

Anatomická stavba kořene

Osnova přednášky

Úvod

Základní typy kořenů a kořenových systémů

- Radikula
- Primární kořen
- Boční kořeny
- Adventivní kořeny

Osnova přednášky

Anatomická stavba kořene

- Vrchol kořene
 - Apikální meristém kořene
 - Kořenová čepička
- Primární stavba kořene
 - Pokožka a kořenové vlásky
 - Primární kůra
 - Endodermis
 - Hypodermis a exodermis
 - Střední válec
 - Pericykl
 - Xylém
 - Floém
- Sekundární stavba kořene
 - Kambium a jeho deriváty
 - Felogén a jeho deriváty
- Přehled stavby kořene dvouděložných rostlin
- Přehled stavby kořene jednoděložných rostlin

Osnova přednášky

Specializované typy kořenů

- Vzdušné kořeny
 - Zásobní kořeny
 - Kontraktilní kořeny
 - Chůdovité a tabulovité kořeny
 - Pneumatofory
 - Proteoidní kořeny
 - Mykorhizy
 - Kořenové hlízky
 - Haustoria
-

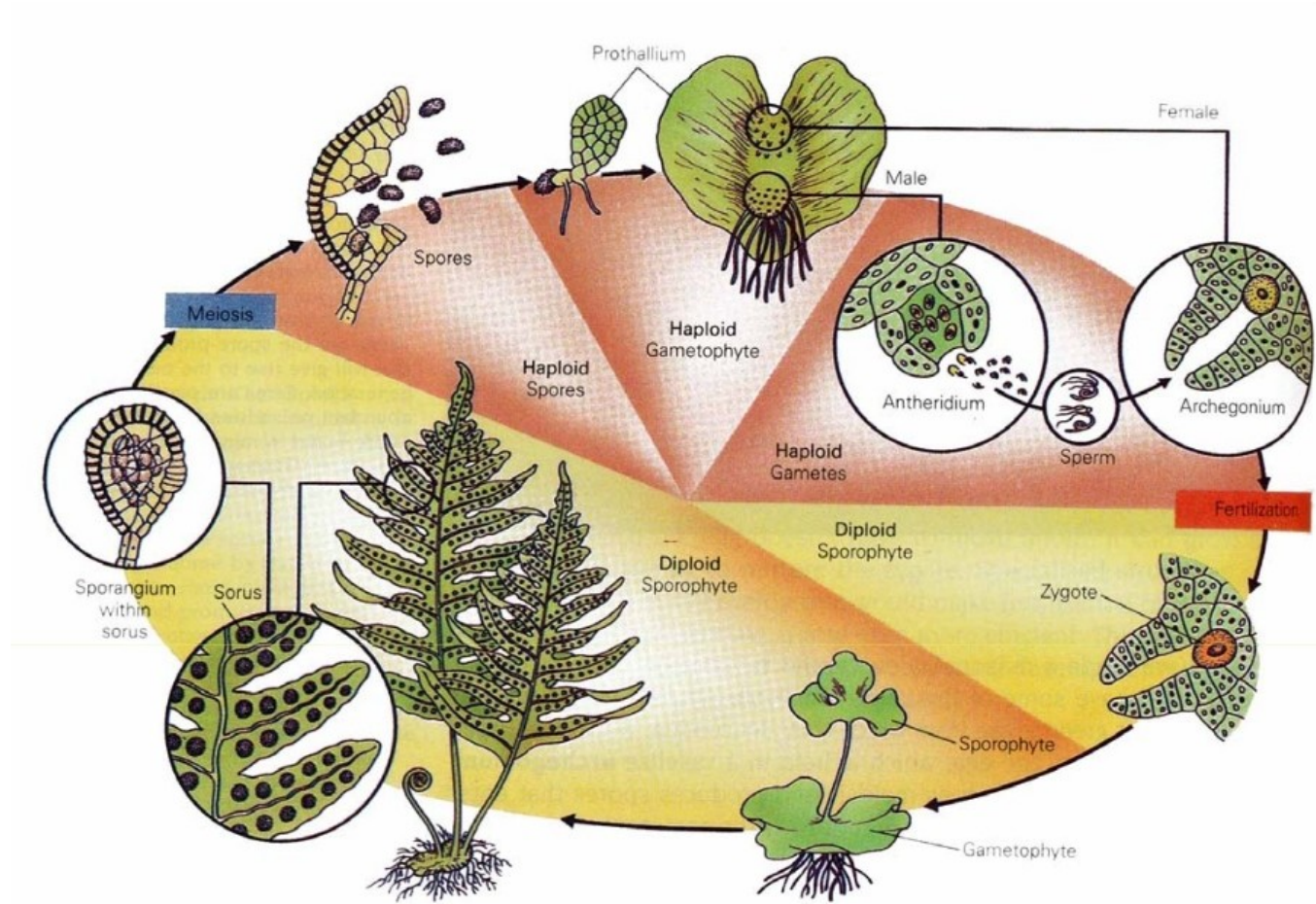
Základní charakteristika kořene

- ukotvení rostlin v půdě (+ epifyty, lithofyty)
- příjem vody a živin
- zásobní funkce
- syntetická funkce (cytokininy, ABA, gibbereliny)
- četné symbiotické interakce
- monopodiální větvení, **endogenní zakládání postranních kořenů v pericyklu**
- **nečláňkovaný** orgán
- nikdy nenese listy
- > pozitivně gravitropický

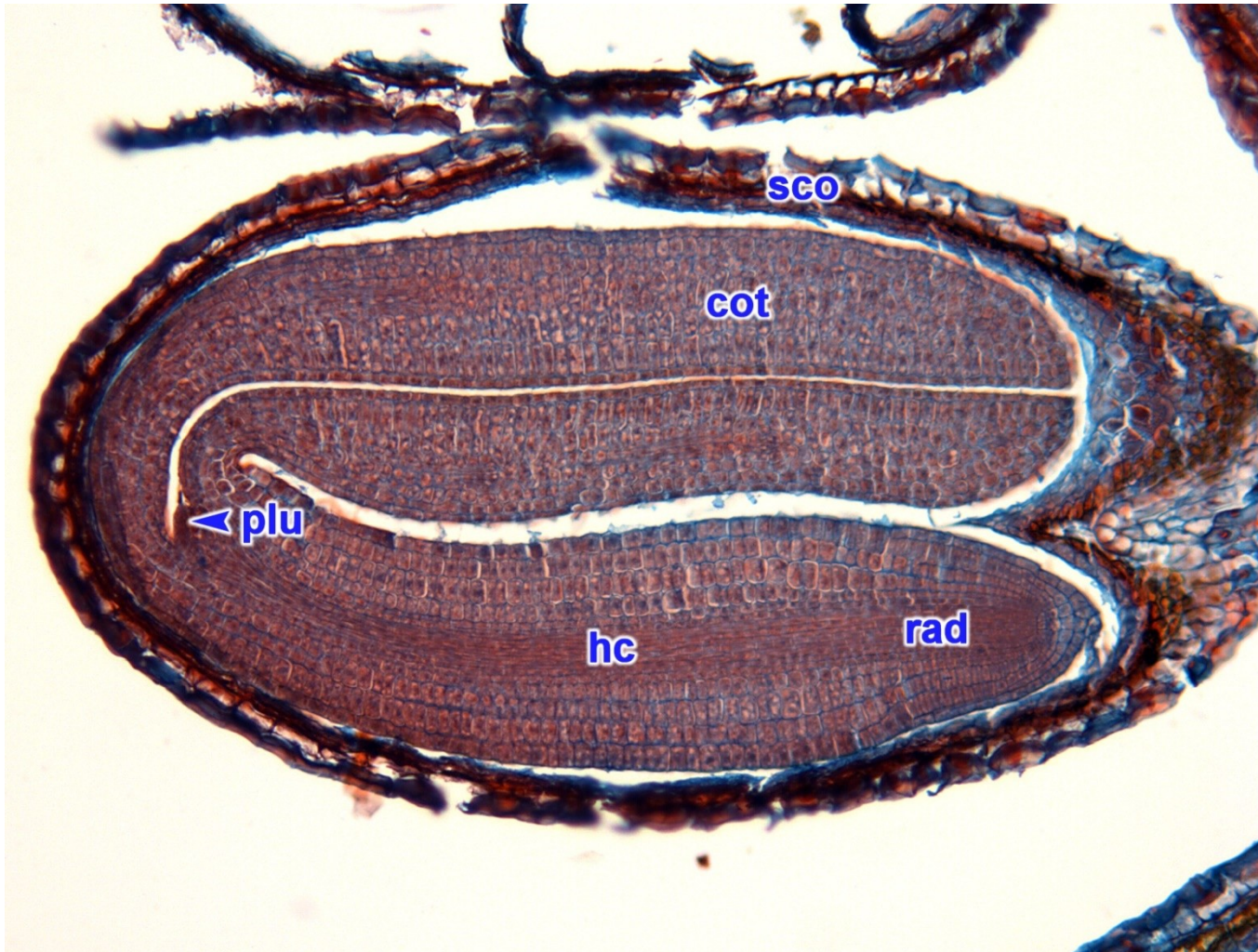
Základní typy kořenových systémů

- Pteridophyta: primární homorhizie
- Pinophyta (Gymnospermae) + Magnoliopsida + Rosopsida: alorhizie
- Liliopsida: sekundární homorhizie
- všechny vegetativně rozmnožené rostliny: sekundární homorhizie
- homorhizní kořenové systémy → **adventivní kořeny**: kořeny které vznikly v jiné části rostliny než v mladých oblastech primárního kořene a z něj vyrůstajících bočních kořenů

Primární homorhizie u Pteridophyta



Alorhizní kořenový systém



cot [děloha](#)
hc [hypokotyl](#)
plu [plumula](#)
rad [radikula](#)
sco [osemení](#)

Podélný řez zralým semenem kokošky pastuší tobolky (*Capsella bursa-pastoris* L.).

Alorhizní kořenový systém

pr [primární kořen](#)

Primární seminální kořen vyrůstající z klíčícího semene sóji luštinaté (*Glycine max* (L.) Merr.).

pr ➤



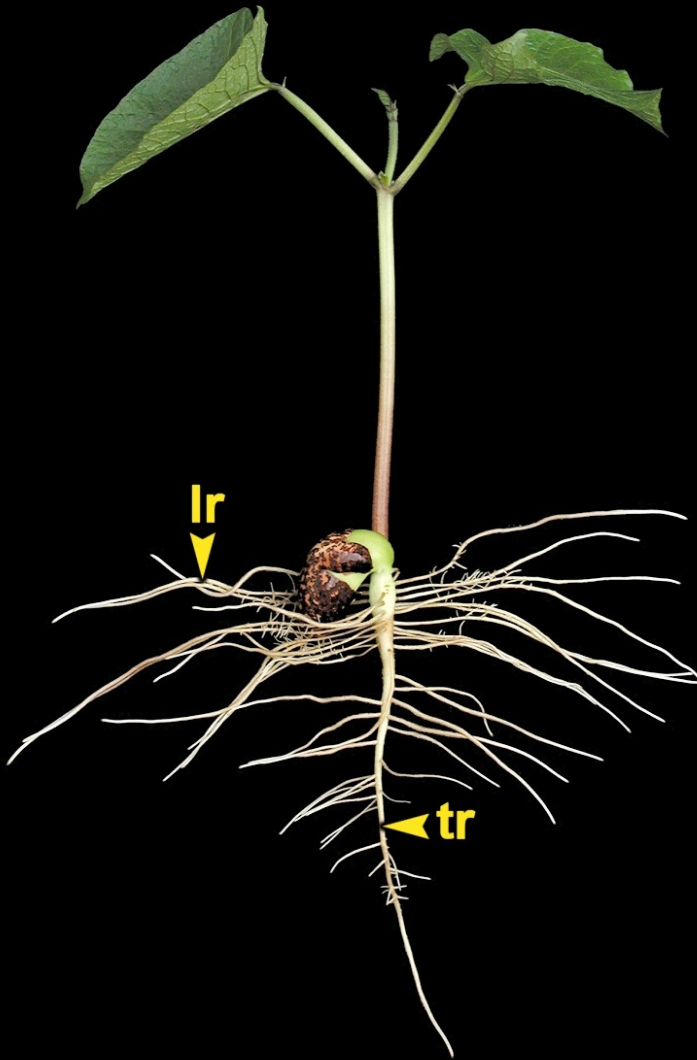
Alorhizní kořenový systém

tr [hlavní kořen](#)

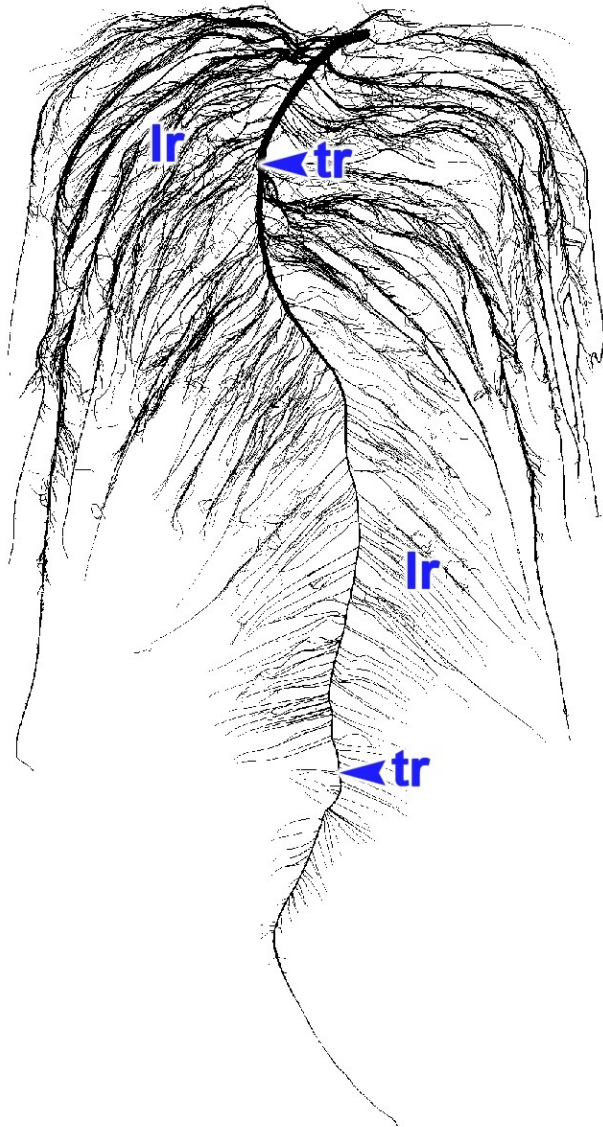
lr [boční kořen](#)

Alorhizní kořenový systém mladé rostliny fazolu obecného (*Phaseolus vulgaris* L.).

radikula → seminální (primární) kořen → hlavní (primární) kořen



Alorhizní kořenový systém



tr hlavní kořen

lr boční kořen

Alorhizní kořenový systém sesbanie (*Sesbania rostrata* Bremek. & Oberm.). S poděkováním Hiroyuki Daimon, Osaka Prefecture University, Japonsko.

Alorhizní kořenový systém je tvořen hlavním kořenem, z něj vyrůstajícími bočními (postranními, laterálními) kořeny, z nichž mohou postupně vyrůst boční kořeny nižších řádů.

Sekundárně homorhizní kořenový systém



crh [koleorhiza](#)

rad [radikula](#)

rc [kořenová čepička](#)

Radikula ve zralém embryu pšenice seté
(*Triticum aestivum* L.).

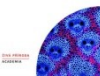
Sekundárně homorhizní kořenový systém



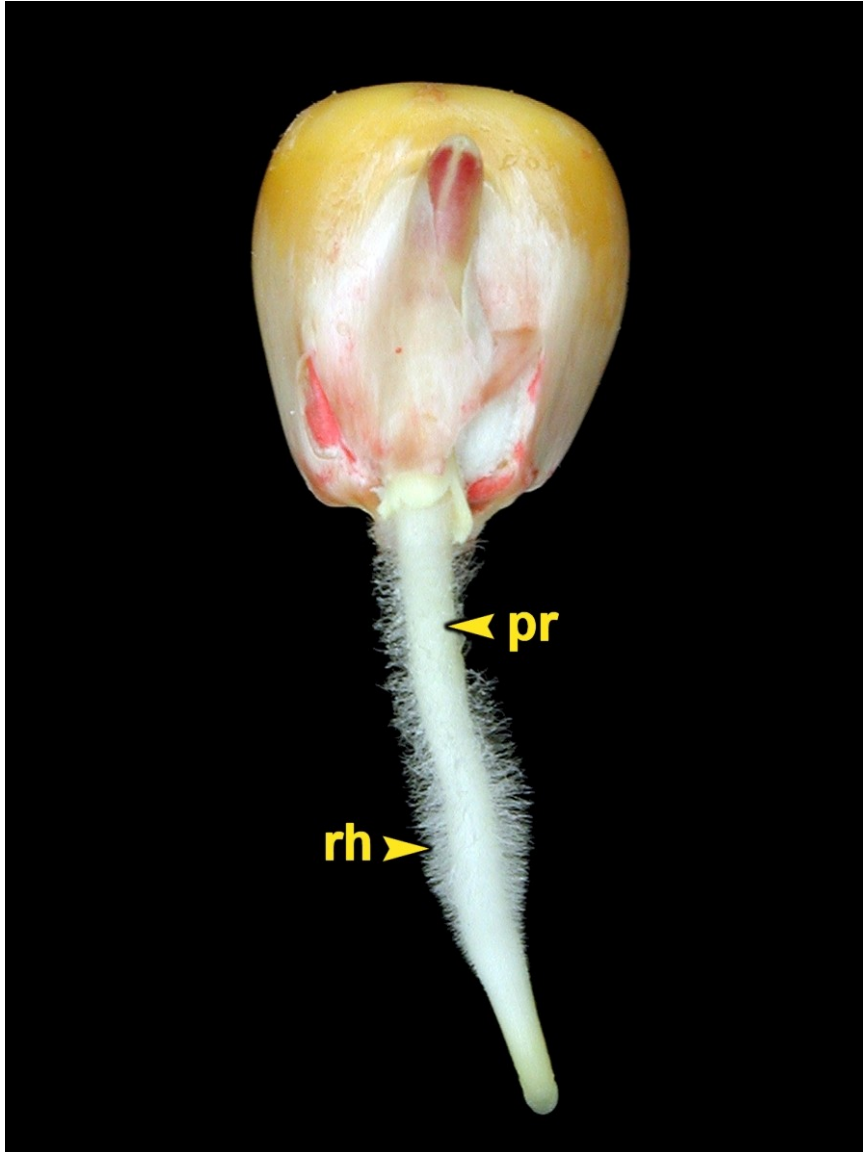
crh [koleorhiza](#)

rad [radikula](#)

Radikula v obilce kukuřice
(*Zea mays* L.).



Sekundárně homorhizní kořenový systém

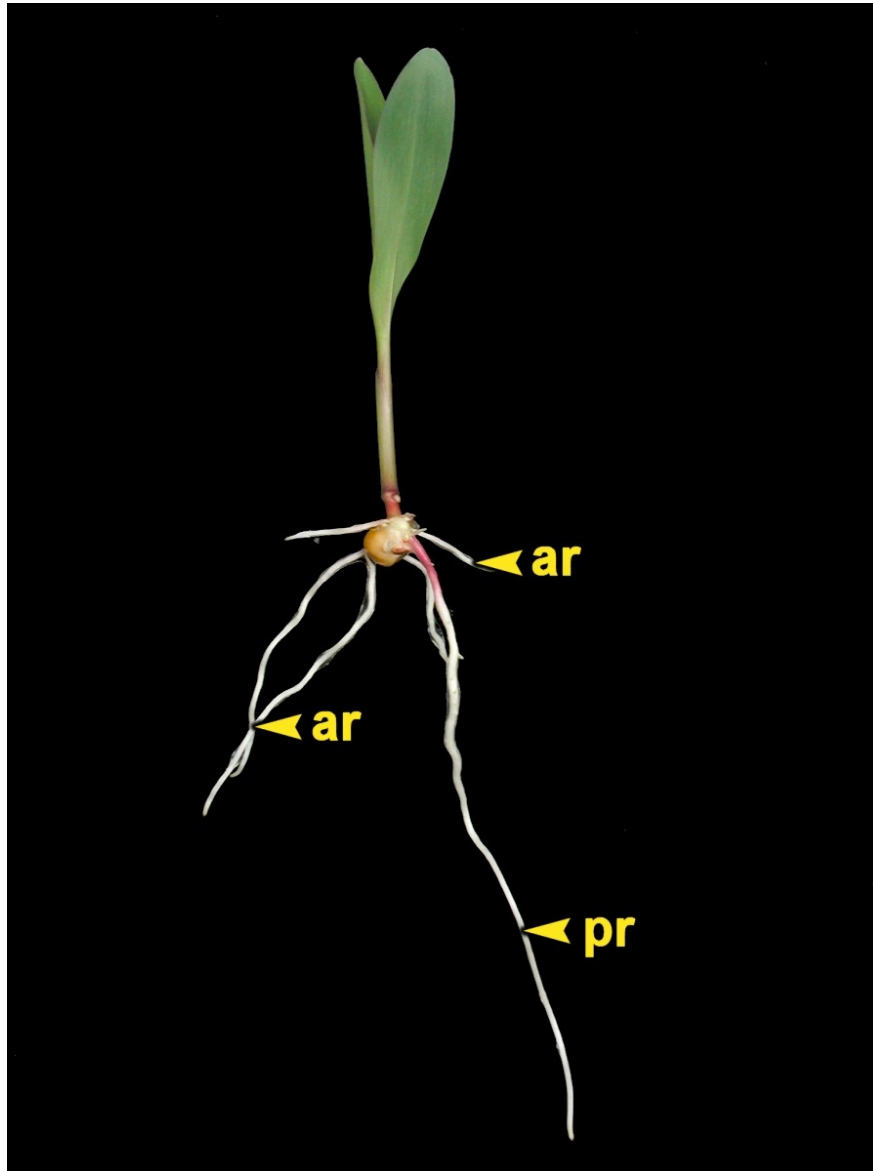


pr primární kořen
rh kořenový vlásek

Primární seminální kořen mladé rostliny kukuřice seté (*Zea mays* L.).



Sekundárně homorhizní kořenový systém



ar [adventivní kořen](#)

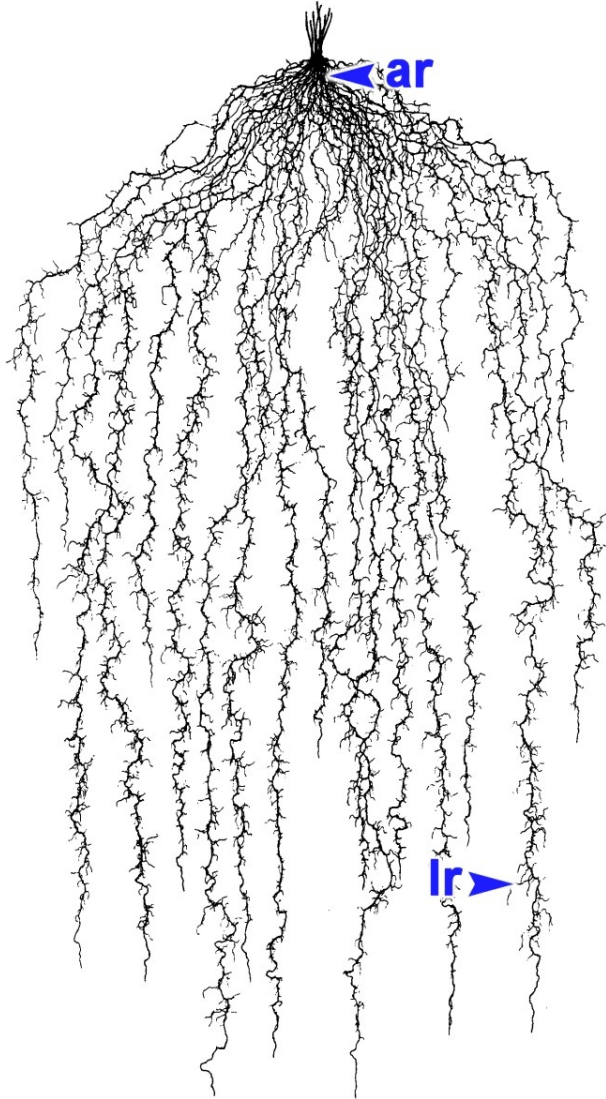
pr [primární kořen](#)

Počáteční fáze vývoje homorhizního kořenového systému, mladá rostlina kukuřice seté (*Zea mays* L.).

Primární kořen posléze během života rostliny zaniká.



Sekundárně homorhizní kořenový systém



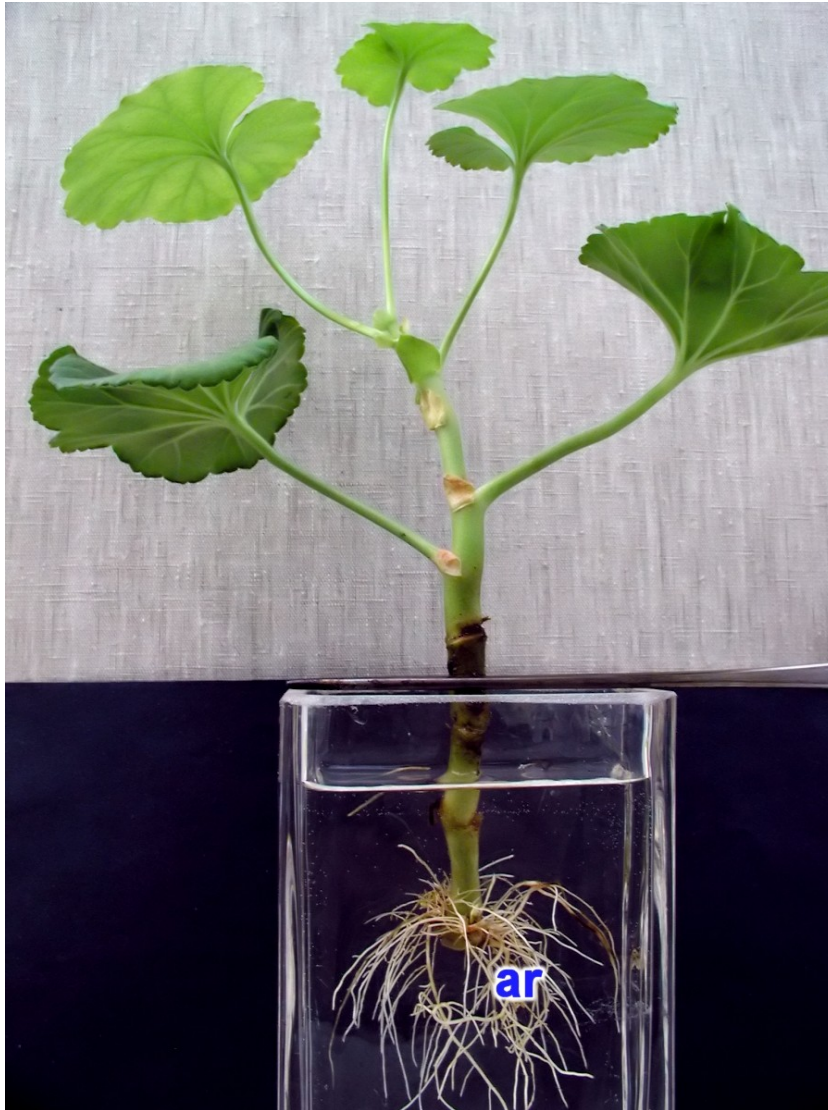
ar adventivní kořen

lr boční kořen

Plně vyvinutý homorhizní kořenový systém
dospělé rostliny kukuřice seté (*Zea mays* L.).
Převzato z Wurtzelatlas (Kutschera 1960).



Sekundárně homorhizní kořenový systém – vegetativně rozmnožené rostliny



ar adventivní kořeny

Homorhizní kořenový systém tvořící se na stonkovém řízku pelargonie páskaté (*Pelargonium zonale* (L.) L'Hér. ex Aiton).



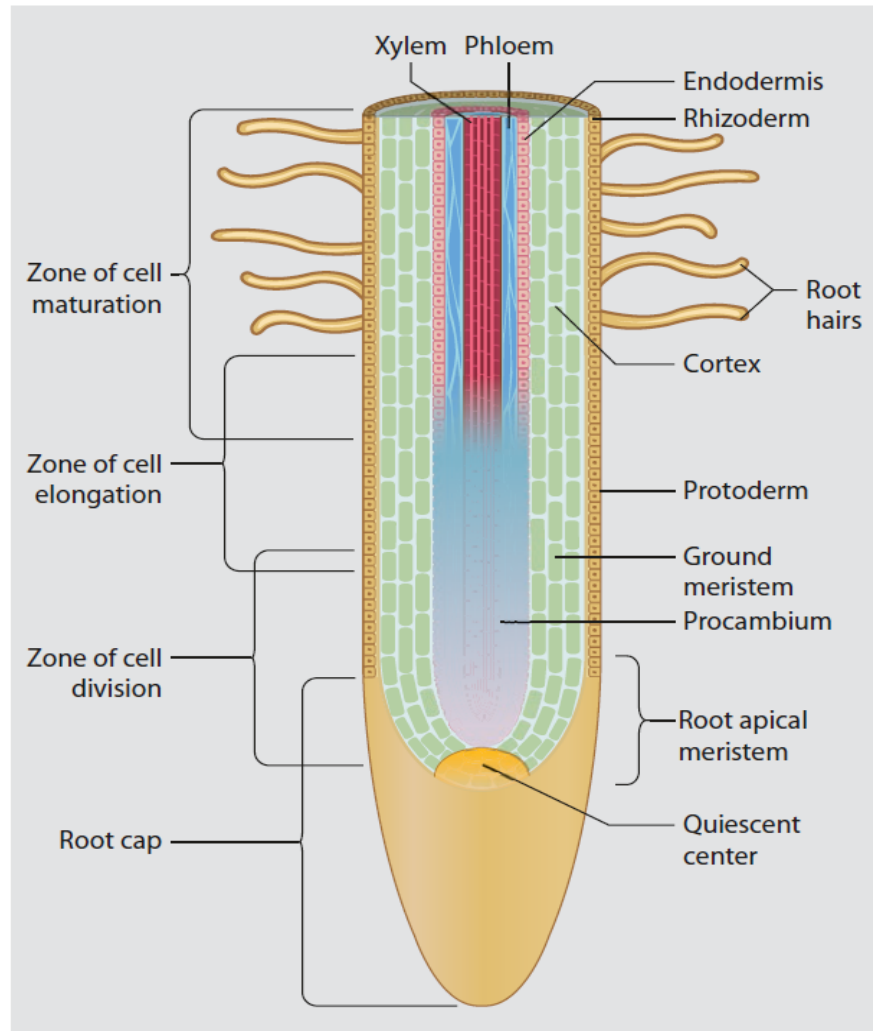
Podélná zonace kořenového apexu

zóna b. zrání

zóna b. prodlužování

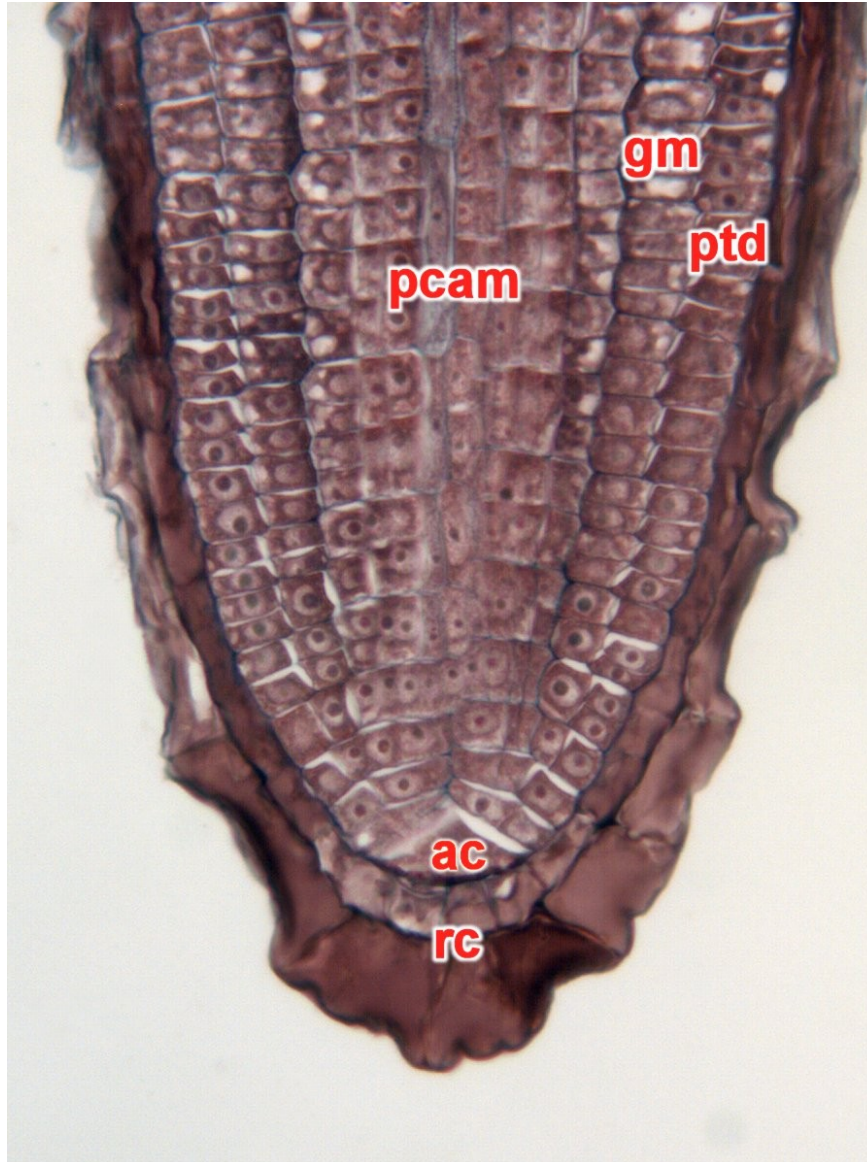
zóna b. dělení

kořenová čepička



■ Fig. 10.3 a Diagram of a root tip. The root cap and three zones of differentiation (division, elongation, and maturation) are labeled to the left. The four meristems (RAM, procambium, ground meristem, and protoderm) are labeled to the lower right. The six mature tissues (cortex, root hairs, rhizodermis, endodermis, xylem, and phloem) are labeled to the top right. (Redrawn from Crang and Vassilyev 2003)

Primární anatomická stavba kořene – apikální meristém kořene (RAM)



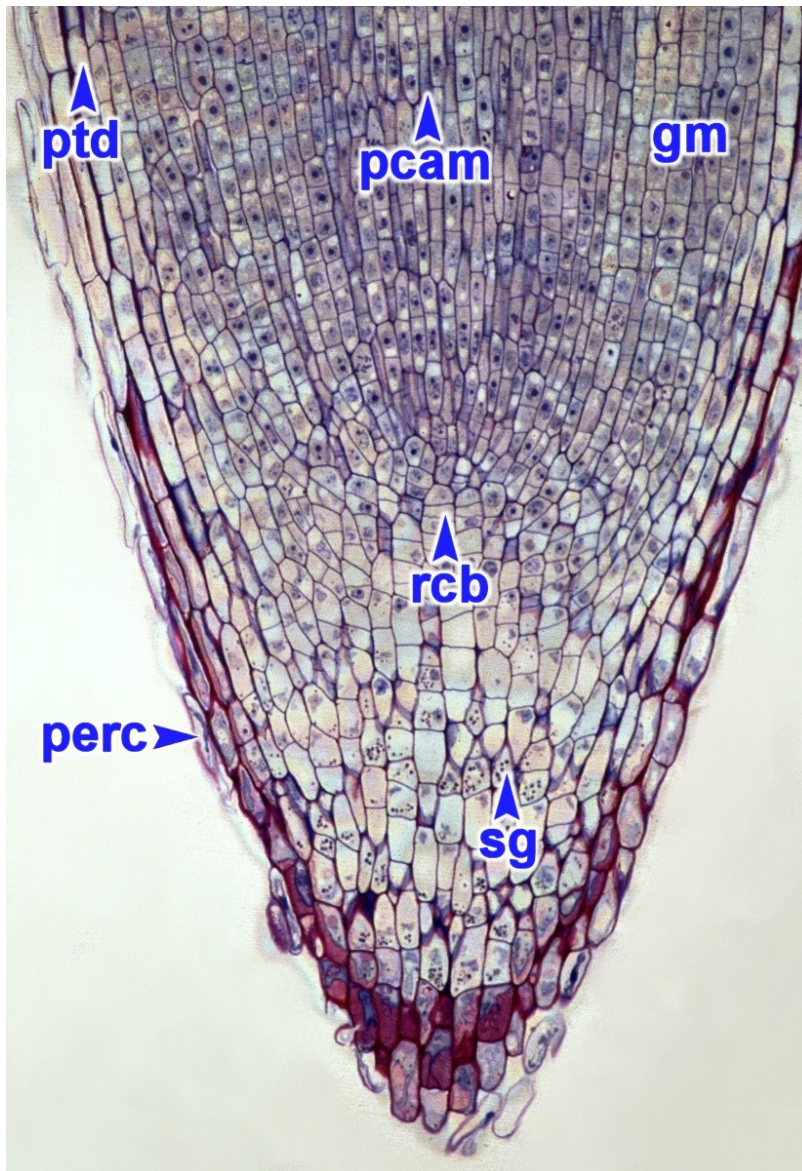
ac apikální buňka
gm základní meristém
pcam prokambium
ptd protoderm
rc kořenová čepička

Podélný řez středem vrcholu kořene
kapradiny rodu *Azolla*.

**Výtrusné cévnaté rostliny:
>> jedna iniciála (apikální
buňka), tetraedr**



Primární anatomická stavba kořene – otevřený typ RAM



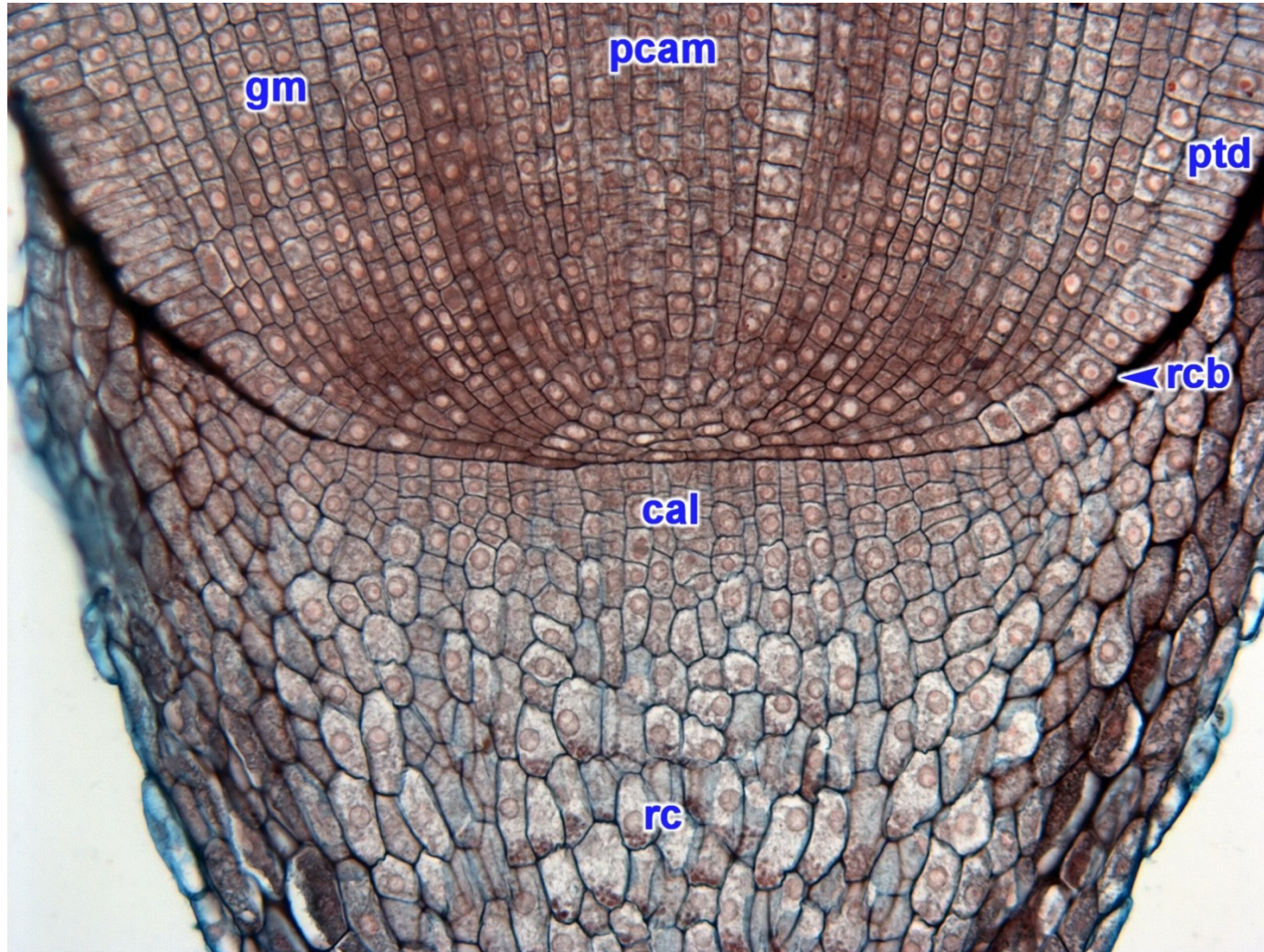
gm [základní meristém](#)
pcam [prokambium](#)
perc [hraniční buňky](#)
ptd [protoderm](#)
rcb hranice [kořenové čepičky](#)
sg [škrobová zrna](#)

Apikální meristém kořene hrachu setého (*Pisum sativum* L.) - **otevřený typ apikálního meristému.**

Není zřetelná hranice mezi vlastním kořenem a kořenovou čepičkou.

Semenné rostliny.

Primární anatomická stavba kořene – uzavřený typ RAM

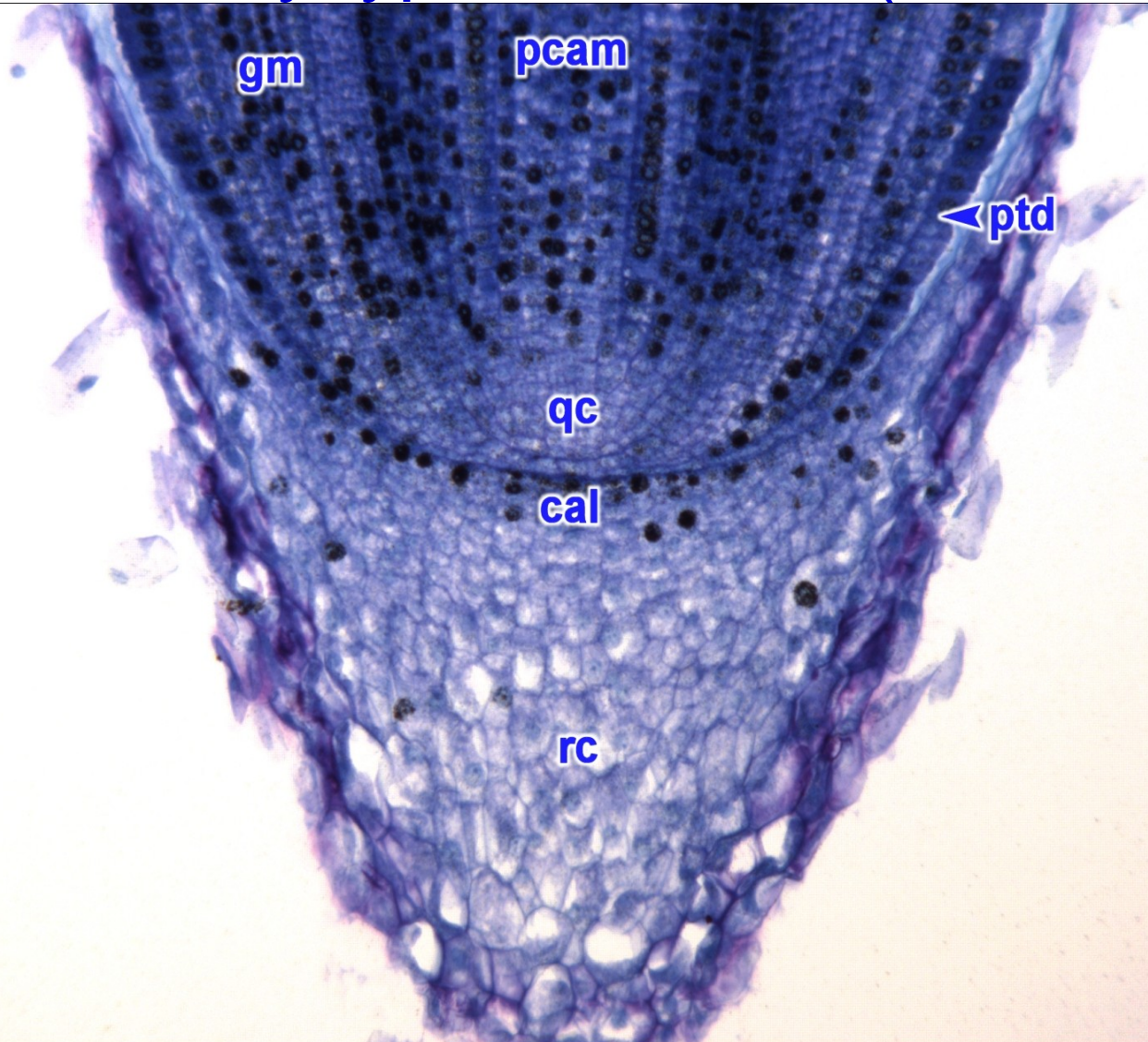


cal [kalyptrogen](#)
gm [základní meristém](#)
pcam [prokambium](#)
ptd [protoderm](#)
rc [kořenová čepička](#)
rcb hranice [kořenové čepičky](#)

Podélný řez středem
vrcholu kořene
kukuřice seté (*Zea
mays* L.) - **uzavřený
typ apikálního
meristému** = zřetelně
oddělená kořenová
čepička od vlastního
kořene.

Semenné rostliny.

Primární anatomická stavba kořene – uzavřený typ RAM + QC (klidové centrum)



cal [kalyptrogen](#)
gm [základní meristém](#)
pcam [prokambium](#)
ptd [protoderm](#)
rc [kořenová čepička](#)
qc [klidové centrum](#)

Podélný řez středem vrcholu kořene kukuřice seté (*Zea mays* L.) - uzavřený typ apikálního meristému. Aktivně mitoticky se dělící buňky jsou označeny inkorporací radioaktivně značeného prekursoru DNA (černě zbarvená jádra).

Primární anatomická stavba kořene – kořenová čepička

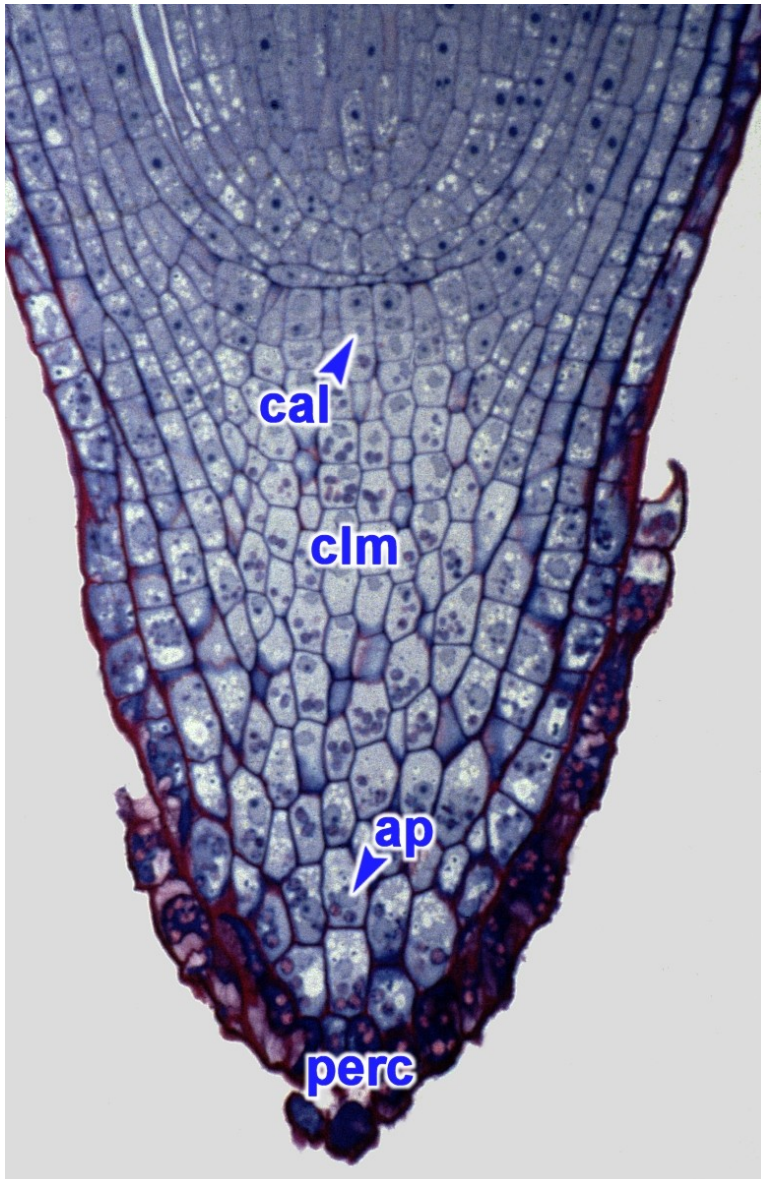


mu [mucigel](#)
perc [hraniční buňky](#)
rc [kořenová čepička](#)

Špičky seminálních kořenů kukuřice seté (*Zea mays* L.). Kořenové čepičky produkují **mucigel** a oddělují **hraniční buňky**.

Mucigel:
exocytózou, ze
sekrečních
veziklů GA
(volného TGN).

Primární anatomická stavba kořene – kořenová čepička



ap [amyloplast](#)
cal [kalyptrogen](#)
clm [sloupek](#)
perc [hraniční buňky](#)

Podélný mediánový řez kořenovou špičkou lilku rajčete (*Solanum lycopersicum* L.).

Sloupek tvořený **statocyty** obsahujícími **statolity** (velká škrobová zrna) je místem zajišťujícím pozitivně gravitropický růst kořene.

ER – Ca^{2+} - polární transport auxinu PIN proteiny – omezení prodlužování buněk kořene v místě zvýšené koncentraci auxinu

**GRAVITY SENSING AND SIGNAL TRANSDUCTION IN
VASCULAR PLANT PRIMARY ROOTS¹**

KATHERINE L. BALDWIN, ALLISON K. STROHM, AND PATRICK H. MASSON²

Laboratory of Genetics and Program of Cellular and Molecular Biology, University of Wisconsin-Madison, 425G Henry Mall,
Madison, Wisconsin 53706 USA

During gravitropism, the potential energy of gravity is converted into a biochemical signal. How this transfer occurs remains one of the most exciting mysteries in plant cell biology. New experiments are filling in pieces of the puzzle. In this review, we introduce gravitropism and give an overview of what we know about gravity sensing in roots of vascular plants, with special highlight on recent papers. When plant roots are reoriented sideways, amyloplast sedimentation in the columella cells is a key initial step in gravity sensing. This process somehow leads to cytoplasmic alkalization of these cells followed by relocalization of auxin efflux carriers (PINs). This changes auxin flow throughout the root, generating a lateral gradient of auxin across the cap that upon transmission to the elongation zone leads to differential cell elongation and gravibending. We will present the evidence for and against the following players having a role in transferring the signal from the amyloplast sedimentation into the auxin signaling cascade: mechanosensitive ion channels, actin, calcium ions, inositol trisphosphate, receptors/ligands, ARG1/ARL2, spermine, and the TOC complex. We also outline auxin transport and signaling during gravitropism.

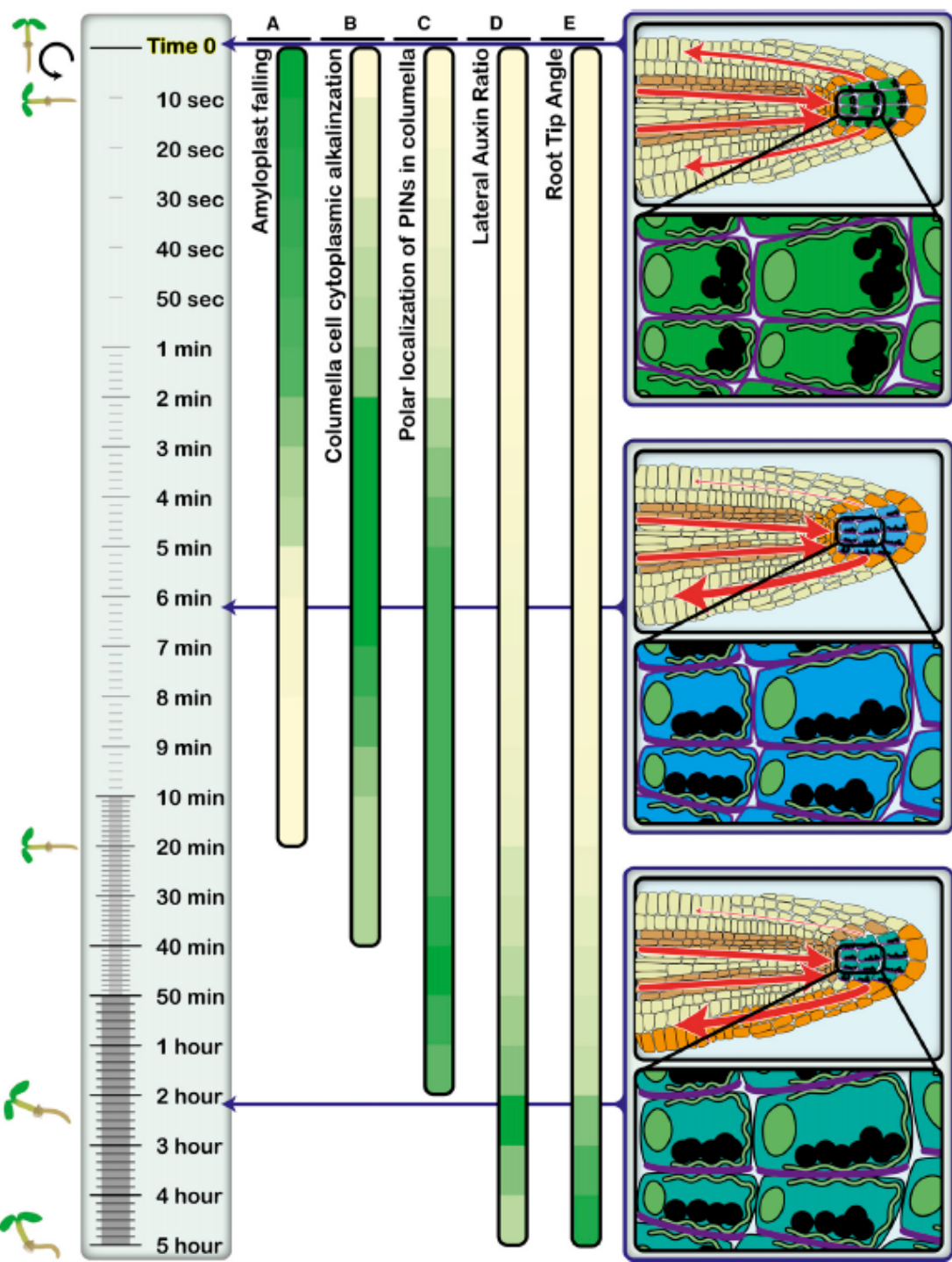
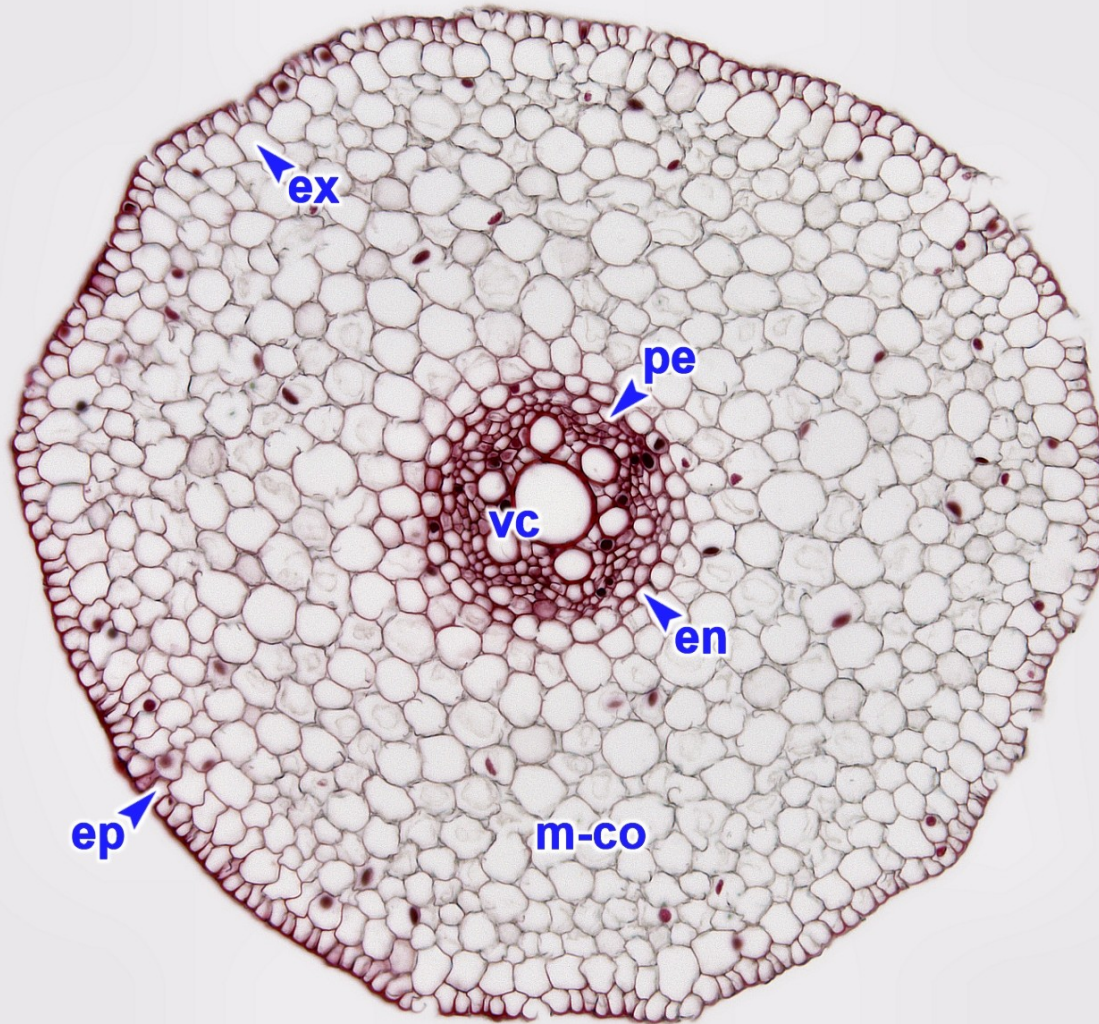


Fig. 2. Flow of events following gravistimulation of an *Arabidopsis* root. The top of the figure shows time zero when the seedling is rotated 90°. Note that the time scale is nonlinear. The heat-map ribbons depict the degree of change of the listed parameters. The sources that inspired these generalizations are cited: (A) Distance of the top amyloplast from the new bottom of the cell in *Wassilewskija Arabidopsis* (Stanga et al., 2009; fig. 6C). (B) Columella cell pH as visualized by injection of a pH sensitive dye (Fasano et al., 2001; fig. 5E). This cytoplasmic pH change is accompanied by an extracellular apoplastic pH change not shown here (Fasano et al., 2001; Monshausen et al., 2011). (C) PIN3 or PIN7 was scored on its polar vs. nonpolar localization from various sources. The early time points were inspired by fig. 5 of Friml et al., 2002b), who used antibodies to localize PIN3. The later points were inspired by fig. 1 of Kleine-Vehn et al. (2010), who used GFP fusions to PIN3 and PIN7, and also by fig. 3 of Harrison and Masson, 2008b), who used a PIN3 antibody. (D) Auxin concentration was indirectly measured using the DII-VENUS reporter from Band et al. (2012). The heat ribbon illustrates the fluorescence ratio between the upper and lower sides of a gravistimulated root as shown in fig. 3B of Band et al. (2012). (E) Root tip angle was inspired by Lewis et al. (2007; fig. 7A). Note that the rate of root curvature is extremely variable depending on experimental conditions. Root insets: Flow of auxin according to the reverse fountain model (Swarup and Bennett, 2003) is shown in vermilion arrows. Thicker arrows indicate more flow. The relative auxin concentration in cells is shown in orange. Columella cells of the root tip are shown in green. Amyloplasts are shown as black circles. The nuclei and ER are shown in lighter green. The localization of PIN3 and PIN7 are diagrammed as a purple outline on the plasma membrane of the columella cells. The alkalization of the cytoplasm of the columella cells is diagrammed as blue.

Primární anatomická stavba kořene – diferencovaná trvalá pletiva

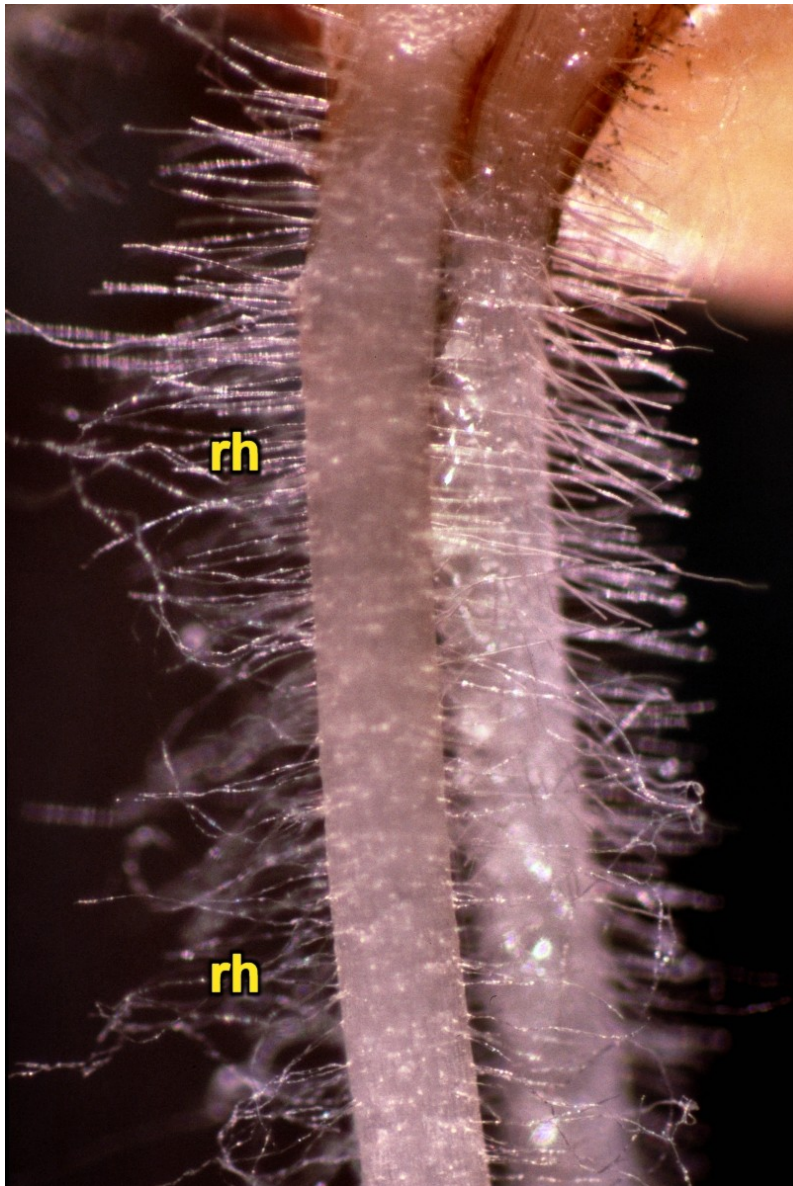


en [endodermis](#)
ep [pokožka](#)
ex [exodermis](#)
m-co [střední kortex](#)
pe [pericykl](#)
vc [střední válec](#)

Příčný řez adventivním
kořenem česneku cibule
(*Allium cepa* L.).

základní zonace:
– **krycí pletiva**
(z protodermu)
– **primární kůra**
(ze základního
meristému)
– **střední válec**
(z prokambia)

Primární anatomická stavba kořene – rhizodermis



rh kořenové vlásky

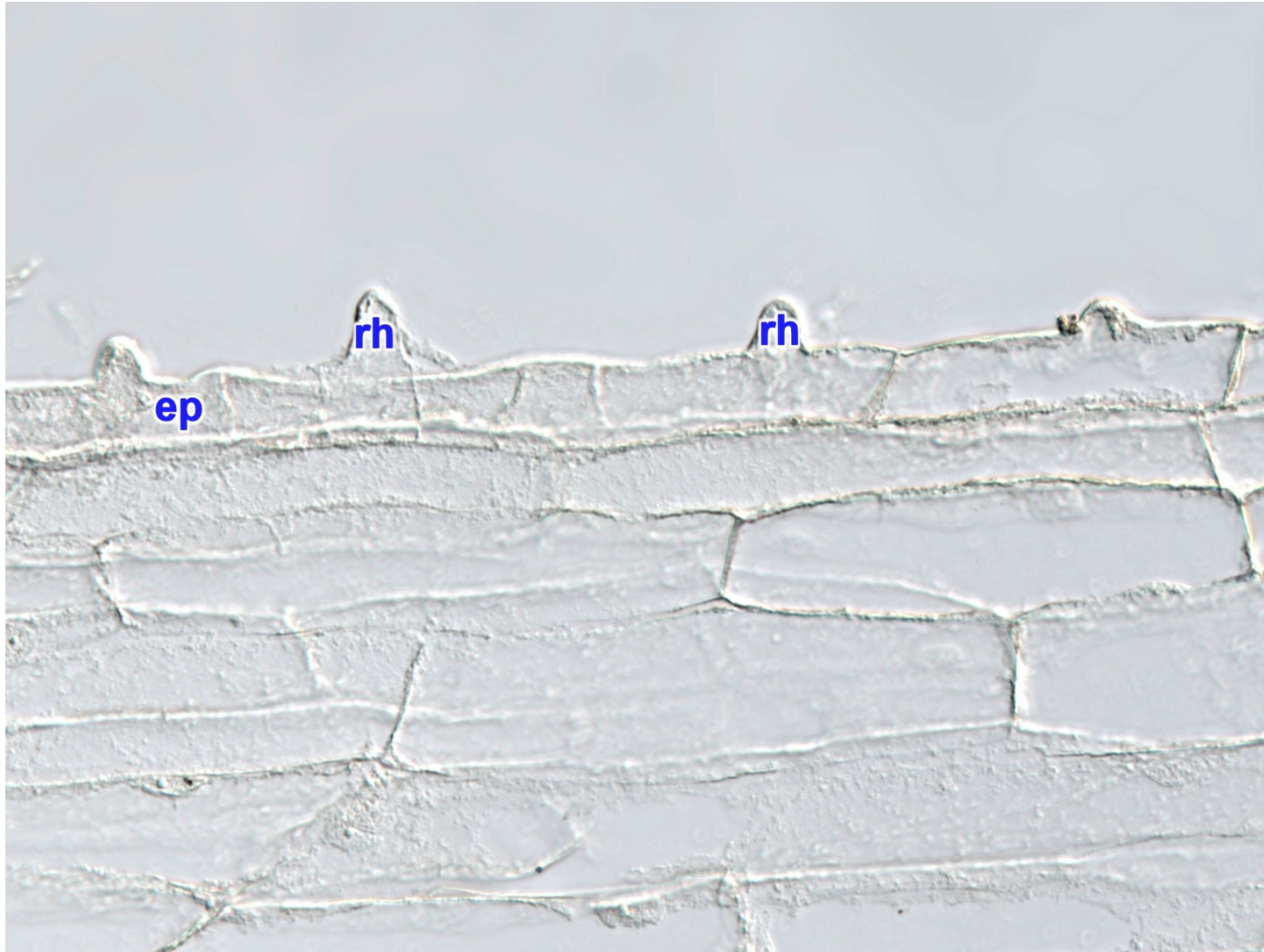
Kořenové vlásky na seminálním primárním kořeni pšenice seté (*Triticum aestivum* L.).

Kořenové vlásky – absorpční trichomy.

Rhizodermis, syn. kořenová epidermis.



Primární anatomická stavba kořene – rhizodermis



ep [pokožka](#)
rh [kořenový vlásek](#)
- [rhizin](#)

Formování
kořenových vlásků
poblíž vrcholu
kořene jabloně
domácí (*Malus
domestica* Borkh.)
z **trichoblastů**.

Atrichoblasty –
vznikají z něj buňky
rhizodermis
netvořící kořenový
vlásek.

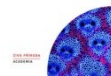


Primární anatomická stavba kořene – rhizodermis

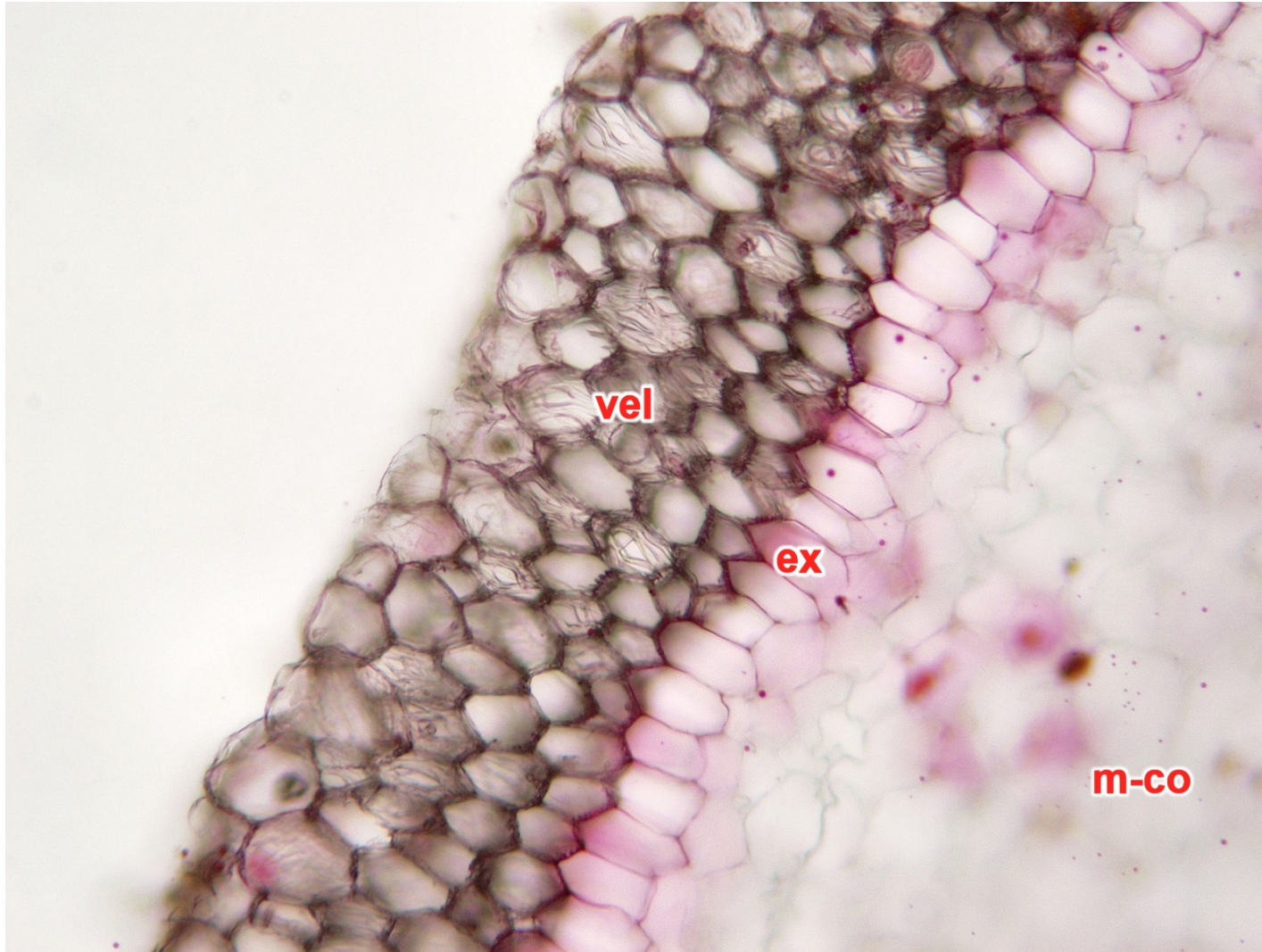


rh kořenové vlásky

Kořenové vlásky na
kořeni *Fouquieria
splendens* Engelm.



Primární anatomická stavba kořene – velamen

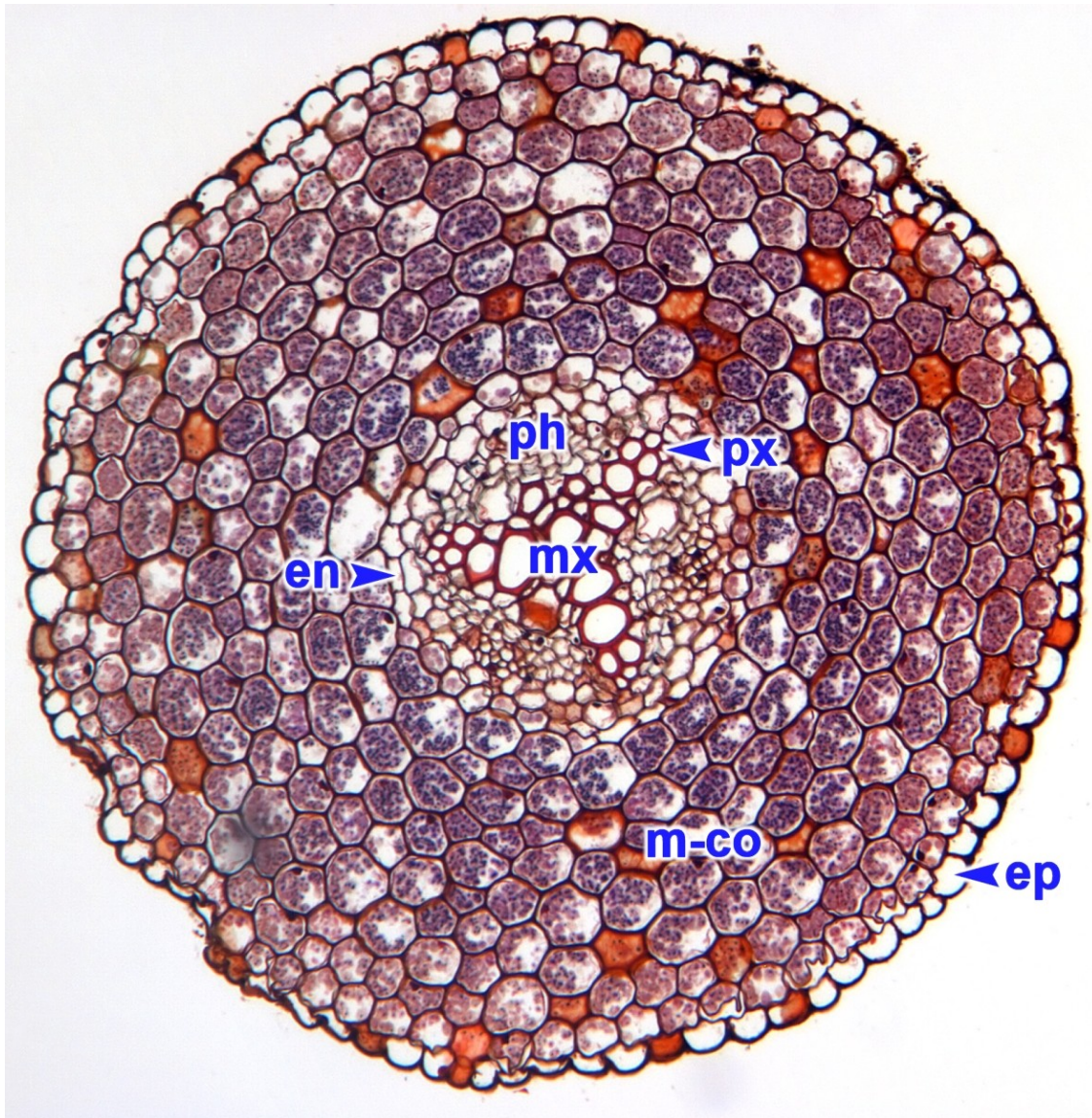


ex [exodermis](#)
m-co [střední kortex](#)
vel [velamen](#)

Vícevrstvá pokožka
(velamen) na povrchu
kořene řemenatky
(*Clivia nobilis* Lindl.).



Primární anatomická stavba kořene – primární kůra (kortex)



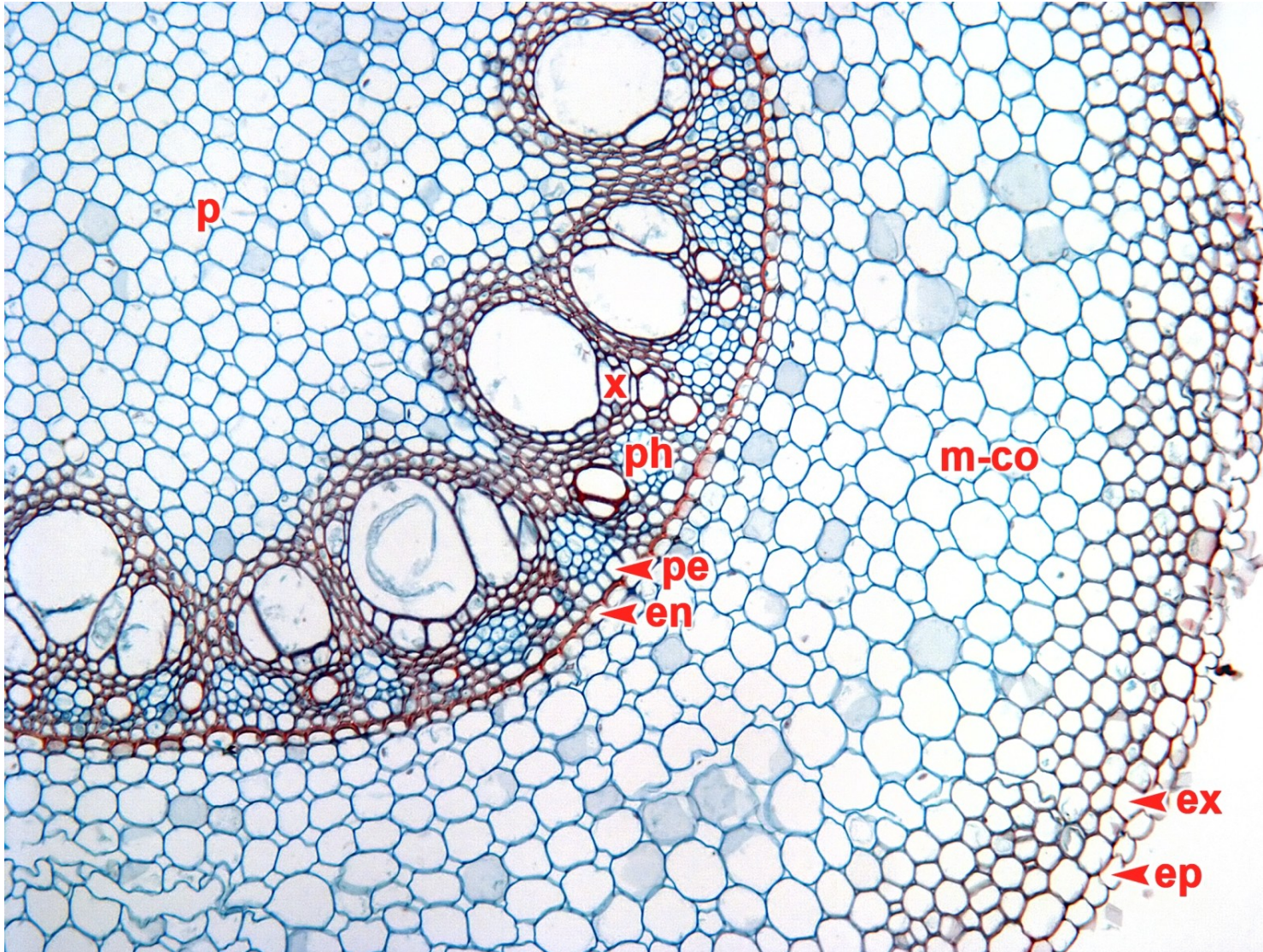
- en [endodermis](#)
- ep [pokožka](#)
- m-co [střední kortex](#)
- mx [metaxylém](#)
- ph [floém](#)
- px [protoxylém](#)

Příčný řez kořenem samorostlíku
bílého (*Actaea pachypoda* Elliot).

Zonace primární kůry (kortexu)

- orientační stratifikace: **vnější, střední a vnitřní kortex**
- **endodermis**
 - hraniční vrstva primární kůry, sousedí se středním válcem, vždy jednovrstevná
 - diferencuje se záhy za apexem kořene – významná fce v příjmu látek – endodermální skok
 - I. (Casparyho proužky), II. (suberinové lamely) a III. vývojová fáze (sekundární tloušťnutí BS)
 - + ochrana proti patogenům
- **střední kortex**
 - typicky parenchymatický či aerenchymatický
- **hypodermis**
 - na periferii kortexu, vícevrstevné mechanické pletivo (sklerifikující!)
 - složená hypodermis: hypodermis + exodermis
- **exodermis**
 - vrstva buněk analogická k endodermis, ovšem na periferii primární kůry

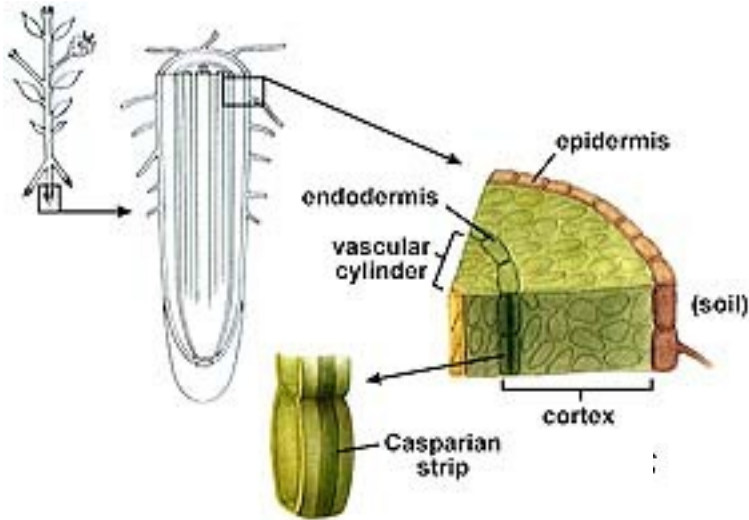
Primární anatomická stavba kořene – primární kůra (kortex)



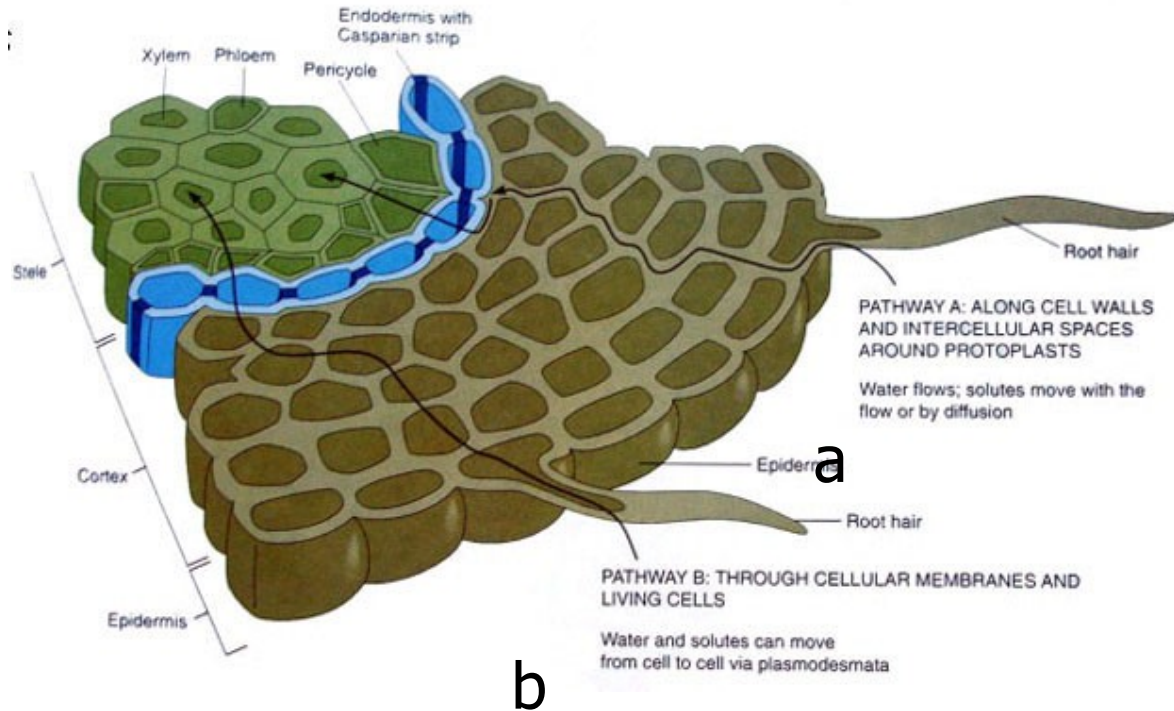
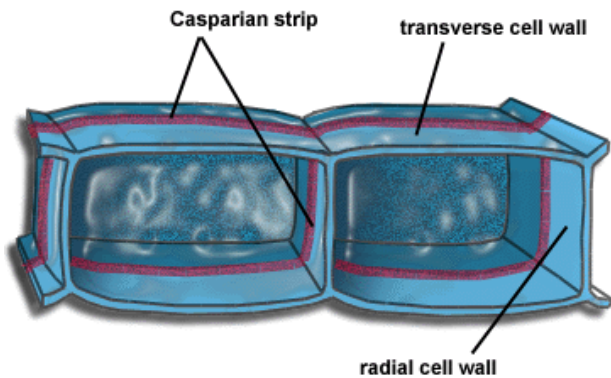
en [endodermis](#)
ep [pokožka](#)
ex [exodermis](#)
m-co [střední
kortex](#)
p [dřeň](#)
pe [pericykl](#)
ph [floém](#)
x [xylém](#)

Příčný řez
adventivním
kořenem
kukuřice seté
(*Zea mays* L.).

Primární anatomická stavba kořene – endodermis



- a) apoplastický transport
- b) symplazmický transport

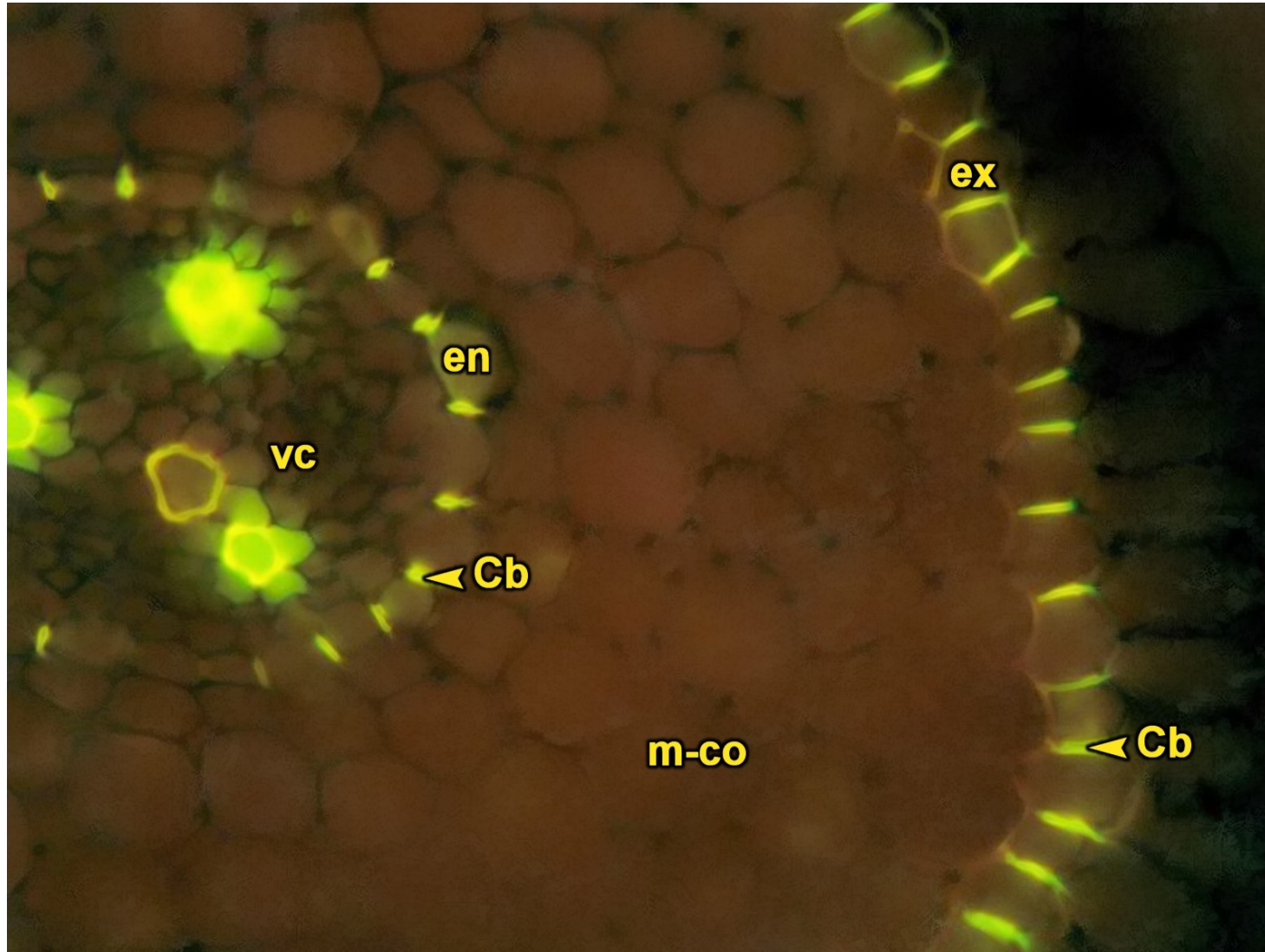


Primární anatomická stavba kořene – endodermis v I. etapě vývinu

- Johann Xaver Robert **Caspary** 1865
 - Casparyho proužky/Casparian strips (bands)
 - CP = I. etapa vývinu endodermis
 - **depozice lignosuberinu do primární neztloustlé BS**
 - approx. 1/3 délky antiklinálních BS
 - plazmalema (PM) lokálně bez plazmodezmat
 - odlišné domény PM na centrální (ke stéle přilehlé) a periferní straně
 - CP oddělují apoplastický prostor ve stéle od apoplastického prostoru kortexu (kořenový vztlak, plnění floému, odstraňování kavitace xylému)
 - ochrana proti patogenům a herbivorům
 - pásková plazmolýza
 - „ukotvení“ PM k BS v místě CP - “Casparian strip membrane domain - CSD” – “zone of protein exclusion ”

Primární anatomická stavba kořene – kortex

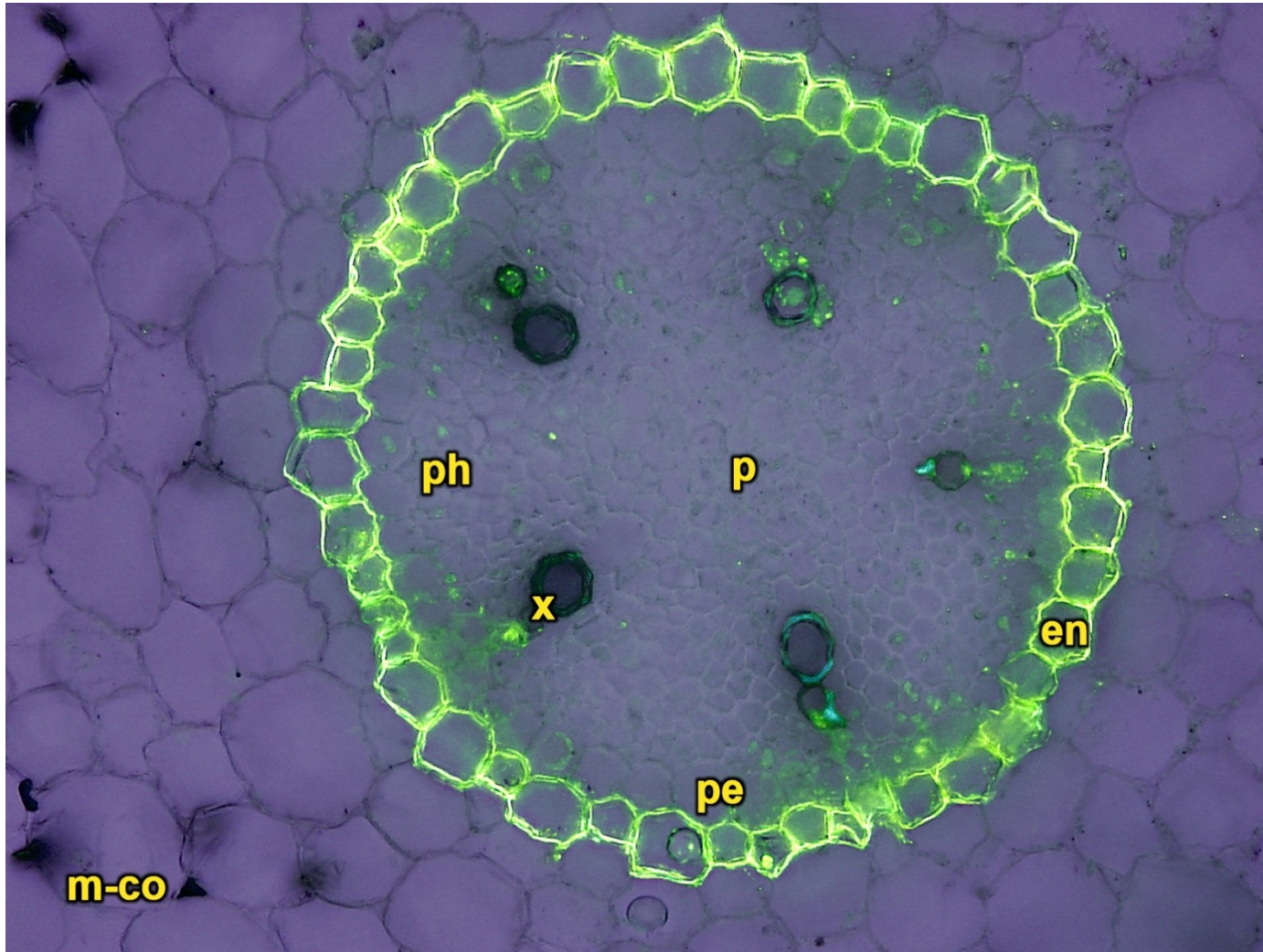
– endodermis, I. etapa, Casparyho proužky



Cb [Casparyho proužek](#)
en [endodermis](#)
ex [exodermis](#)
m-co [střední kortex](#)
vc [střední válec](#)

Casparyho proužky
- I. etapa vývoje jak **endodermis**, tak exodermis v kořeni hořce tolitovitého (*Gentiana asclepiadea* L.).
Fluorescenční mikroskopie.

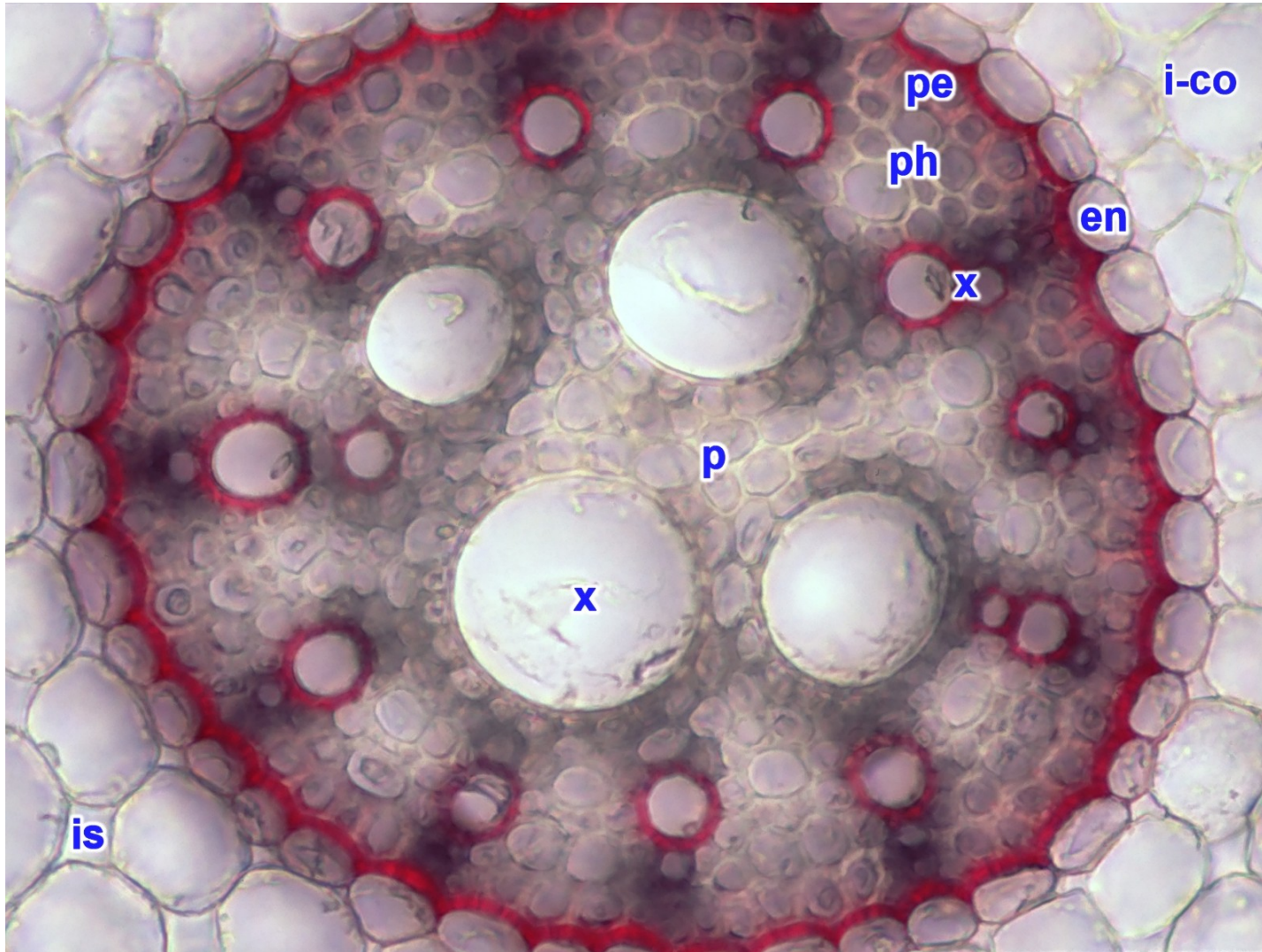
Primární anatomická stavba kořene – kortex – endodermis, II. etapa, suberinové lamely



en [endodermis](#)
m-co [střední kortex](#)
p [dřeň](#)
pe [pericykl](#)
ph [floém](#)
x [xylém](#)

**Suberinové lamely -
II. etapa vývoje
endodermis v kořeni
okurky seté (*Cucumis
sativus* L.).** Fluorescenční
mikroskopie kombinovaná
s technikou světlého pole.

Primární anatomická stavba kořene – kortex – endodermis, III. etapa, U-forma

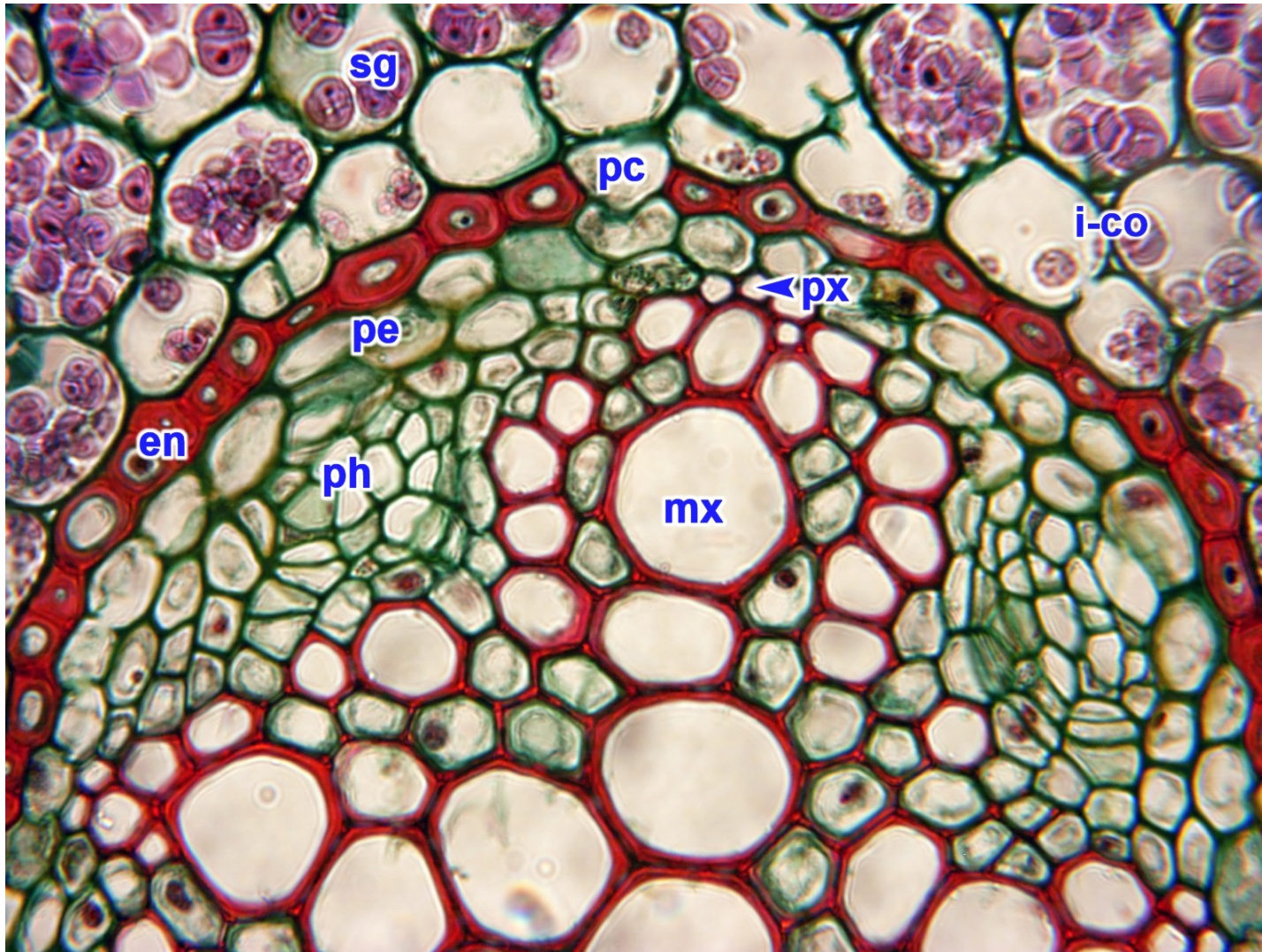


en endodermis
is mezbuněčný prostor
i-co vnitřní kortex
p dřeň
pe pericykl
ph floém
x xylém

Sekundární tloušťnutí buněčných stěn - **III. etapa vývoje (U-forma) endodermis** v seminálním kořeni čiroku obecného (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

Primární anatomická stavba kořene – kortex

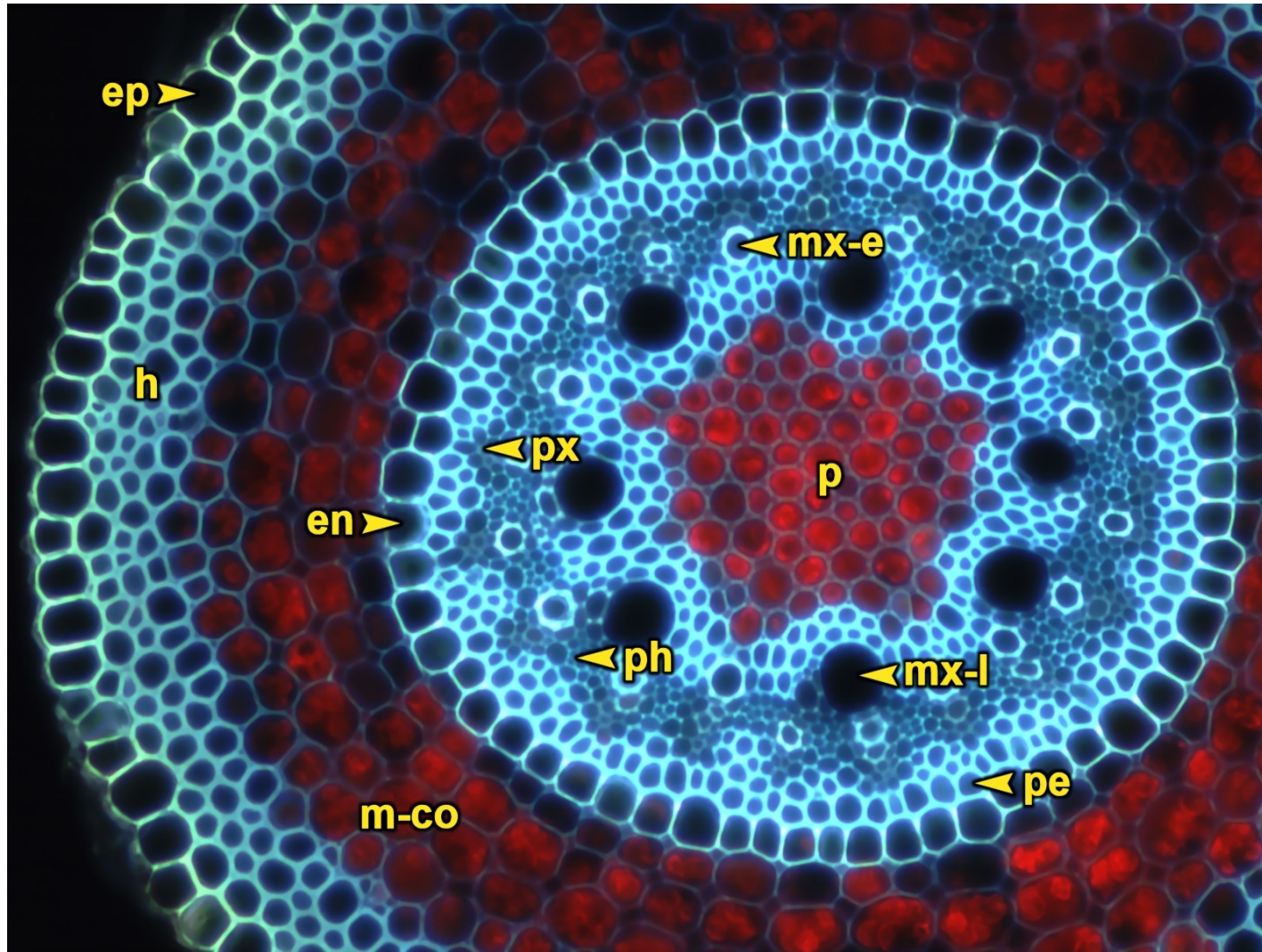
– endodermis, III. etapa, O-forma



- en [endodermis](#)
- i-co vnitřní [kortex](#)
- mx [metaxylém](#)
- pe [pericykl](#)
- pc [propustná buňka](#)
- ph [floém](#)
- px [protoxylém](#)
- sg [škrobová zrna](#)

Sekundární tloušťnutí
buněčných stěn -
III. etapa (O-forma)
vývoje endodermis
v kořeni pryskyřníku
prudkého (*Ranunculus*
acris L.).

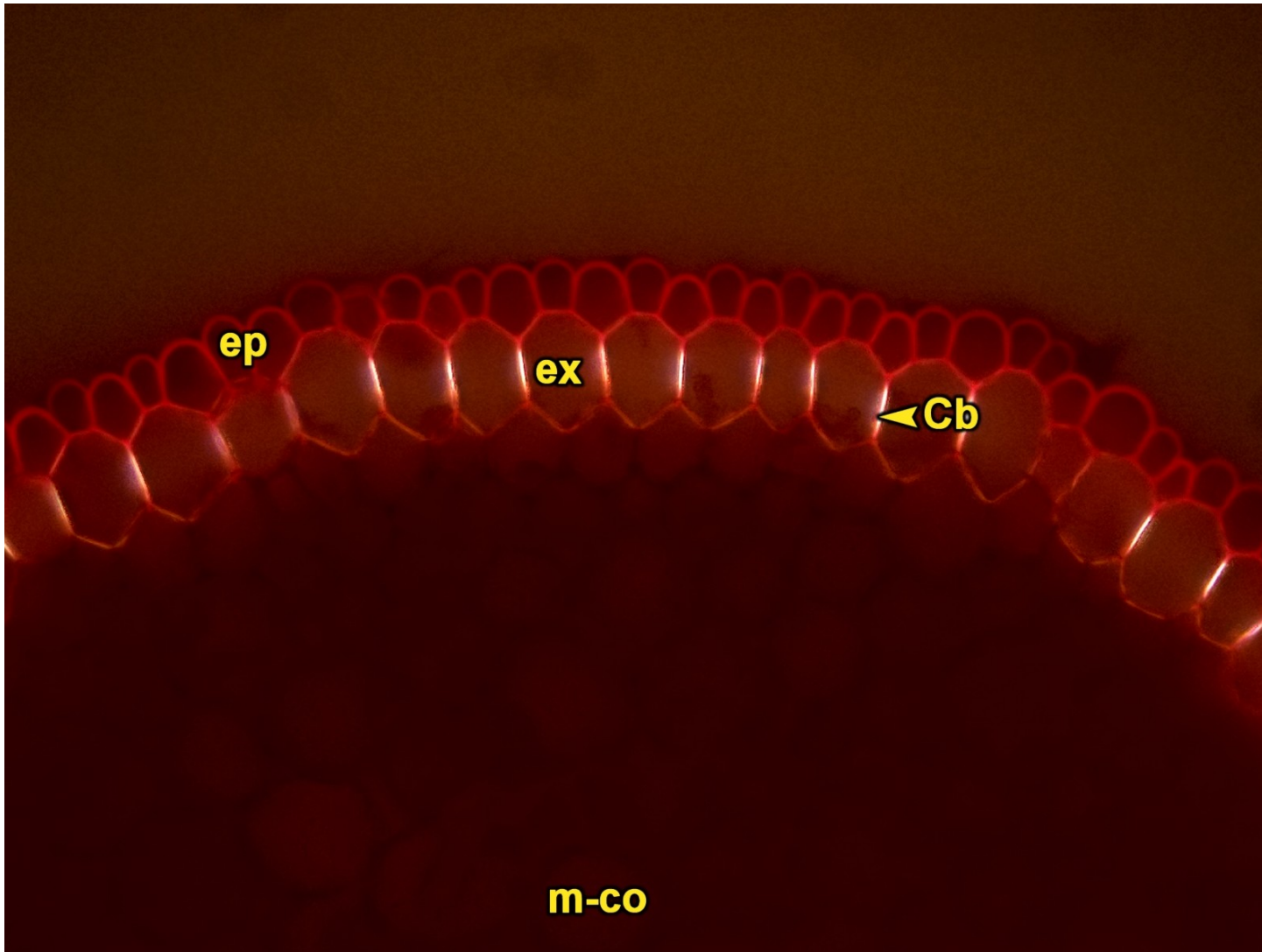
Primární anatomická stavba kořene – kortex – hypodermis



- en [endodermis](#)
- ep [pokožka](#)
- h [hypodermis](#)
- m-co [střední kortex](#)
- mx-e [časný metaxylém](#)
- mx-l [pozdní metaxylém](#)
- p [dřeň](#)
- ph [floém](#)
- pe [pericykl](#)
- px [protoxylém](#)

Příčný řez
adventivním kořenem
trojkutu prstnatého
(*Cynodon
dactylon* (L.) Pers.).
Autofluorescence.

Primární anatomická stavba kořene – exodermis (I. fáze)

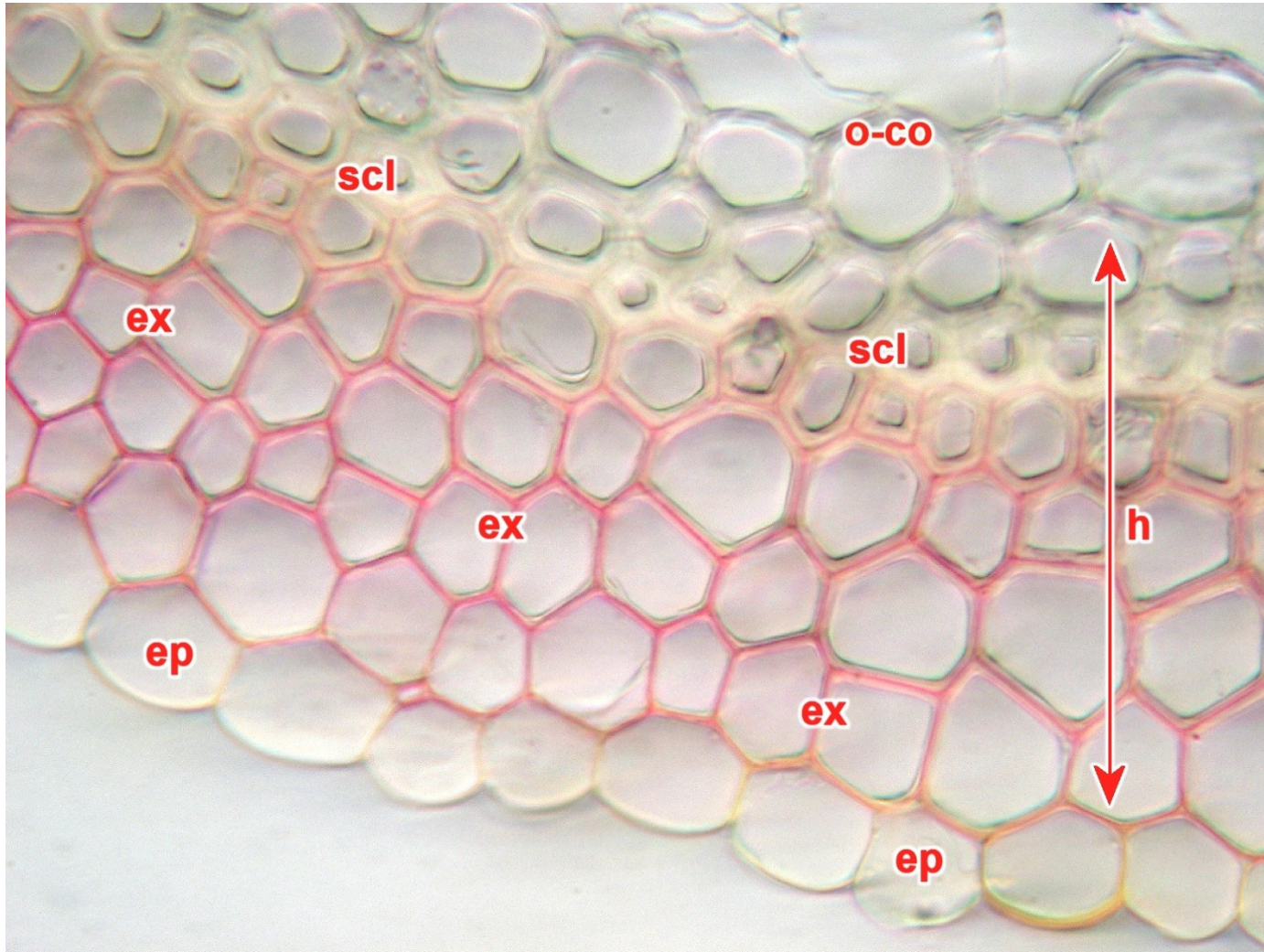


Cb [Casparyho proužek](#)
ep [pokožka](#)
ex [exodermis](#)
m-co [střední kortex](#)

Exodermis v periferní části kořene česneku cibule (*Allium cepa* L).
Fluorescenční mikroskopie.



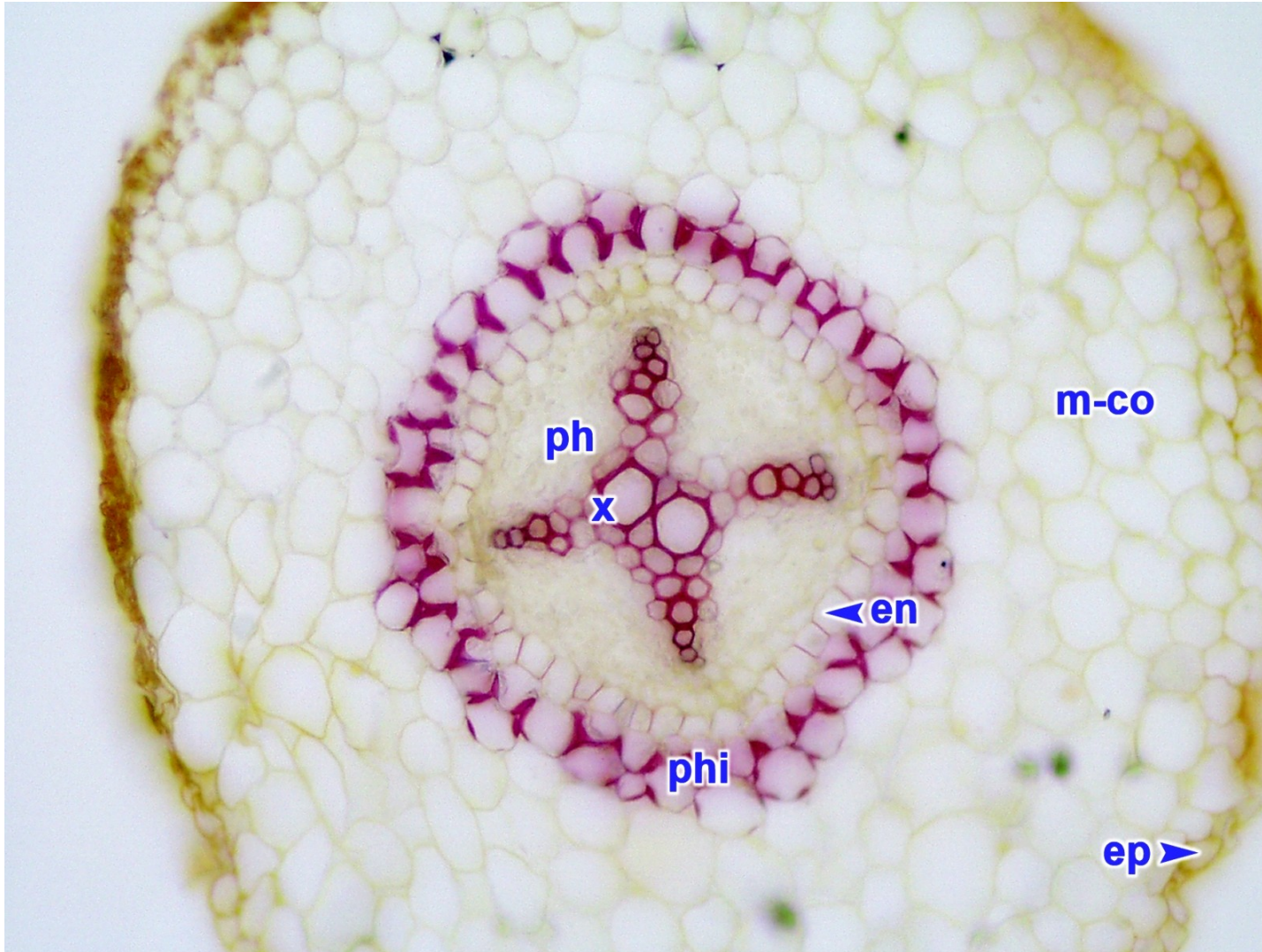
Primární anatomická stavba kořene – složená hypodermis



ep [pokožka](#)
ex [exodermis](#)
h složená [hypodermis](#)
o-co vnější [kortex](#)
scl [sklerenchym](#)

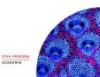
Složená hypodermis v
periferní části
adventivního kořene
rákosu obecného
(*Phragmites
australis* (Cav.)
Trin. ex Steud.).

Primární anatomická stavba kořene – Φ vrstva



en [endodermis](#)
ep [pokožka](#)
m-co [střední kortex](#)
ph [floém](#)
phi [fí-vrstva](#)
x [xylém](#)

Příčný řez kořenem
třešně ptačí
(*Cerasus avium* (L.)
Moench).

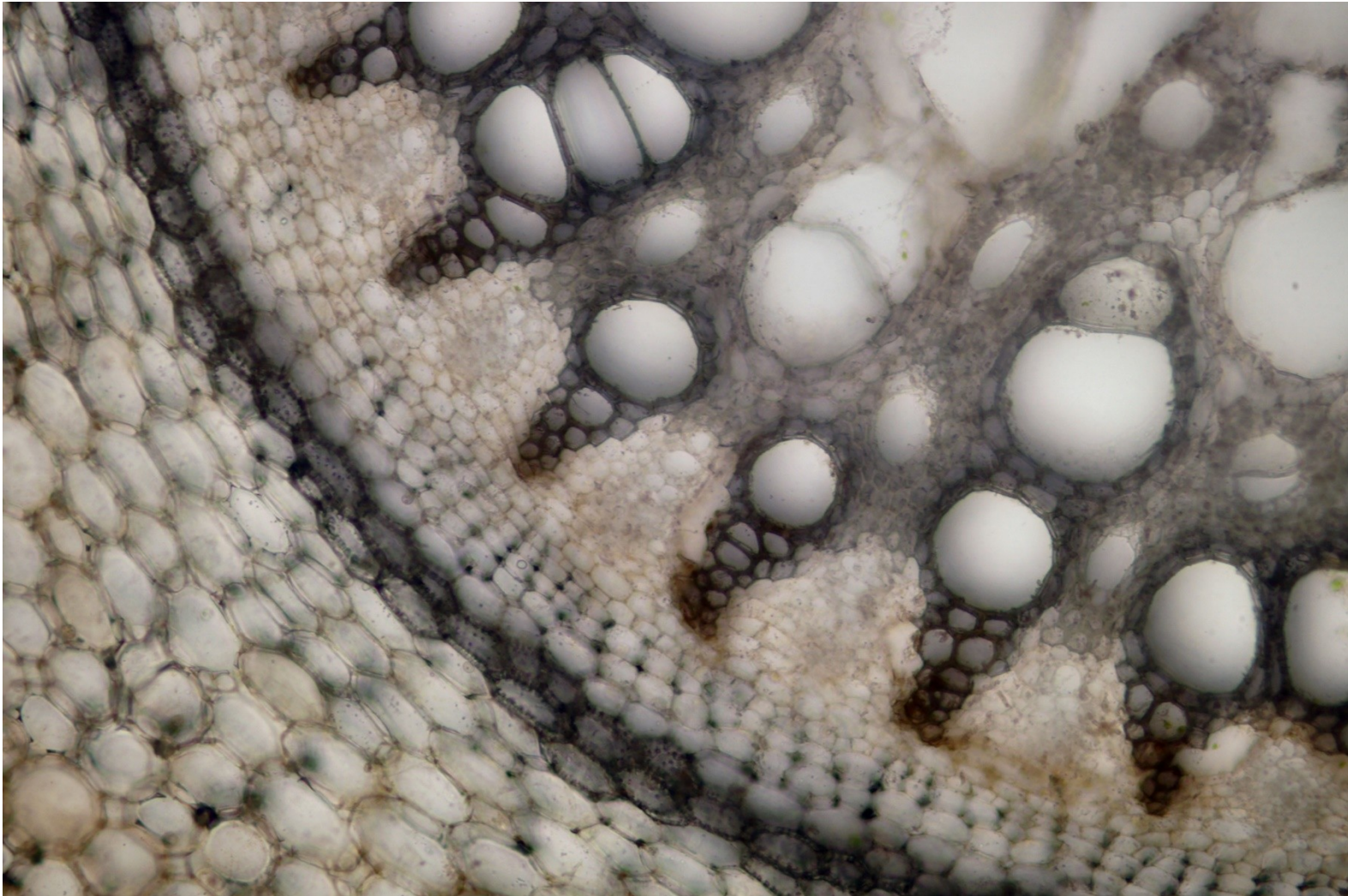


Primární anatomická stavba kořene – skl ve vnitřním kortexu



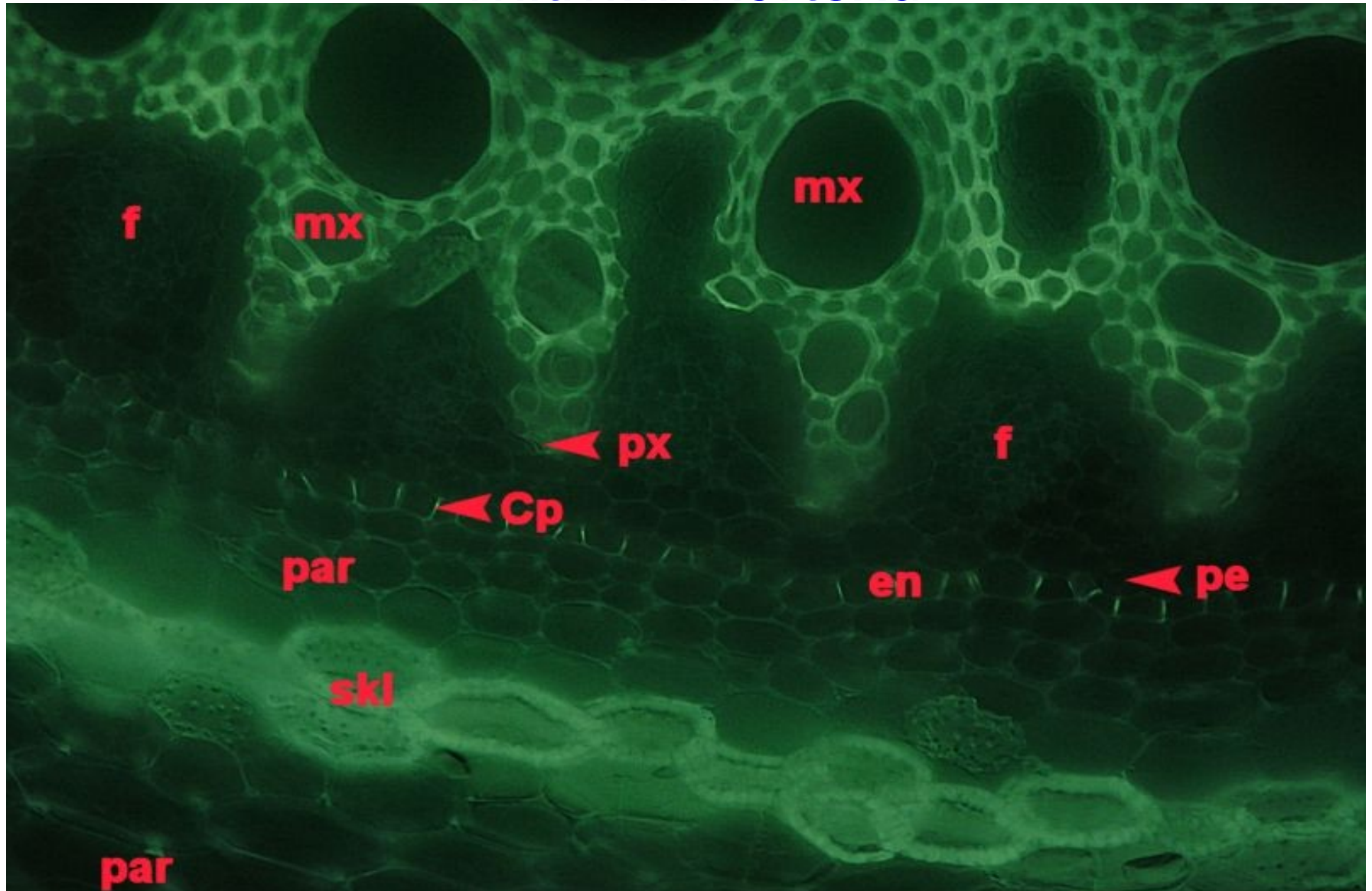
Příčný řez adventivním kořenem monstery nádherné (*Monstera deliciosa*).

Primární anatomická stavba kořene – skl ve vnitřním kortexu



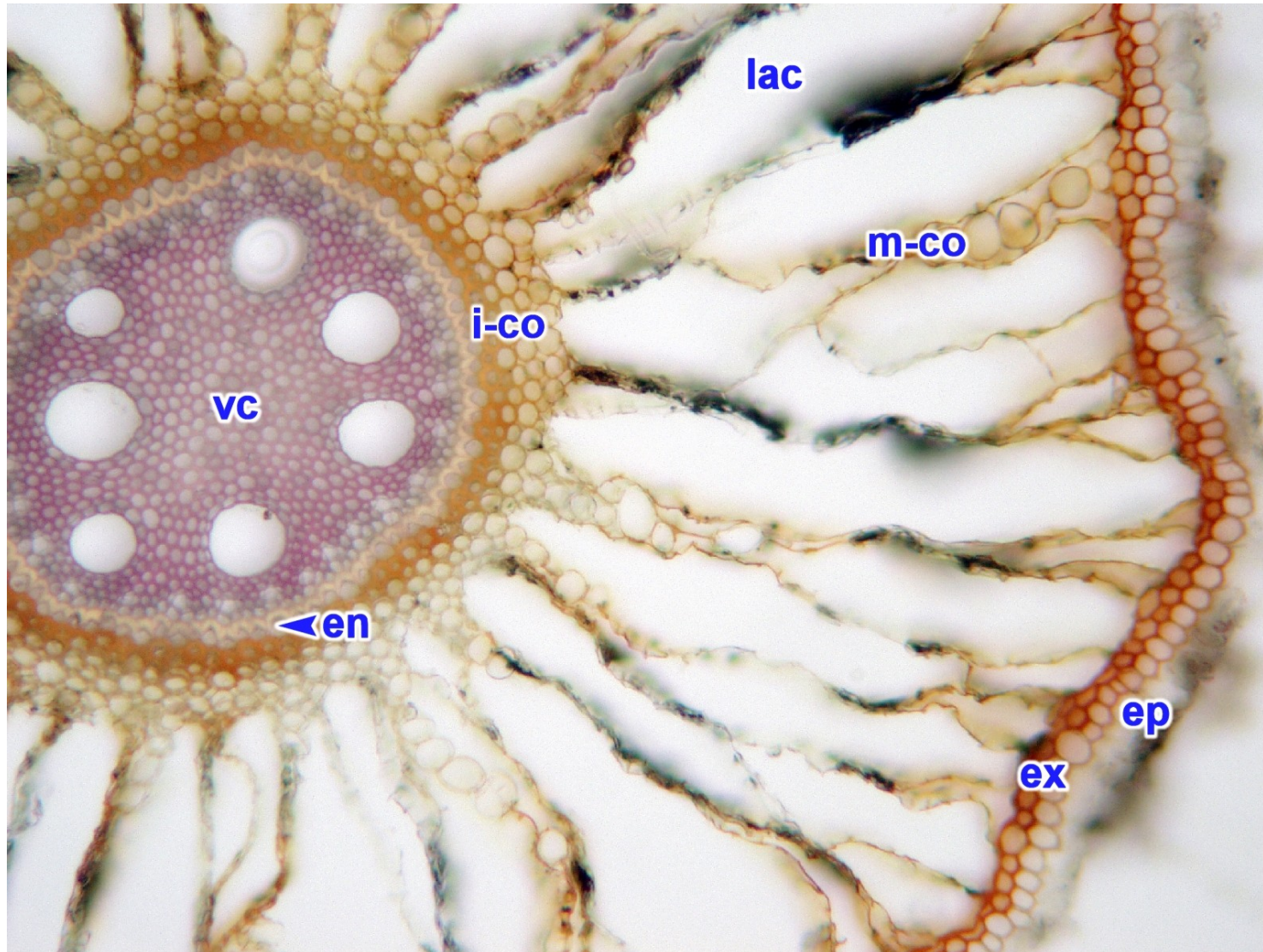
Příčný řez adventivním kořenem monstery nádherné (*Monstera deliciosa*).

Primární anatomická stavba kořene – skl ve vnitřním kortexu



Příčný řez adventivním kořenem monstery nádherné (*Monstera deliciosa*, Liliopsida).

Primární anatomická stavba kořene – primární kůra



- en [endodermis](#)
- ep [pokožka](#)
- ex [exodermis](#)
- lac [lakuna](#)
- m-co [střední kortex](#)
- vc [střední válec](#)

Příčný řez
adventivním
kořenem sítny
rozkladité (*Juncus
effusus* L.).

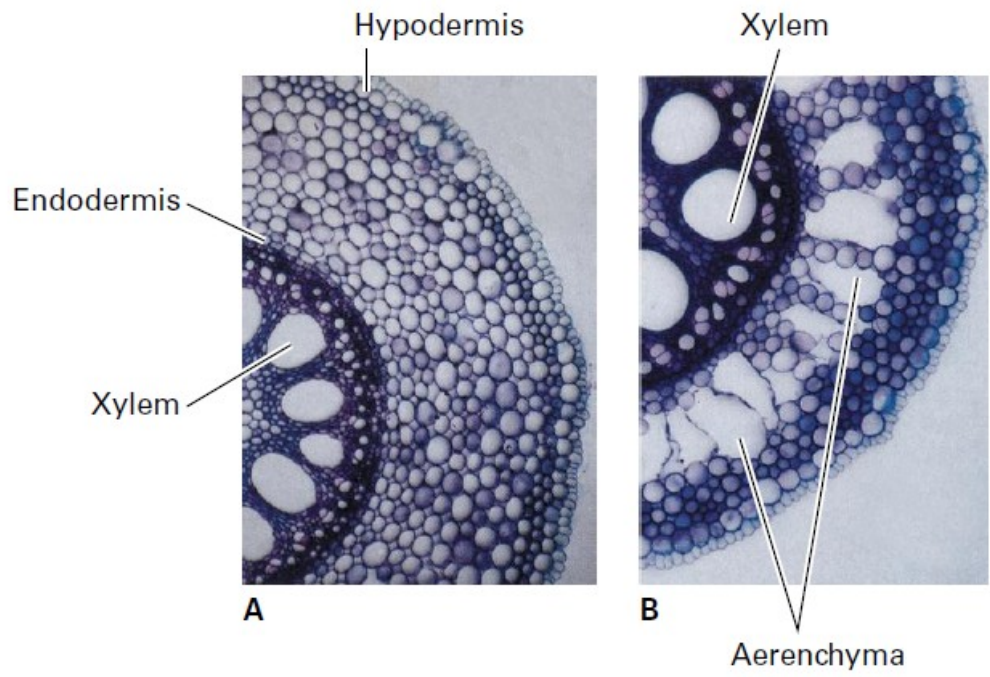
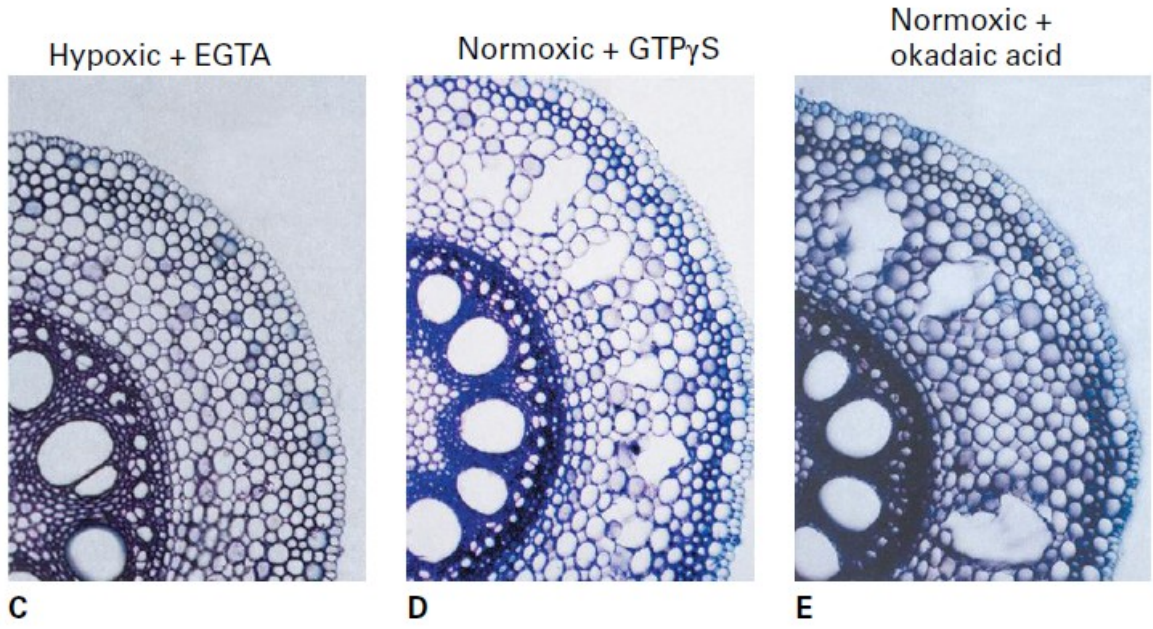
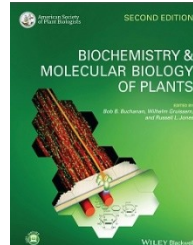


FIGURE 20.41 Aerenchyma formation in maize roots in response to hypoxia. Roots were grown under aerobic (A) and hypoxic (B) conditions. Under low-oxygen conditions, cortical cells between the endodermis and hypodermis undergo lysigeny to form air spaces that are continuous throughout the root, allowing submerged roots to access atmospheric gases obtained by above-ground tissues. Aerenchyma formation is influenced by agonists and antagonists of signal transduction pathways. The Ca^{2+} chelator EGTA prevents aerenchyma in maize roots under hypoxic conditions (C), whereas the G-protein activator $GTP\gamma-S$ (D) and the protein phosphatase inhibitor okadaic acid (E) induce aerenchyma formation under aerobic conditions. Source: (A–E) He et al. (1996). *Plant Physiol.* 112:463–472.



- Lyzigenní aerenchym
- Etylén



Střední válec

- pericykl
 - radiálně uspořádaná vodivá pletiva
 - (dřeň)
 - (kambium)
- počet px polů
- jednoděložné (polyarchní radiální organizace vodivých pletiv)
 - nahosemenné a dvouděložné rostliny (oligoarchní...)

Exarchní založení (proto)xylému v kořenech

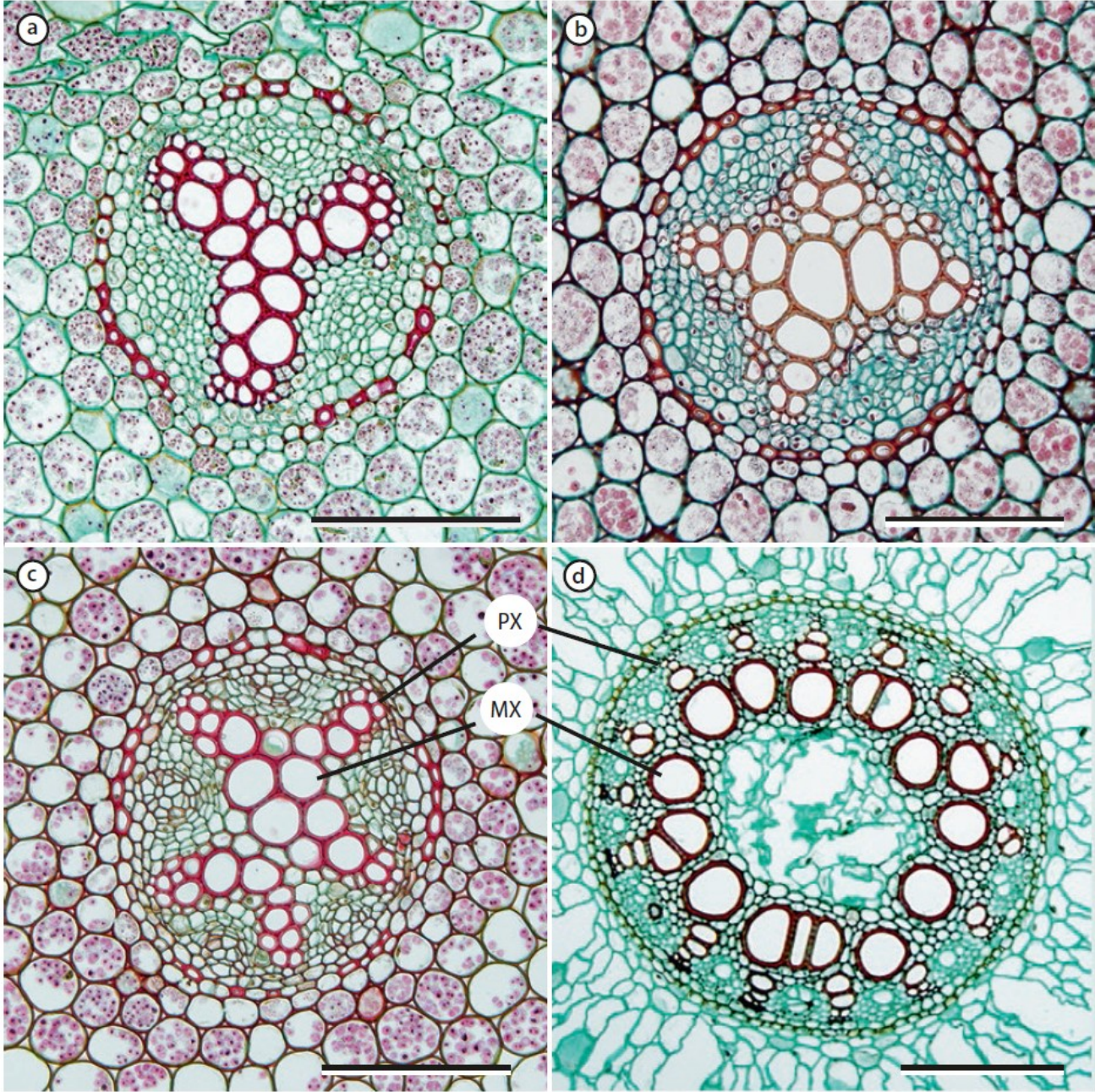
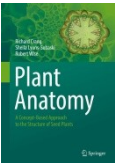
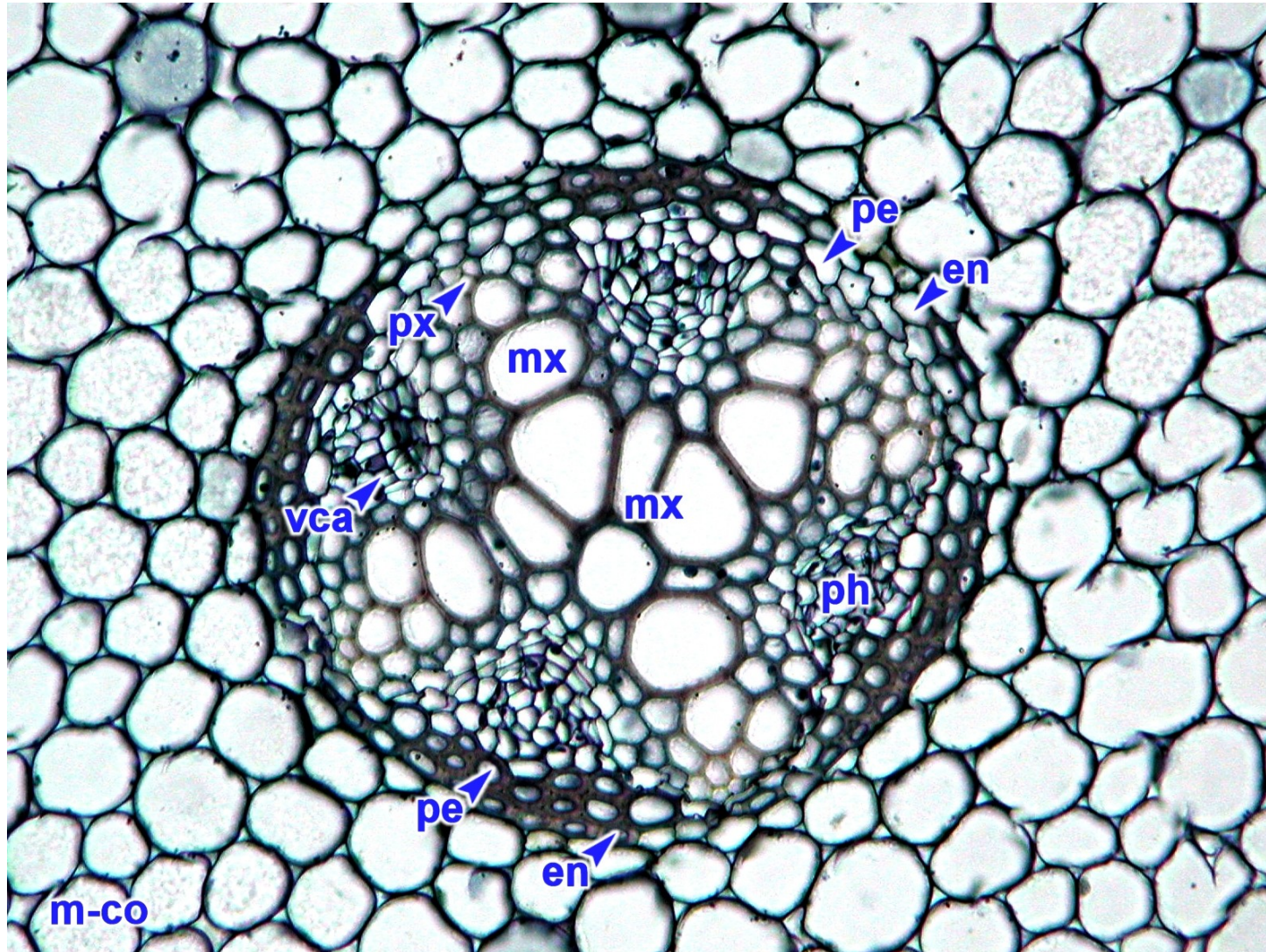


Fig. 10.7 a–d Images of a a triarch stele in a buttercup (*Ranunculus acris*) root, b tetrarch buttercup stele, c pentarch buttercup stele, and d polyarch asparagus (*Asparagus officinalis*) stele with multiple individual groupings of xylem. PX, protoxylem; MX, metaxylem. Scale bars = 100 μm in all panels. (a–d RR Wise)



Primární anatomická stavba kořene – střední válec dvouděložné rostliny

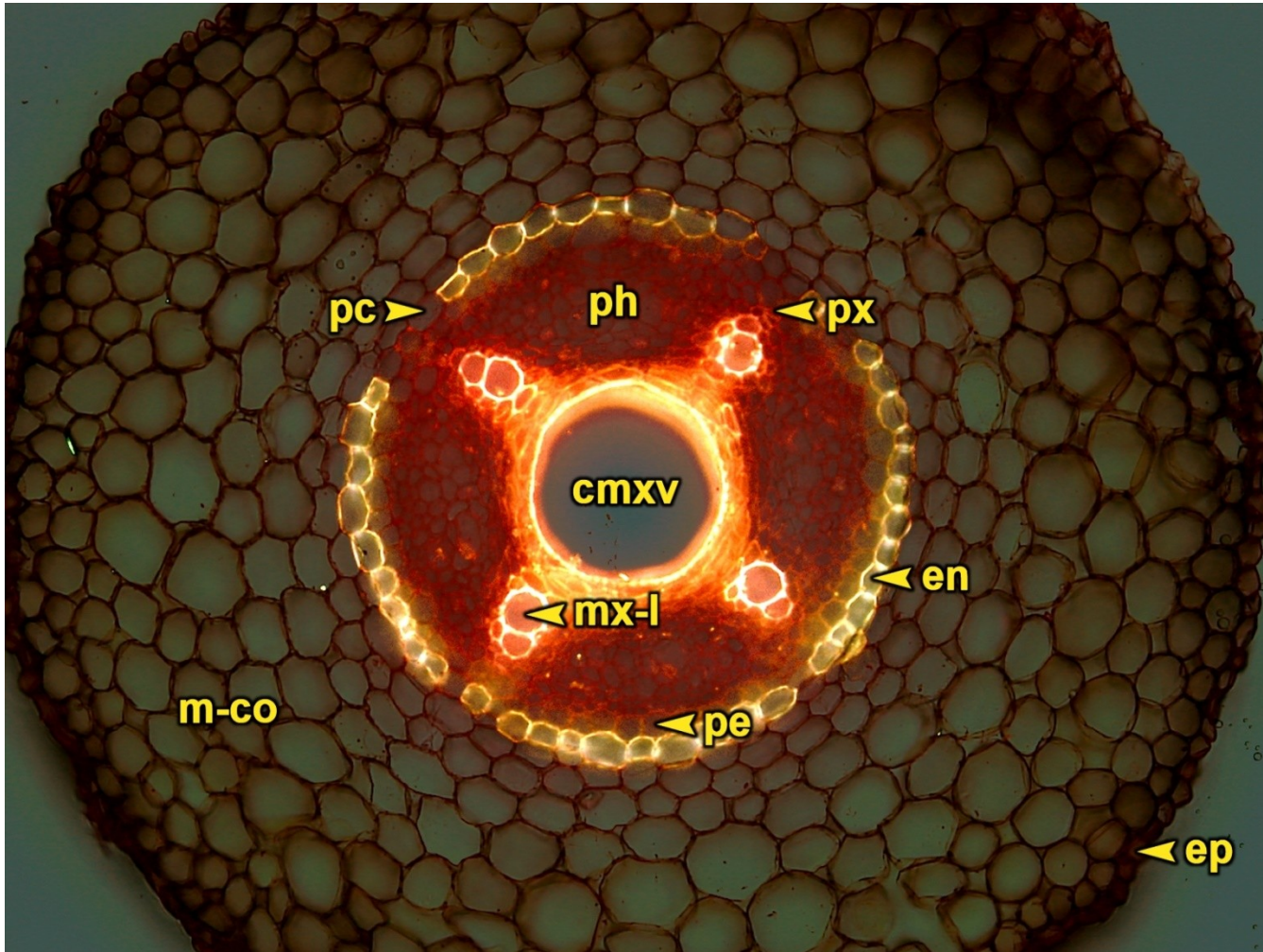


en [endodermis](#)
m-co [střední kortex](#)
mx [metaxylém](#)
pe [pericykl](#)
ph [floém](#)
px [protoxylém](#)
vca [kambium](#)

Příčný řez kořenem
hvězdnatce zubatého
(*Hacquetia
epipactis* (Scop.)
DC.).

Záhy bude
sekundárně
tloustnout –
kambium!

Primární anatomická stavba kořene – střední válec dvouděložné rostliny



cmxv centrální
[metaxylémová céva](#)
en [endodermis](#)
ep [pokožka](#)
m-co [střední kortex](#)
mx-l pozdní
[metaxylém](#)
pc [propustná buňka](#)
pe [pericykl](#)
ph [floém](#)
px [protoxylém](#)

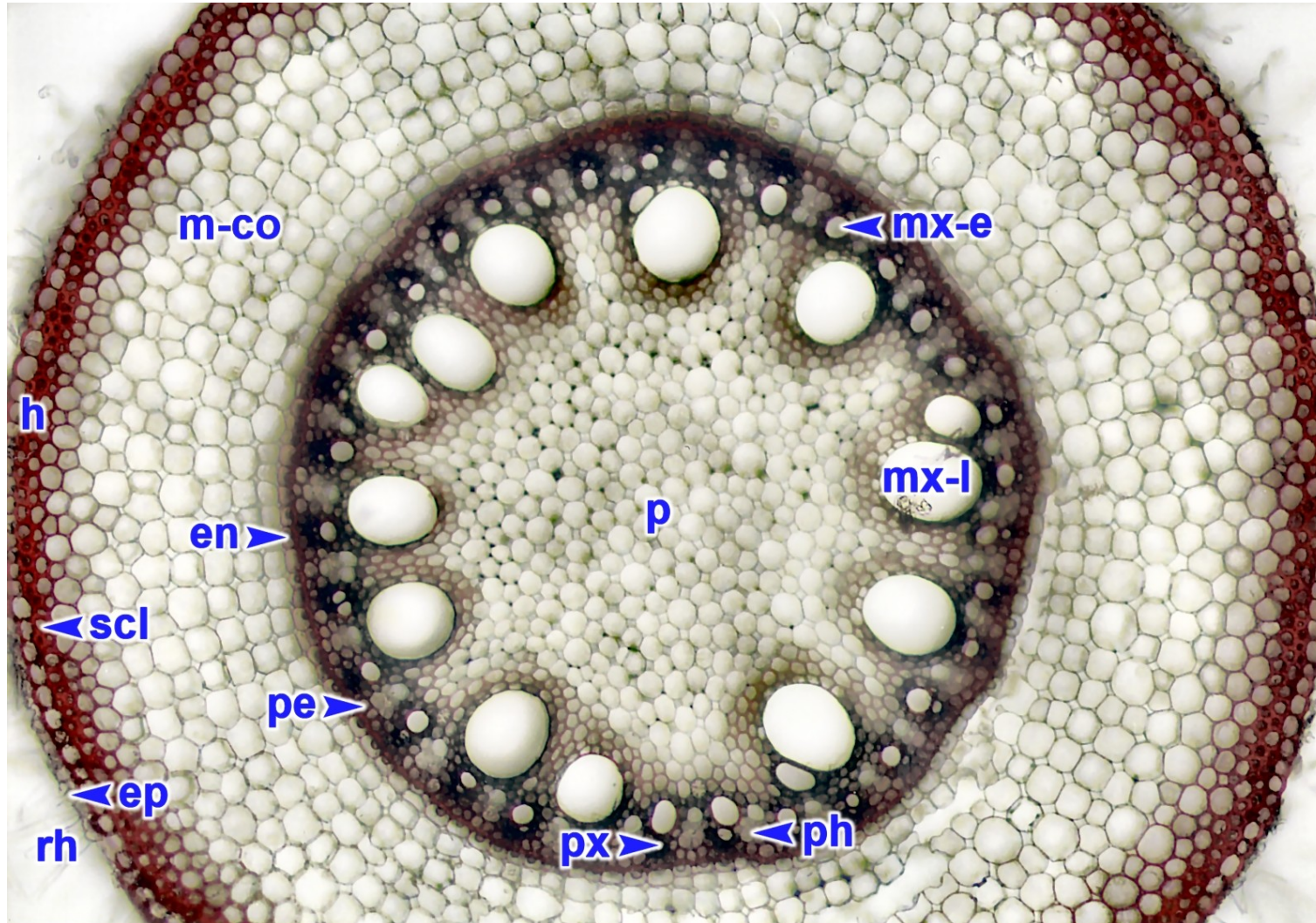
Příčný řez kořenem
okurky seté (*Cucumis
sativus* L.).
Fluorescenční
mikroskopie
kombinovaná s
technikou světlého
pole.

Primární anatomická stavba kořene – střední válec dvouděložné rostliny



Příčný řez seminálním kořenem bobu setého (*Vicia faba*).

Primární anatomická stavba kořene – střední válec jednoděložné rostliny



- en [endodermis](#)
- ep [pokožka](#)
- h [hypodermis](#)
- m-co [střední kortex](#)
- mx-e raný [metaxylém](#)
- mx-l pozdní [metaxylém](#)
- p [dřeň](#)
- pe [pericykl](#)
- ph [floém](#)
- px [protoxylém](#)
- rh [kořenový vlásek](#)
- scl [sklerenchym](#)

Příčný řez
adventivním
kořenem čiroku
obecného
(*Sorghum
bicolor* (L.)
Moench).