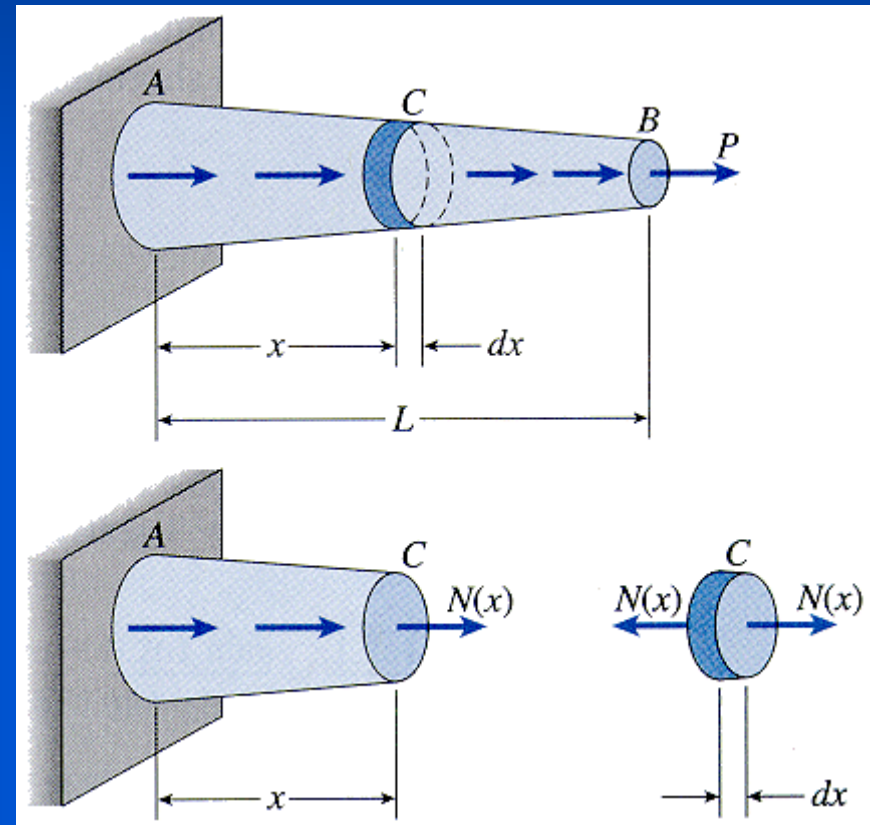
Přesnější model je založen na

- o **proměnném** průřezu po výšce
- o variabilních osových silách (e.g. gravitační, hmotnost kmene,

Postup řešení (**HODNOCENÍ**):

1. výběr diferenciálního elementu o délce dx
2. určení síly $N(x)$ z podmínky rovnováhy
3. stanovení průřezu $A(x)$
4. integrace po délce sloupu

$$\delta = \int_0^L d\delta = \int_0^L \frac{N(x)dx}{EA(x)}$$

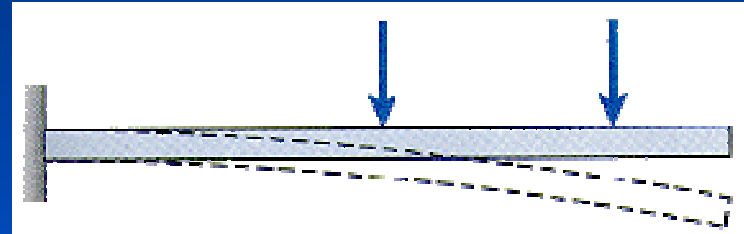


Zatížení momenty

- strom jako jednostranně vetknutý nosník

Jednostranně vetknutý nosník -

nosník ukotvený na jednom konci a volný na konci druhém



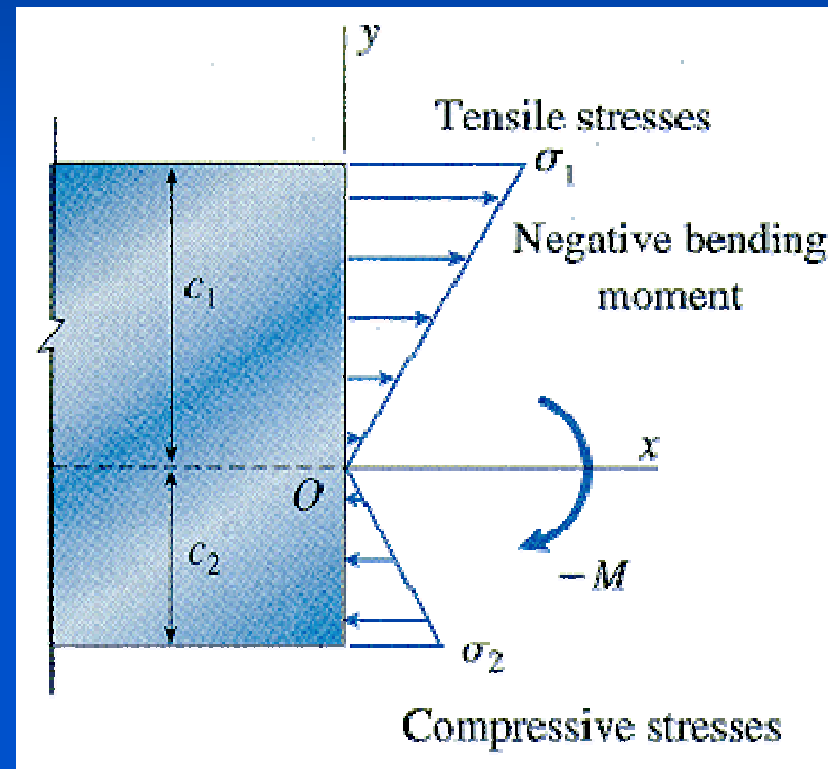
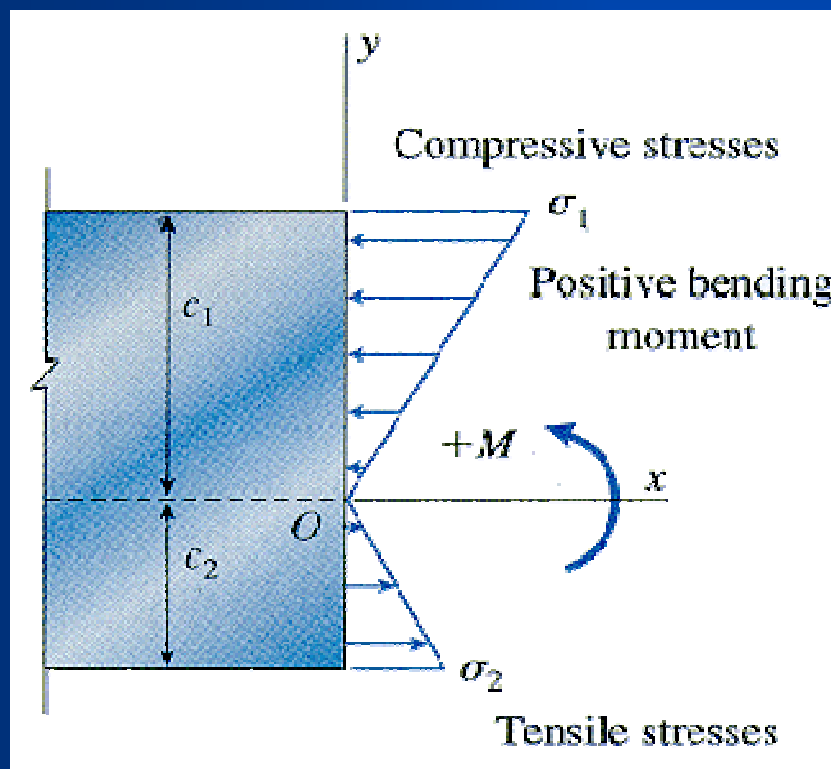
Způsoby zatížení

- koncentrované zatížení (posouvající síla)
- spojitě zatížení
- kombinované zatížení

Intensity, q - force per unit length (units: lb/ft, N/m)	
Uniformly distributed load	
Linearly varying load	

Rozložení napětí po průřezu nosníku při zatížení ohybovým momentem

$$\sigma_x = -\frac{My}{I}$$



Maximální napětí po průřezu

Maximální napětí (tahové a tlakové) se při namáhání ohybovým momentem objevuje ve vrstvách nejvíce vzdálených od neutrální osy (c_1 a c_2)

$$\sigma_1 = -\frac{Mc_1}{I} = -\frac{M}{S_1} \quad \sigma_2 = \frac{Mc_2}{I} = \frac{M}{S_2}$$

kde I je **moment setrvačnosti**; a S_1 a S_2 jsou **průřezové moduly** podle vztahu

$$S_1 = \frac{I}{c_1} \quad S_2 = \frac{I}{c_2}$$

Momenty setrvačnosti a průřezové moduly jsou uváděny ve všech učebnicích.

Např. pro pravoúhlý a kruhový průřez jsou I a S dány vztahy

Pravoúhlý průřez

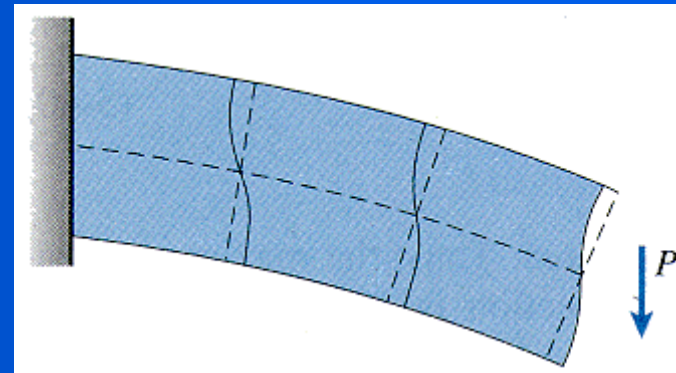
$$I = \frac{bh^3}{12} \quad S = \frac{bh^2}{6}$$

Kruhový průřez

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad S = \frac{\pi d^3}{32}$$

Omezení aplikace teorie jednostranně vetknutého nosníku

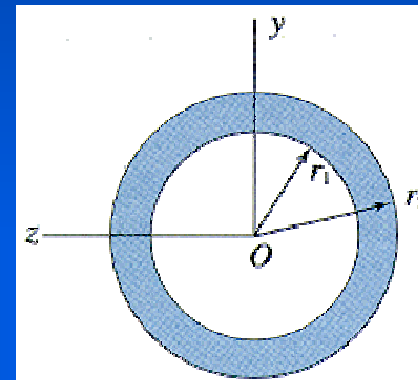
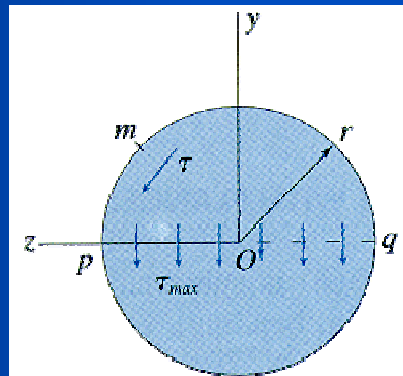
- rovnice platí pouze pro **čistý ohyb prismatického nosníku** z homogenního, lineárně-elastického materiálu
- rovnice neplatí v blízkosti **koncentrátorů napětí** (např. v blízkosti náhlých změn tvaru, v okolí nasazení větví, u dutin, suků, vad,, a nerovnoměrného zatížení)
- rovnice neberou do úvahy smykové napětí/deformace



Napětí v nosníku kruhového průřezu (např. strom)

Předpoklady:

- ve směru neutrální osy působí pouze normálová napětí = působí pouze ohybový moment, ne posouvající síly = ČISTÝ OHYB
- nosník je prismatický a homogenní



Ohyb



$$I_1 = \frac{\pi r^4}{4}$$

$$I_2 = \frac{\pi}{4} (r_2^4 - r_1^4)$$

Tlak / tah



$$S_1 = \pi r^2$$

$$S_2 = \pi (r_2^2 - r_1^2)$$

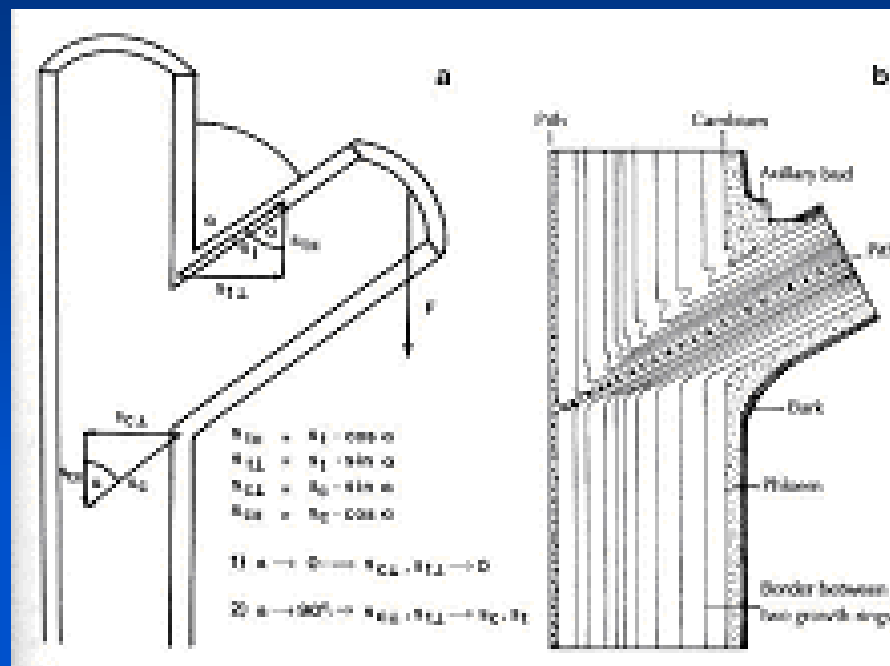
Srovnání obou průřezů (plný ₁ x zbytková ₂ stěna):

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\pi(r_2^4 - r_1^4)}{\pi r_1^4} = 1 - \frac{r_1^4}{r_2^4} \quad \frac{S_2}{S_1} = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{\pi r_1^2} = 1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

- zbytková stěna je 25% plného poloměru; tj. $r_2 = 0,25 r_1 \Rightarrow$ potom $I_2/I_1 = \mathbf{0,43}$ a $S_2/S_1 = \mathbf{0,68}$.
- **nosnost kmene se zbytkovou stěnou** je proti plnému průřezu snížena
 - \Rightarrow o **43 %** při zatížení ohybem a
 - \Rightarrow o **68 %** při zatížení osovými silami (tah / tlak)
- strom je mnohem bezpečnější v případě zatížení ohybovým momentem než při zatížení tlakem (navíc pozor na vybočení)
- pravděpodobnost selhání zatížením v tlaku je o 50% vyšší než při ohybu

Ukotvení větví v plném a dutém kmeni

- Zjednodušené znázornění rozložení napětí ve **zbytkové stěně** dutého kmene navozené připojením postranní větve – napětí působící kolmo na osu kmene / větve závisí na úhlu větvení.
- U **plného průřezu** jsou postranní větve ukotveny mnohem hlouběji a jsou mnohem stabilnější.
- Letokruhy kopírují rozložení sil / napětí ve dřevě (**silové proudnice**).



Dotazy ?



Geometrie (tvar) kmene/stromu

(3. vrchol trojúhelníku statiky)

- Základním přístupem v konstrukční morfologie je princip **optimálního designu** – každá biologická struktura je optimálně adaptována k přenosu zatížení, které současně slouží jako podnět při tvorbě dřeva.
- Mechanismus se nazývá **adaptivním růstem** – stromy mají kompromisní stavbu vycházející z naplňování různých (i protichůdných) požadavků = různé funkce.
- Optimalizačním kritériem je princip **spotřeby minimálního množství materiálu** (asimilátů) – platí pro každý orgán = kmen, větve,

⇒ minimální (dělení a respirace), ohraničený (primární) a neohraničený (sekundární) růst

Geometrie (tvar) kmene/stromu

(souhrn)

- Působí-li (1) ohybový moment ve všech směrech a (2) je naplněn princip minimální alokace asimilátů a (3) je snaha redukovat napětí ve stromě



nejlepší kompromisní řešení nabízí
kruhový průřez.

- Považujeme-li kmen za jednostranně vetknutý nosník

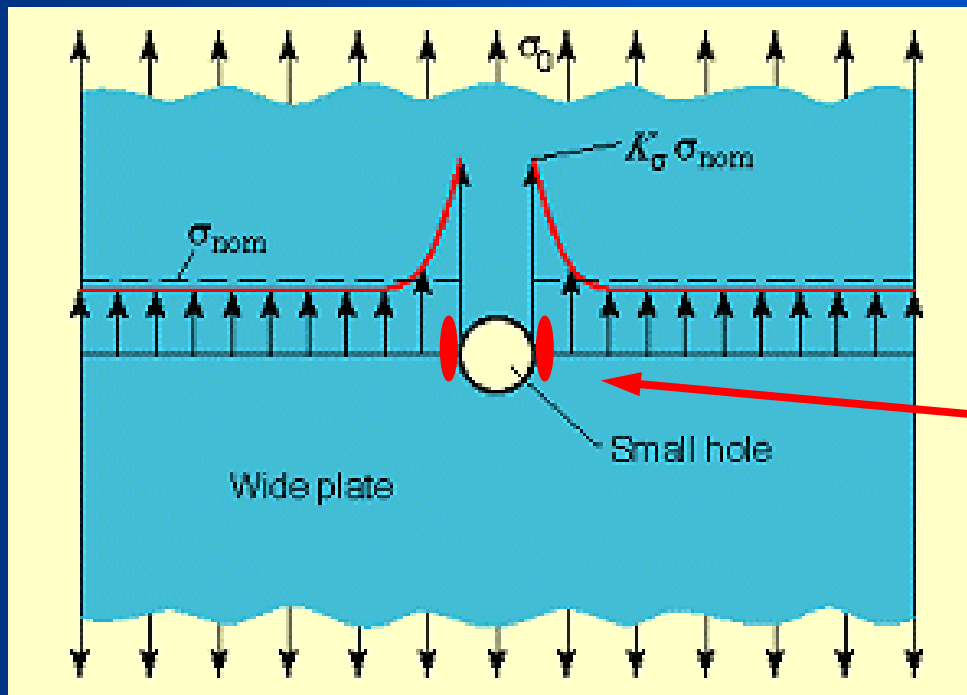


ohybové napětí podél jeho osy je funkcí
vzdálenosti od neutrální osy a **průřezu**. V místech
minimálního napětí tedy není potřeba alokace
takového množství materiálu, který může být
použit na posílení nejvíce namáhaných částí.

- Optimum je **sbíhavý tvar kmene** vyjádřený nelineární výtvarnicí.

Další geometrické nelinearity

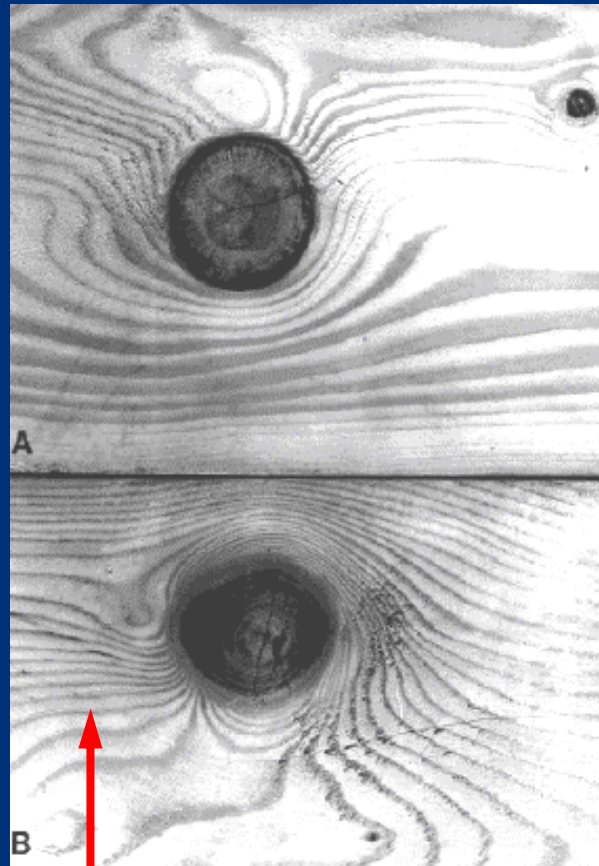
- Vlivem přítomnosti nelinearit = necelistvostí (dutiny, díry, vruby, trhliny, boule, ...) silové proudnice **obtékají** kolem těchto vad a indukují lokální špičky napětí.
- Geometrické necelistvosti (a také odchylky od homogenity) slouží jako **koncentrátory napětí**.



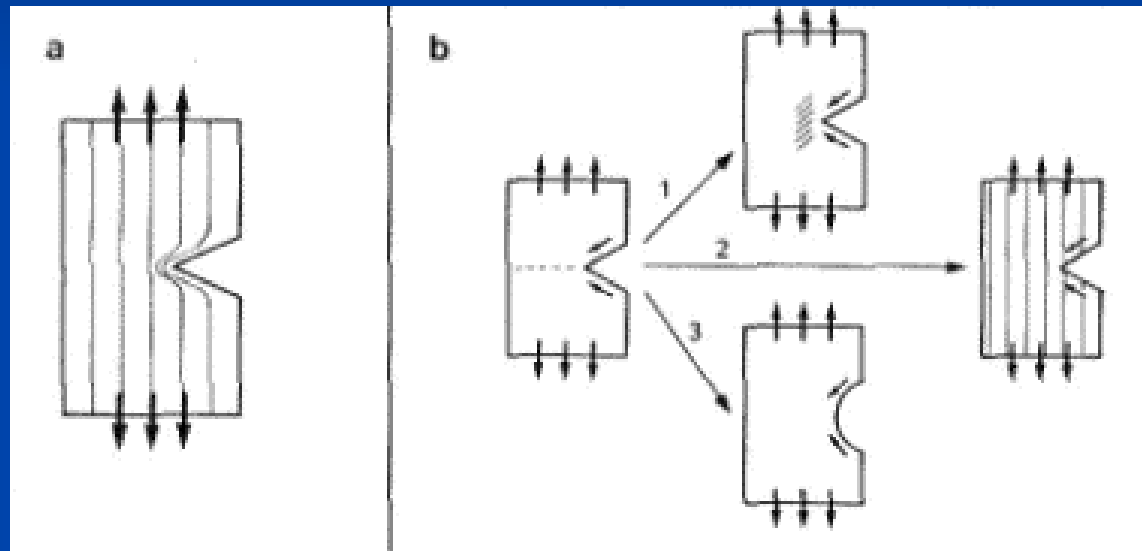
Koncentrace napětí:

lokalizované oblasti

s výrazně vyšším
napětím v okolí
„necelistvostí“ =
otvorů, trhlin, ...



Silové proudnice – trajektorie hlavních napětí = (1) tlaku/tahu ve směru a napříč vláken, (2) smyku



Letokruhy se vytvářejí tak, aby se **shodovaly** s hlavním (převládajícím) směrem silových proudnic jak v podélném tak i příčném směrech. To vede minimalizování, příp. vymizení smyku a ohybu, a naopak k maximálnímu využití schopnosti dřeva přenášet napětí v tahu a tlaku podél letokruhů.

SOUHRN

– jak uplatnit nabyté poznatky ?

Tvar stromu (kmene) dokumentuje historii zatížení / namáhání stromu – je jeho *autobiografií* a mechanickým diářem – který je pozornému čtenáři nabídnut k prostudování.

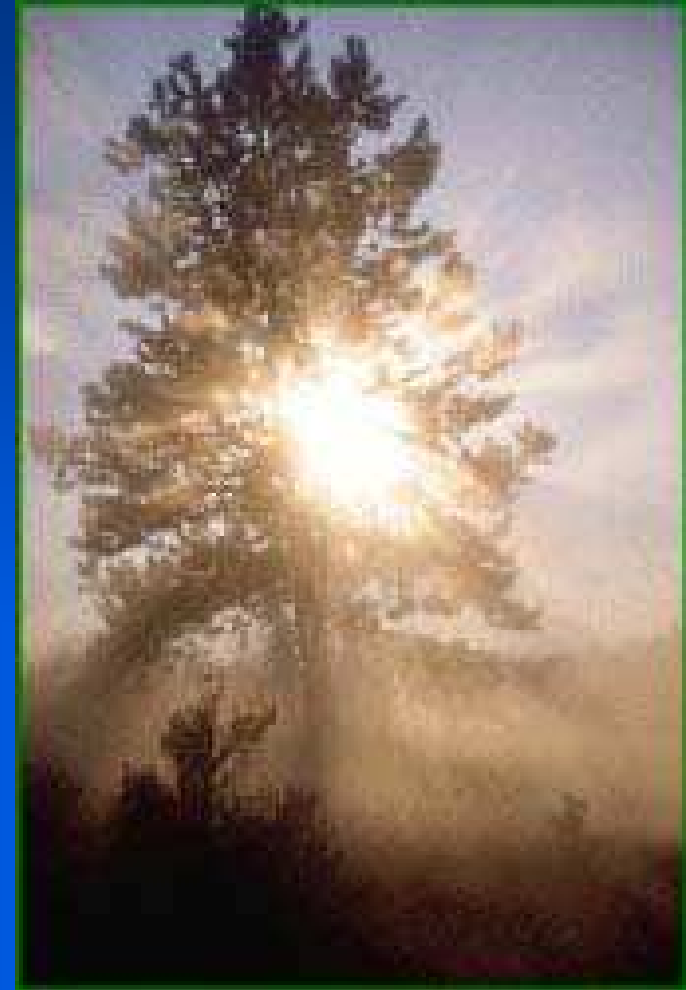
Rozpoznáním změn ve stavbě a tvaru stromů porozumíme i *skrytým stavům*, které vznikají v důsledku měnícího se zatížení stromu.



- **tvar kmene**
- **tvar větví / koruny**
- **tvar kořene / kořenového systému**

Tvar kmene

- kmen stromu je považován za
 - neprismatický sbíhavý nosník
 - jednostranně vetknutý nosník
 - intenzivně namáhaná struktura přenášející napětí
 - růst je kompromisem mezi
 - geotropismem
 - fototropismem
 - orgánovými korelacemi (apikální dominance)
 - adaptivním růstem
- strom se snaží optimalizovat
 - poměr mezi průměrem a výškou
 - tvar orgánů omezující necelistvosti
 - rovnoměrné zatížení orgánů
 - alokaci asimilátů

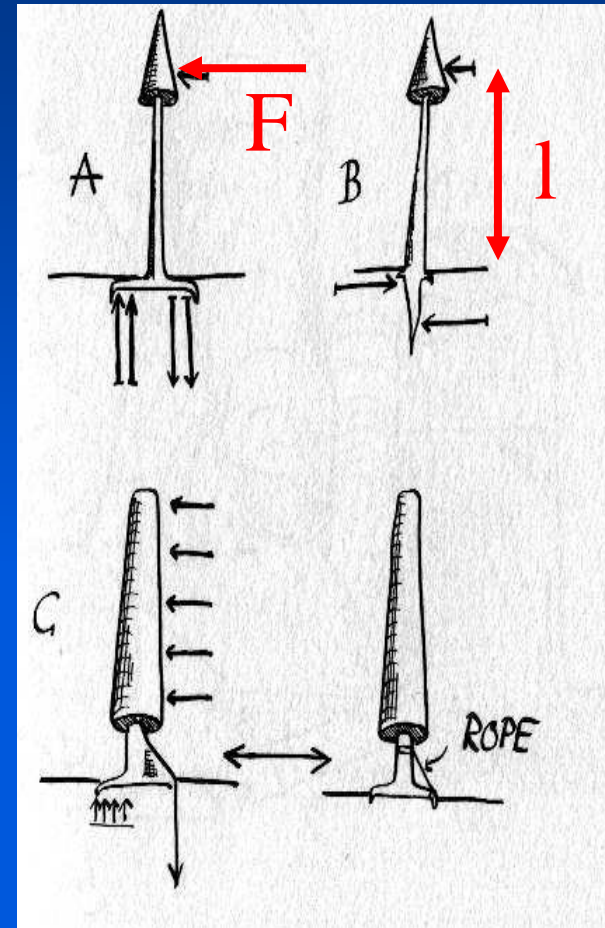


Výška kmene

Všimni si, že:

- ✓ Čím je strom vyšší – tím delší působí rameno.
- ✓ Čím je strom vyšší – tím větší rychlosti větru působí v těžišti koruny.
- ✓ Čím je strom vyšší – tím horší je zásobení koruny vodou.

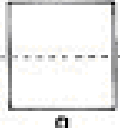
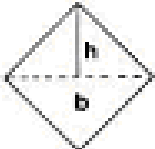
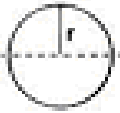

Moment = síla . rameno



Matheck, C. (1995)

Tvar příčného řezu (průřez)

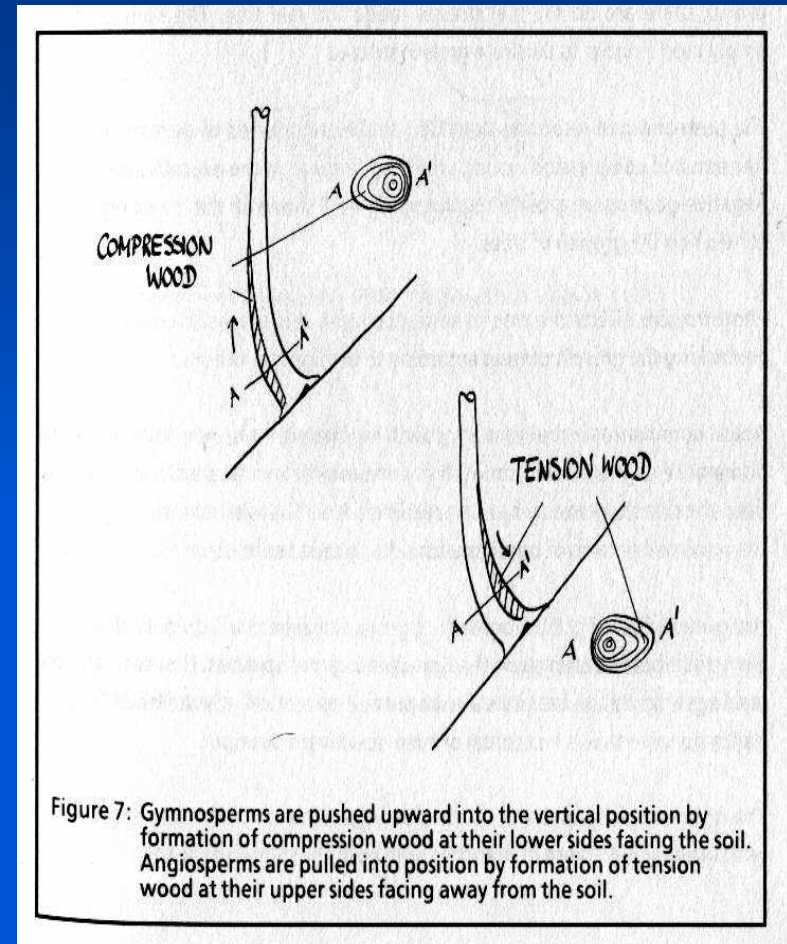
- z mechanického hlediska je nejvýhodnější **kruhový dutý průřez**
- uzavřené dutiny **nejsou nevýhodou** – nosnost kmene se zbytkovou stěnou **10 %** je stále ještě **50 %** ve srovnání s plným průřezem **!!!!**

		A = const.	
		I (rel.)	z (rel.)
	$I = a^4 / 12$ $z = a^3 / 6$	1	1
	$I = bh^3 / 6$ $z = bh^2 / 6$	1	0.71
	$I = \pi r^4 / 4$ $z = \pi r^3 / 4$	0.96	0.85
	$I = \pi (r_e^4 - r_i^4) / 4$ $z = \pi (r_e^3 - r_i^3) / 4 r_e$	6.68 ($r_e = 2 r_i$)	2.96 ($r_e = 2 r_i$)

Pozn.: Srovnání momentů setrvačnosti I a průřezových modulů z při konstantní ploše průřezu !

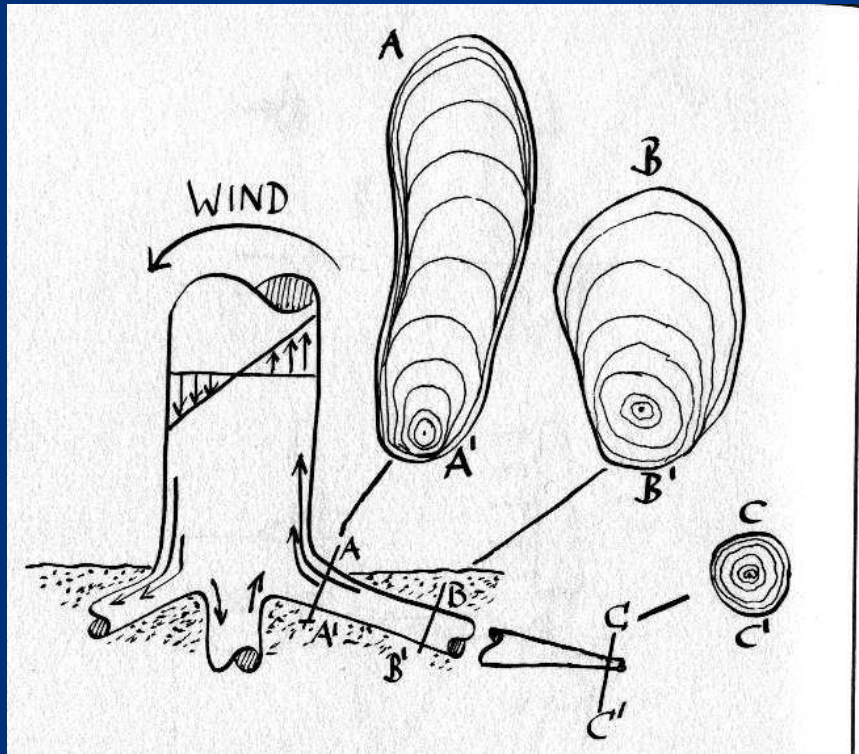
Tvar větví (reakční dřevo)

- větve jsou více-méně horizontálními nosníky
- uložení ve kmeni je velmi pevné a tuhé (optimalizace obtékání letokruhy) – nosnost několik tun !!!!
- trvalé zatížení (např. vlastní hmotností) způsobí mechanickou modifikaci průřezu – kruhový průřez se zploští v důsledku tvorby reakčního dřeva (stejný princip platí i pro kmen !!)



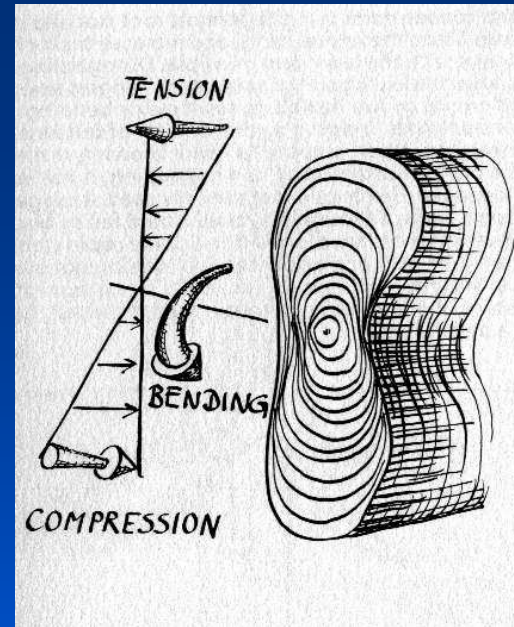
Mattheck (1995)

Tvar kořenu



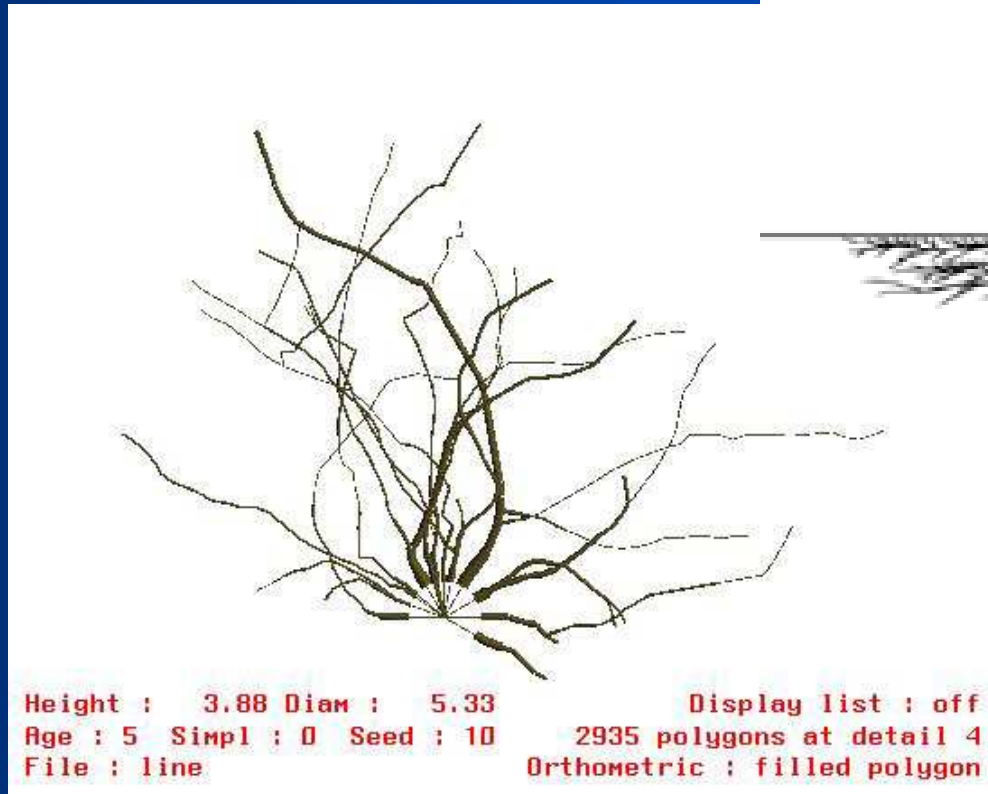
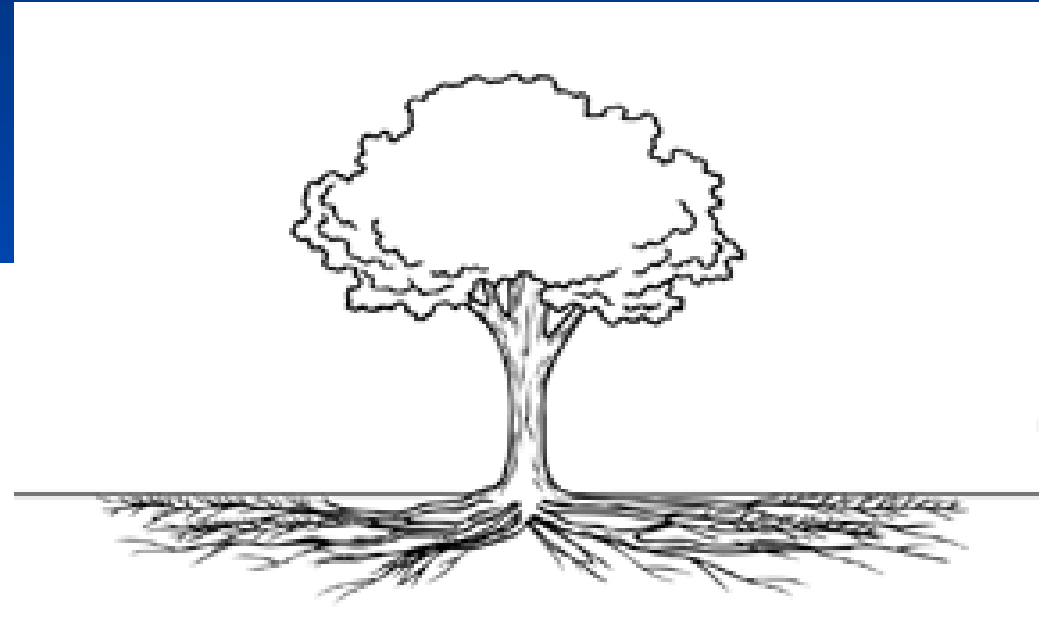
Mattheck, C. (1995)

Dřevo kořenů se tvoří v souladu s převládající orientací sil v podélném a příčném směru.



- Kořeny přenášejí síly / napětí vznikající v koruně a kmenu do půdy. V půdě jsou síly rozptýleny třením mezi kořeny a zeminou.
- Tvar kořenů (průřez) je opět optimalizován k zabezpečení jejich funkce s minimálními energetickými výdaji.

Tvar kořenového systému



Jednostranný rozvoj kořenového systému je důsledkem asymetrického zatížení stromu.