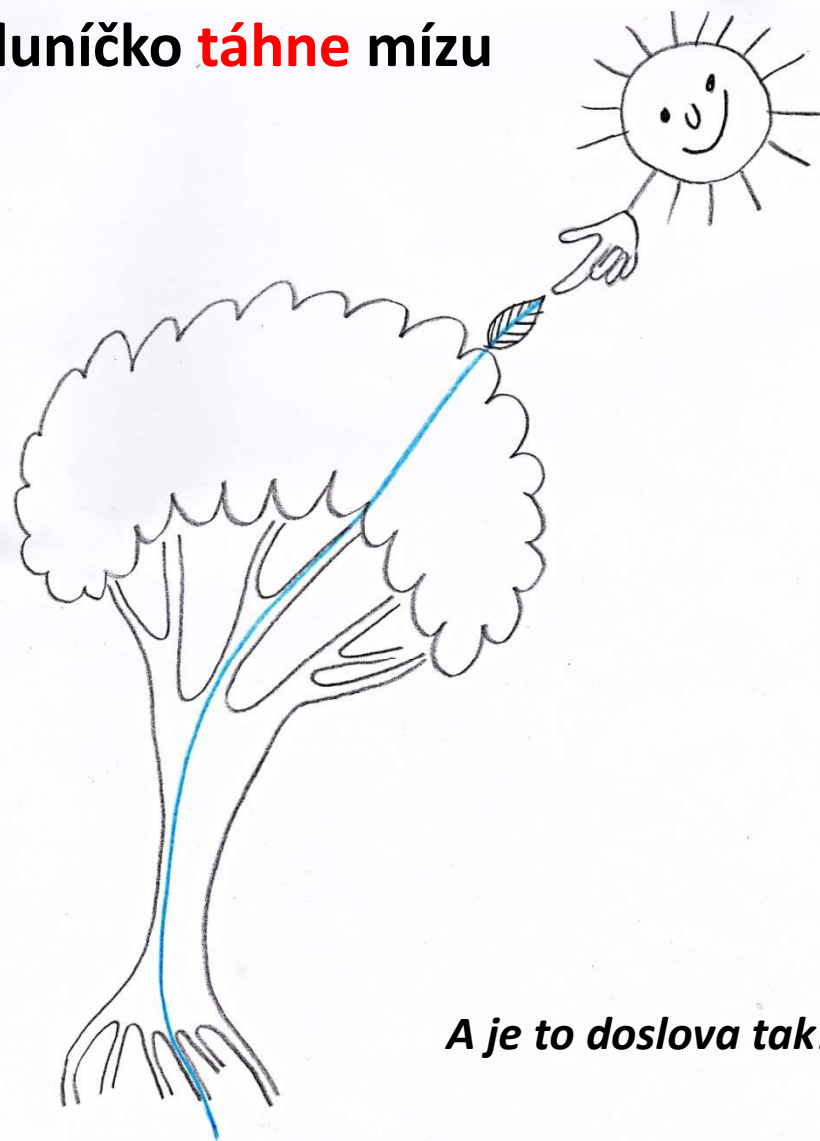


Sluníčko **táhne** mizu



A je to doslova tak!

Jan Petrovský pro Fyzikální kavárnu
2016/2017

PROSBA **L**ESA

Milý člověče!

Jsem dárceem tepla ve tvém
krbu za chladných nocí v zimě a dár-
cem přívětivého chládku v žáru letní-
ho slunce. Já jsem dal trámovi tvému
obydlí a desku tvému stolu. Ze mne
je lože ve kterém spáváš i kleč tvé-
ho rádla. Já jsem dodal topůrko do
tvé sekery a branku do tvého plota.
Ze mne je dřevo tvé kolébky i tvojí
rakve. Jsem tím, čím pro blahobyť je
chléb a pro krásu kvítko.
Slyš tedy moji prosbu: Nepusť mne!

Studánka Prosba lesa
u Arboreta Řícmanice
na modré značce

Proč zkoumat?

když to i bez nás a našich vědomostí funguje stromům asi 400 miliónů let
a pro každý jednotlivý strom je to proces udržitelný po desítky, stovky,
někdy i tisíce let

pro představu

kmeny stromů na Zemi "proteče" proti zemské gravitaci bez pump a
pohyblivých součástí asi dvojnásobné množství vody, než všemi řekami
světa (u listu se každých 20 min za slunného dne vymění množství vody odpovídající jeho čerstvé váze)

"inženýrská" botanika si slibuje od poznání vzestupného toku vody a
sestupného toku cukerného roztoku zvýšení výnosů - vypěstováním
"chytrých rostlin" (*smart plants*)

stavebnictví si slibuje pasívní ochlazování staveb

mikroelektronika zase „vysbírání“ elektrické energie z toku vypařované
kapaliny mikrokanálky

mikromechanika konstrukci mikropump a mikroventilů poháněných
transpirací

ekologie hledá lepší porozumění příčin usychání porostů

.....

a konečně odpověď na otázku, proč stromy nerostou do nebe

Náš stav poznání po
více než 200 letech
zkoumání



Vladimír Renčín, 1980

Jan Petrovský pro Fyzikální kavárnu
2016/2017

Příklad příčného řezu kmenem stromu



jádro

dřeň

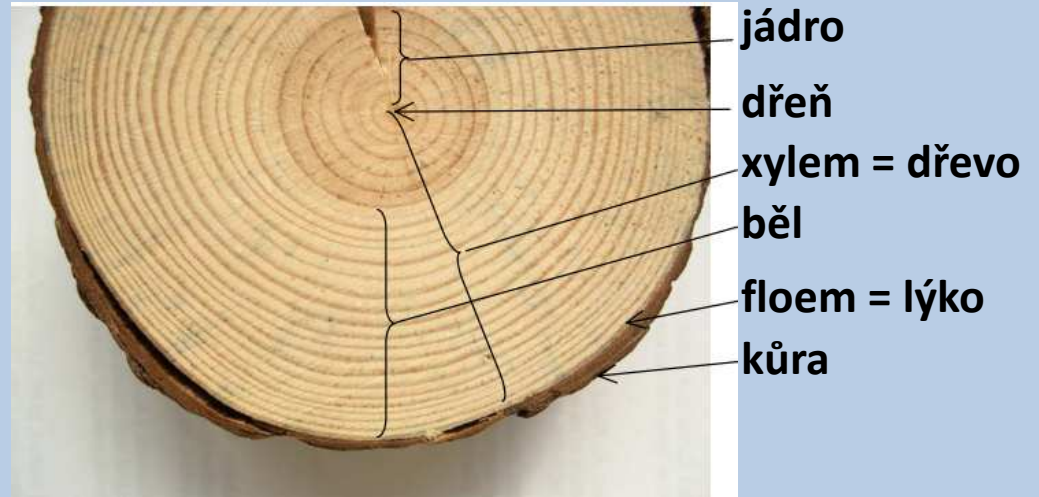
xylem = dřevo

běl (sapwood)

floem = lýko

kůra

Termíny užívané při popisu dřevnatých kmenů



- **Dřeň:** zásobní a transportní funkce.
- **Dřeňové paprsky:** zásobní, vodivá a provětrávací funkce.
- **Jádro:** odlišitelné u jádrových dřev - např. modřín, tis, dub, ořešák, akát, jabloň, slivoně
- **Běl (splint, albumen):** světlejší nejmladší obvodové letokruhy. Transpirační proud vedou vodivé elementy nejmladších letokruhů. Rychlost transportu je za optimálních podmínek **u listnáčů až desítky m/hod, u jehličnanů m/hod.** Vodní sloupce dosahují výšky i přes 100m. Pohon transpiračního proudu zajišťuje **transpirace**, kořenový vztlak, **koheze molekul vody, adheze molekul vody ke stěnám cév.** Plně diferencované vodivé elementy dřeva (tracheidy a tracheje) plní vodivou funkci jsou mrtvé buňky.

Vodivé elementy xylému (=dřeva):

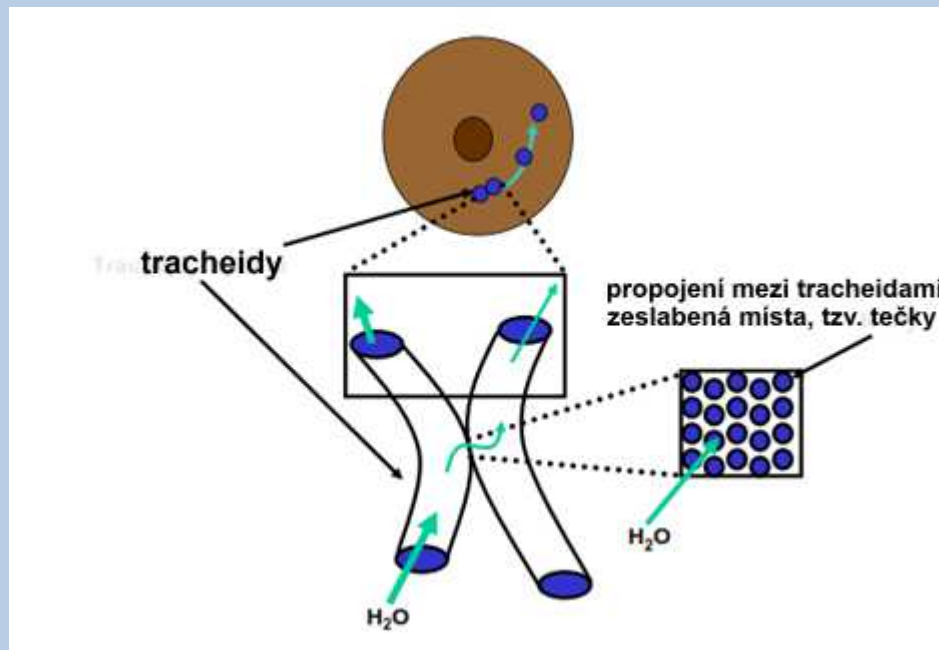
Tracheidy (= cévice) - protáhlé vřetenovité buňky
(1mm až několik mm dlouhé)

Tracheje (= cévy) - protáhlé kapiláry (až několik metrů dlouhé) tvořené jednotlivými **tracheálními články**.

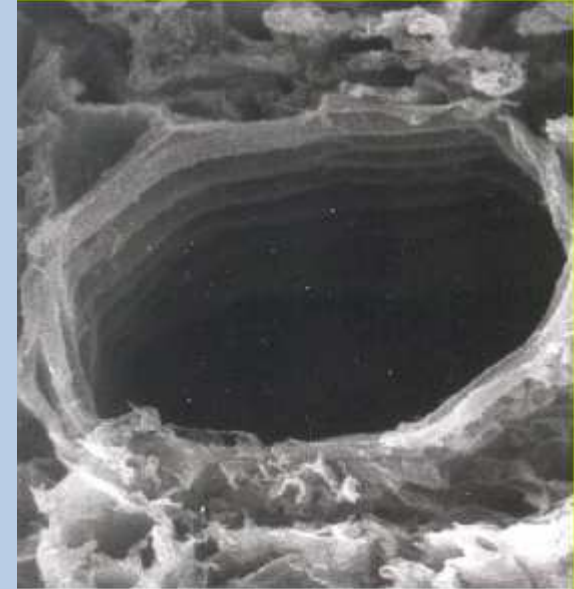
V místech styku tracheálních článků jsou buněčné stěny perforovány – dokonalejší transport

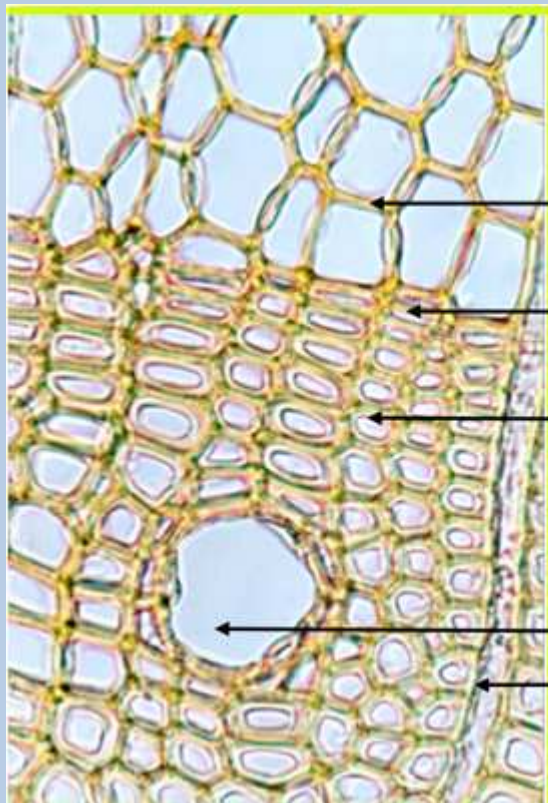
Tracheidy a tracheje plní vodivou funkci **jsou mrtvé**

A jsou vzájemně propojené:



síťovitě zesílená trachea





**Příčný řez dřevem modřínu opadavého
(*Larix decidua*).**

tracheidy jarního dřeva

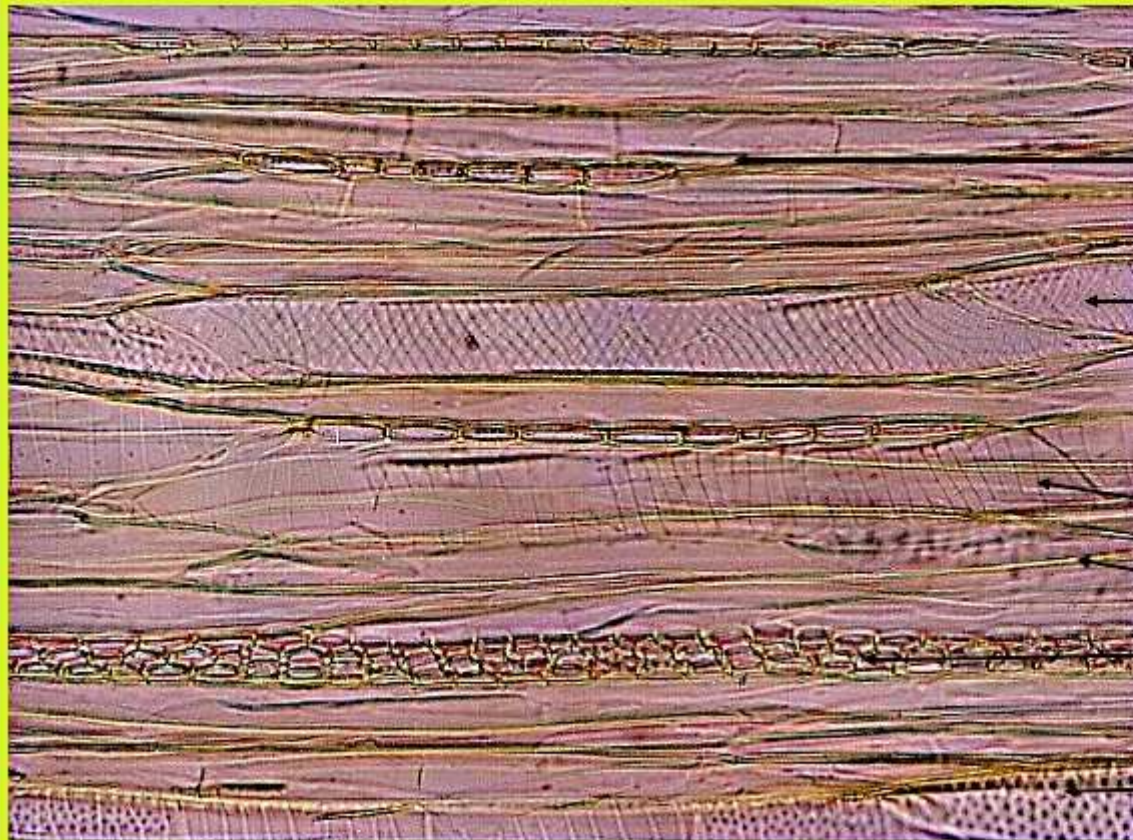
hranice letokruhu

tracheidy letního dřeva

pryskyřičný kanálek vystlaný epitelem

dřeňový paprsek

Podélný tangenciální řez dřevem lípy srdčité (*Tilia cordata*).



dřevní parenchym

trachea

trachea

trachea

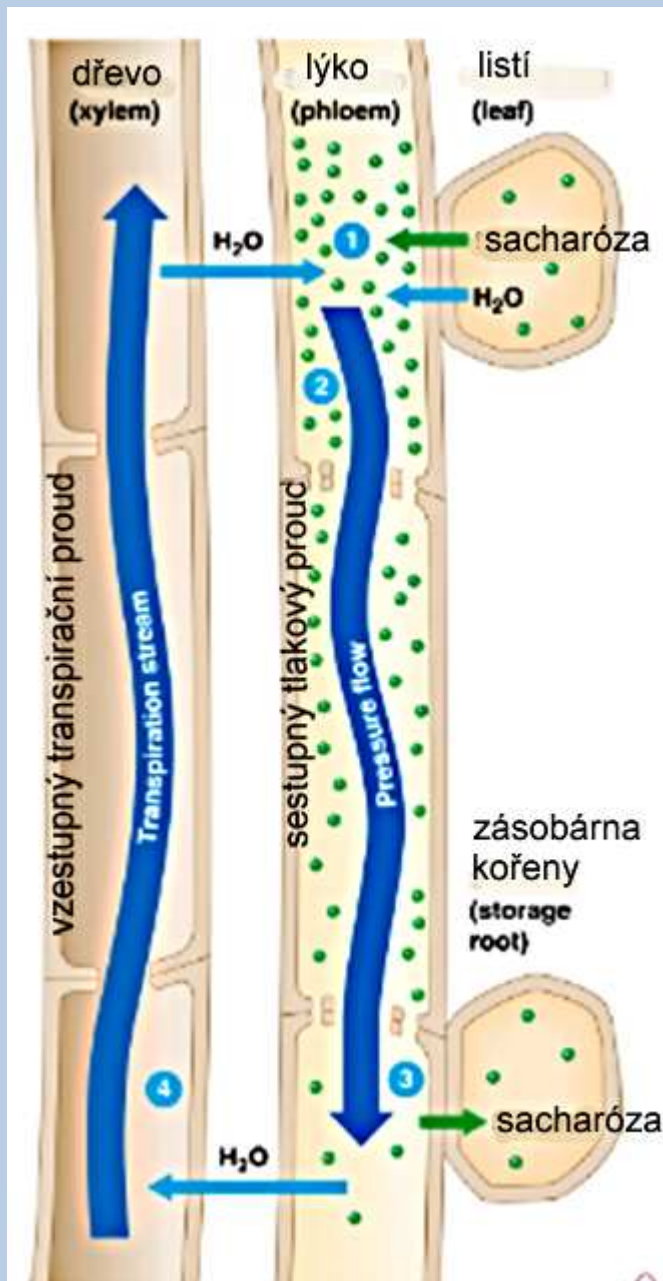
libriform

dřeňový paprsek

trachea

trachea





Dřevní části (xylém) slouží především k rozvádění vody a v ní rozpuštěných anorganických látek po celém těle rostliny. Tento tok směřuje z hlavního místa příjmu vody a minerálních živin (z **kořenů**) do hlavních míst výdeje vody (nadzemní části rostliny, **zejména listy**) - nazýváme jej proto **transpiračním proudem**.

Naproti tomu **lýkové části (floém)** rozvádí zejména energeticky bohaté látky (sacharidy) syntetizované v procesu fotosyntézy po celém rostlinném organismu - floémový tok je tedy všesměrný.

Některá čísla pro představu

Liquid dynamics in plants

Phloem lýko

- Sugar transport
 - Sugar: 1 kg/day
 - Water: 4 kg/day

- Cell diameter: 10 μm
- Flow velocity: 100 $\mu\text{m/s}$
- Reynolds number: 10^{-3}

Xylem dřevo

- Water transport
 - Water uptake: 100 kg/day
 - Evaporation: 95 kg/day
 - Photosynthesis: 1 kg/day
 - Phloem: 4 kg/day

- Cell diameter: 100 μm
- Flow velocity: 1 mm/s
- Reynolds number: 10^{-1}

u listnáčů
(jehličnany 10 μm)



**Javorový sirup, taková dobrota!
Avšak jeho transport lýkem je na
jiném principu než transport vody
vzhůru kmenem stromu,
takže si necháme zajít chuť**



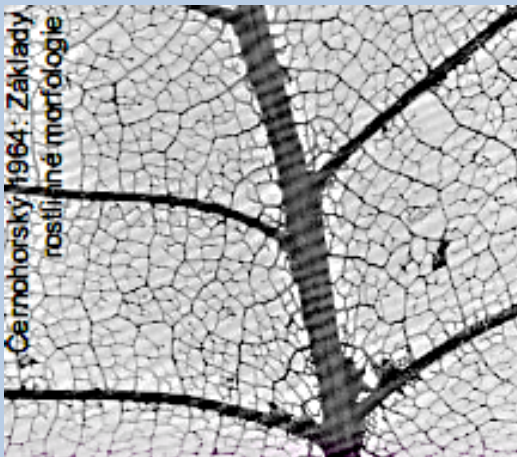
This image of maple sap collecting is on a license for sugar production issued by the federal government in 1893.

Vermont (1893)

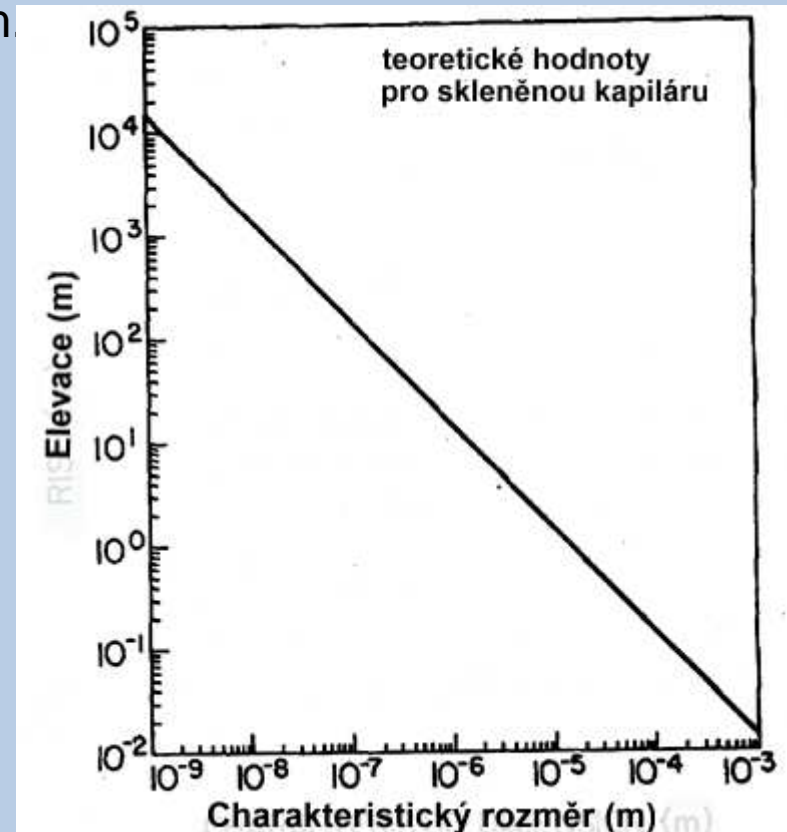
Kmen stromu je vlastně „jenom“ takový **dopravní a informační systém** (dálnice, rozvětvené potrubí) a není příčinou toku mízy vzhůru.

Kapilární elevací může míza vystoupit tak nanejvýš do zhruba 3 m, předpokládáme-li průměr vodivých kapilár (cév a cévic) 10 μm

Musíme prozkoumat další části stromu, jehlice a listy

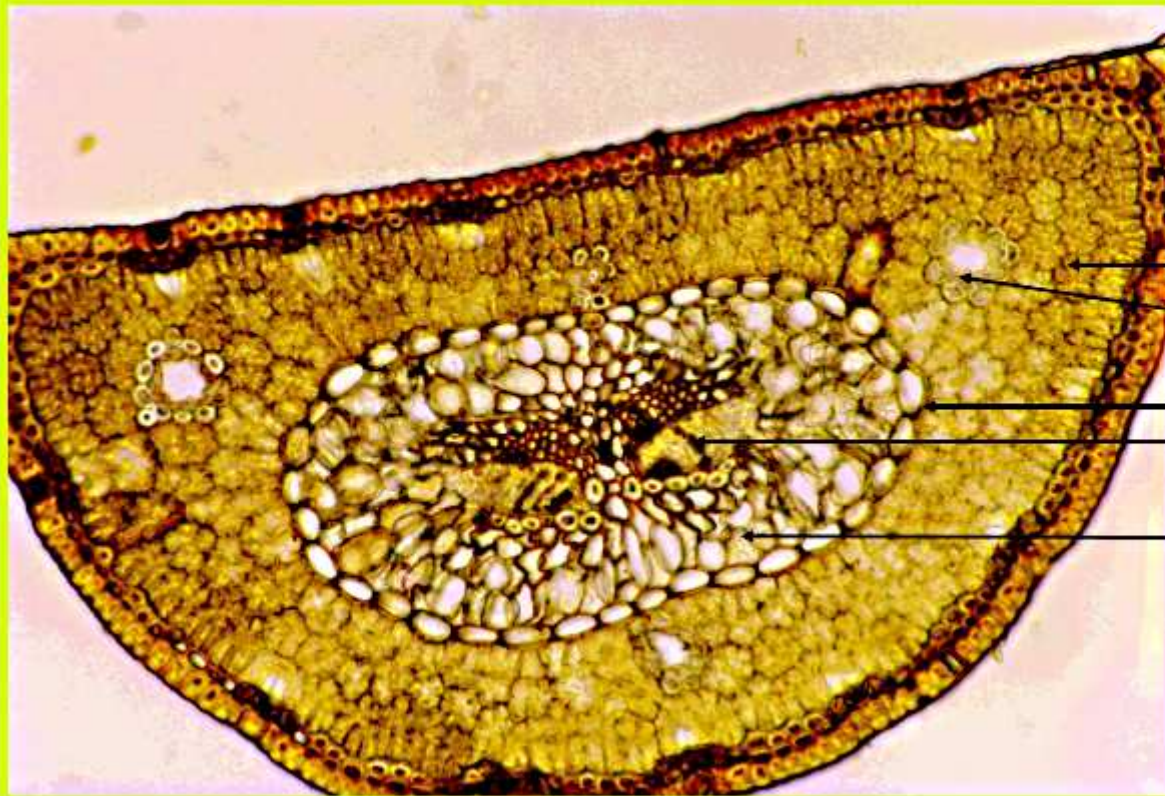


Hagen-Poiseuille $\sim r^4$



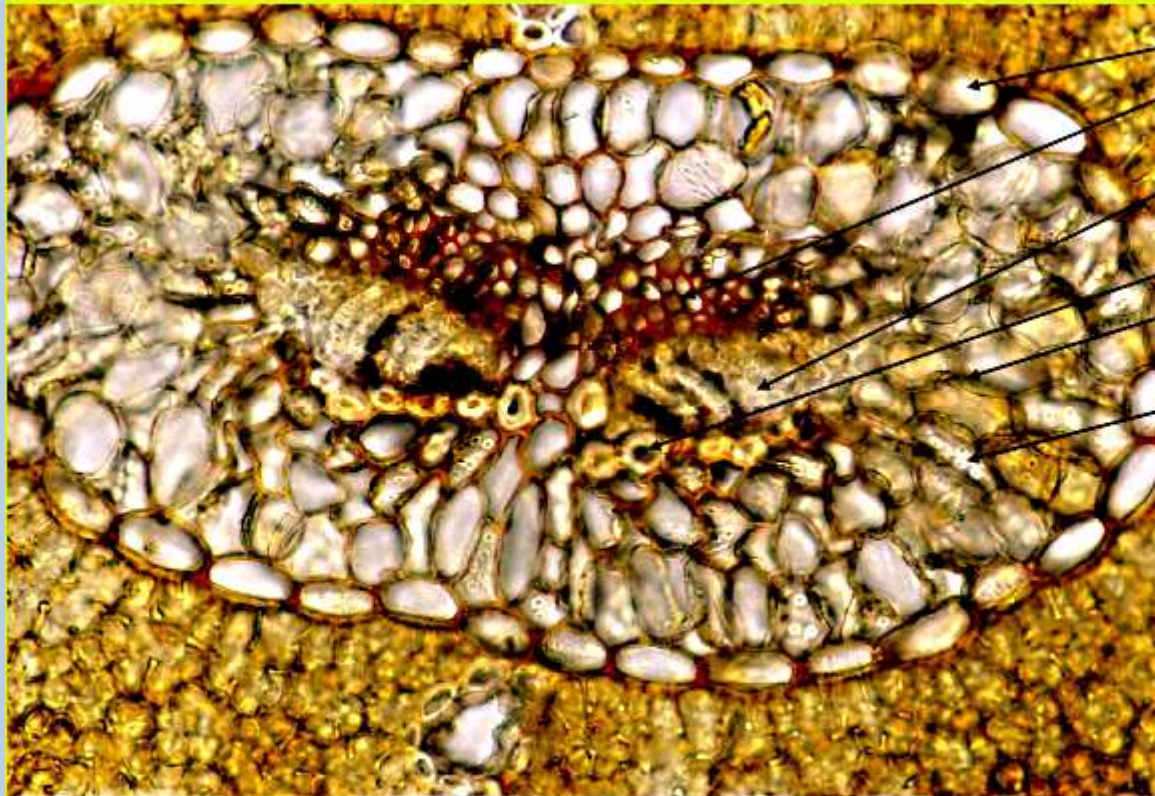
$$\text{elevace [m]} = 14.9 \cdot 10^{-6} [\text{m}]^2 (\text{radius [m]})^{-1}$$

Příčný řez jehlicí borovice černé (*Pinus nigra*).



- epidermis
s ponořenými
stomaty
- sklerenchymatická
hypodermis
- mezofyl
- pryskyřičné
kanálky
- endodermis
- dva kolaterální
cévní svazky**
- transfuzní pletivo

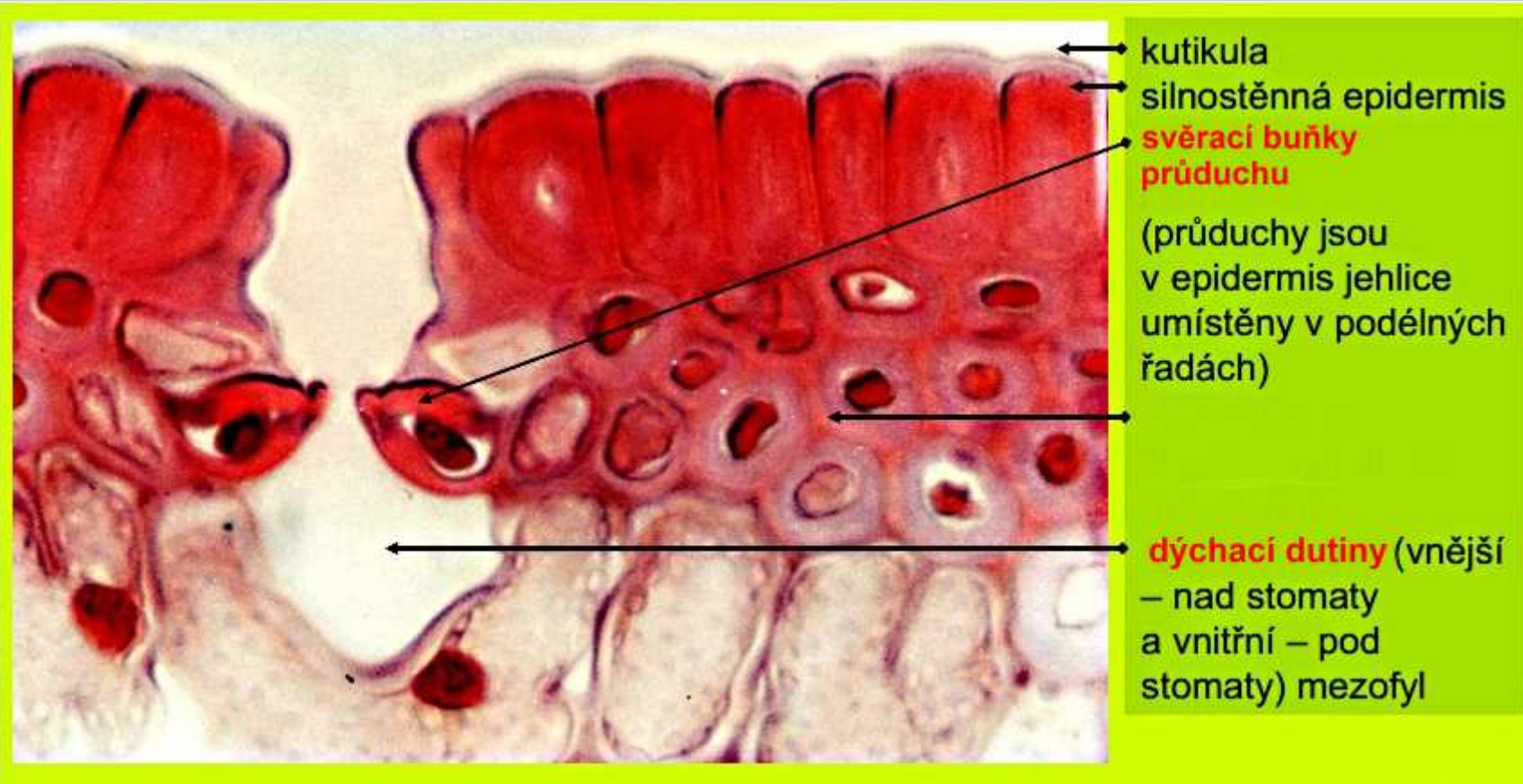
Detail endodermis, transfuzního pletiva a cévních svazků jehlice borovice černé (*Pinus nigra*).



endodermis
xylémová část
cévního svazku

floémová část
cévního svazku

transfuzní
tracheidy
s dvojtečkami
v buněčných
stěnách
(transfuzní
pletivo
zprostředkovává
látkovou výměnu
mezi cévními
svazky
a mezofylem).



Kohezní teorie (Cohesion-Tension Theory)

Popisuje (ale nevysvětluje) vzestupný proud vody (mízy) z půdy přes kořeny a kmenem až do listoví.

Vznikla jako ucelená teorie koncem 19. století: Dixon and Joly (1894)-botanik a inženýr, kteří konzultovali s excelentním fyzikem FitzGeraldem (FitzGerald-Lorentzova transformace).

Některé správné myšlenky (*hybnou silou je transpirace v listech*) vyslovil již Stephen Hales r. 1797 - "Newton rostlinné fyziologie".

Ale už Johannes Kepler v r. 1611:

...aby potrava svou vahou a voda díky tekutosti směřovaly dolů na své místo a nemusela být získávána nepřetržitým sáním jako u rostlin, které jsou vázány na jedno místo.

Od začátku, a až po současnost, tato teorie vyvolává kontroverze:

"Představa, že sloupec vody v trachejích visí a přenáší dolů tah vyvolaný někde nahoře vypařováním vody z listů, je stejná, jako věřit, že lana lze uplést z písku." (volně podle botanika Francise Darwina, syna slavného Charlese Darwina)

Zkusme i my nechat na sebe zapůsobit představu visícího vlákna vody, dlouhého desítky metrů, které se nepřetrhne, ani když nahoře za něj popotahujeme.

Tento jev je ukrytý jen ve stromech a nesetkáme se s ním nikde jinde v přírodě, natož abychom ho dokázali napodobit.

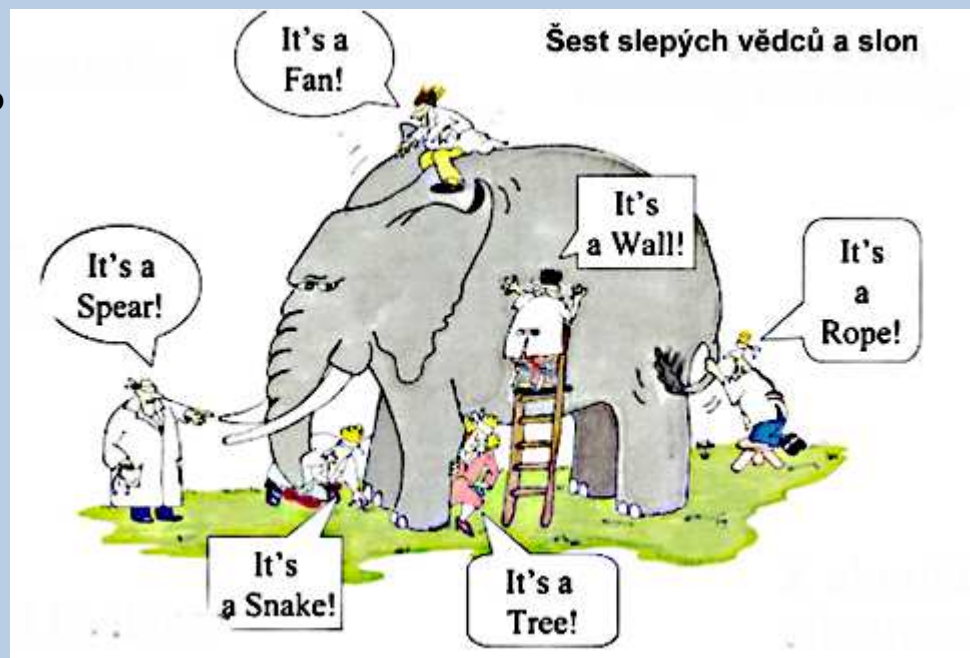
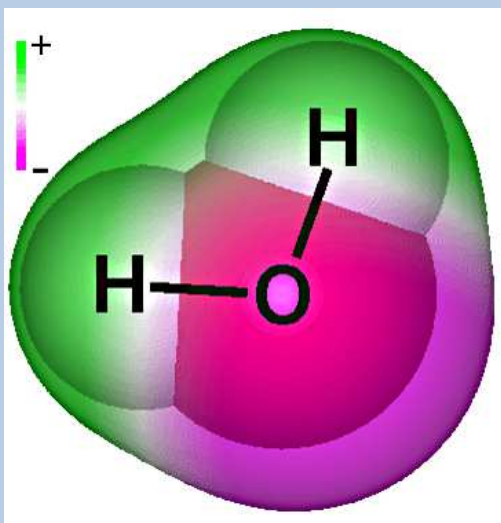
Kohezní teorie (Cohesion-Tension Theory) – základní principy volně a zjednodušeně

1. Ve stromech tvoří míza obrovské množství přetržitých, ale hlavně nepřetržitých, vláken od absorbujících povrchů kořenů až po vypařující povrch listů.
2. Transpirace vody (vypařování) listy je hybnou silou vzestupu mízy vzhůru. Ubývání molekul vody vypařováním na rozhraní voda-vzduch v pórech způsobuje ustupování rozhraní dovnitř pórů a rozhraní se stává více konkávní. Síly adheze a povrchového napětí působí ke znovu- ustanovení rovnovážného tvaru rozhraní a způsobují tahové napětí (podtlak) ve svém nejbližším okolí.
3. **Tahové napětí** se přenáší až do kořenů a vede k pasivní absorpci vody z půdy, takže ztráta vody v listoví je doplňována z půdy.
4. Energie pro tento proces pochází ze slunce, které dodává energii pro fázovou přeměnu při odpařování vody.
5. Díky **pozoruhodně velké kohezi vody** zůstávají vodní sloupce (vlákna) v době transpirace soudržné. (V denní dobu a za vhodné okolní vlhkosti a povětrnosti.) **Tato vlákna vody jsou v přehřátém stavu - tj. v metastabilním stavu**, ale vydrží to na rozdíl od typických umělých experimentálních podmínek.

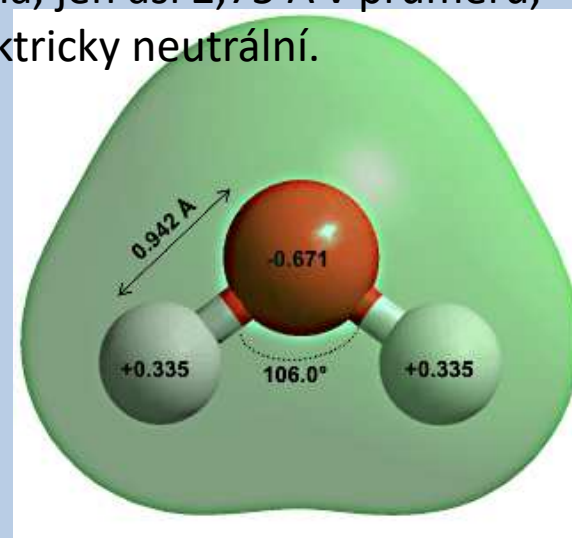
Co je to voda a vodíková vazba ?

Tekutina
nejpodivnější
nejzáhadnější
nejdůležitější
Životodárná
Aqua Incognita

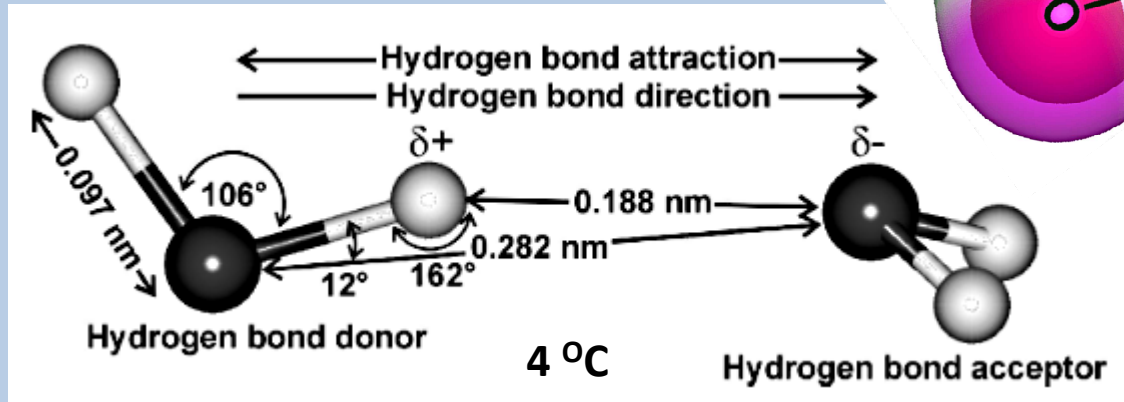
Přibližný tvar a rozdělení náboje



Molekula vody je malá, jen asi 2,75 Å v průměru, přibližně tvaru V, elektricky neutrální. Je mnohem menší než většina molekul kolem nás



Co je to voda a vodíková vazba ? - Pokračování



Představa o vodíkové vazbě pochází z r. 1920.

Atom vodíku je silně přitahován ke dvěma atomům zároveň, a ne jen k jednomu, jak by se dalo předpokládat z toho, že má jen jeden valenční elektron.

U vody každý atom vodíku, který má částečně kladný náboj, je přitahován k částečně záporně nabitému atomu kyslíku své molekuly, a je také přitahován k částečně zápornému atomu kyslíku jiné molekuly, ale slaběji. Tato slabší vazba se nazývá **vodíková vazba** (hydrogen bond).

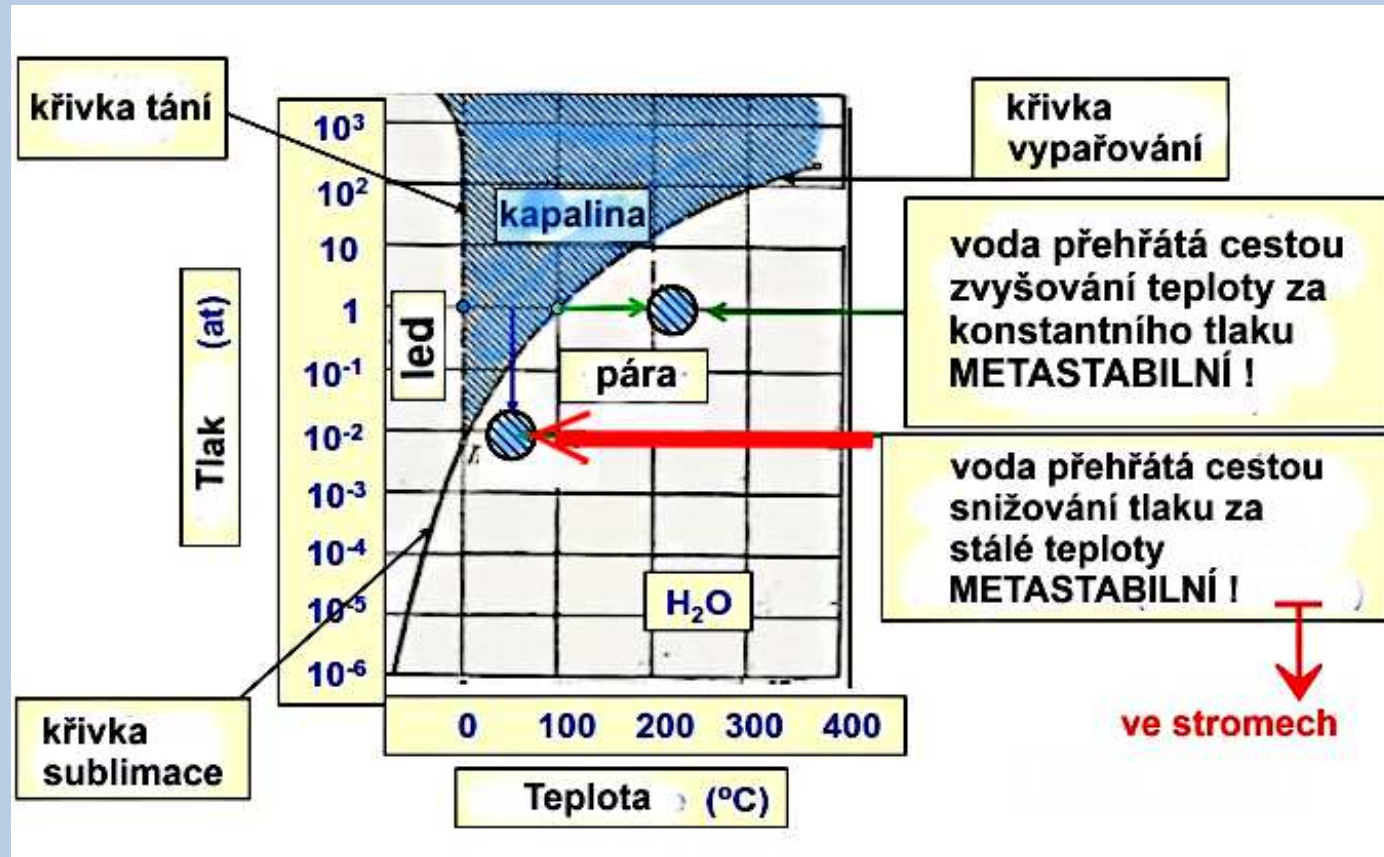
Vodíková vazba je kooperativní - dochází k jejímu zesilování sousedními vazbami. To posiluje tvoření **shluků (klastrů)**, kdy molekuly vody jsou spolu vzájemně propojeny třemi nebo čtyřmi vodíkovými vazbami.

Doba života vodíkové vazby je 1 až 20 ps, ale přerušená vazba se znovu obnovuje asi za 0,1 ps.

Vodíková vazba je z části elektrostatická (asi tak 90 %) a z části kovalentní (asi 10 %), ale jsou i jiné názory.

Díky silné vodíkové vazbě je voda kohezí, přetrvává jako kapalina ve velkém rozsahu teplot.

Zjednodušený fázový diagram vody



Jedna překvapivá vlastnost vody: pevnost v tahu

Pevnost v tahu některých materiálů

Konstrukční ocel 11375

Měď

Olovo

Voda

MPa

363 až 441

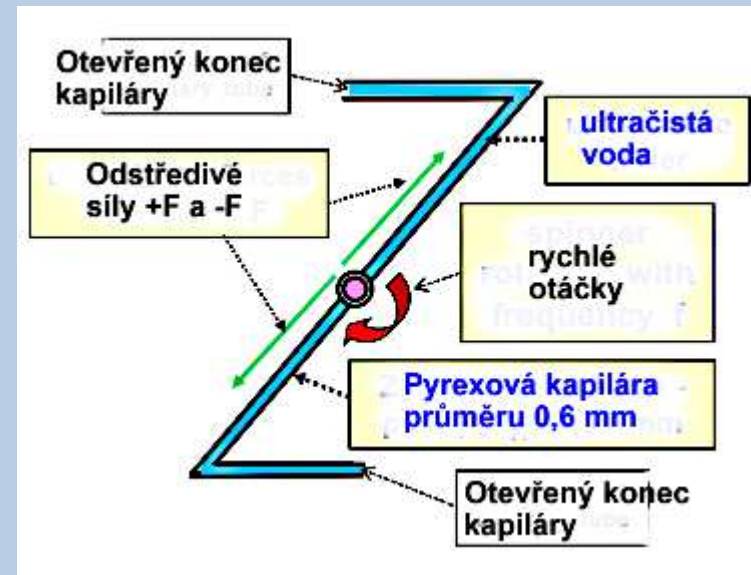
180 až 450

15 až 20

190 až 230 (teoretická)

3 až 30 (dříve měřená)

130 (nejvyšší naměřená)



Proč takový rozptyl v hodnotách?

Záleží na tom, jak moc vzduchu a nečistot voda obsahovala, čili jak moc docházelo při negativním tlaku ke **kavitaci** (a také na metodě).
Jedna z mnoha metod – kapilára tvaru Z připevněna na centrifugu.

Rozhraní voda-pevná látka-vzduch

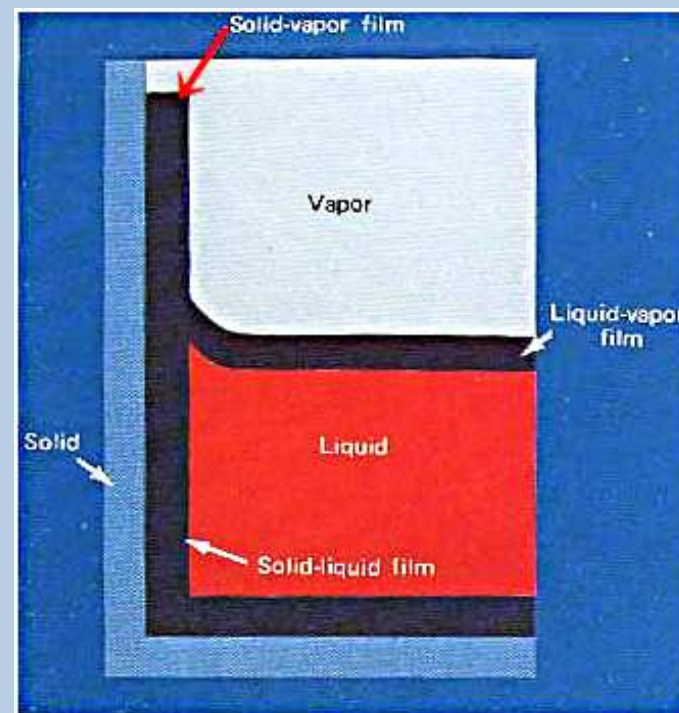
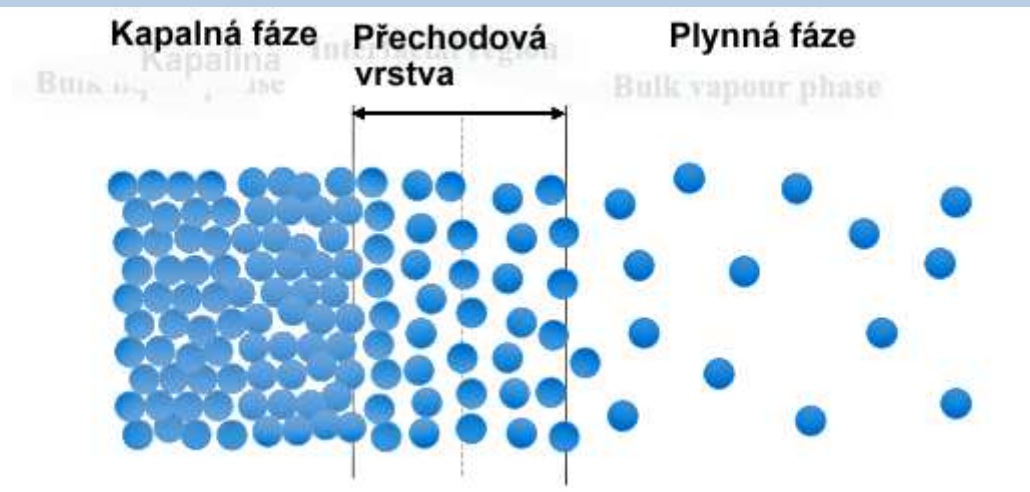
Kapalina v nádobě představuje problém tří rozhraní a tří povrchových vrstev:

povrchová vrstva mezi vzduchem a kapalinou

povrchová vrstva mezi vzduchem a pevnou látkou

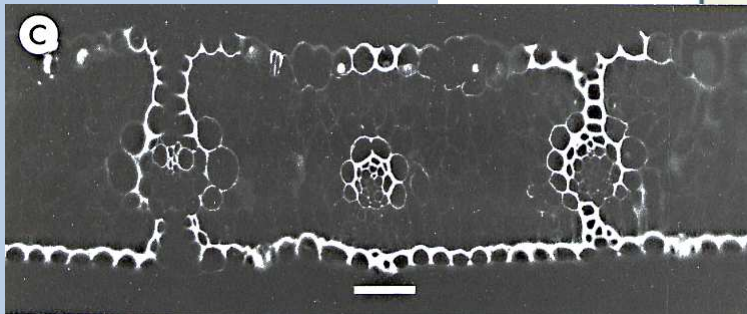
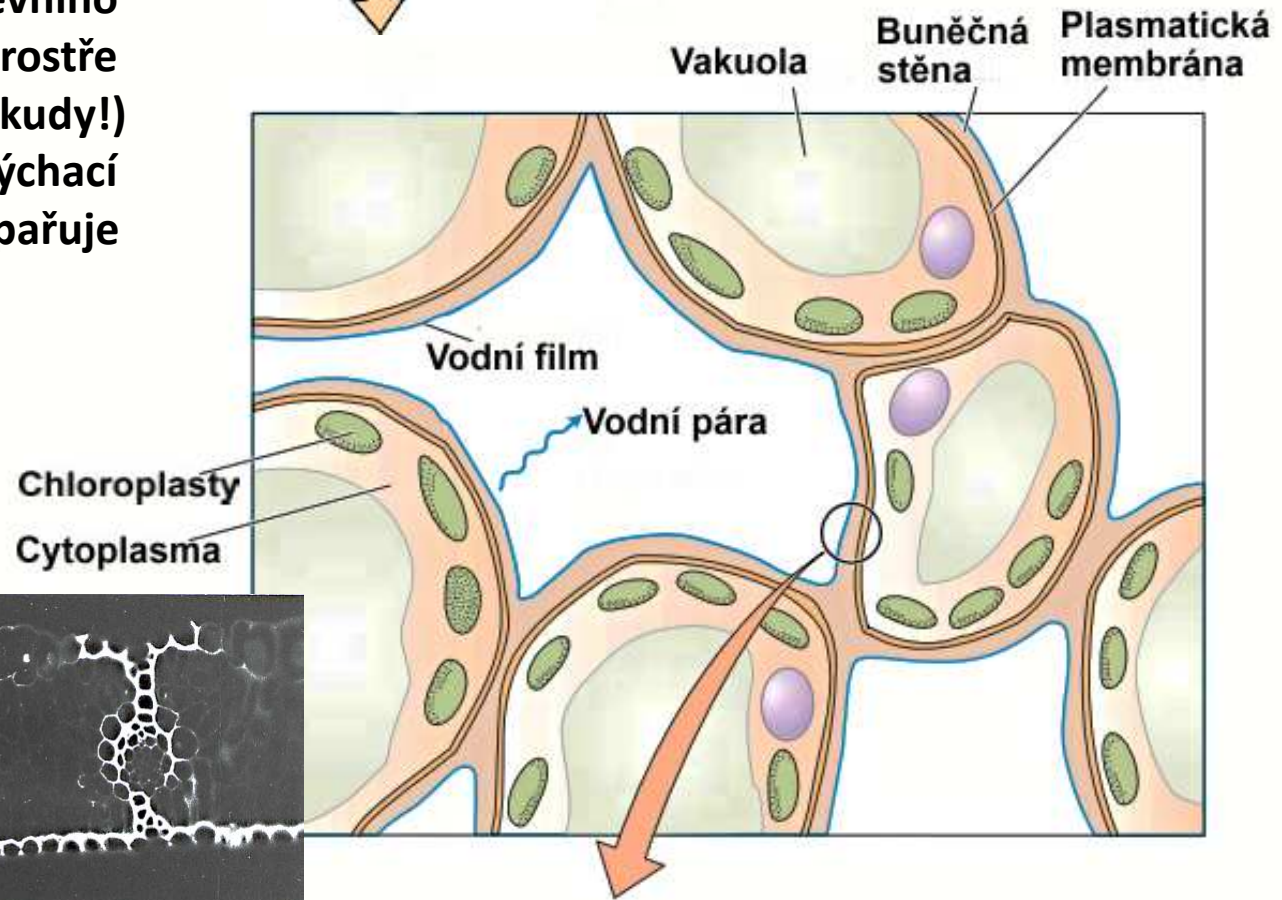
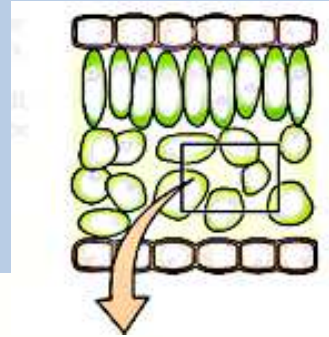
povrchová vrstva mezi kapalinou a pevnou látkou

Tyto povrchové vrstvy mají tloušťku jen několika molekul, ale ovlivňují kohezi a adhezi

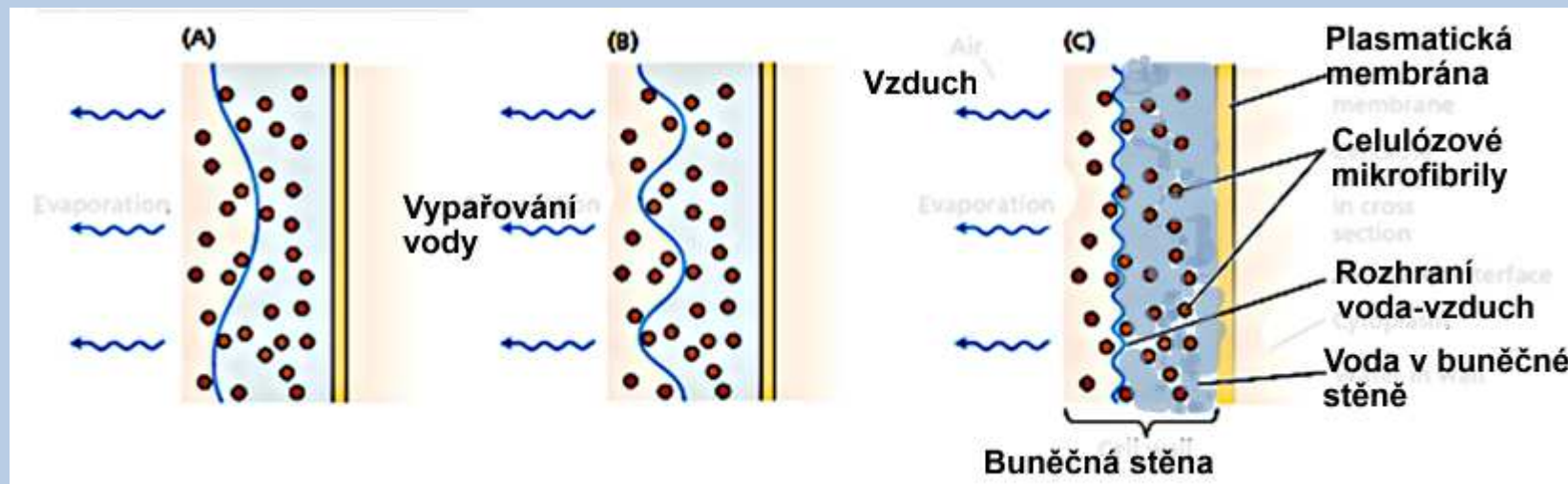
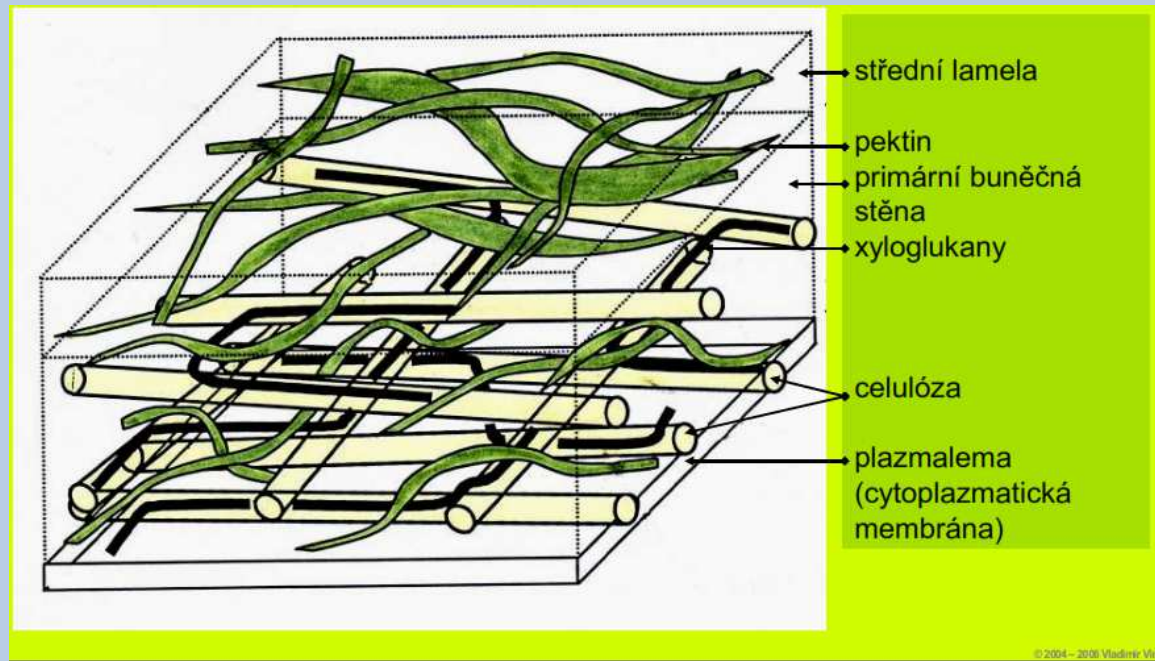


Děje v přechodové vrstvě jsou důležité pro veškeré další zkoumání toho co se děje v listech

Z xylémového cévního svazku se voda rozprostře (nevíme přesně jak a kudy!) po povrchu buněk dýchací dutiny a řízeně se vypařuje



detail viz další obrázek



Gutace



Ne všechno je transpirace a podtlak:

Kořeny rostlin někdy vyvozují také přetlak 0,05 až 0,5 MPa, ten nestačí na "vyhnání" vody až do korun stromů, ale pozorujeme jej u některých rostlin, když uřízneme stonek u země, a také jako **gutaci**, v době snížené transpirace (v noci, zvýšená vlhkost). Tlak má původ v kořeni v důsledku **osmotického tlaku** vody obohacené o soli.

Meniskus vody v kapiláře vytažené z klasické Pasteurovy pipety udrží úctyhodný sloupec vody

Uplatní se zde Pascalův princip, koheze molekul vody a adheze ke stěnám



PE lahvička (vysoká 13 cm) proděravělá ve dně otvory asi 3,5 - 4 mm, naplněná a uzavřená víčkem pod vodou.

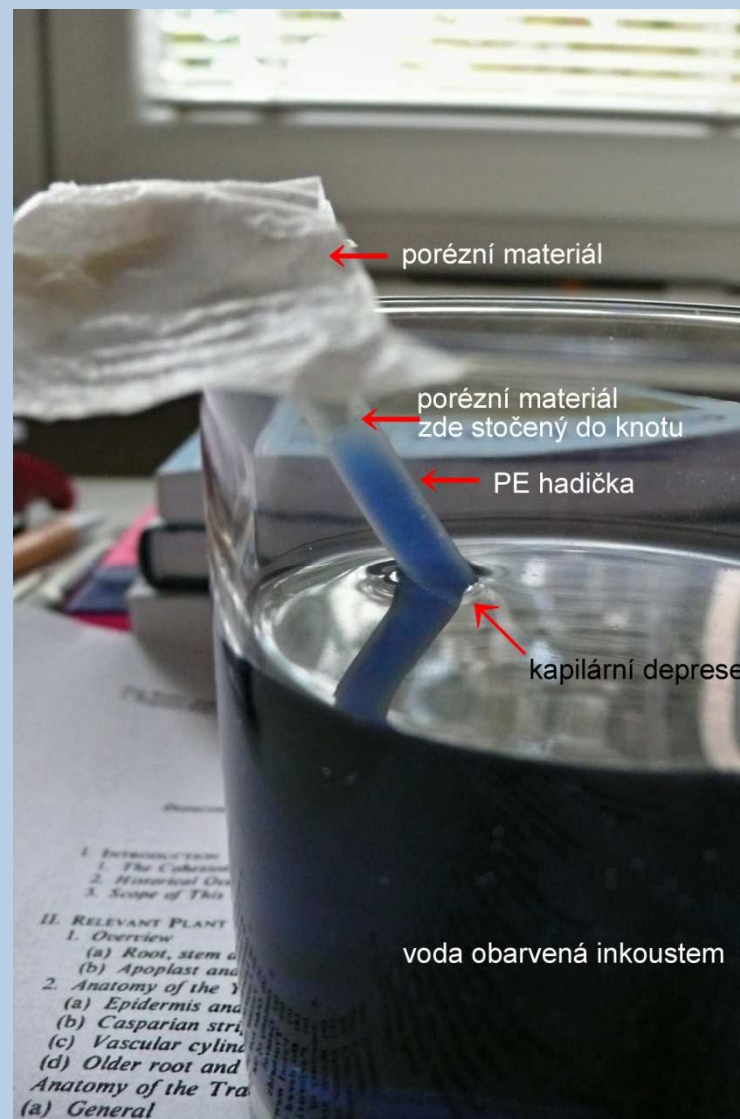
Menisky utvořené vodou i u tak velkých otvorů udrží hydrostatický tlak a voda nevyteče.



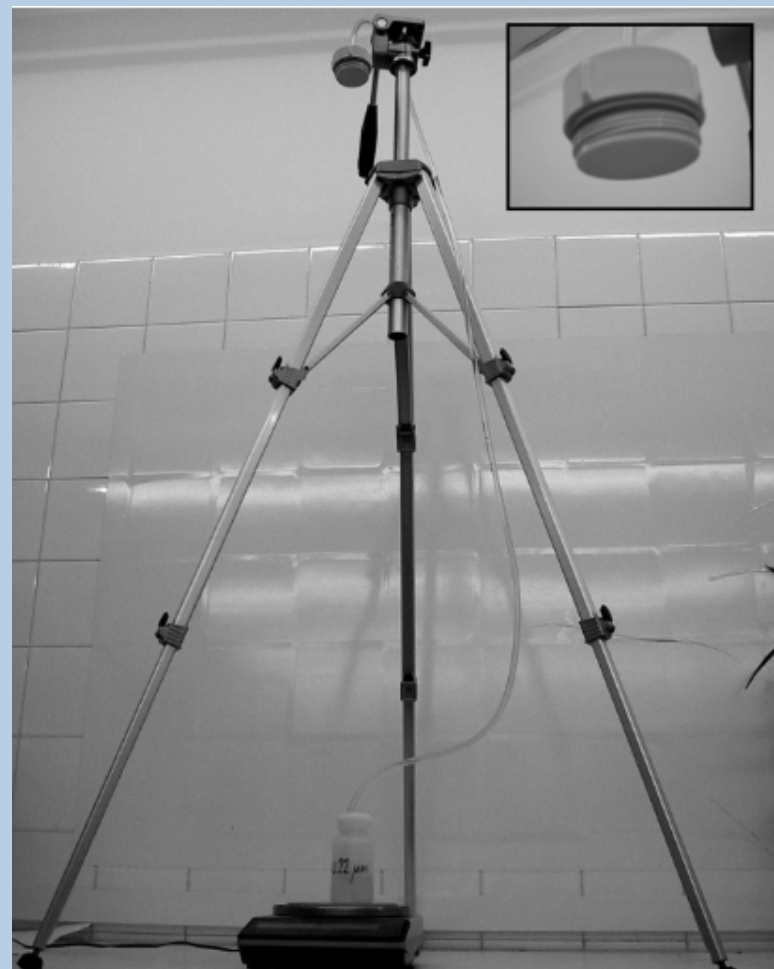
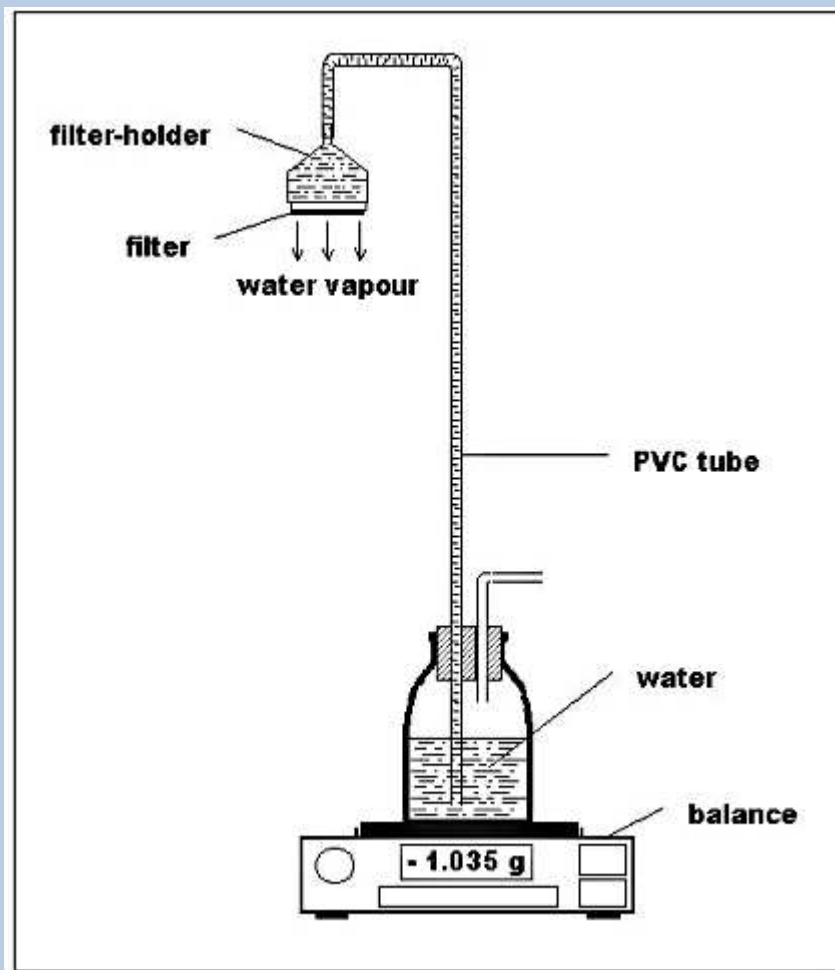
Po otevření víčka se k hydrostatickému tlaku přidá tlak atmosférický a voda vytéká.

Porézní materiál odpařuje vodu a ta je doplňována sáním PE hadičkou ze skleničky.

Kápneme-li do vody trošku inkoustu, postupně se zbarví voda v hadiččce i porézní materiál nahoře.

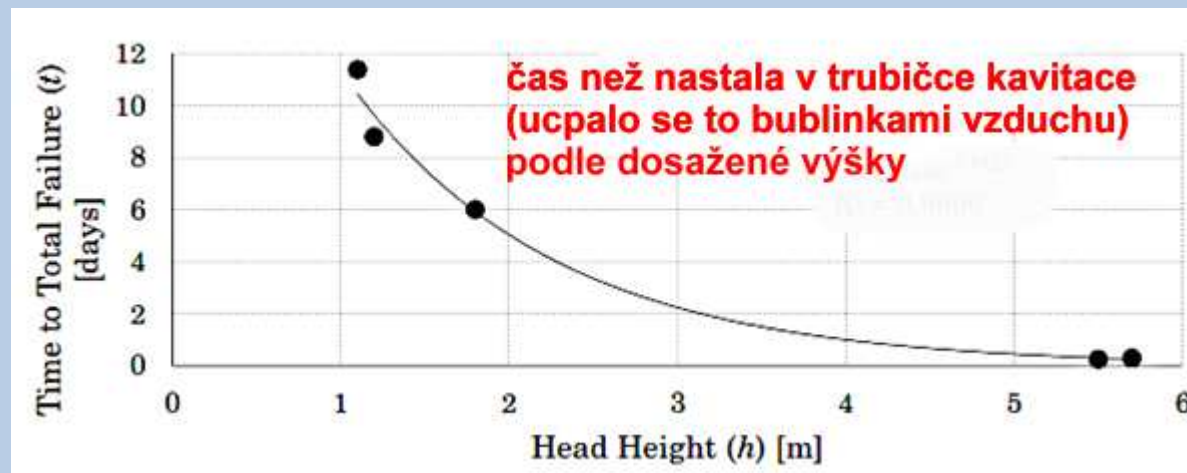
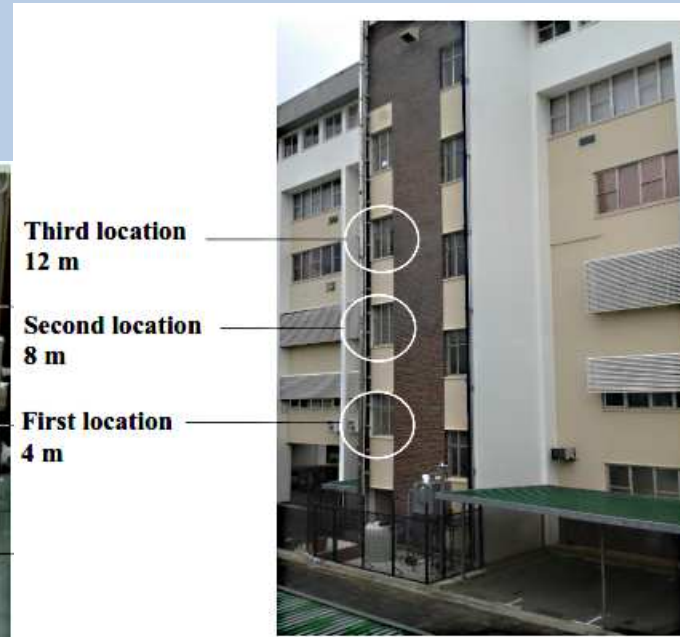


Mnohem dokonalejší realizace v univerzitní laboratoři



Inspirace transpirací – pasívní vodní pumpa

Justin Fraser, Stellenbosch University



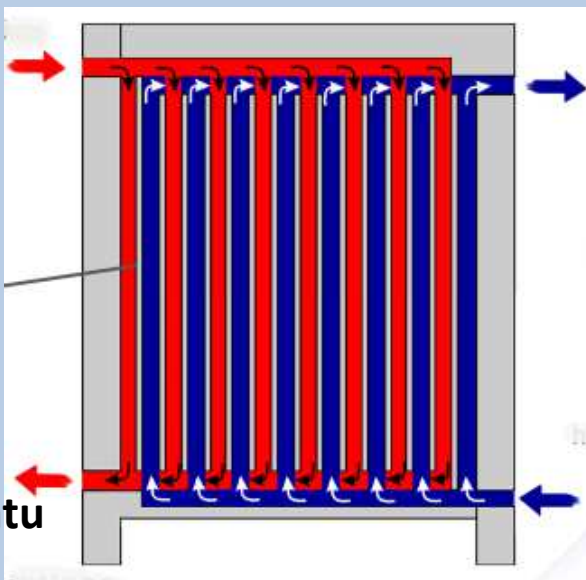
KAVITACE – technický pohled

veliký parní
regulační ventil



Deskový parní výměník tepla

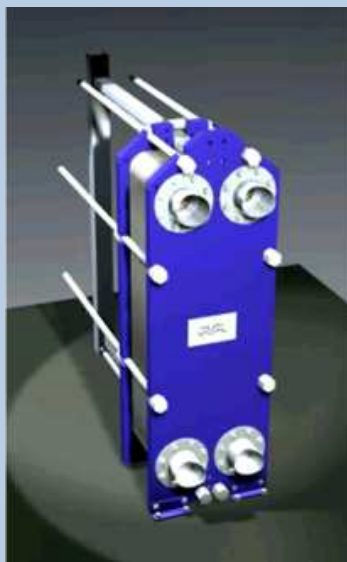
přívod páry



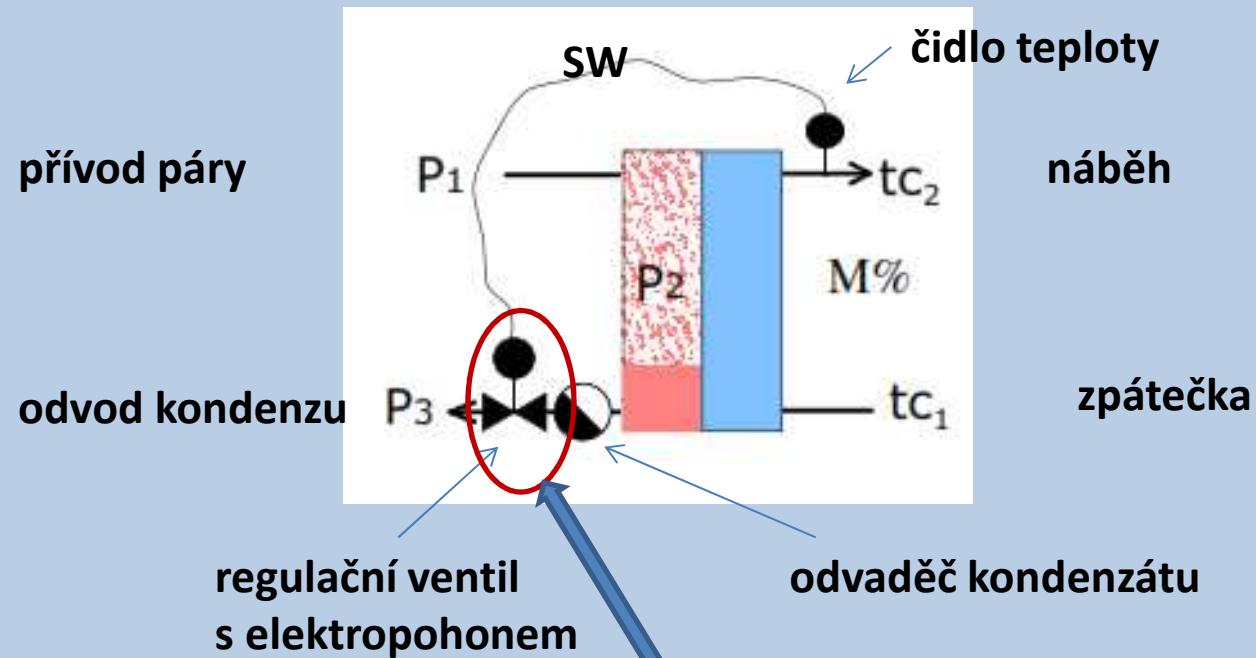
odvod ohřáté vody
(přívod k radiátorům)

odvod
kondenzátu

přívod vody k ohřevu
(zpátečka od radiátorů)



Regulace výměníku na straně kondenzátu



Ouha! Někdy to tady začne hlučet a hučet - KAVITACE

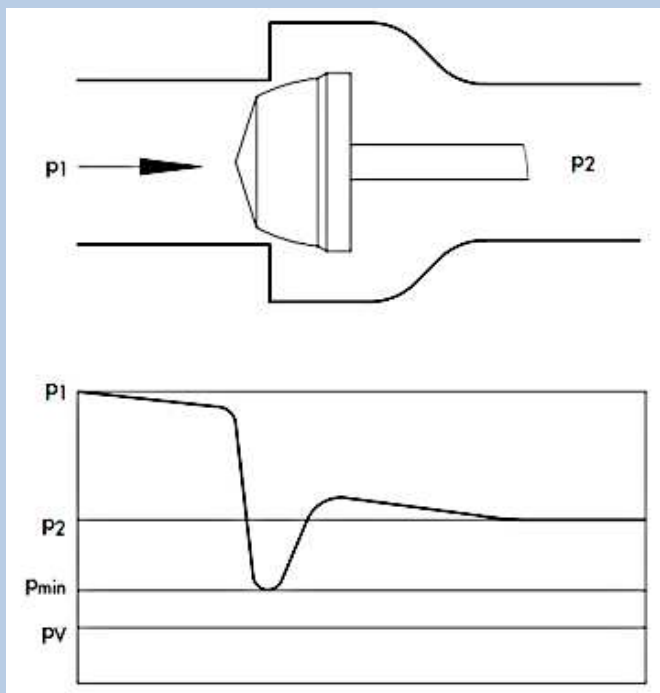
Kavitací nazýváme složitý jev vzniku a zániku dutin v proudící kapalině.

Podstatou samotného vzniku kavitace je snížení tlaku na tlak nasycených par, odpovídající teplotě kapaliny. Při těchto podmínkách se začne kapalina odpařovat a tvoří se v kapalině velmi malé **bublínky**.

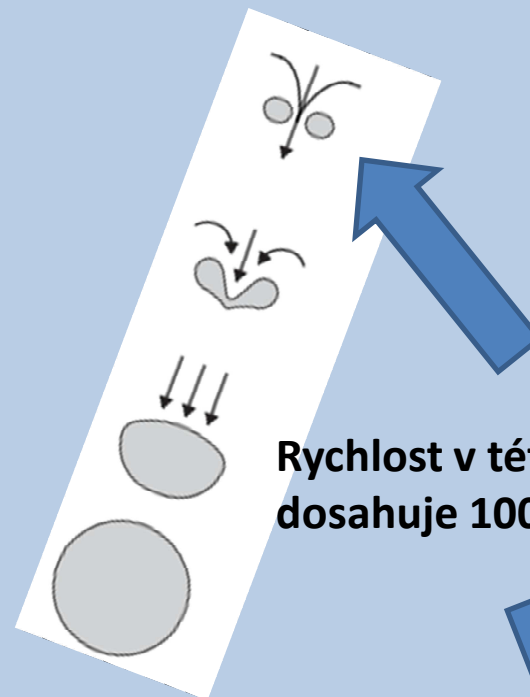
Tyto kavitací bublinky jsou unášeny proudící kapalinou do míst **vyššího tlaku**, kde pára obsažená v bublinkách **kondenzuje** a vytváří se **kavitací dutiny**.

Do těchto dutin vniká okolní kapalina velkou rychlostí a v podstatě rozděluje dutinu na dvě části a dochází k **implozi**.

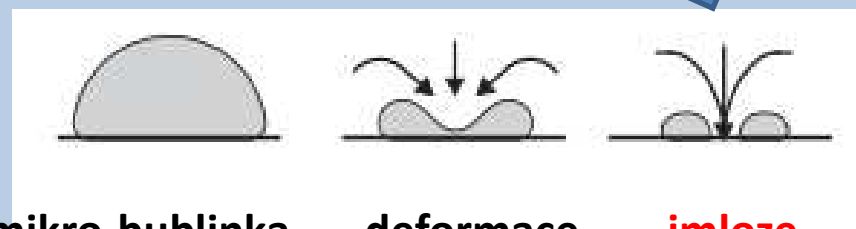
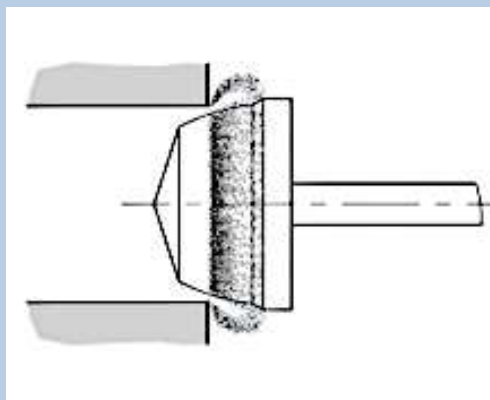
Paprsek vody, který rozdělil dutinu na dvě části naráží obrovskou rychlostí a za velkých teplot na povrch např. lopatky lodního šroubu či kuželky ventilu a rozrušuje je.



I kvalitní ventil je zničen za několik týdnů



Rychlost v této mikro-trysce dosahuje 100 m/s



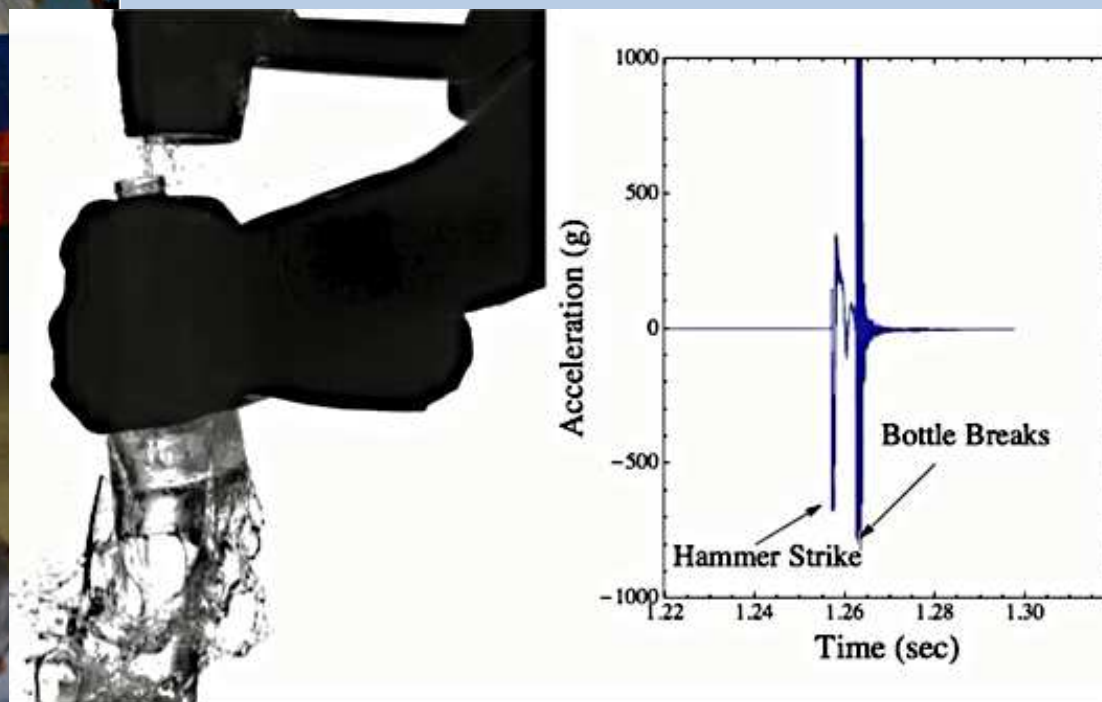
mikro-bublinka

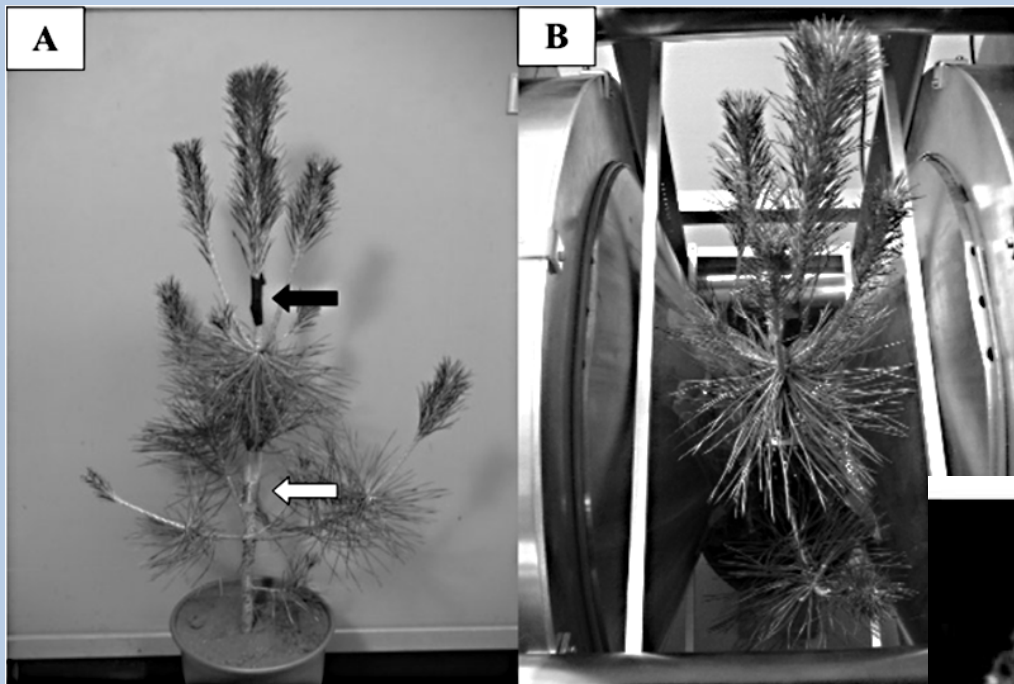
deformace

imloze

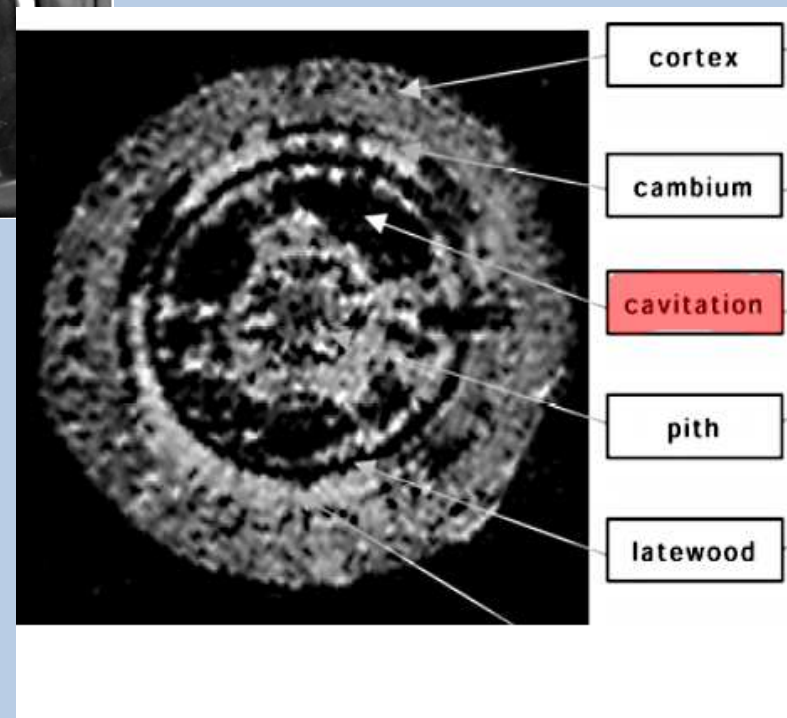


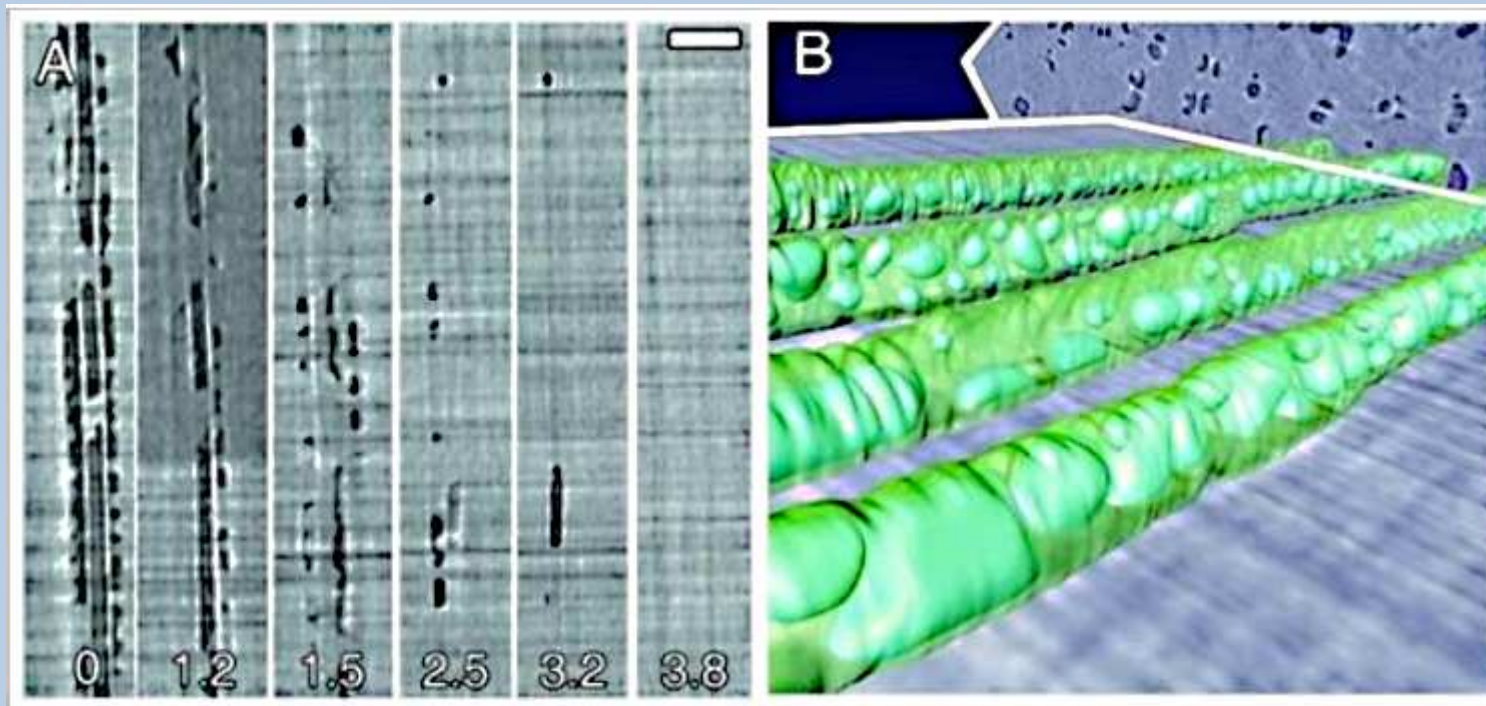
Někdy je kavitace užitečná
třeba pro zábavu
nebo pro liposukci





**In-vivo zobrazování
kavitace sazenice borovice
pomocí magnetické rezonance**





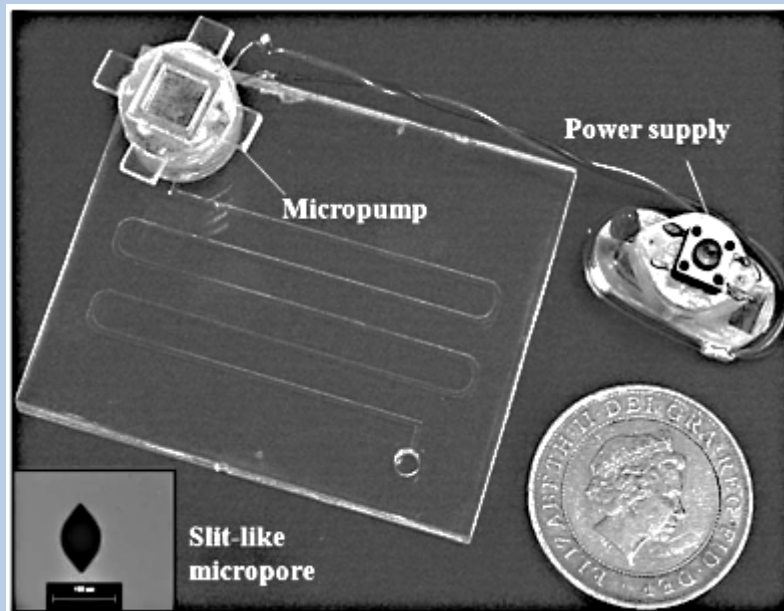
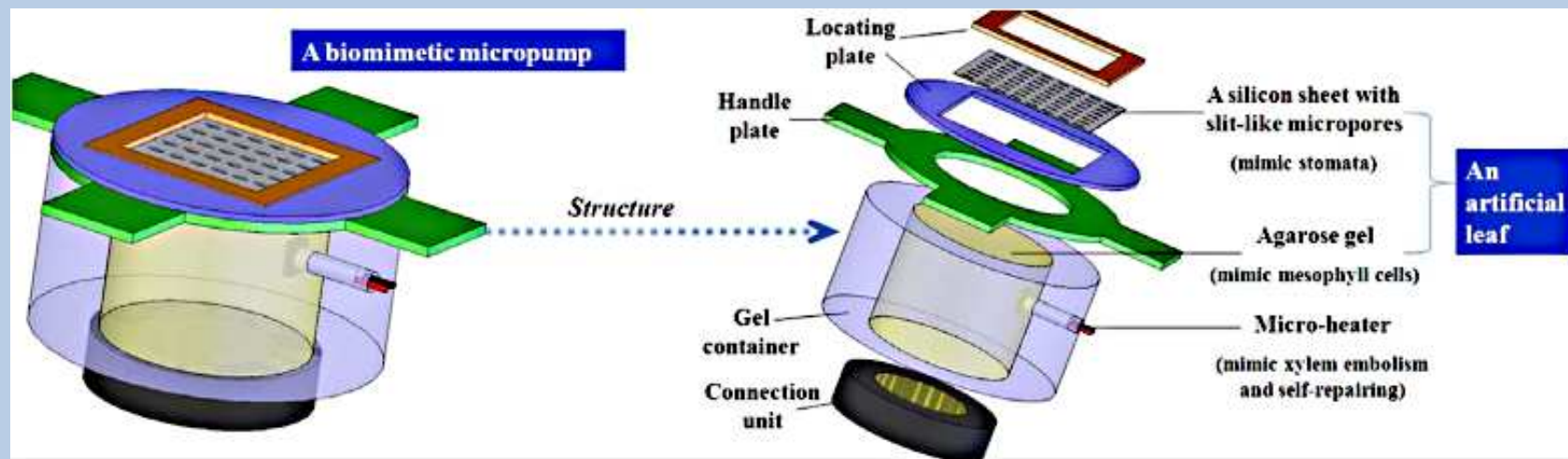
Lawrence Berkeley National Lab, CA, USA

A Vyhojení embolie u révy vinné (*Vitis vinifera* L.) zobrazené pomocí rentgenového mikro-tomografu. Čas je uveden v hodinách, tj. za méně než 4 h se cévy zase naplnily mizou

B 3D rekonstrukce čtyř vodivých kanálků ukazující, jak kapičky vody vytvořené na stěnách postupně vyplní vodivý kanálek

Po předchozím výkladu už se nebudeme strachovat, co se stane se stromem, do kterého datel ve výšce vyklove díru





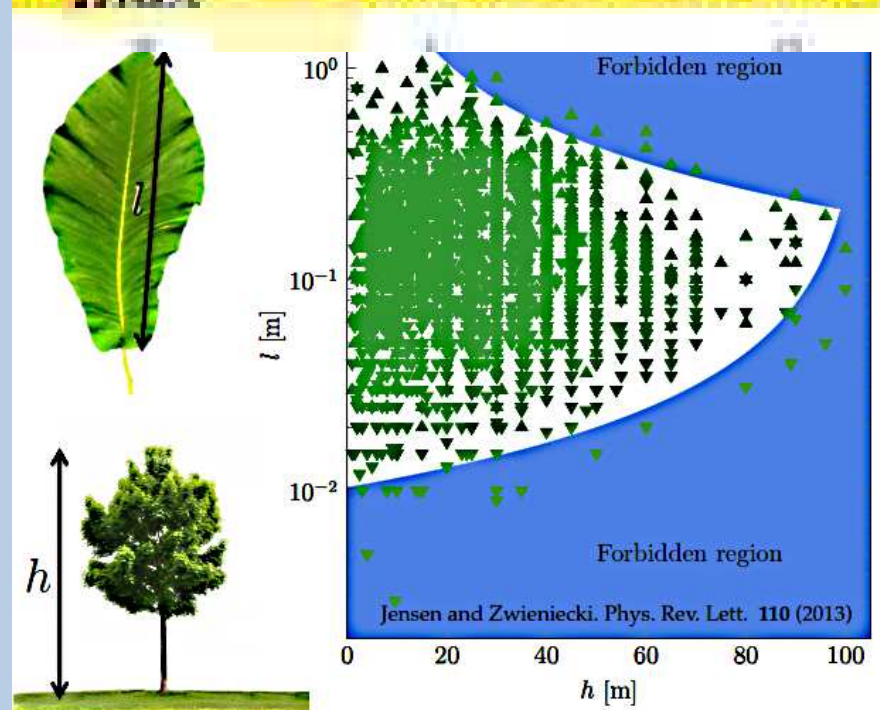
Micropump/valve Design

As is shown in Fig. 1c, the micropump/valve mainly consists of a silicon sheet with slit-like micropores, agarose gel and a micro-heater. The silicon sheet and the agarose gel form an artificial "leaf" to drive the fluid. The micro-heater mimics the xylem embolism and its self-repairing through increasing or decreasing the temperature in agarose gel. A power supply is used to supply the micro-heater. It has a microcircuit which can control the turning on or turning off of the micro-heater. The array of slit-like micropores on the silicon sheet is fabricated by photolithography and wet etching. The fabricated slit-like micropore is shown in Fig. 2. The length of a micropore is about $98\ \mu\text{m}$, and the width is $64\ \mu\text{m}$. The density of the micropore array is 9 micropores per square millimeters. A fabricated micropore has similar shape with a stoma on a leaf.

Appendix: Jak tedy vysoko?
Až do nebe?

Nic z toho, o čem jsme zde mluvili (!), ale:
na základě **sestupného proudu produktů fotosyntézy floémem**, za předpokladu, že list je osmotická pumpa a ostatní části dolů až do kořenů jsou hydraulický systém s určitým odporem

$$h_{\max} = 104 \pm 6 \text{ m.}$$



PRL 110, 018104 (2013)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
4 JANUARY 2013



Physical Limits to Leaf Size in Tall Trees

Kaare H. Jensen*

Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138, USA

Maciej A. Zwieniecki†

Department of Plant Sciences, University of California, Davis, California 95616, USA

(Received 28 August 2012; published 4 January 2013)

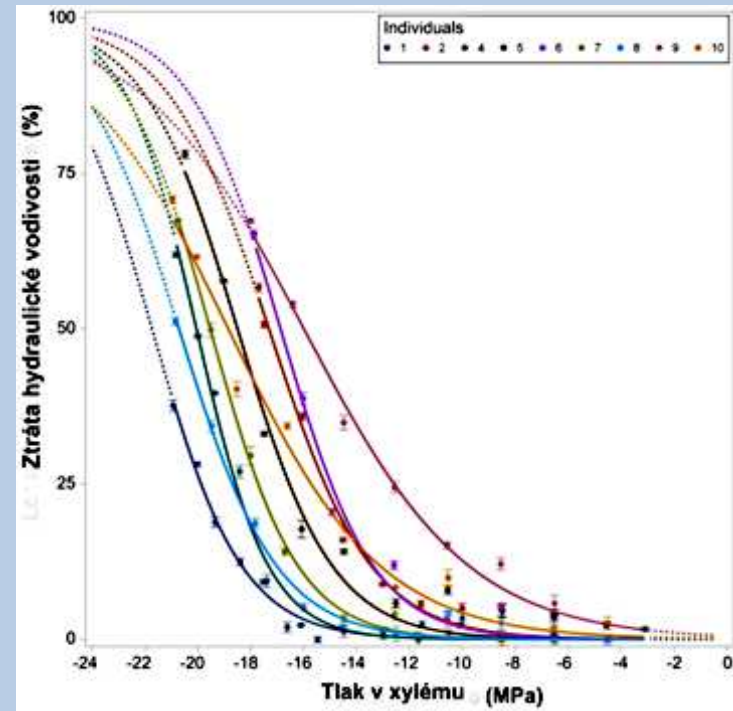
Jan Petrovský pro Fyzikální kavárnu

2016/2017

Appendix:

Kudy možná vede cesta k lepšímu pochopení, jak to funguje

Callitris tuberculata



Keř připomínající borovici, dosahující výšky 8 m a rostoucí v aridních oblastech Austrálie. Vědci naměřili v průměru tlak **-18,8 MPa**, při kterém dochází teprve k 50 % ztráty průchodnosti xylému (kdy už je zvýšené nebezpečí uhynutí suchem)

Larter M. et al: Extreme Aridity Pushes Trees to Their Physical Limits, Plant Physiology, July 2015, Vol. 168, pp. 804–807, www.plantphysiol.org

**Na každý strom pohlédněte s úctou,
protože on umí něco,
na co my fyzici jsme a budeme krátcí**



Jan Petrovský pro Fyzikální kavárnu
2016/2017

Výběr ze zdrojů a další čtení

Brown H.R.: The theory of the rise of sap in trees: some historical and conceptual remarks, *Physics in Perspective*, 15 (2013), 320-358

Berry M.V.: The molecular mechanism of surface tension, 1971, *Physics Education*, 6, 79-84

Pickard W.F.: The ascent of sap in plants, *Prog. Biophys. molec. Biol.*, 37, 181-229, 1981

Chaplin M.: Water's hydrogen bond strength, on-line: <https://arxiv.org/pdf/0706.1355>

Chaplin M.: on-line: <http://www1.lsbu.ac.uk/water/>

Bruesch P.: Water, Its Significance in Science, in Nature and Culture, in World Religions and in the Universe, on-line: <https://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:5519>, 2012

Jensen K.H.: Physical Limits to Leaf Size in Tall Trees, *Phys Rev Let* **110**, 018104 (2013)

Peramaki M.: A physical analysis of sap flow dynamics in trees, Academic dissertation, Faculty of Agriculture and Forestry of the University of Helsinki, 2005

Vinter V.: Atlas anatomie cévnatých rostlin, on-line: <http://www.botanika.upol.cz/atlas/anatomie/>

Sack L., Holbrook M.N.: Leaf hydraulics, *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2006. 57:361–81

Basic physics of transpiration at plant leaves, Pohang University of Science and Technology, Biofluid and Biomimic Research Center, on-line: <http://bbrc.postech.ac.kr/rb/?r=home&m=bbs&bid=research01&uid=999>

Canny M.J.: What becomes of the transpiration stream?, *New Phytol.* (1990), 114, 341-368

Sedláček P.: Interakce mezi dostupností živin a vodním provozem rostlin, disertace, MUNI, 2013

Brodersen C.R. et al.: The Dynamics of Embolism Repair in Xylem: In Vivo Visualizations Using High-Resolution Computed Tomography, *Plant Physiology*, November 2010, Vol. 154, pp. 1088–1095

Fraser J.: Surface Tension Driven Water Pumping: A Bio-Inspired Passive Water Pump, Thesis, Stellenbosch University, March 2015

Vilalta J.M.: Make your own transpiring tree, *Journal of Biological Education* (2003) 37(4)

Utzusawa S.: Use of Magnetic Resonance Microscopy for the Nondestructive Observation of Xylem Cavitation Caused by Pine Wilt Disease, *Phytopathology* 95:737-743, 2005

Holbrook M.N., Zwieniecki M.A.: Transporting water to the top of the tree, *Physics Today*, January 2008

Ördög Vince, Molnár Zoltán (2011): *Plant Physiology*, on-line:

http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0010_1A_Book_angol_01_novenyelettan/ch02.html#id470716

Plant Physiology, Taiz_&_Zeiger, on-line: exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/PlantPhysiologyTaiz2002.pdf

Jingmin L, Chong L, Zheng X, Kaiping Z, Xue K, et al. (2012) A Microfluidic Pump/Valve Inspired by Xylem Embolism and Transpiration in Plants. *PLoS ONE* 7(11): e50320

Marias D.: The path to understanding water movement in leaves is not straightforward, on-line:

<https://aobblog.com/2015/01/path-understanding-water-movement-leaves-not-straightforward/>

Jungwith P.: Voda, samá voda, on-line: <http://www.molecular.cz/~jungwirt>

Tyc T.: Termodynamika kolem nás, on-line: www.physics.muni.cz/~tomtyc/zajfyz/termodyn-text.pdf