

# Plant water relations

# 1. Wasserzustand

## Maße für den Wasserzustand in der Pflanze

- relativer Wassergehalt (%  $H_2O \text{ g}^{-1}$  Trockengewicht)

Wenig aussagekräftig, da

- der Wassergehalt verschiedener Arten und Gewebe deutlich verschieden sein kann
- nicht bekannt ist, ob das Wasser physiologisch verfügbar ist

- Wassersättigungsdefizit (% Sättigungsgewicht)

- Berücksichtigt unterschiedliche Wassergehalte, aber nicht Verfügbarkeit



- Wasserpotential

- Ist ein Maß für das physiologisch verfügbare Wasser!

## Wasserpotential

Chem. Potential ( $\mu$ ):

= Freie Enthalpie pro mol ( $J \text{ mol}^{-1}$ )

= Maß für die Fähigkeit, Arbeit zu leisten

Das chem. Potential reinen Wassers ist 0 J mol<sup>-1</sup>.

Sind Substanzen im Wasser gelöst verringert sich das chem. Potential:

(Der Wert wird also negativ: <0 J mol<sup>-1</sup>.)

$$\text{Wasserpotential: } \Psi = (\mu_w - \mu_w^0)/V_w$$

$\mu_w - \mu_w^0$  = chem. Potential – chem. Potential im Standardzustand (Temp., Druck)

$V_w$  = Molvolumen von Wasser ( $\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$ )

Einheiten für Energie (J) und Druck (Pa) sind einander äquivalent:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\Psi = (\mu_w - \mu_w^0)/V_w = \text{J/mol} \times \text{mol/m}^3 = \text{Nm/m}^3 = \text{N/m}^2 = \text{Pa}$$

Vorteil: Bestimmung von  $\Psi$  über die Messung von Drücken.

Einheiten:  $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10 \text{ bar}$

# Wasserpotentialgleichung

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

$\Psi_p$  = Druckpotential (Hydrostatisches Potential)

$\Psi_s$  = Osmotisches Potential (auch  $\pi$ )

$\Psi_m$  = Matrixpotential (-> Adhäsion)

$\Psi_g$  = Gravitationspotential

$\Psi_m$  und  $\Psi_g$  in der Pflanze vernachlässigbar:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$

# Wasserpotentialgleichung

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g$$

$\Psi_p$  = Druckpotential (Hydrostatisches Potential)

$\Psi_s$  = Osmotisches Potential)

$\Psi_m$  = Matrixpotential ( -> Adhäsion)

$\Psi_g$  = Gravitationspotential

$\Psi_m$  und  $\Psi_g$  in der Pflanze vernachlässigbar:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$

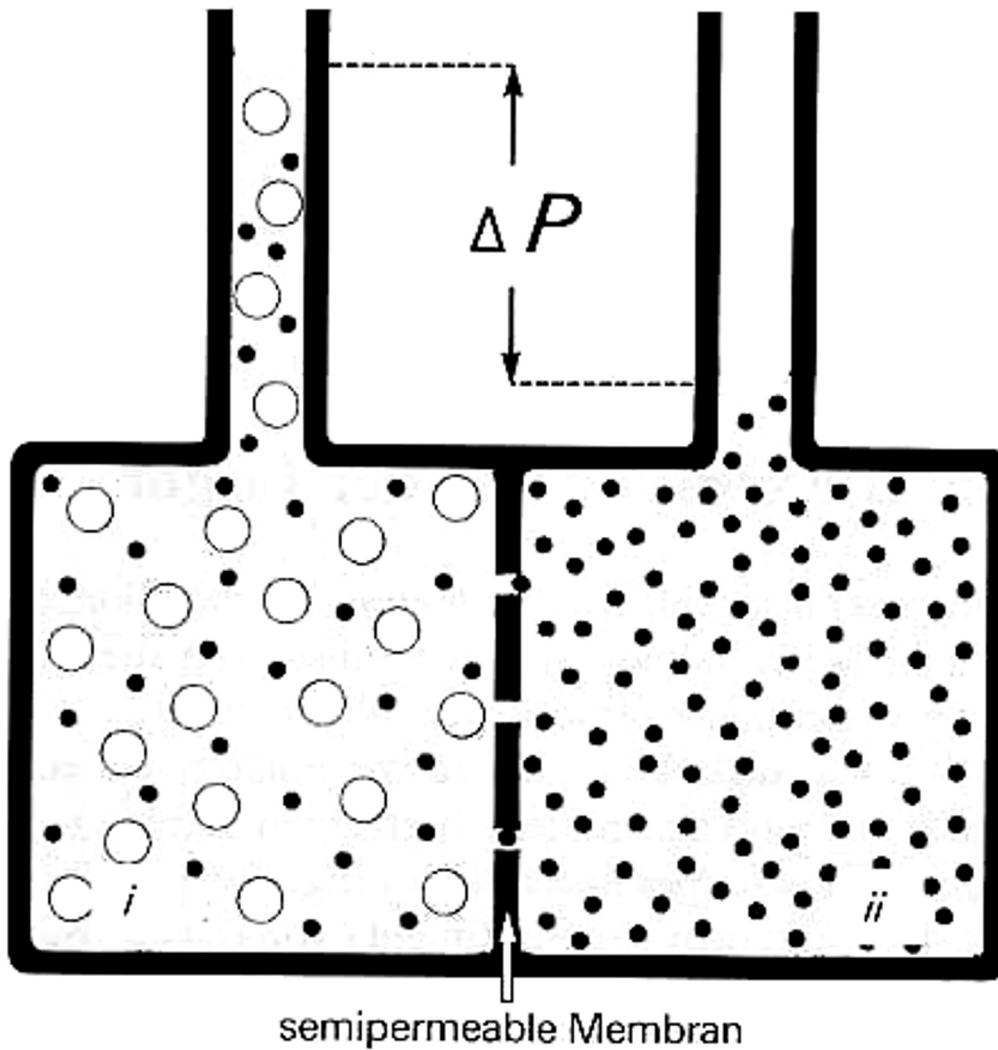


$\Psi_p$  und  $\Psi_g$  im Boden vernachlässigbar:

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_s$$



$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$

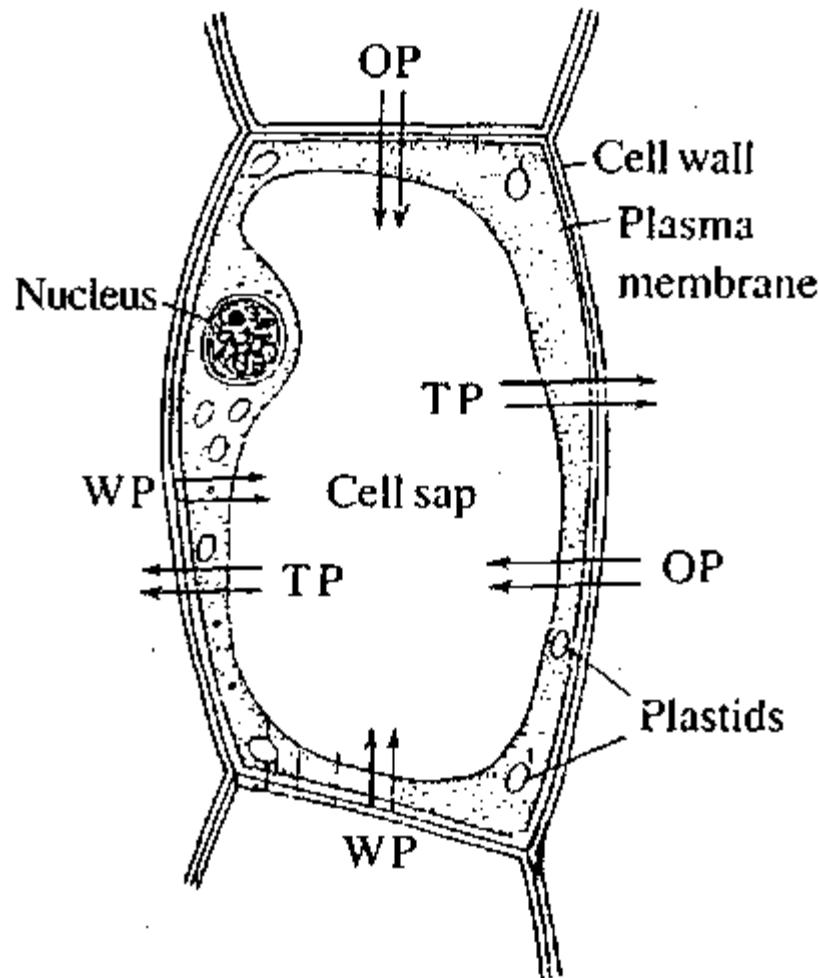


○ Moleküle von S; ● H<sub>2</sub>O-Moleküle

### Osmotisches Potential

- Treibende Kraft hinter der Wasseraufnahme in die Zelle.
- Das Chem. Potential des Wassers wird durch darin gelöste Stoffe abgesenkt.
- Das Osmotische Potential hat immer negative Werte.

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$



- $\Psi_p$  ist der hydrostatische Druck des Wasserkörpers auf die Zellwand (Turgor)
- $\Psi_p$  hat den gleichen Betrag wie der entgegengesetzt wirkende Druck der Zellwand (Turgor)

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$

$\Psi$  = Druckpotential + Osmotisches Potential  
[= Turgor]

(+)                          (-)

Wasseraufnahme in die Zelle erfolgt solange bis der Gegendruck der Zellwand den Osmotischen Druck gerade kompensiert:

$$\Psi_p = -\Psi_s$$

$$\Psi = 0$$

## Bodenwasserpotential

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_s$$

$\Psi_s$ : relevant in Salzböden



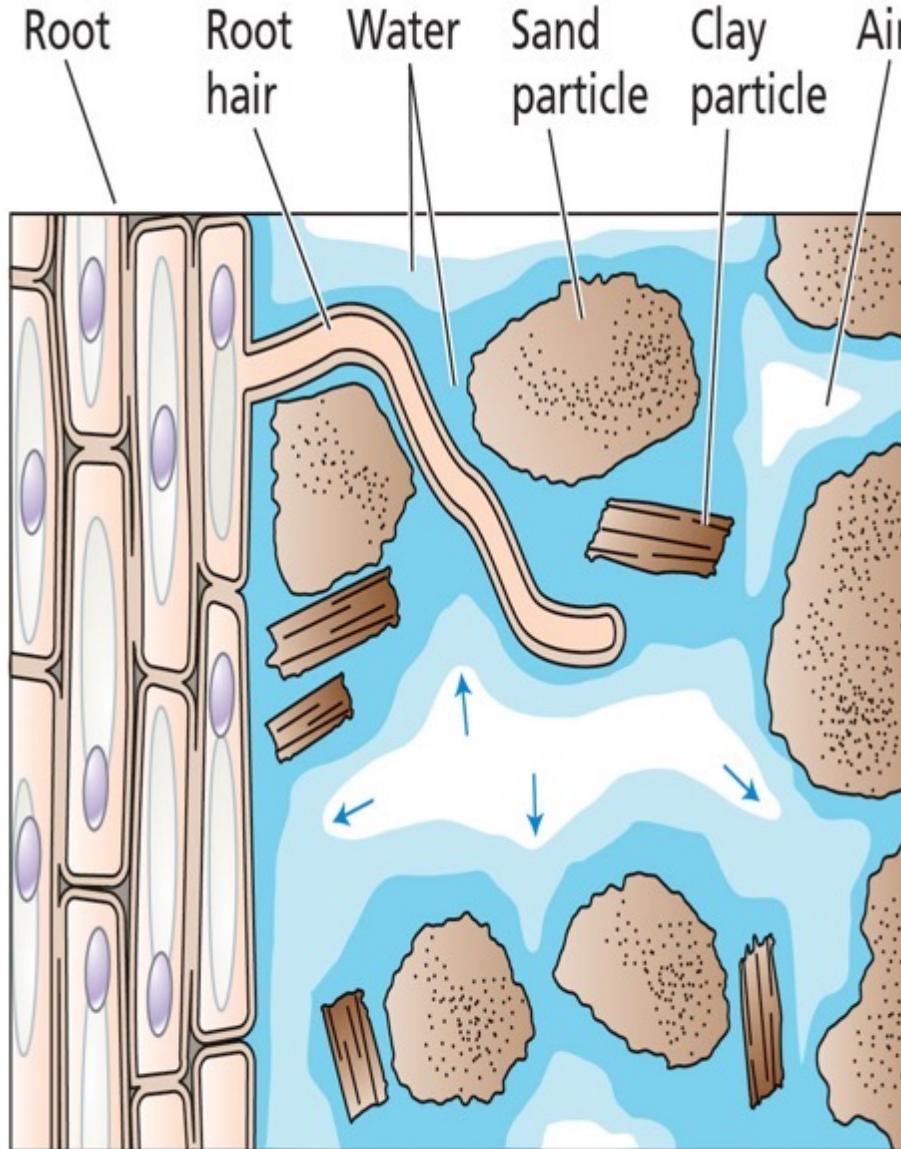
Nicht salzige Böden:  $\Psi \approx \Psi_m$

## $\Psi_m$ (Matrixpotential)

wird bestimmt durch die Adhäsion  
des Wassers an Bodenpartikeln

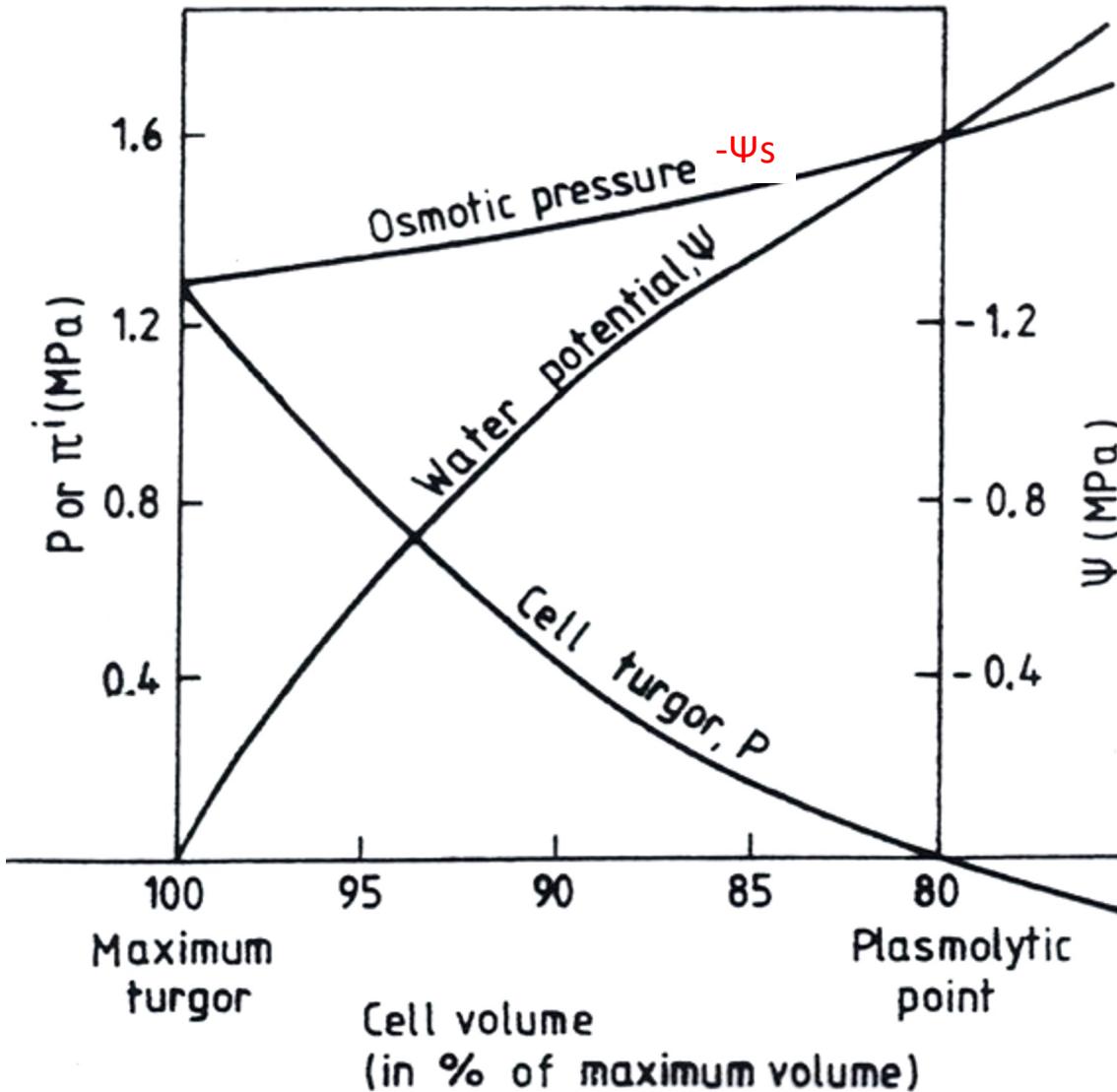
$$pF = \log (-\Psi_m)$$

- pF 1: naß
- pF 2: feucht
- pF 3: frisch
- pF 4: trocken
- pF 5: sehr trocken



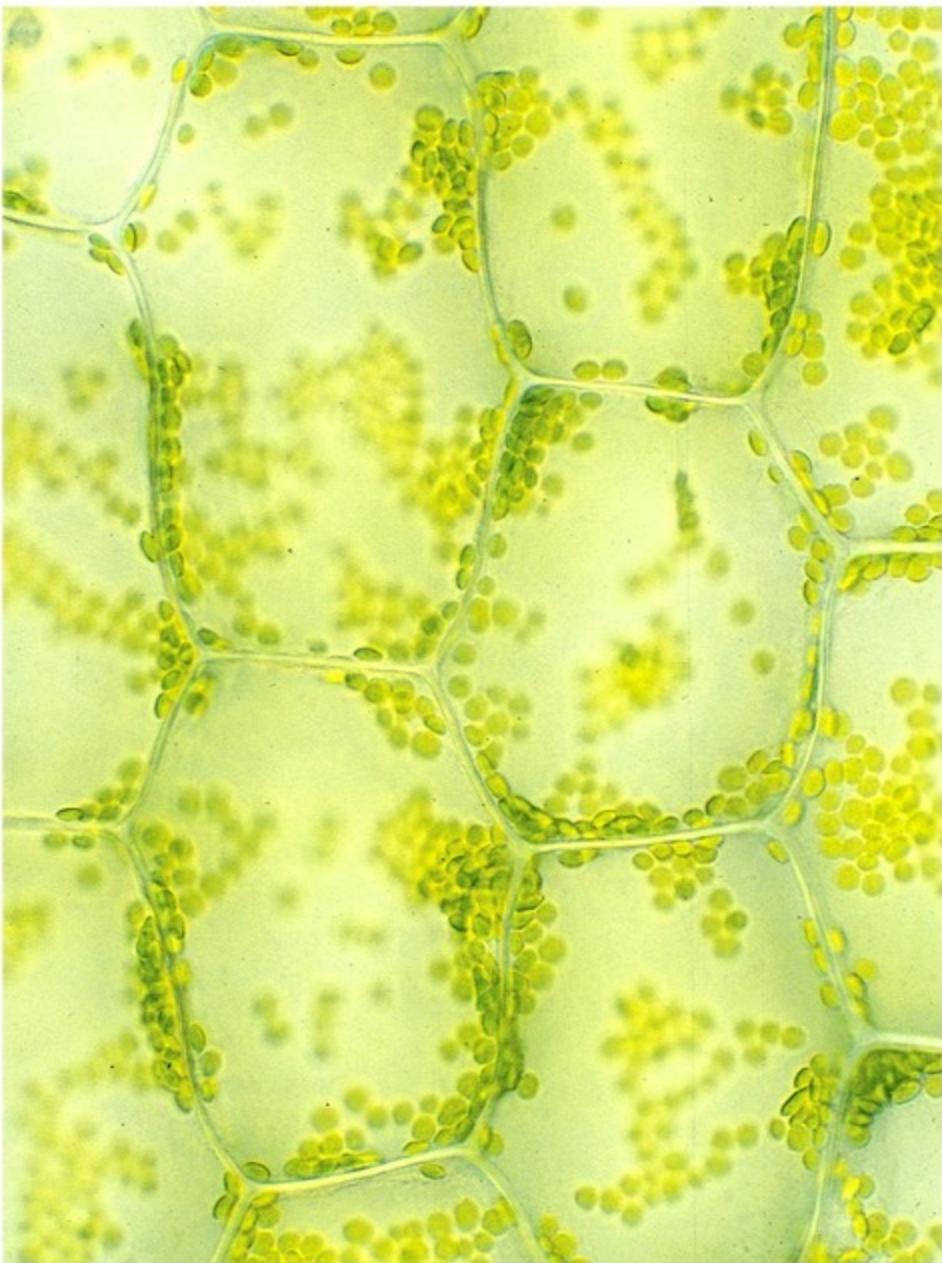
PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 4.2 © 2002 Sinauer Associates, Inc.

## Höfler-Zustandsdiagramm

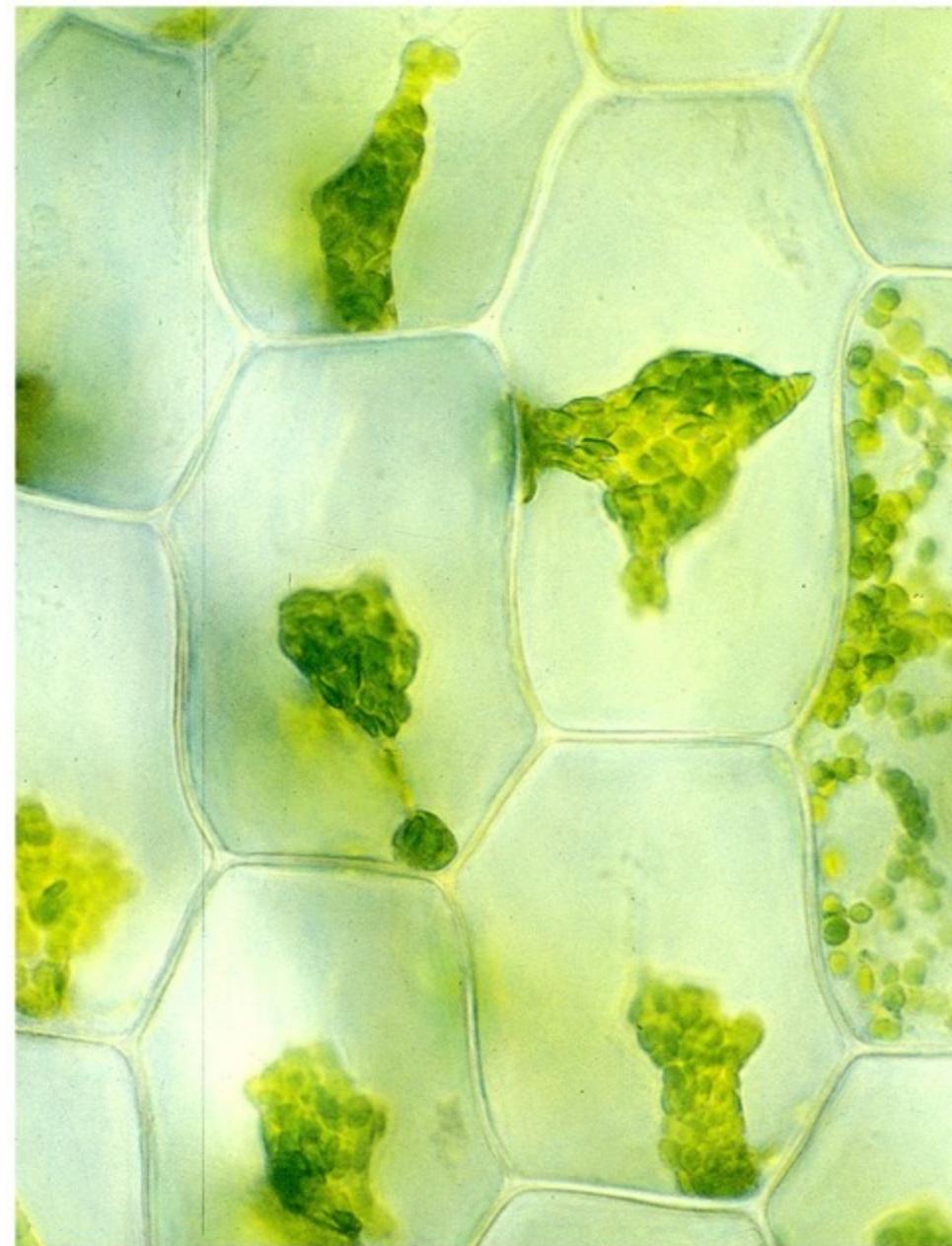


Je schlechter die Zelle mit Wasser versorgt ist, desto niedriger wird  $\Psi$ .

nach Höfler (1920)



**Figure 4-8a**  
*Biology of Plants, Seventh Edition*  
© 2005 W.H. Freeman and Company



**Figure 4-8b**  
*Biology of Plants, Seventh Edition*  
© 2005 W.H. Freeman and Company

Plasmolyse

## Größenordnungen für Wasserpotential-Werte

$\Psi = 0 \text{ MPa}$

Reines Wasser

$\Psi = 0 \text{ bis } -1 \text{ MPa}$

Pflanze gut wasserversorgt

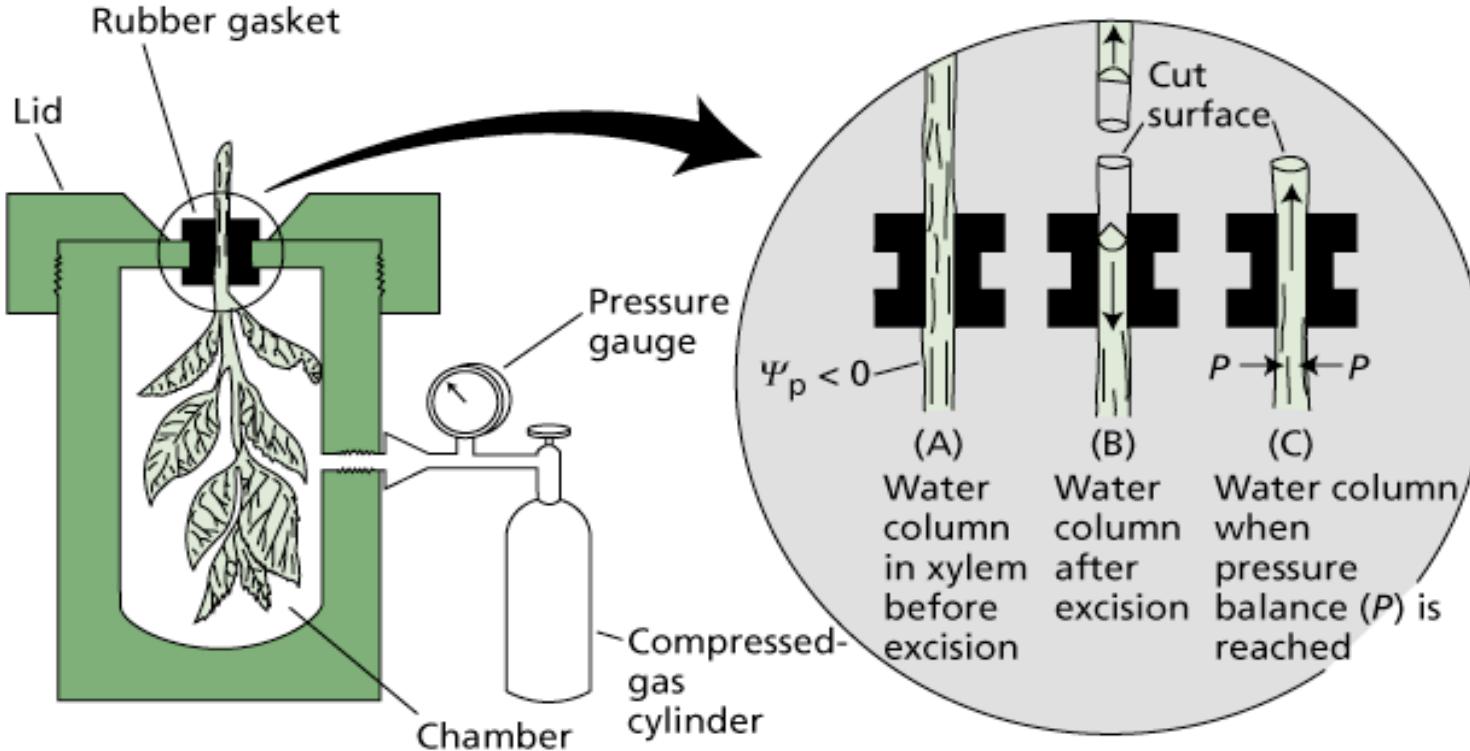
$\Psi = -1 \text{ bis } -2 \text{ MPa}$

Leichter Trockenstreß

$\Psi < -2 \text{ MPa}$

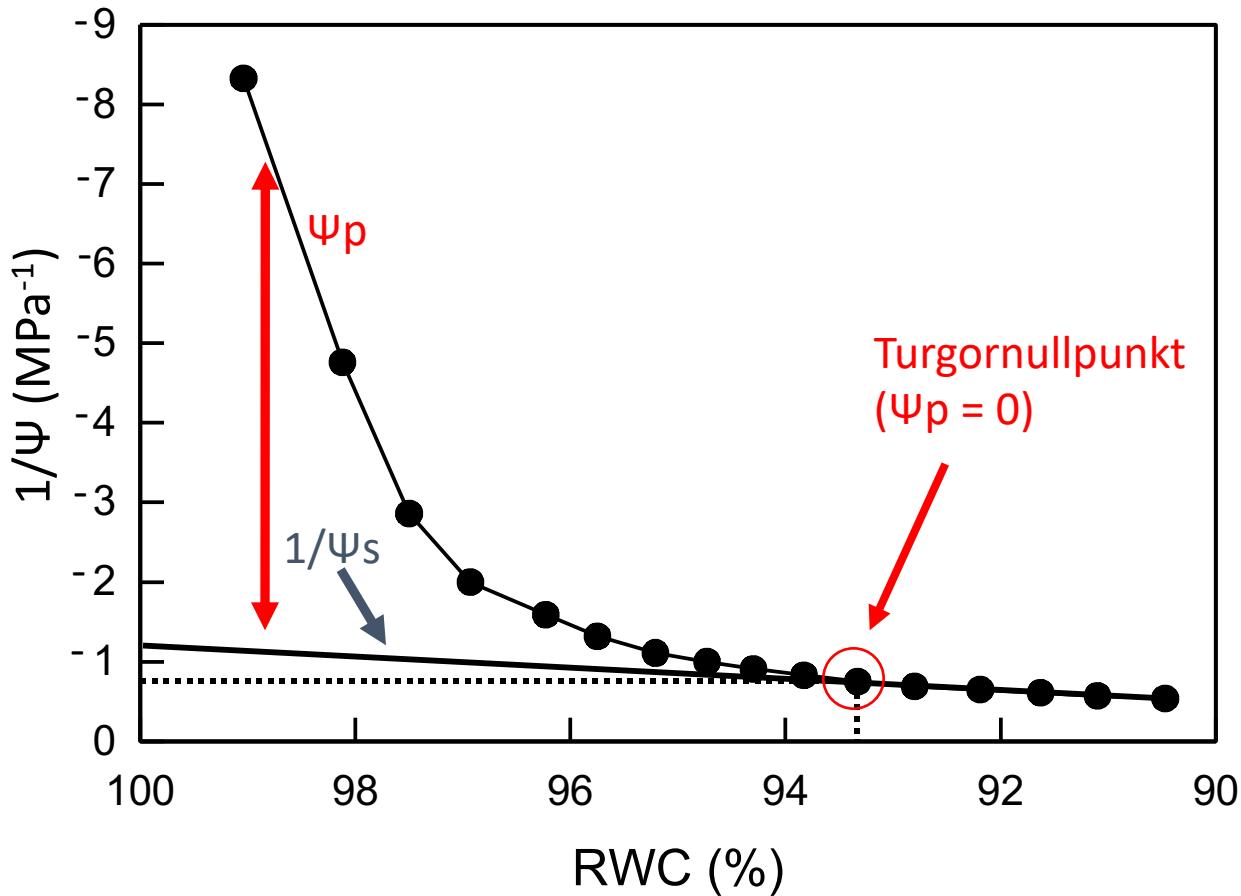
Starker Trockenstreß

## Messung von $\Psi$ in der Scholander-Druckkammer („Scholander-Bombe“)



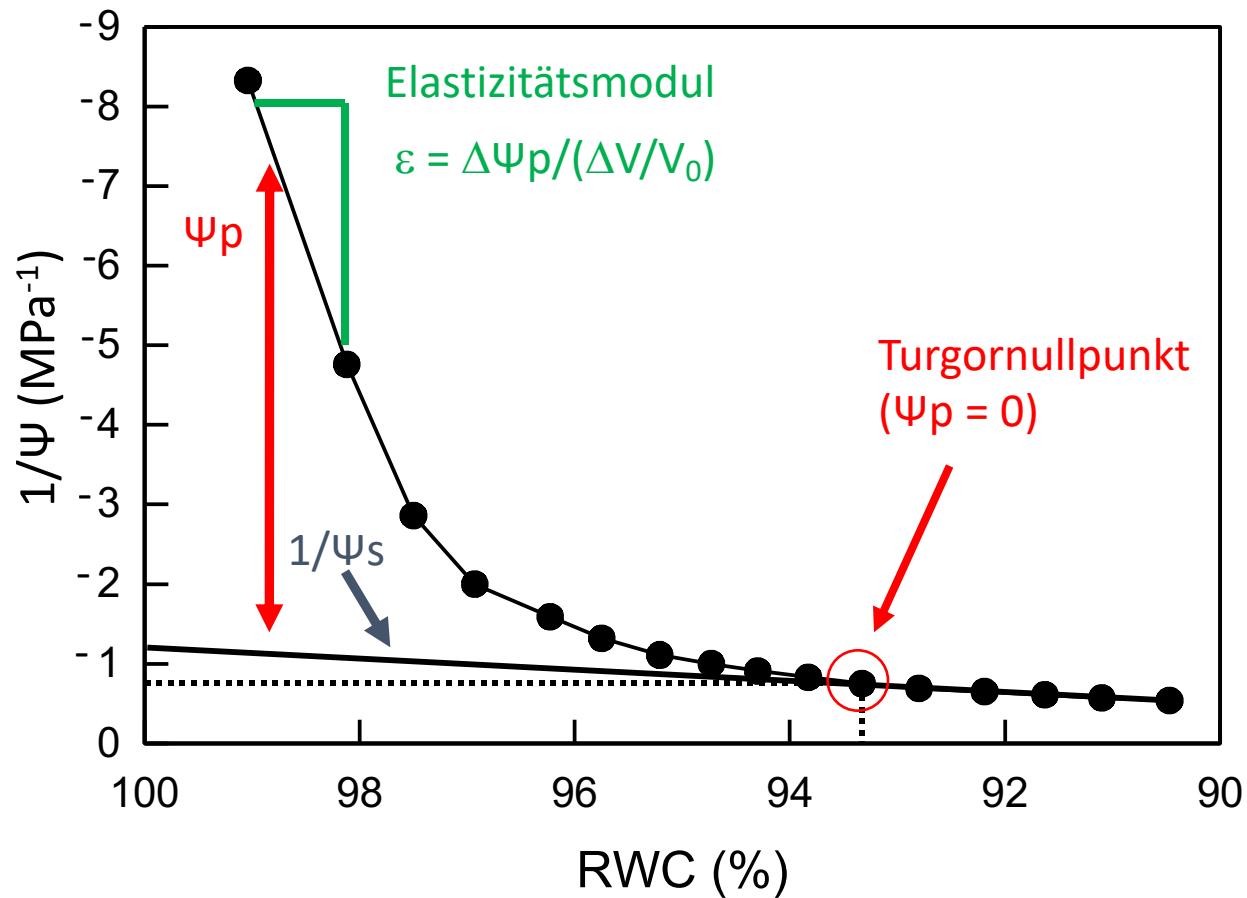


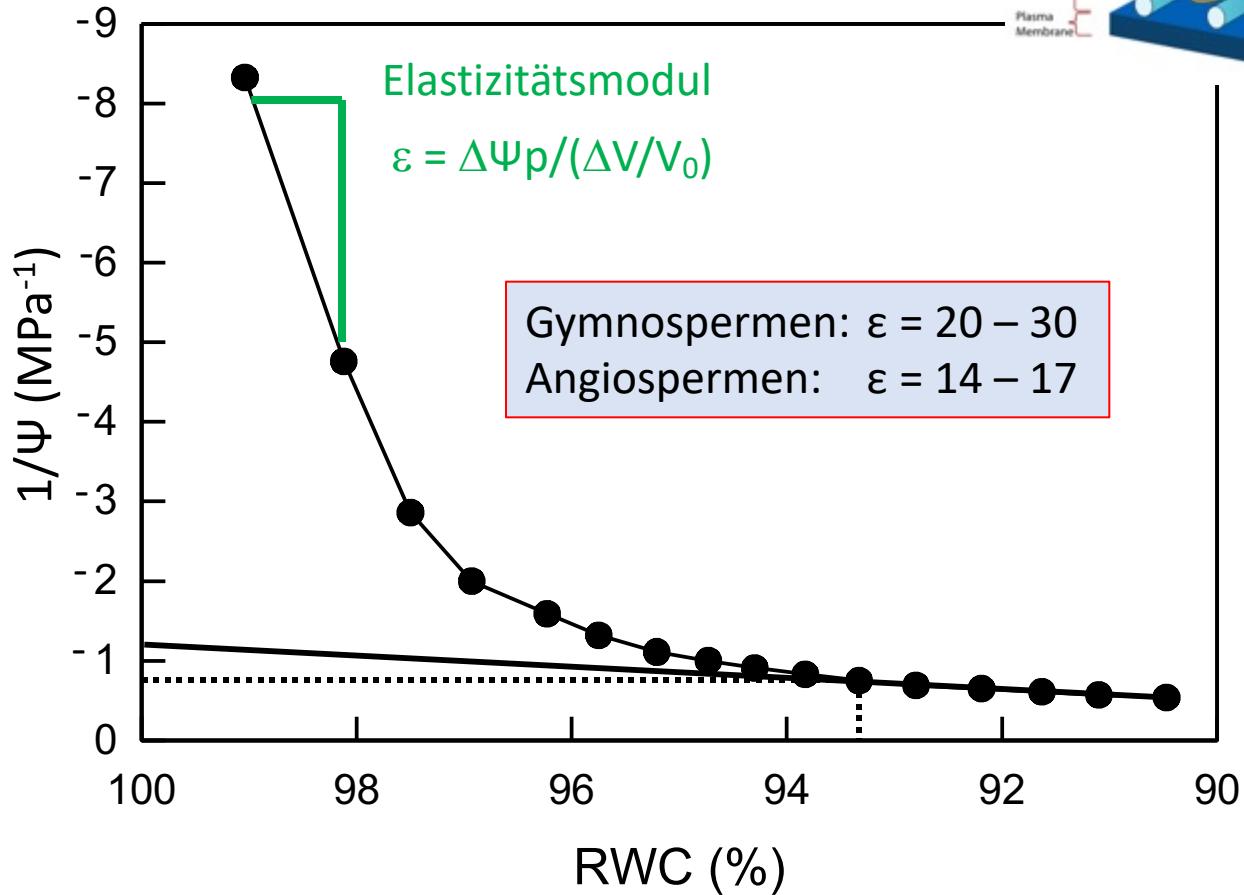
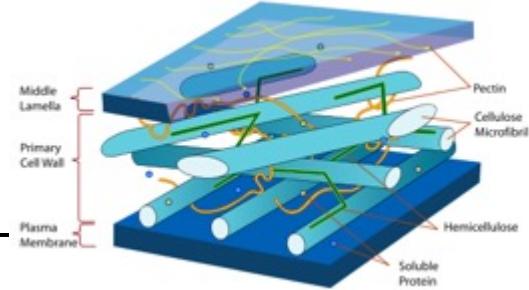
## Druck-Volumen-Kurve



Am Turgornullpunkt reißt die räumliche Verbindungen (durch Adhäsion) vom Protoplasten zur Zellwand.

## Druck-Volumen-Kurve

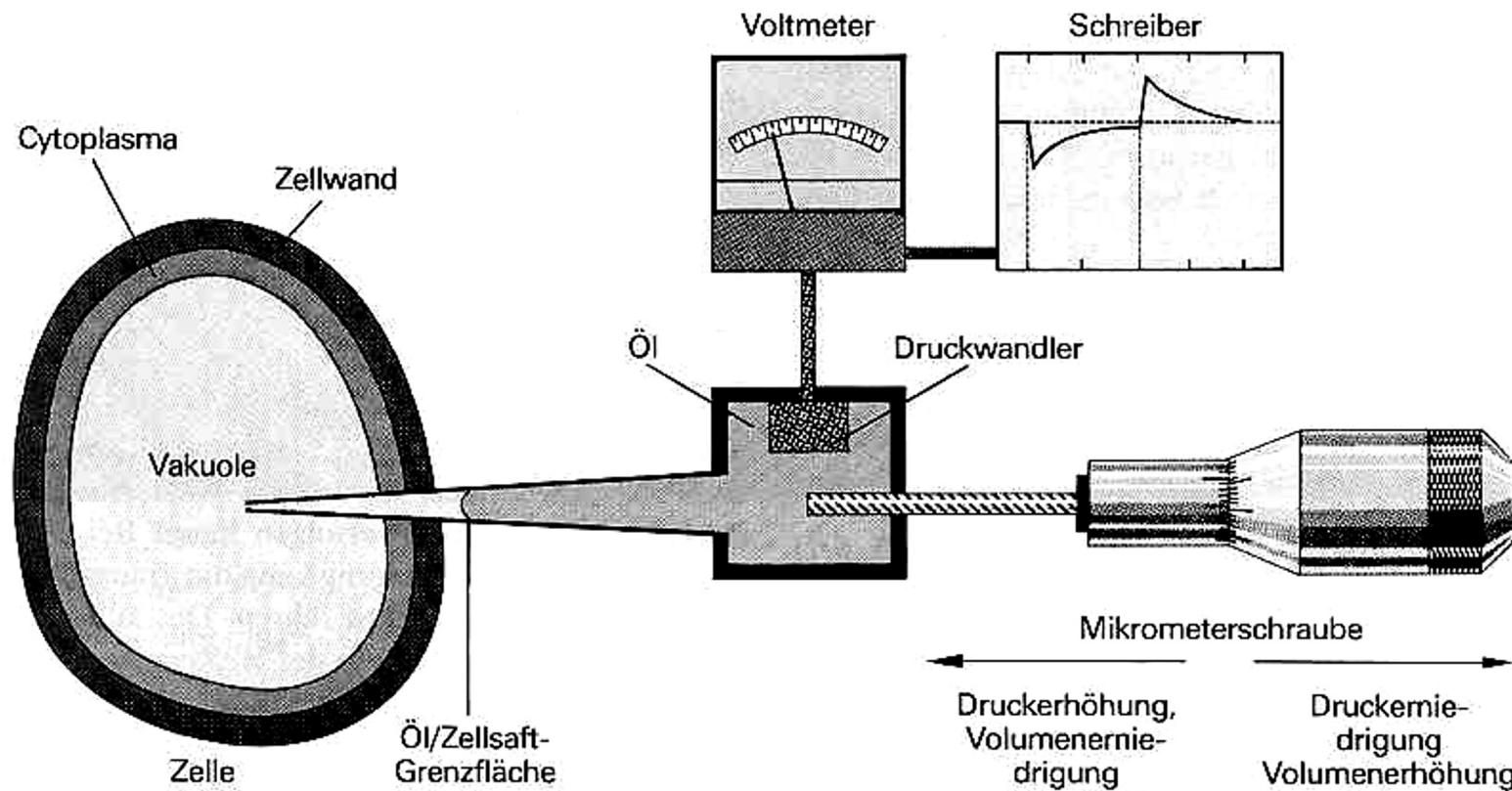


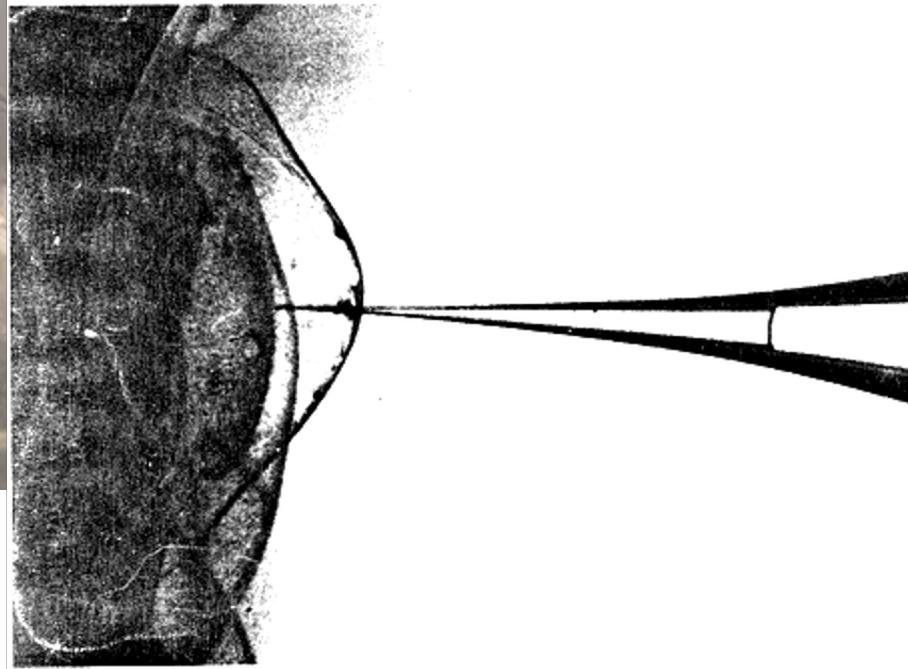
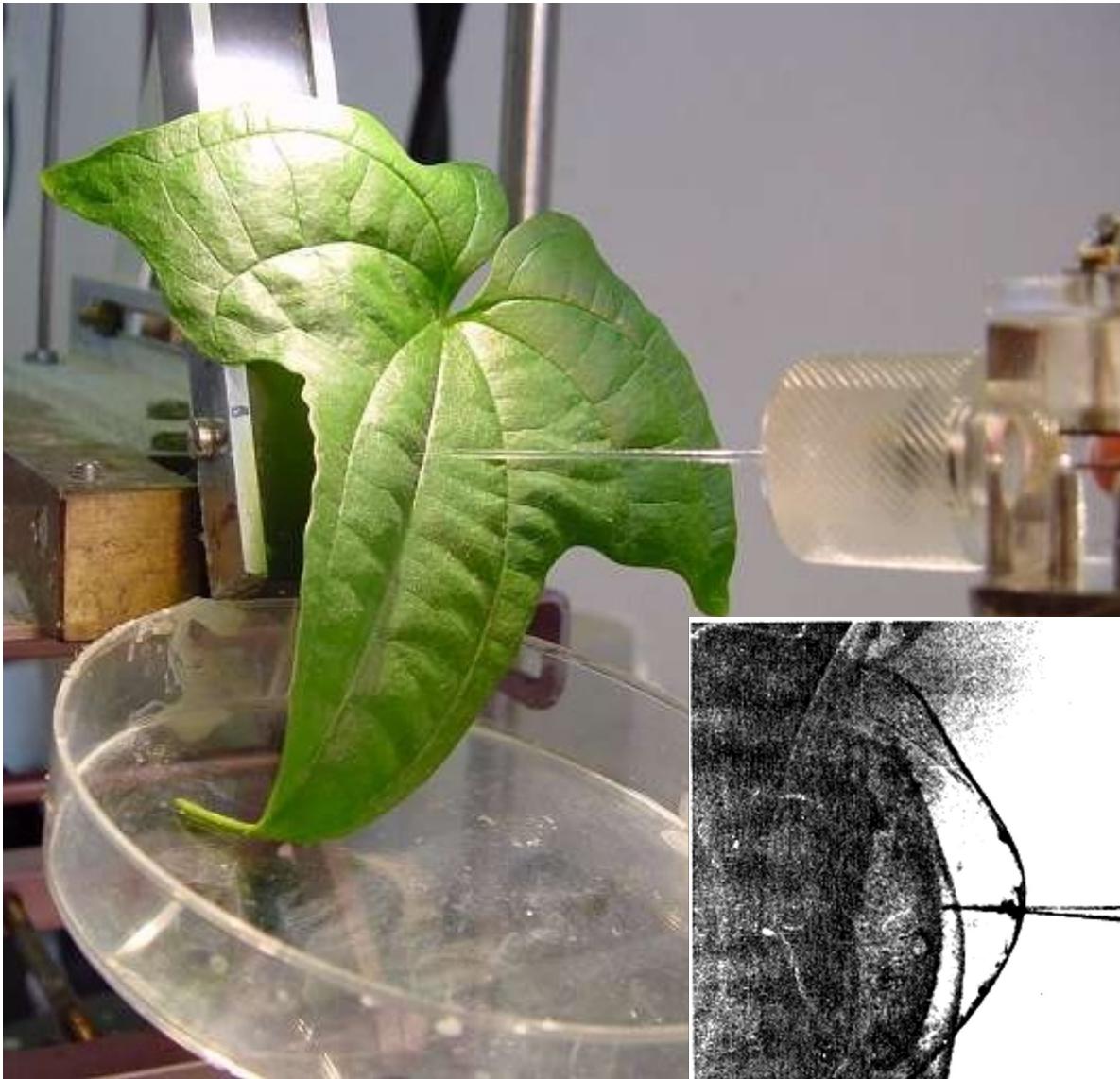


Elastizitätsmodul: Begriff nicht spezifisch für Pflanzenzellen (Werkstoffkunde)

- Steife Zellwand = hohes  $\varepsilon$  =  
starke Änderung von  $\Psi_p$  (und damit  $\Psi$ ) bei geringer Änderung des Wasservolumens
- Elastische Zellwand = niedriges  $\varepsilon$  =  
geringe Änderung von  $\Psi_p$  (und damit  $\Psi$ ) bei geringer Änderung des Wasservolumens,  
dafür schnelleres Wachstum

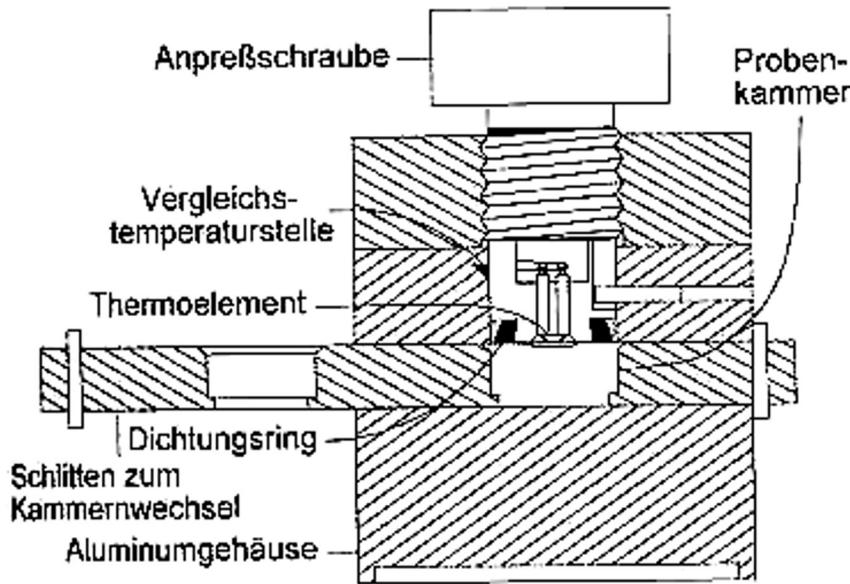
## Wasserpotential-Messung auf zellulärer Ebene (Drucksonde nach Zimmermann und Steudle)





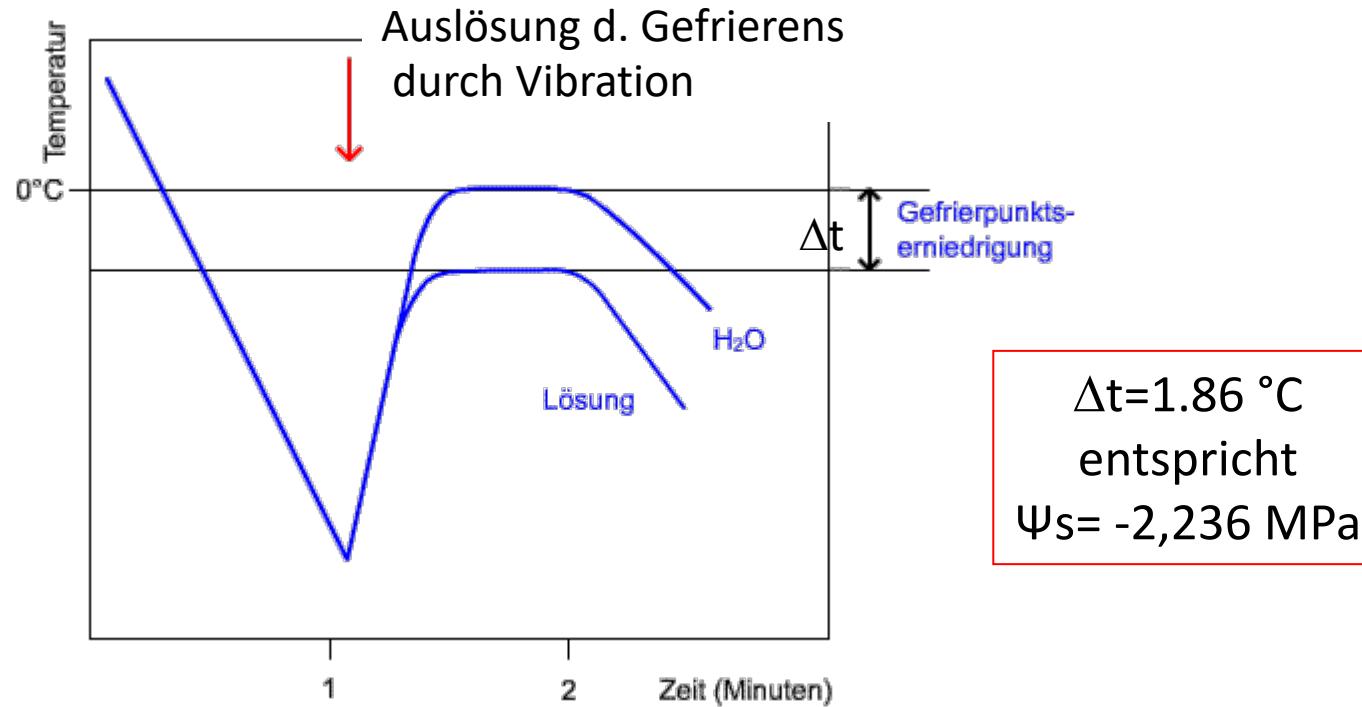
## Wasserpotential-Bestimmung am Psychrometer

- Probe wird mit möglichst wenig Luft eingeschlossen.
- Gleichgewichtseinstellung:  
 $\Psi$  (Probe) =  $\Psi$  (Luft)
- Messung der relativen Luftfeuchte über Taupunktbestimmung



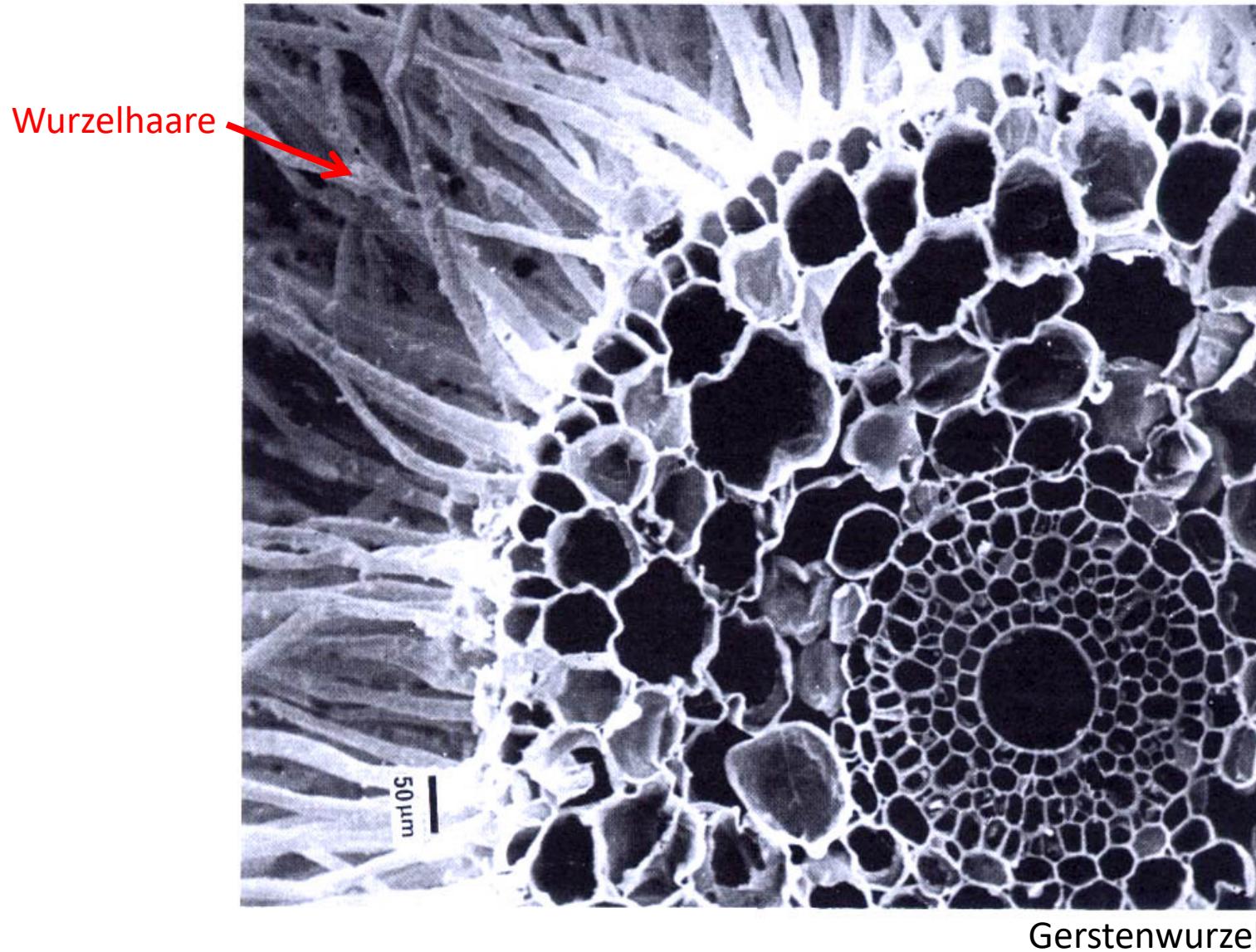
- Turgor ( $\Psi_p$ ): intakte Pflanzenteile in der Probenkammer
- Osmotisches Potential ( $\Psi_s$ ): Pflanzenpreßsaft

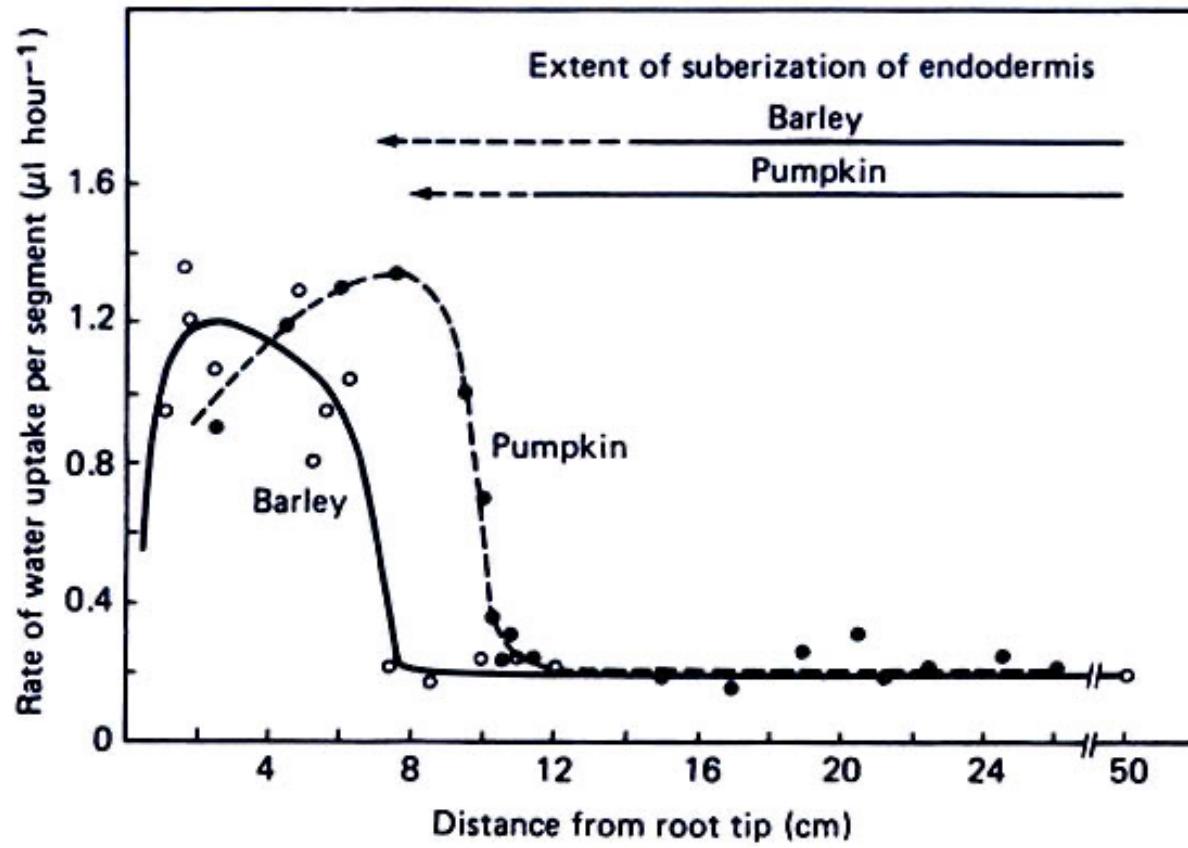
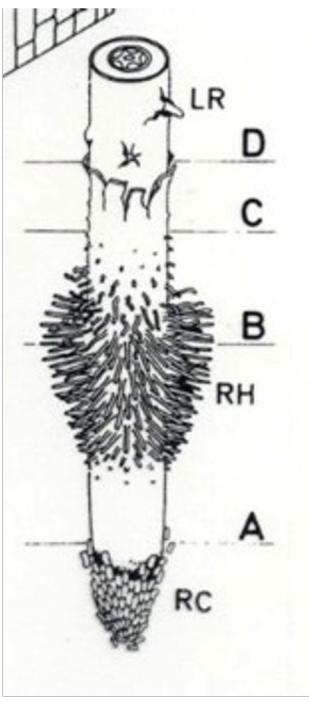
## $\Psi_s$ -Bestimmung durch Kryoskopie

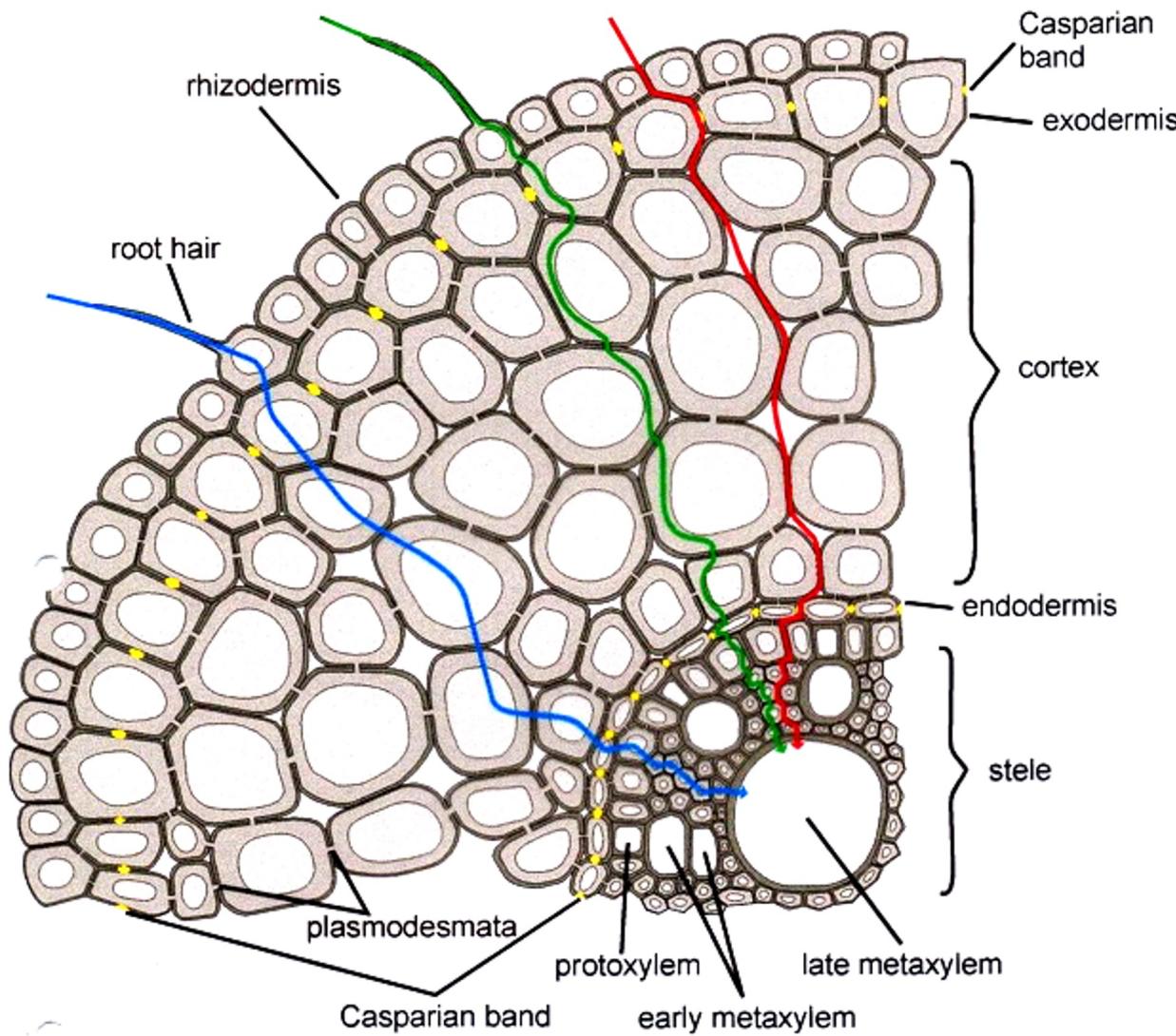


## 2. Wasseraufnahme

## Wasseraufnahme über die Wurzel



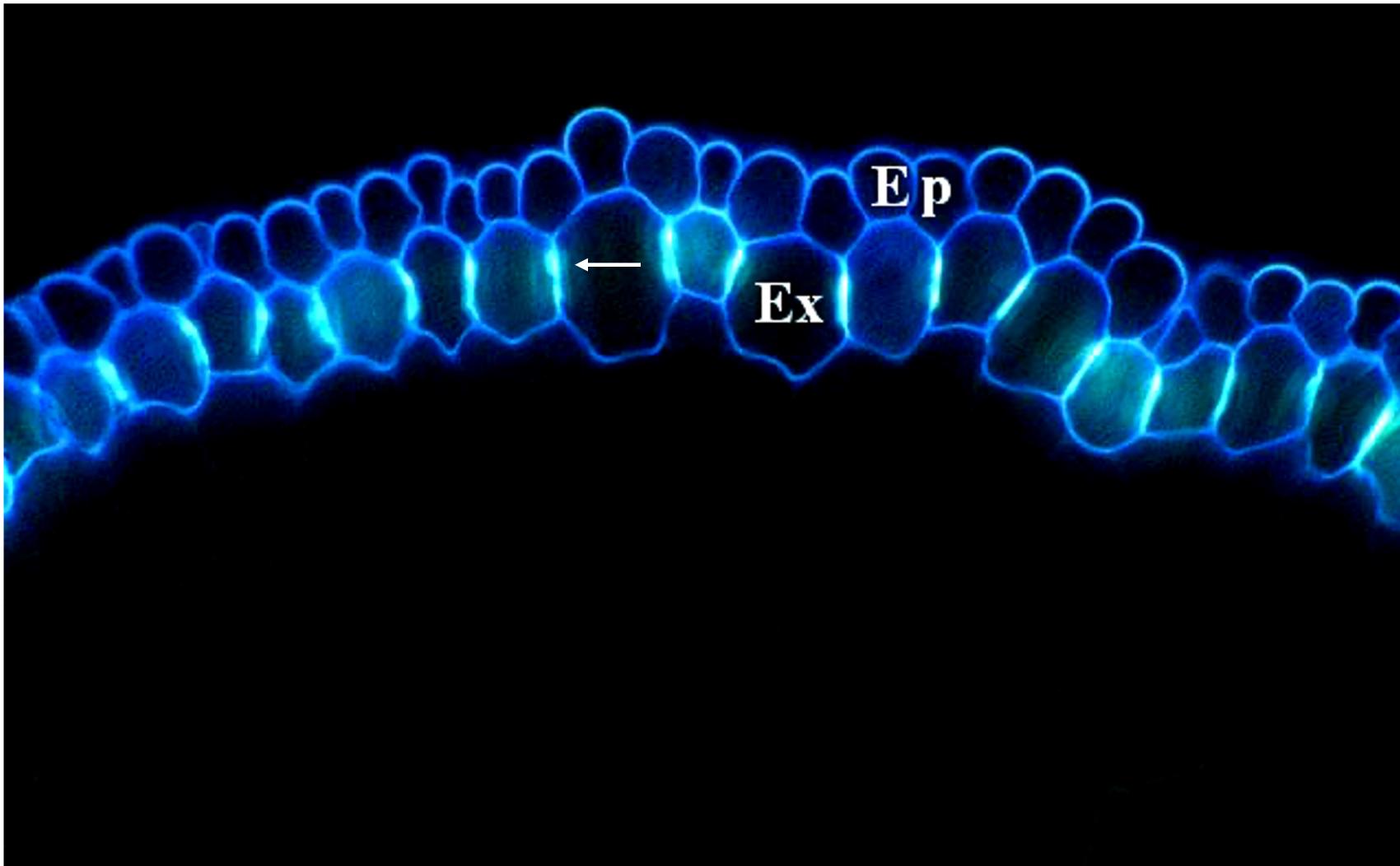




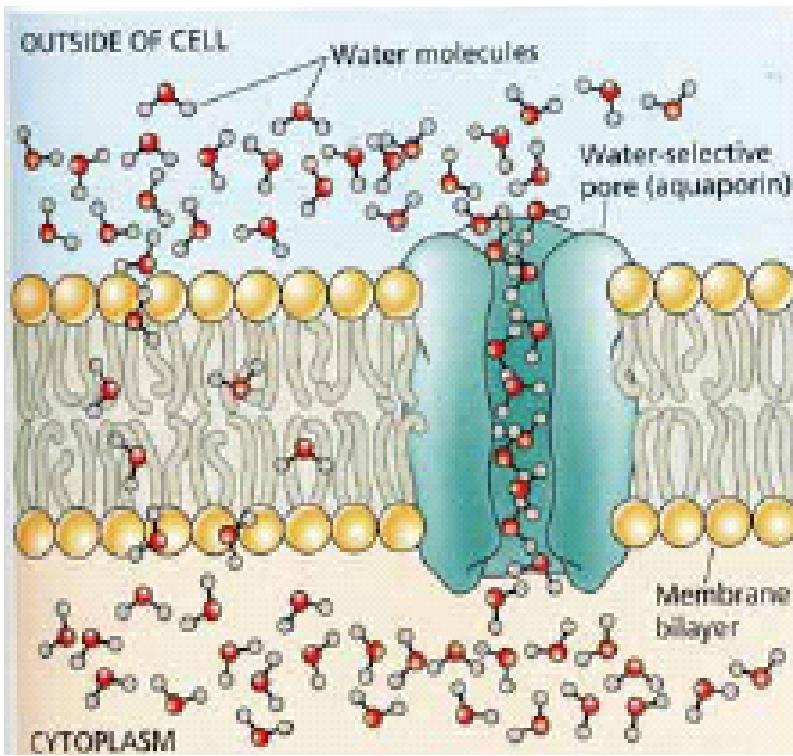
- apoplastic path
  - symplastic path
  - transcellular path
- } cell-to-cell path

Caspari-Streifen (Pfeil) in radiären Wänden der Exodermis der Zwiebel

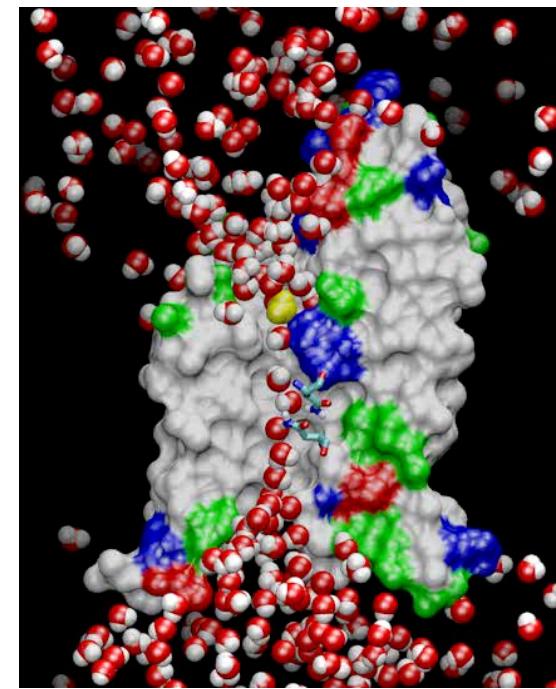
(Ep – Epidermalzellen, Ex – Exodermis)



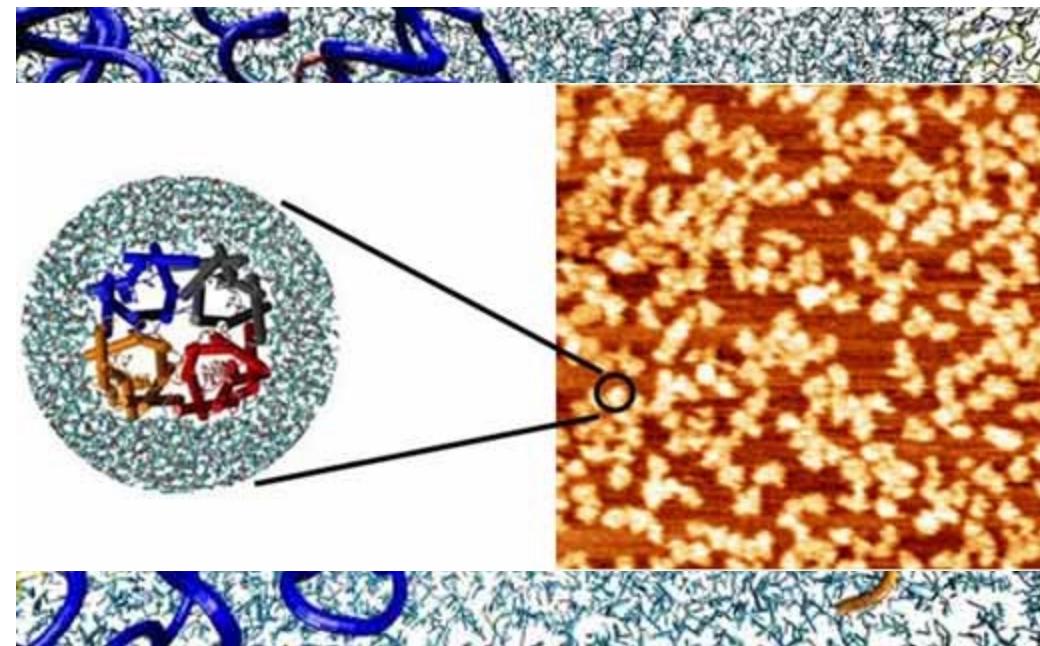
## Aquaporine



- Wasser gelangt überwiegend über membran gebundene Proteine in die Zelle.
- Nur 5 – 25 % werden direkt durch die Lipid Doppelschicht transportiert.



## Aquaporine in Lipid-Doppelmembran



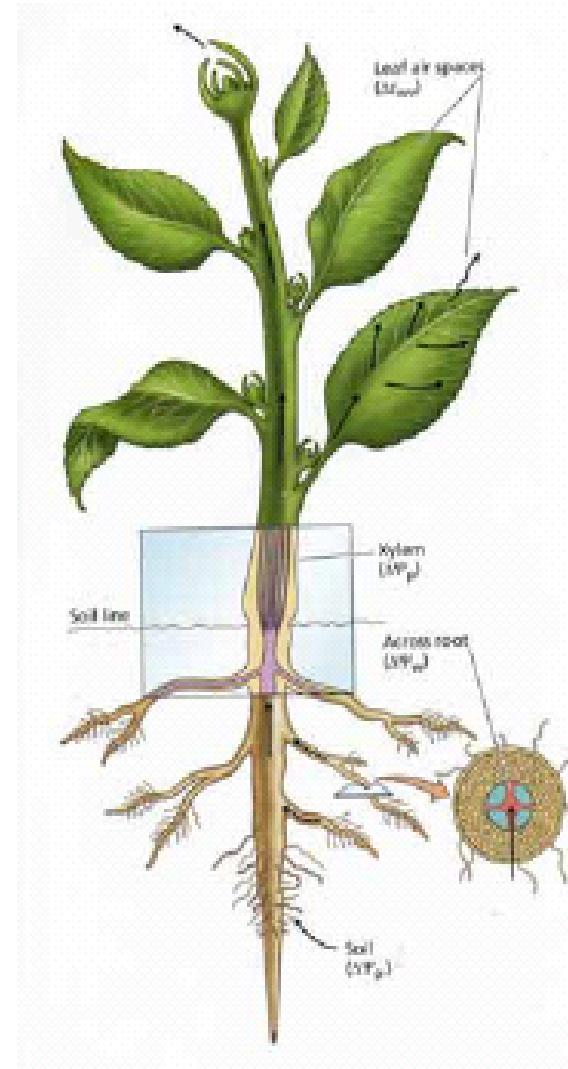
Treibende Kraft der Wasseraufnahme:

$$\Psi \text{ (Wurzel)} < \Psi \text{ (Boden)}$$

$\Psi_s$  in der Pflanze ist negativer als  $\Psi_m$ , das die Bindung des Wassers im Boden beschreibt.

$\Psi_s$  erzeugt Wurzeldruck (ca. 300-500 kPa).

↑  
-  $\Psi$

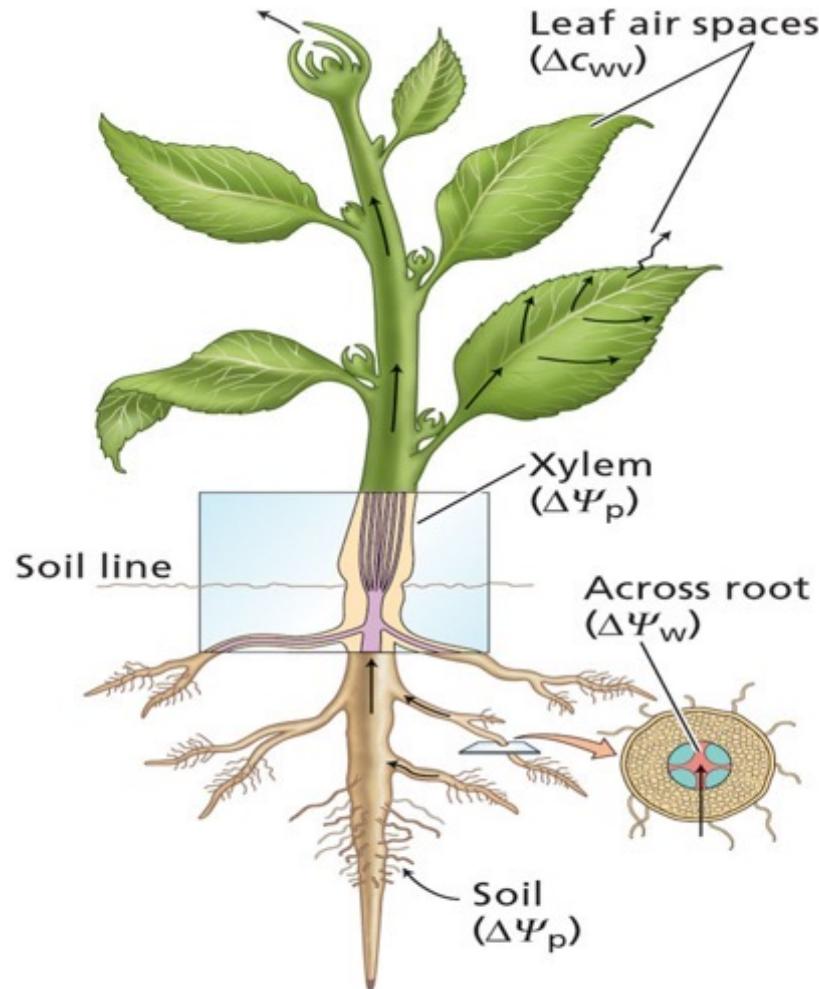


### **3. Wasserleitung durch die Pflanze**

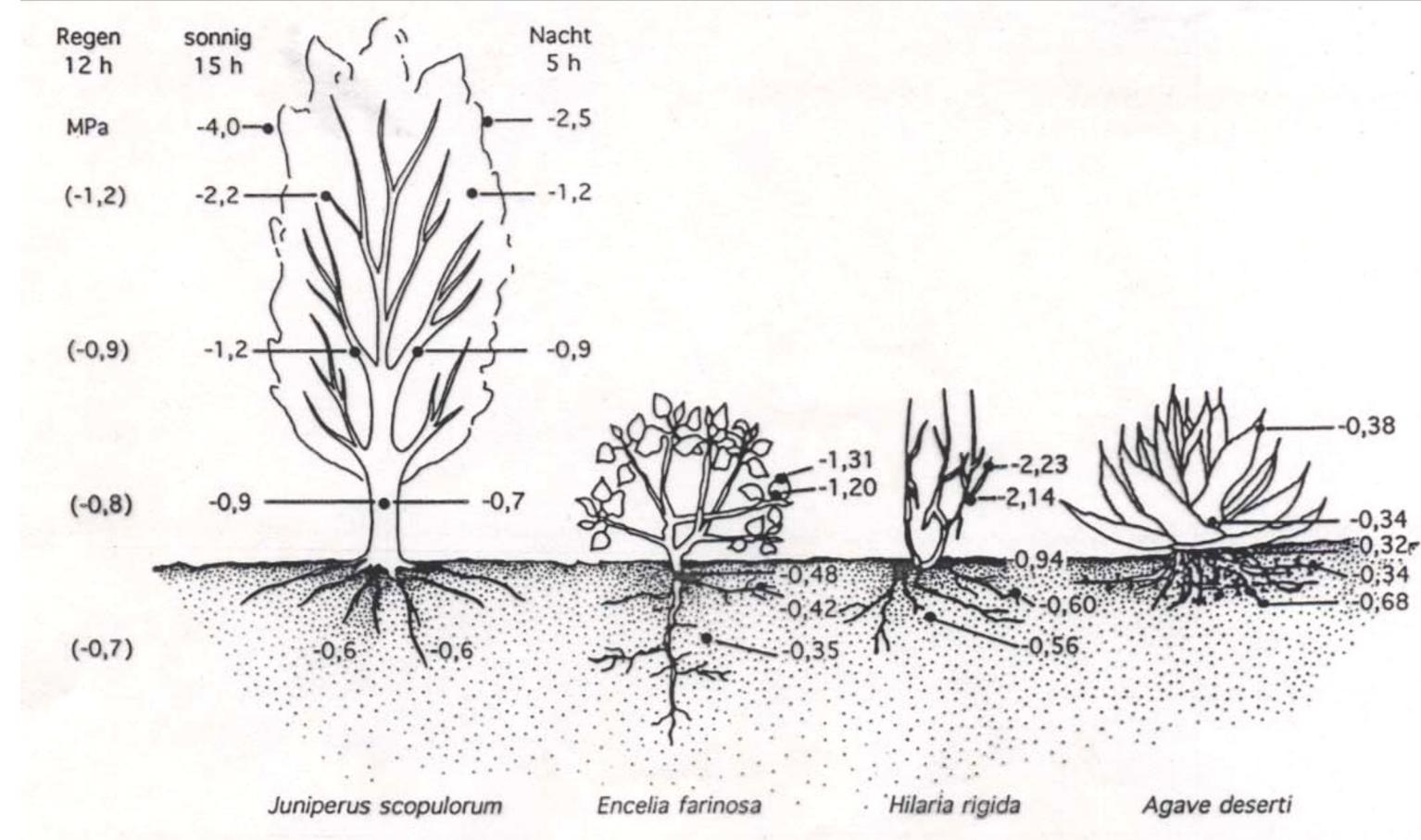
## Wasserleitung durch die Pflanze

Treibende Kraft des Wassertransports zu den Blättern:

$$\Psi(\text{Blätter}) < \Psi(\text{Sproß}) < \Psi(\text{Wurzel}) < \Psi(\text{Boden})$$

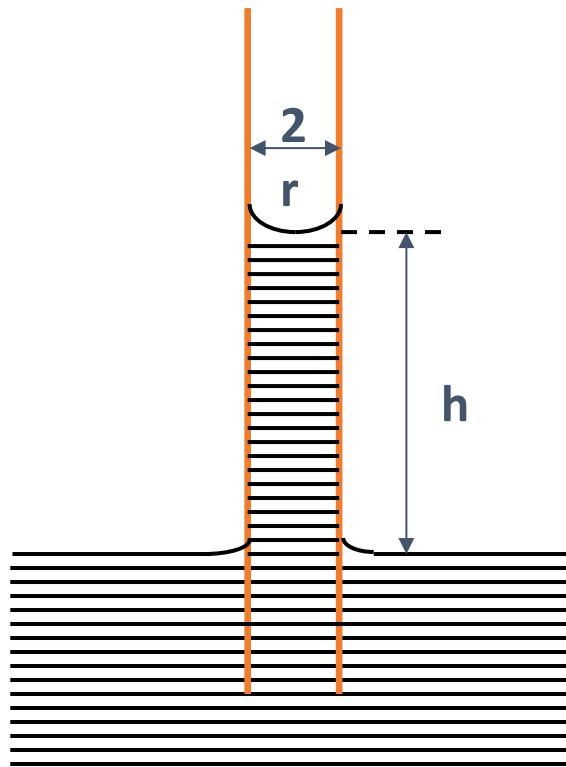


PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 4.1 © 2002 Sinauer Associates, Inc.



## Mechanismen der Wasserleitung im Sproß

- Wurzeldruck (durch osmotisches Potential der Wurzelzellen)
- Kapillarkräfte  
(durch Adhäsion an den Gefäßwänden und Kohäsion der Wassermoleküle)



$$P_{cap} = 2\sigma/r$$

$\sigma$  = Oberflächenspannung

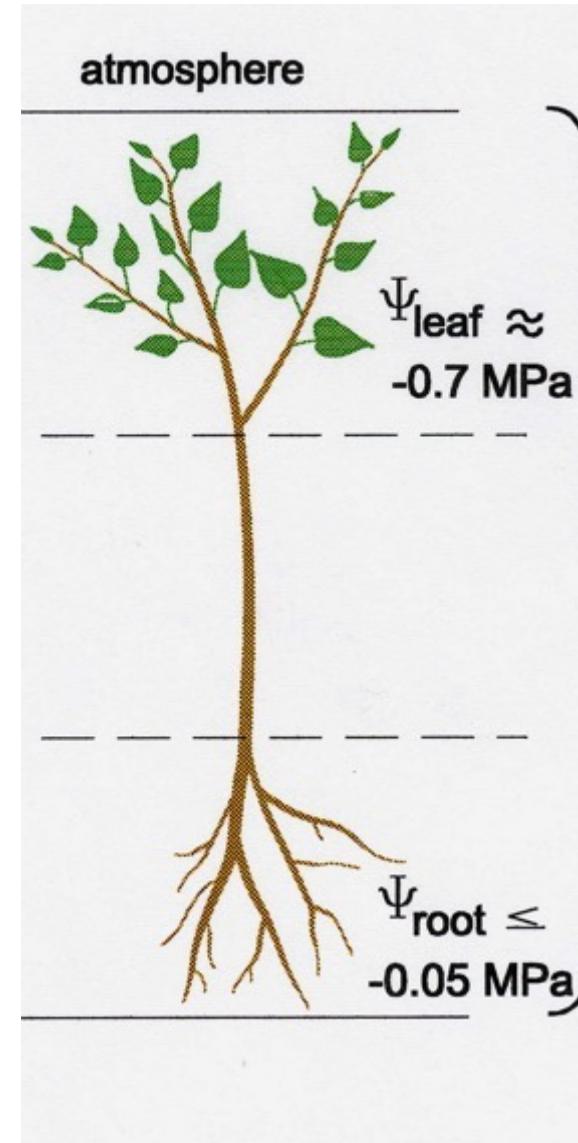
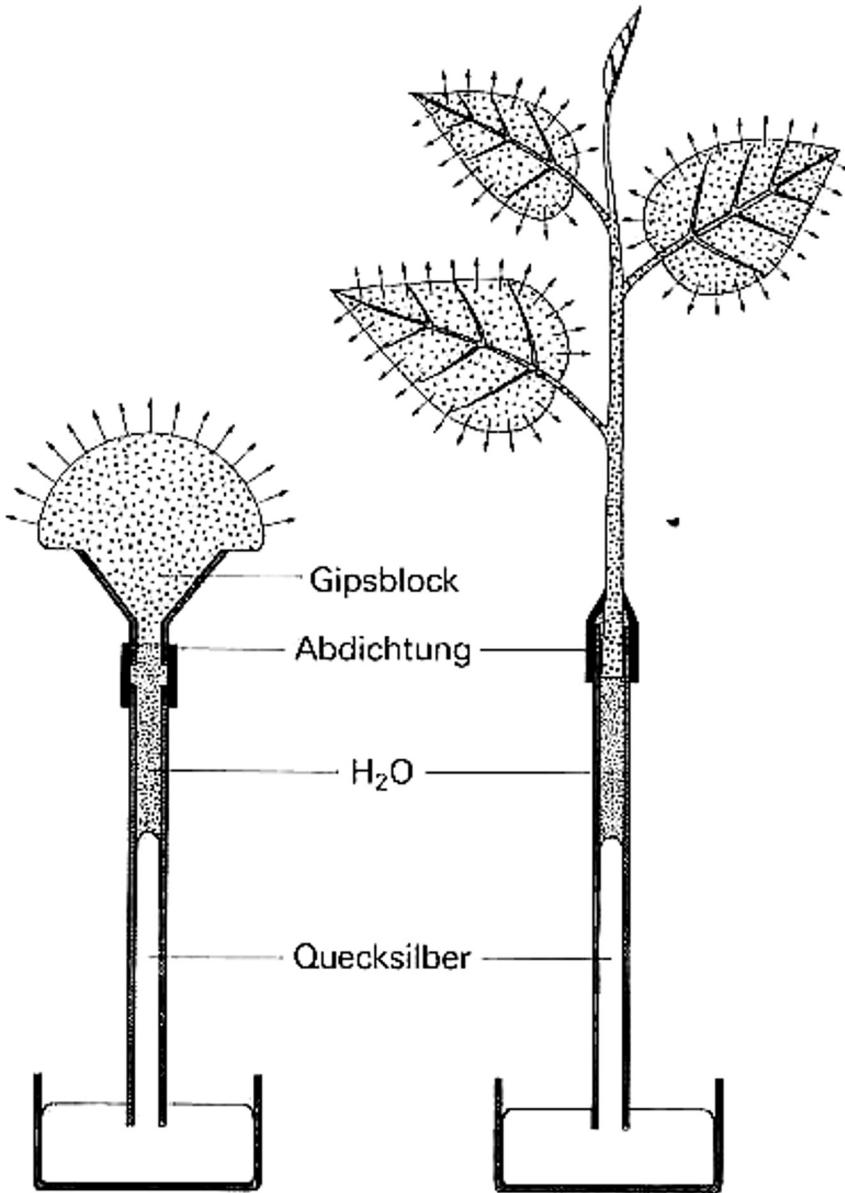
$$\sigma (H_2O) = 0,07275 \text{ N m}^{-1}$$

Gefäßdurchmesser: ca. 10 bis 700  $\mu\text{m}$

$$\begin{aligned} P_{cap} &= 2 \times 0,07275 \text{ N m}^{-1}/5 \mu\text{m} = \\ &= 2 \times 0,07275 \text{ N m}^{-1}/5 \times 10^{-6} \text{ m} = \\ &= 29100 \text{ N m}^{-2} = 29100 \text{ Pa} = \\ &= 0,0291 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kapillarkräfte sind zur Erklärung des Wasserflusses im Sproß zu gering!

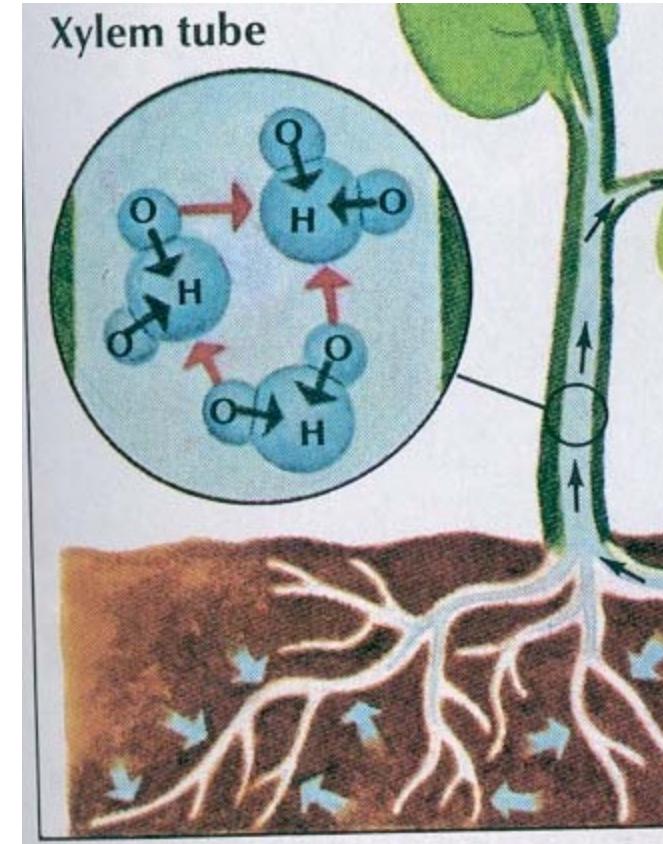
- Transpirationssog



## Voraussetzung für Wasserfluß durch Transpirationssog

- starke Kohäsion der Wassermoleküle  
(hohes Diplomoment!)
- Ausbildung von Wassersäulen
- hohe Zerreißfestigkeit des Wassers:  
Meßwerte bis 140 MPa

Transpirationssog ist die wichtigste treibende Kraft des Wasserflusses durch den Sproß.



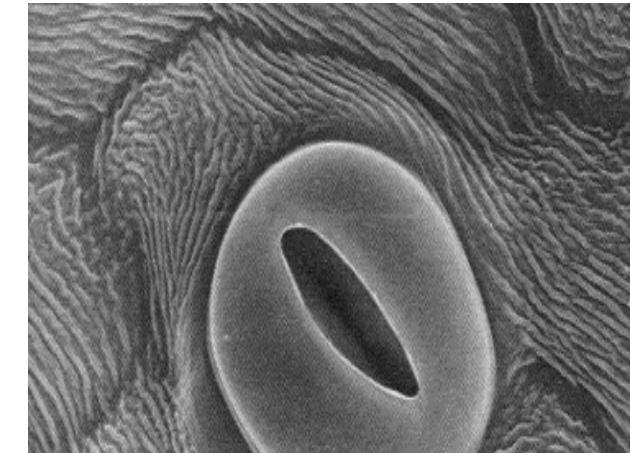
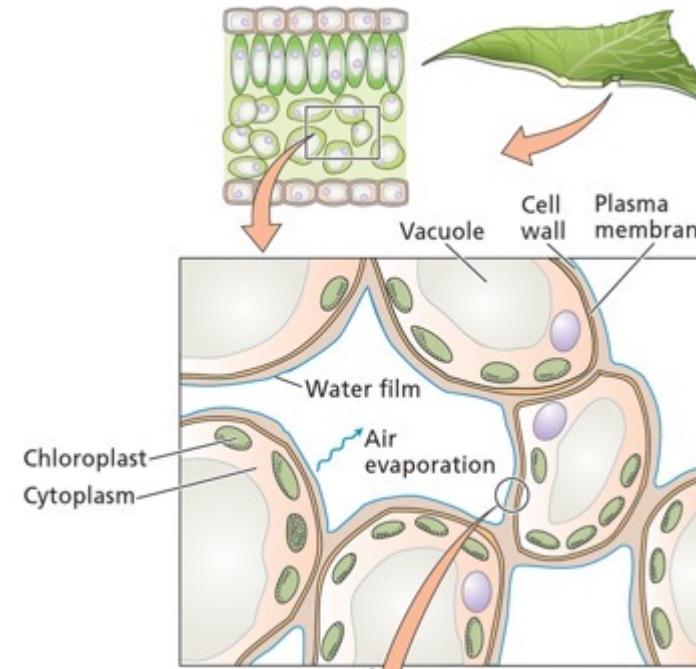
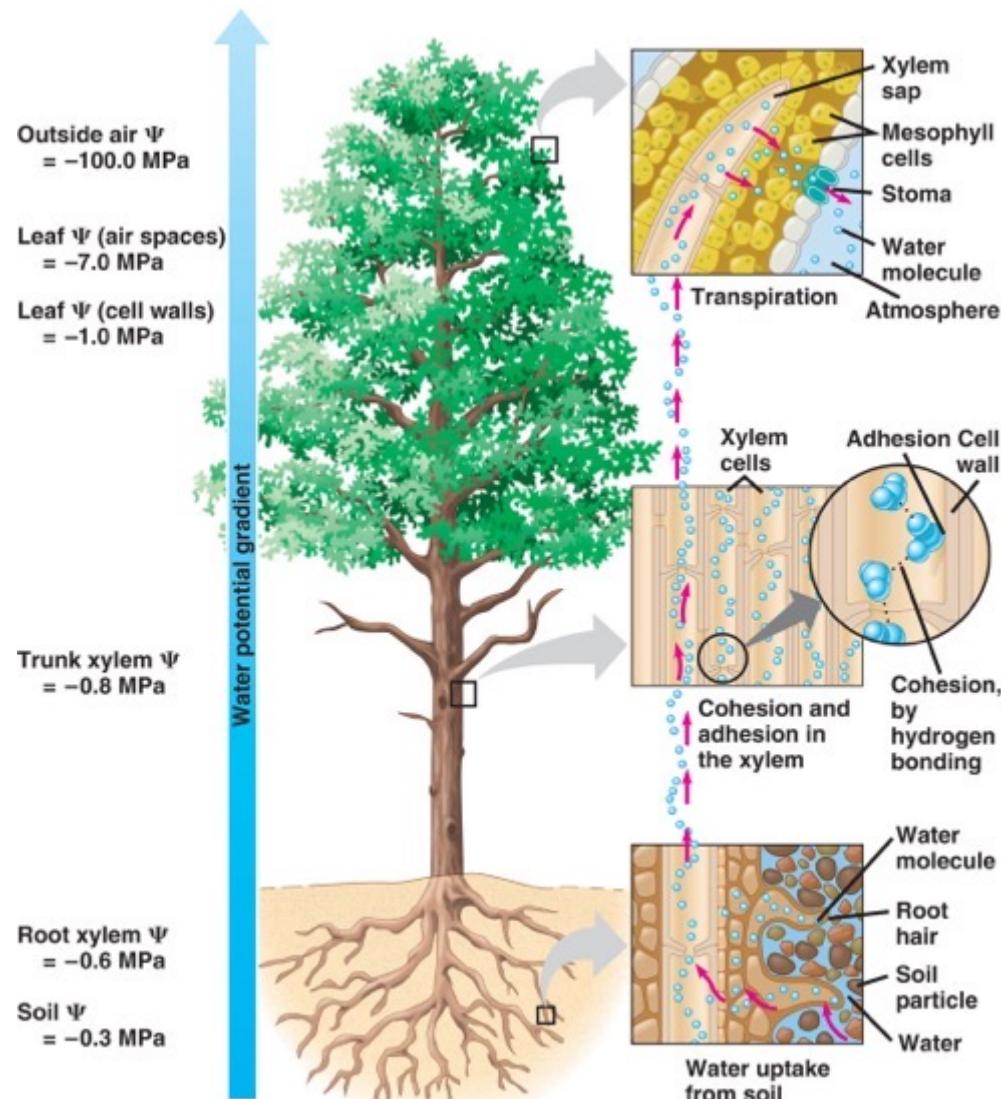
## Kohäsionstheorie des Wassertransports in Pflanzen



Josef Böhm 1893

Josef Böhm

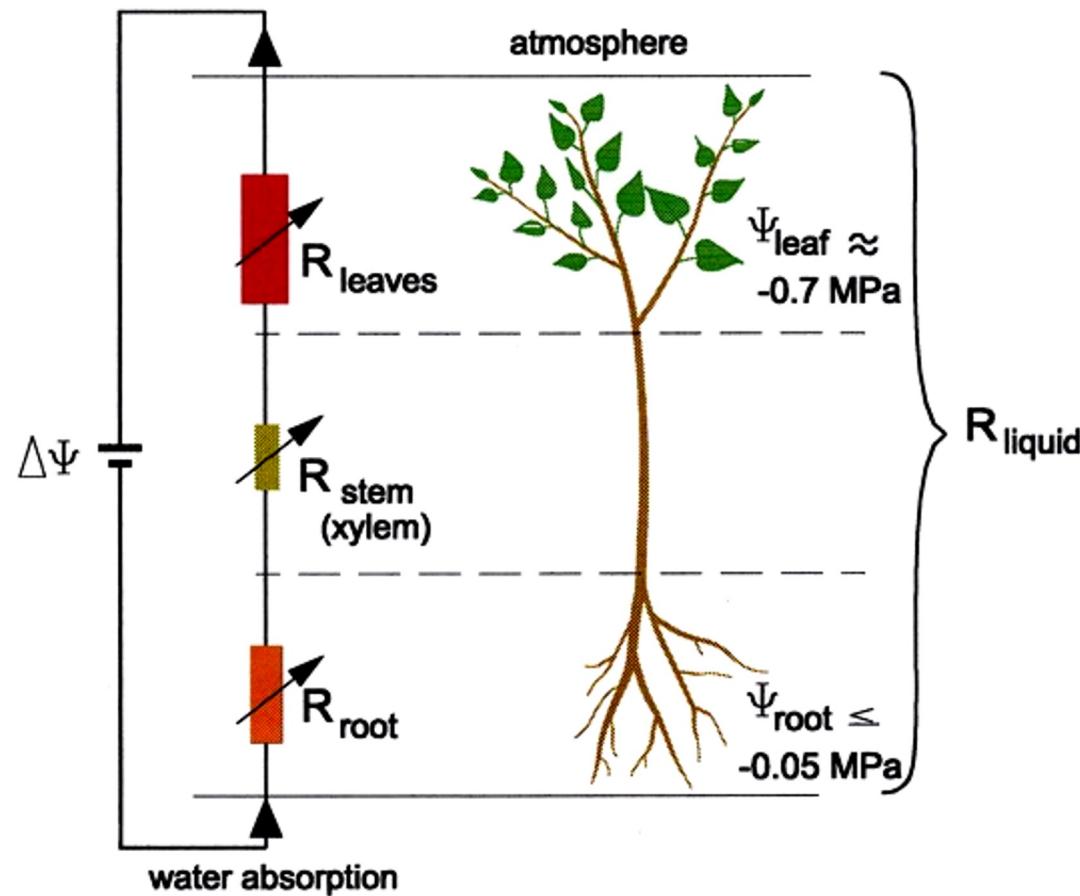
# Wasserfluß durch die Pflanze



Universelle Transportgleichung: **Fluß = Potentialgradient / Transportwiderstand**

$$I = U / R \quad (\text{Ohmsches Gesetz})$$
$$F = \Delta\Psi / \Sigma r_i$$

Boden-Pflanze-Atmosphären-Kontinuum  
(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)

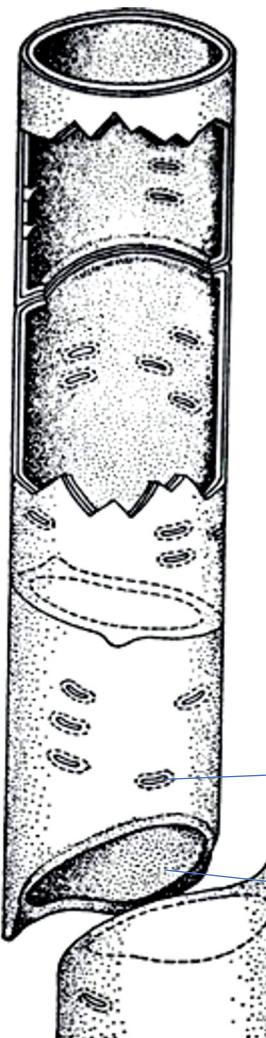


# Leitgefäß

Tracheiden



Tracheen



Gymnospermen:  
nur Tracheiden

Angiospermen:  
Tracheen und Tracheiden

$\varnothing$ : Tracheiden: 10 - 40  $\mu\text{m}$

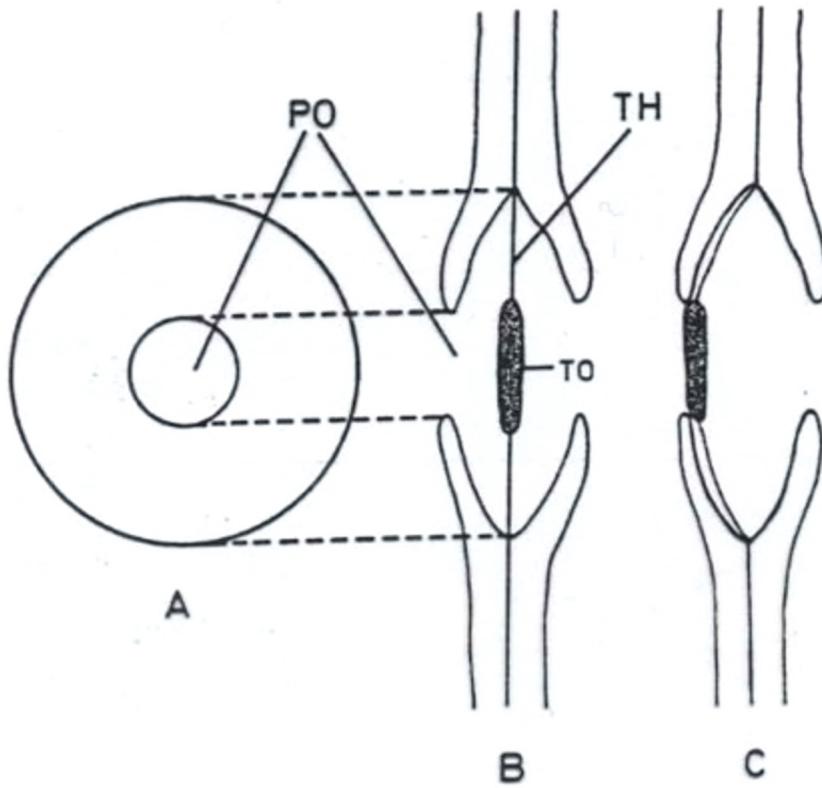
Tracheen: 60 - 700  $\mu\text{m}$

Länge: Tracheiden: 0,3 - 11 mm

Tracheen:  $\approx$  5 cm - 10 m

Tüpfel: Querleitung von Wasser

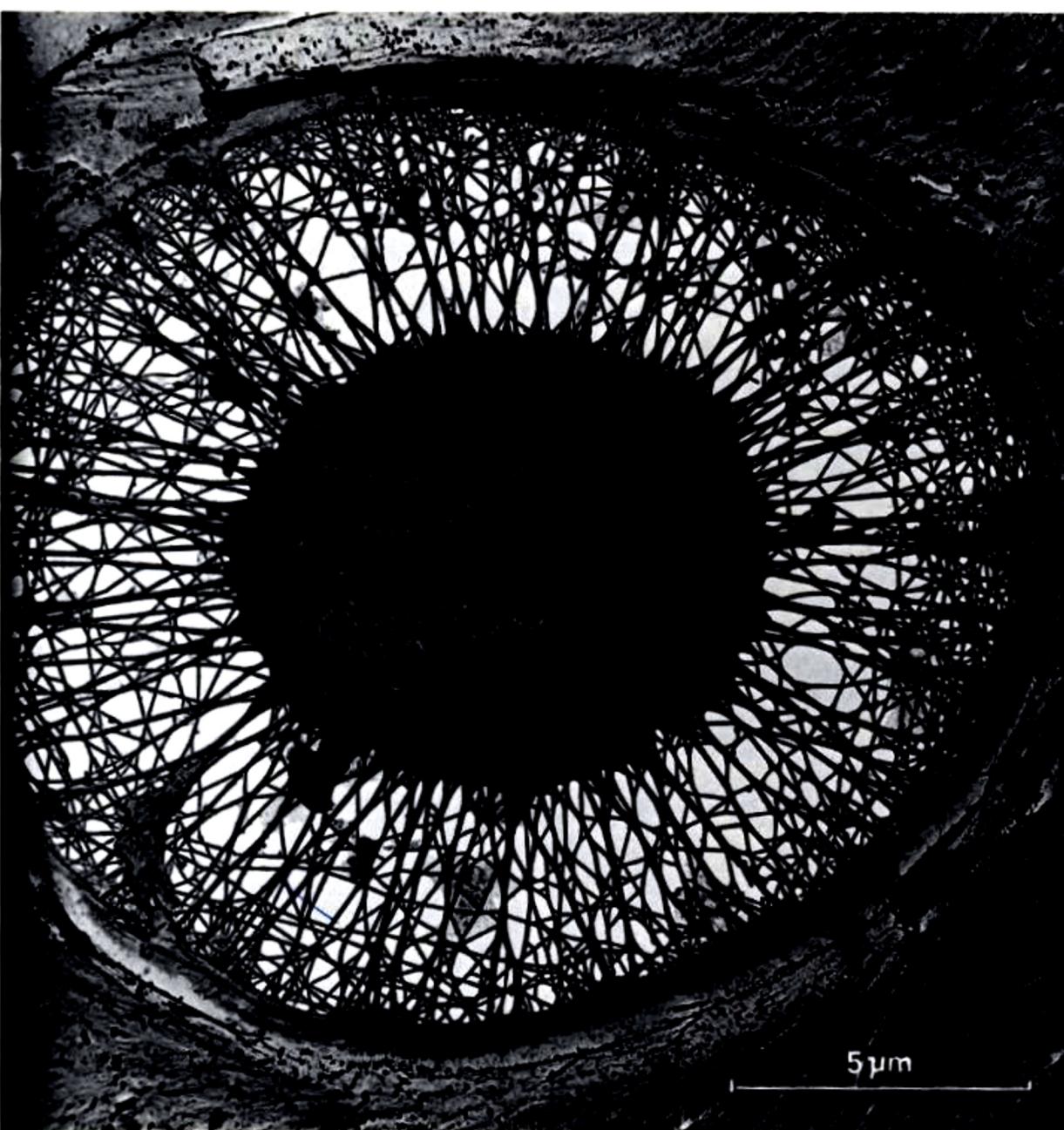
Querwände ganz oder teilweise durchbrochen



### Hoftüpfel einer Tracheide.

A in Flächenansicht,  
B u. C im Längsschnitt.  
PO = Porus,  
Eingang in den Tüpfelkanal,  
der sich zur  
Tüpfelschließhaut (TH)  
trichterartig erweitert.

TO = Torus,  
verdicktes scheibenförmiges  
Mittelstück der  
Tüpfelschließhaut,  
mit dem beide Pori  
eines Hoftüpfels wechselweise  
dank der elastischen  
Tüpfelschließhaut verschlossen  
werden können (C)  
(nach Fitting).



**Fig. 1.11.** Bordered pit of eastern hemlock (*Tsuga canadensis*), solvent-dried from green condition. The pit membrane consists of the net-like margo and the central torus. (Transmission electron micrograph courtesy W.A. Côté)

## Gesetz von Hagen und Poiseuille über die Wasserleitung in Kapillaren

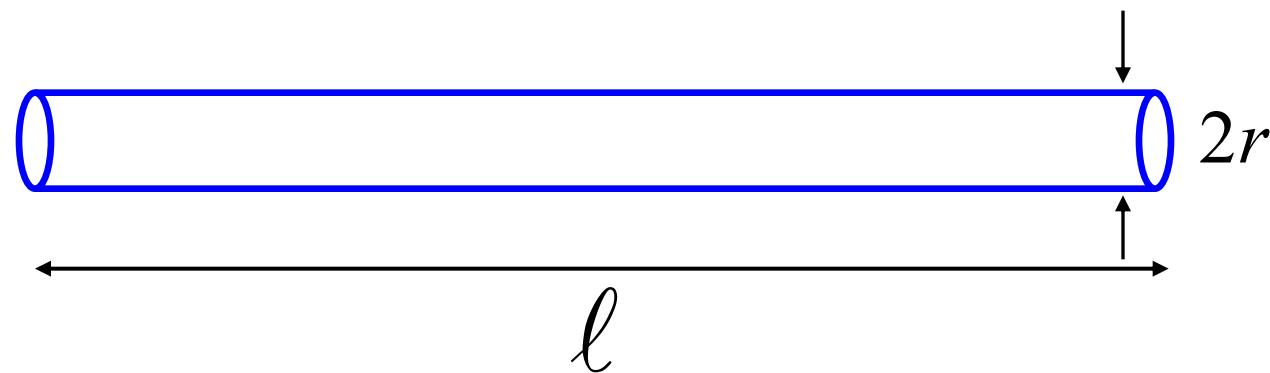
$$\frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot r^4}{8\eta \cdot \ell} \Delta P$$

$V$  = Volumen

$t$  = Zeit

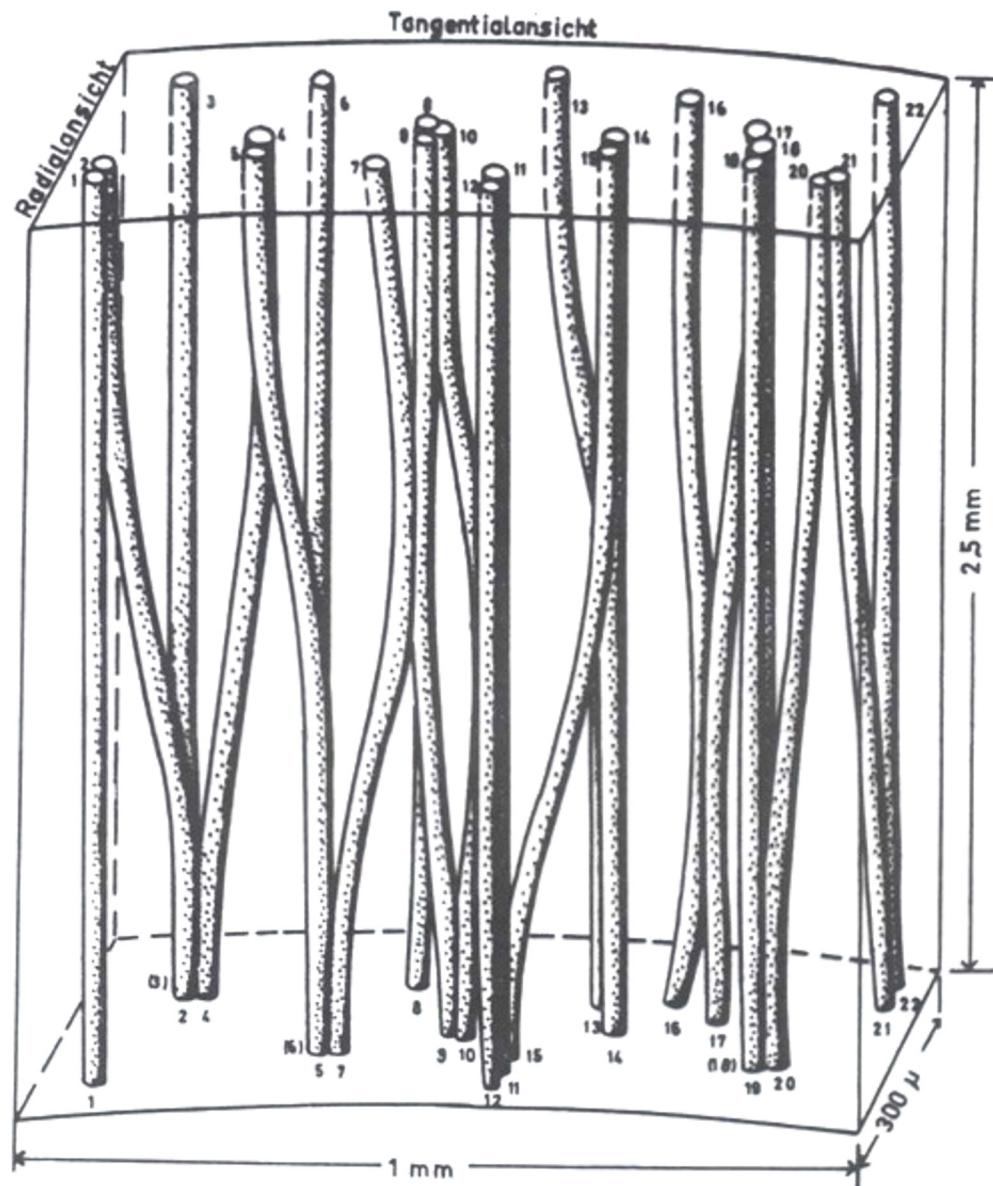
$\eta$  = Viskosität

$\Delta P$  = Druckdifferenz



**Tab. 2.1.24:** Hydraulische Leitfähigkeit des Xylems verschiedener Pflanzen in % des theoretischen Wertes für ideale Capillaren des gleichen Durchmessers. (Aus Zimmermann u. Brown)

Art	% des theoretischen Wertes
Weinstock (Liane)	100
Eiche (Wurzelholz)	53–84
Tanne	26–43
Birke (Wurzelholz)	34,8
Pappel (Stammholz)	21,7
Verschiedene Kräuter und Sträucher	12–22



Gefäßnetz: Verknüpfung der axial laufenden Gefäße in radialer und tangentia-  
ler Richtung zu einem Gefäßnetz, das Wasser nach allen Richtungen  
transportieren kann (Schema nach einer natürlichen Vorlage).

## Fließgeschwindigkeit

$$J_x = \frac{(r^2 / 8\eta)(dp / dx)}{= (m^2 / (Pa \cdot s)) (Pa / m) = m/s}$$

$J_x$  = Fließgeschwindigkeit in einem Xylelement (Flußdichte)

$r$  = Radius des Xylemelements ((nicht Widerstand!))

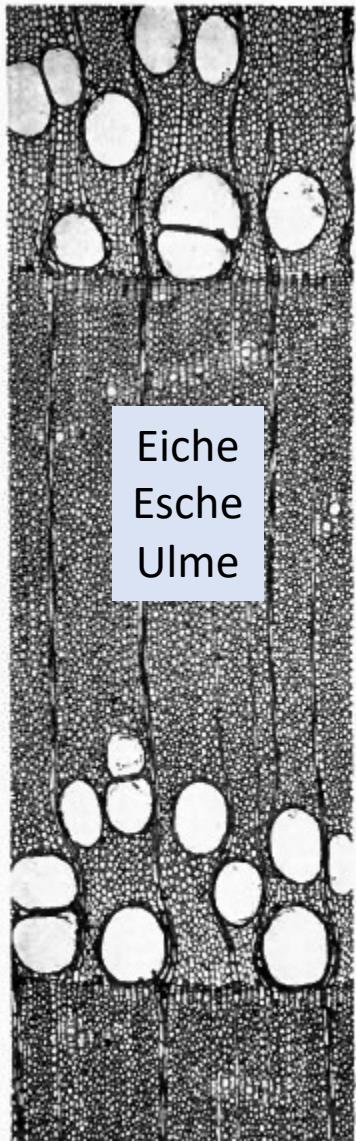
$\eta$  = Viskosität der Flüssigkeit ( $\eta = 10^{-3}$  Pa s für Wasser)

$dP/dx$  = hydrostatischer Gradient

### Hydraulische Leitfähigkeit:

$$L_p = J_x / \Delta\Psi = m \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$$

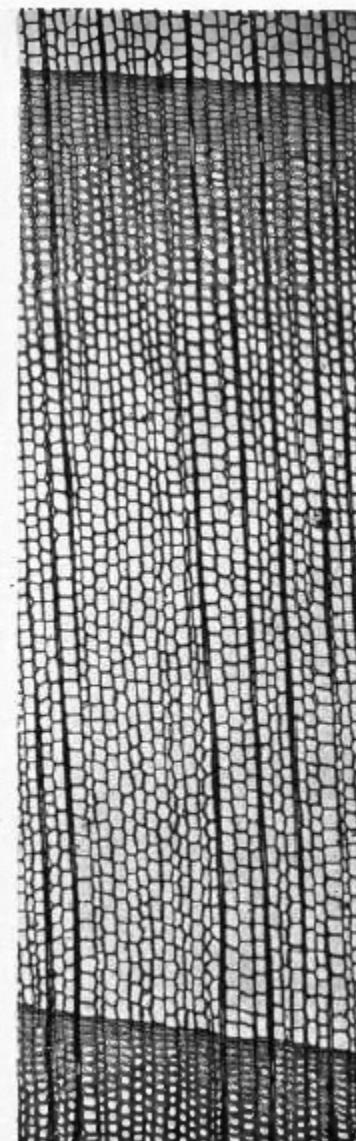
Angiospermen: Tracheenanordnung  
ringporig      zerstreutporig



Eiche  
Esche  
Ulme



Buche  
Linde  
Erle  
Birke  
Weide  
Pappel



Gymnospermen  
(nur Tracheiden)

Photomicrographs by the author.

FIG. 22.—Cross sections of a ring-porous hardwood (white ash), a diffuse-porous hardwood (red gum), and a non-porous or coniferous wood (eastern hemlock).  $\times 30$ .

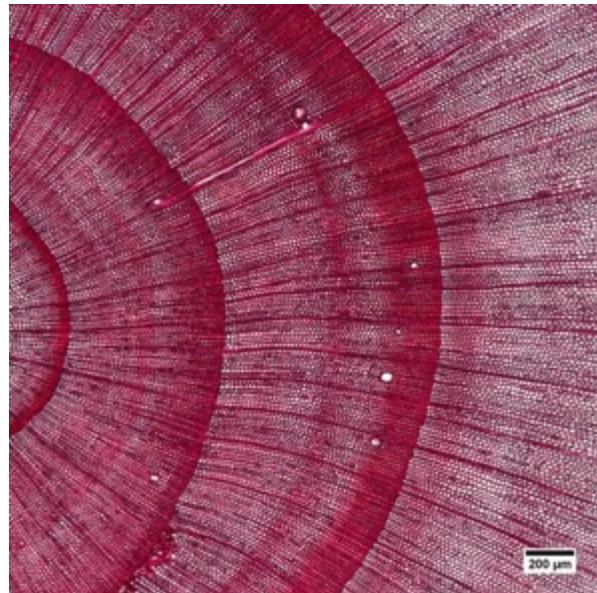
# Gefäßgröße bestimmt hydraulische Leitfähigkeit ( $K_p$ )

## *Picea abies*

Gefäßgröße 8,64 µm

Gefäßdichte 3.930 n mm<sup>-2</sup>

$$K_p = 1.01 \text{ kg m}^{-1} \text{ MPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

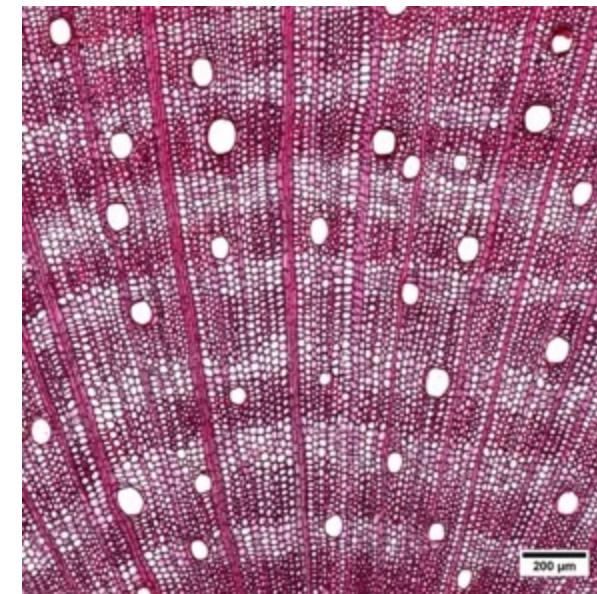


## *Ficus benjamina*

Gefäßgröße 60,95 µm

Gefäßdichte 9,53 n mm<sup>-2</sup>

$$K_p = 4.53 \text{ kg m}^{-1} \text{ MPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$$



# Wassertransport in das Blatt

TABLE 7. Typical ratios of foliage area ( $A_f$ ) to sapwood area ( $A_s$ ) of conifers.

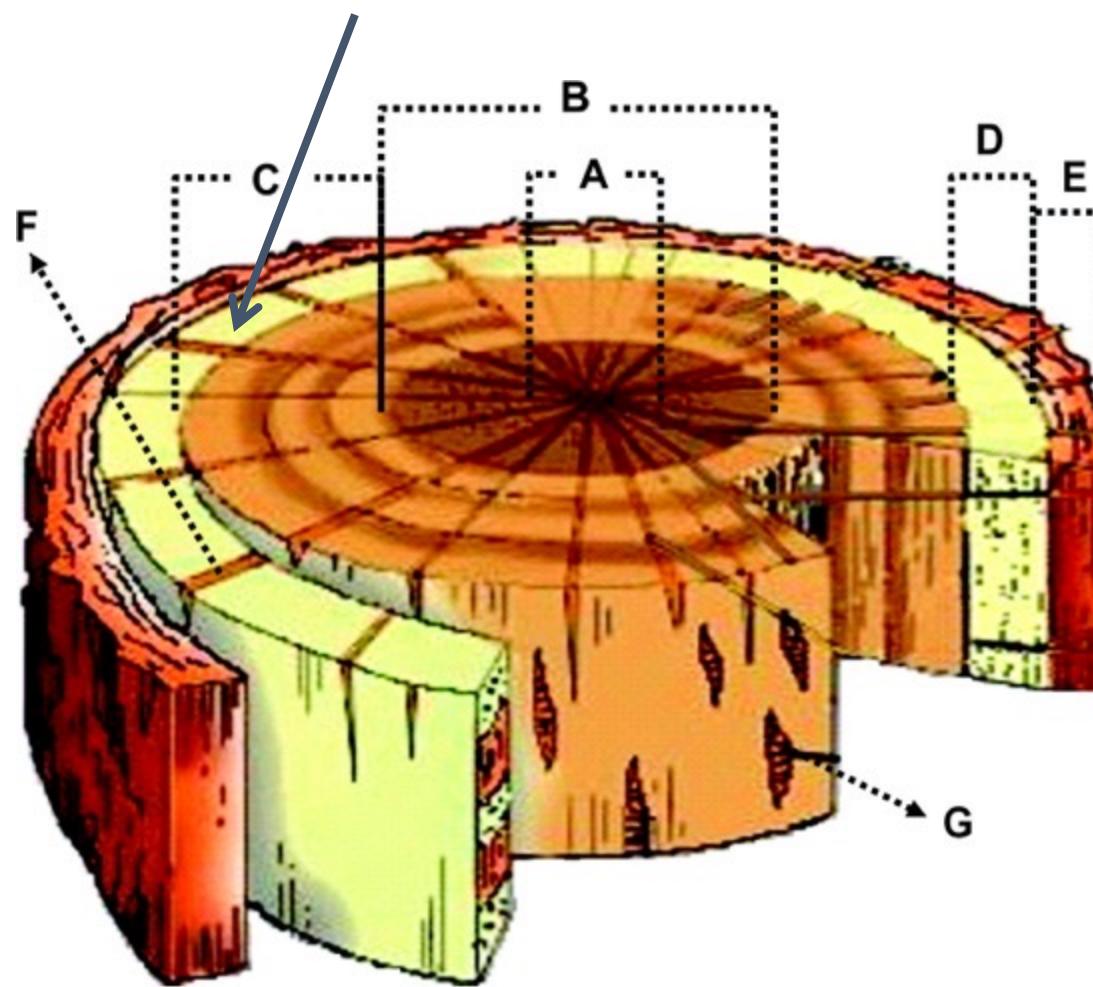
Species	Common name	$A_f:A_s$ ( $m^2 m^{-2}$ )
Mesic environments		
<i>Abies balsamea</i>	Balsam fir	6700–7100
<i>A. amabilis</i>	Pacific silver fir	6300
<i>A. grandis</i>	Grand fir	5100
<i>A. lasiocarpa</i>	Subalpine fir	7500
<i>Larix occidentalis</i>	Western larch	5000
<i>Picea abies</i>	Norway spruce	4600
<i>P. engelmanni</i>	Engelmann spruce	2900–3400
<i>P. sitchensis</i>	Sitka spruce	4500
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas fir	3800–7000
<i>Tsuga heterophylla</i>	Western hemlock	4600
<i>T. mertensiana</i>	Mountain hemlock	1600
Average		5000 ± 500
Xeric environments		
<i>Juniperus monosperma</i>	One-seeded juniper	800
<i>J. occidentalis</i>	Western juniper	1800
<i>Pinus contorta</i>	Lodgepole pine	1100–3000
<i>P. edulis</i>	Pinyon pine	2500
<i>P. nigra</i>	Austrian pine	1500
<i>P. ponderosa</i>	Ponderosa pine	1900
<i>P. sylvestris</i>	Scotch pine	1400
<i>P. taeda</i>	Loblolly pine	1300–3000
Average		1800 ± 200

Source: Margolis et al. 1995.

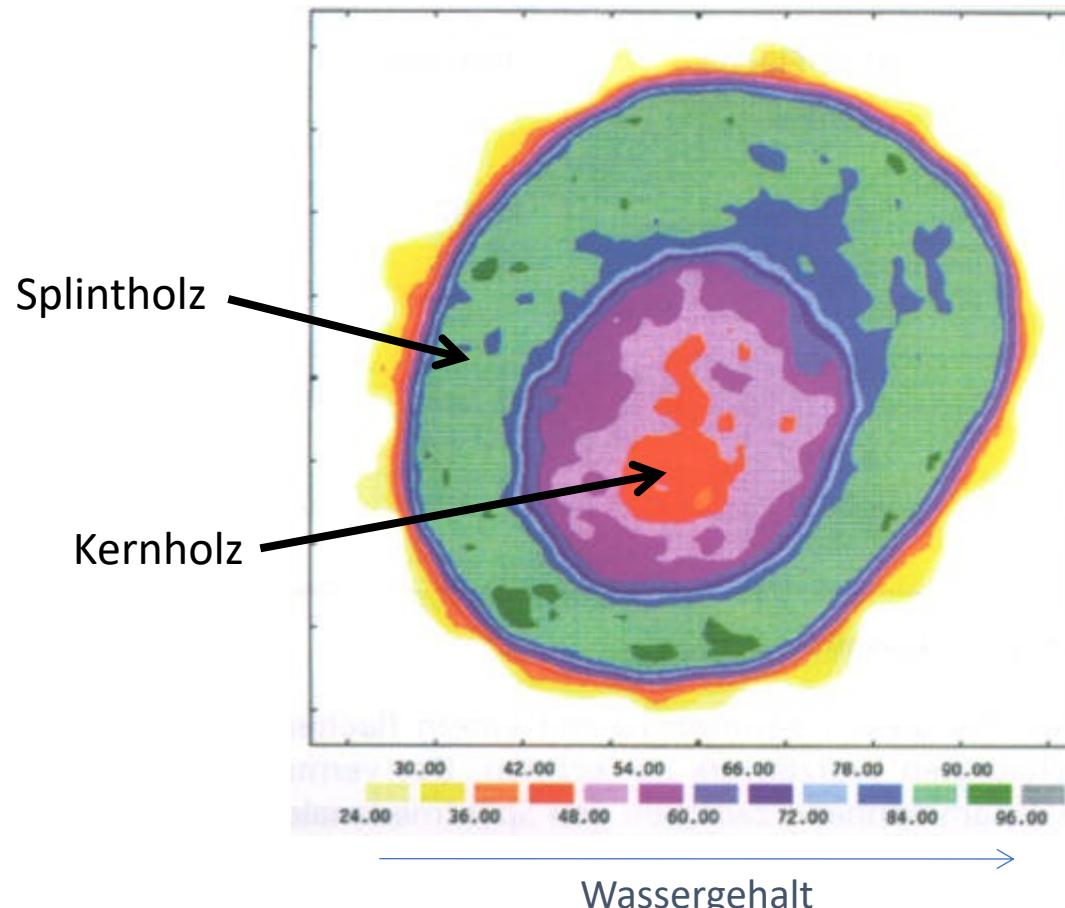


Quotient versorgte Blattfläche : leitende Querschnittsfläche

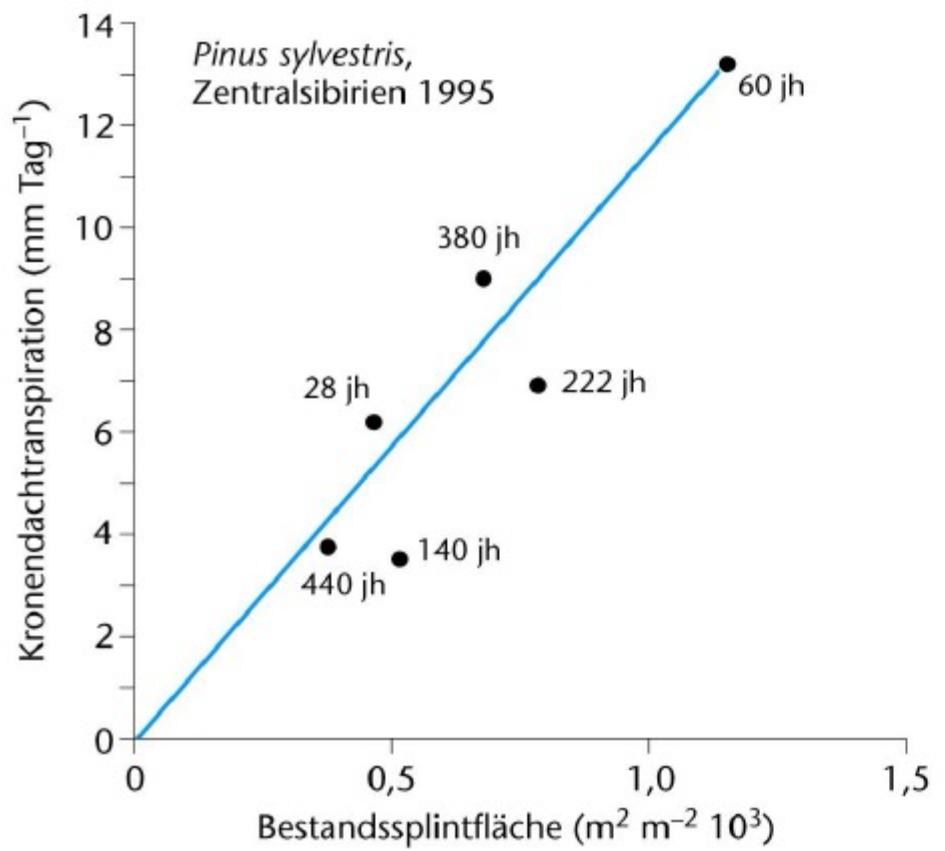
### Splintholz bei der Eiche



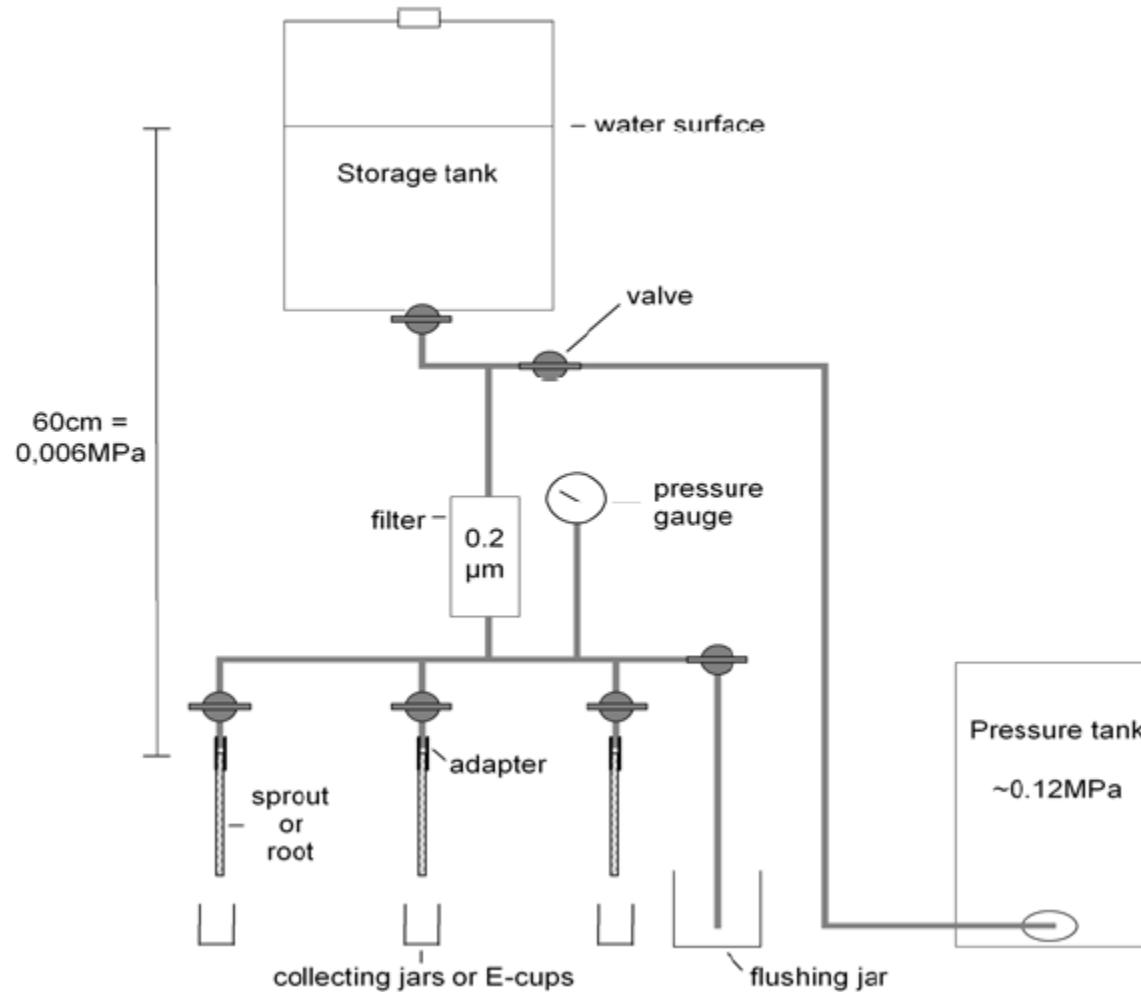
## Wasserleitendes Holz: Splintholz (sapwood)



*Pinus sylvestris*



## Bestimmung der Hydraulischen Leitfähigkeit nach Sperry



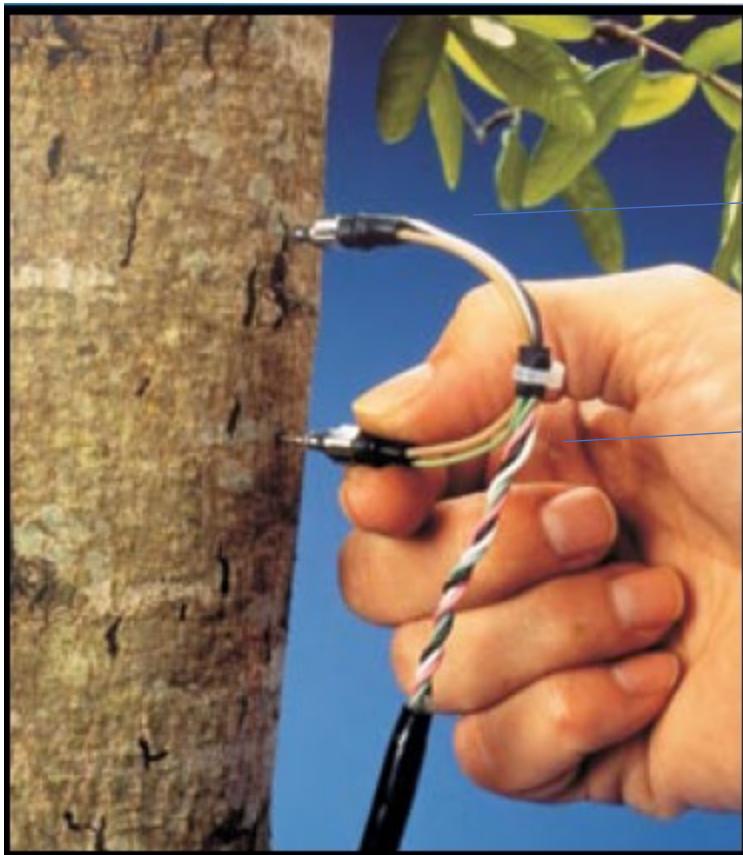
# Spezifische Leitfähigkeit

Pflanzentyp	spezifische Leitfähigkeit des Wassers (m s <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> )	maximale Geschwindigkeit (m h <sup>-1</sup> )	Gefäßdurchmesser (μγ m)	Gefäßlänge (m)
Koniferen	5–10 × 10 <sup>4</sup>	1 – 2	10 – 40	0,002–0,005
Zerstreutporige Angiospermen	5–50 × 10 <sup>4</sup>	1 – 6	5–150	1–2
Ringporige Angiospermen	50–300 × 10 <sup>4</sup>	4–44	10–600	10
Krautige Pflanzen	30–60 × 10 <sup>4</sup>	10–60	10–500	1–2
Lianen	300–500 × 10 <sup>4</sup>	150	600	ca. 10

Tabelle 14.4 Mittägliche Spitzengeschwindigkeiten des Transpirationsstromes verschiedener Pflanzentypen. Gemessen mit der thermoelektrischen Methode (aus Huber)

Objekt	Geschwindigkeit (m · Std <sup>-1</sup> )
Nadelhölzer, immergrün	1,2
Lärche	1,2
Mediterrane Hartlaubgewächse	0,4–1,5
Sommergrüne zerstreutporige Laubhölzer	1–6
Ringporige Laubhölzer	4–44
Krautige Pflanzen	10–60
Lianen	150

## Saftflußmessung



beheizter Temperaturfühler

unbeheizter Temperaturfühler  
(Referenz)

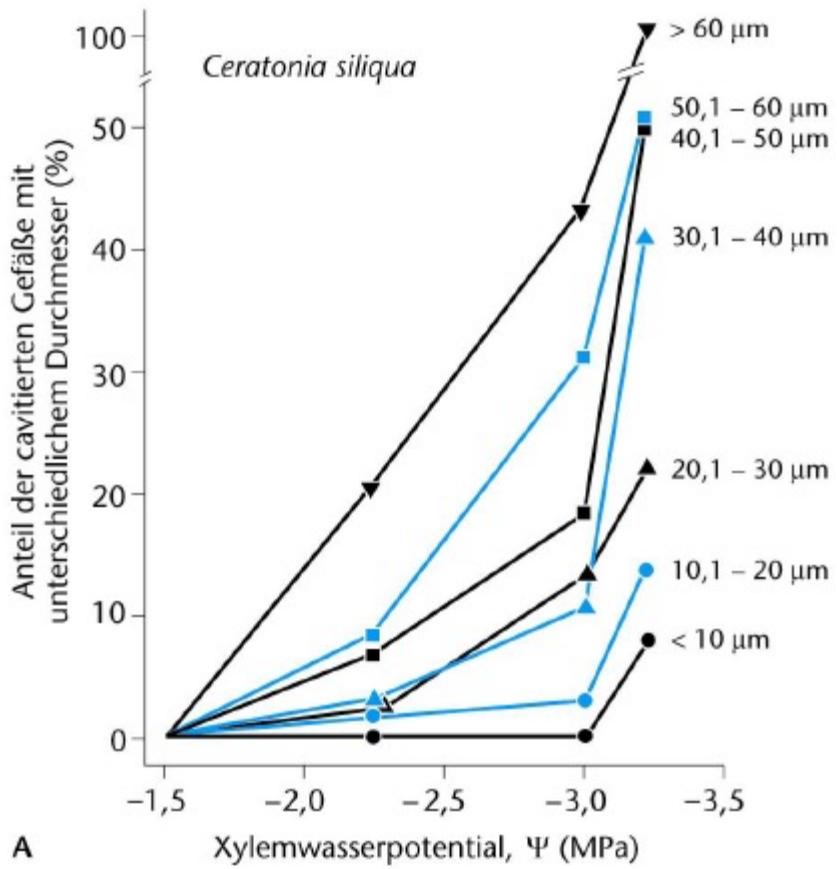
# Embolism



Figure 8. Embolisms, or pockets of air, form inside xylem vessels when the water breaks. In this frozen leaf stalk from a sunflower, some of the vessels—the large circles—contain water, which appears as black ice. Other xylem pipes reveal embolisms, which show up white, showing the insides of the pipes. Embolisms are found constantly during transpiration, and they are constantly repaired. They disappear at night.

# Embolism and vessel diameter

Die Abhängigkeit der Cavitation unterschiedlich großer Xylemgefäß vom Wasserpotential des Xylems bei mehrtagiger Bodenaustrocknung.

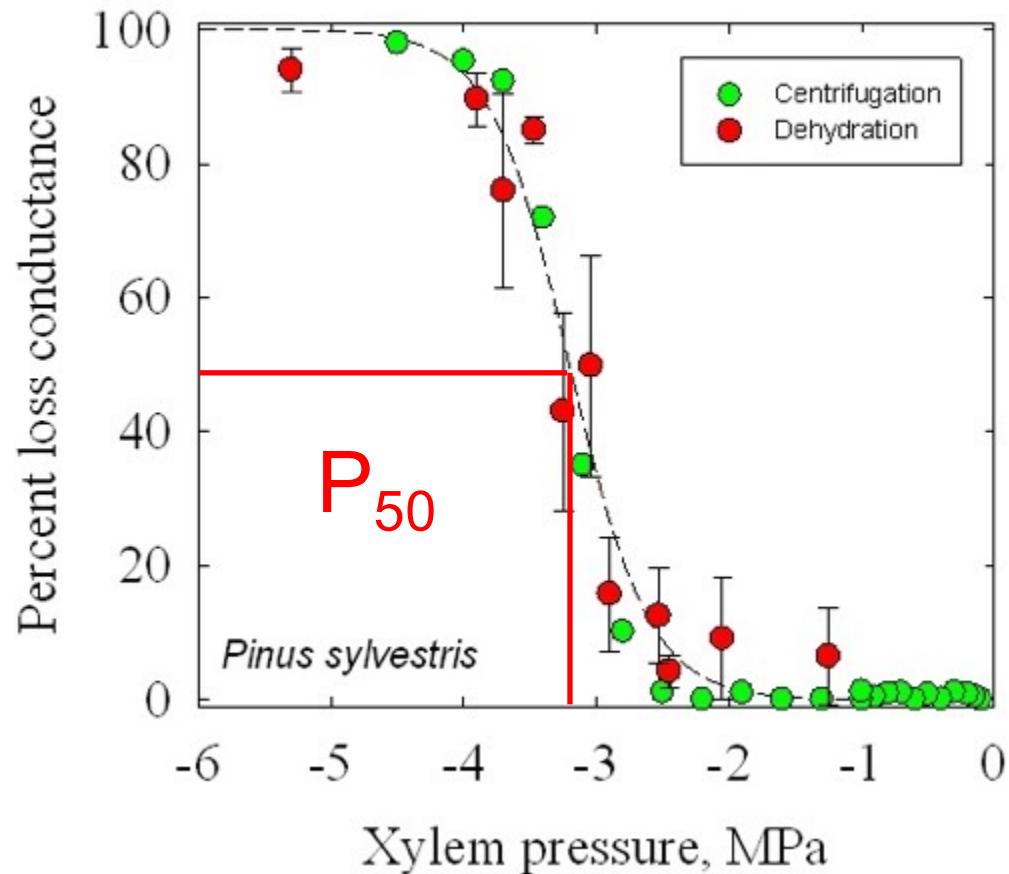


Johannisbrotbaum

Bei einem Wasserpotential von -3,3 MPa sind bei *Ceratonia siliqua* alle großen Gefäße, aber nur 10% der kleinen Gefäße cavitiert.

# Vulnerabilitätskurve

Relative Transportkapazität als Funktion des Xylemdrucks

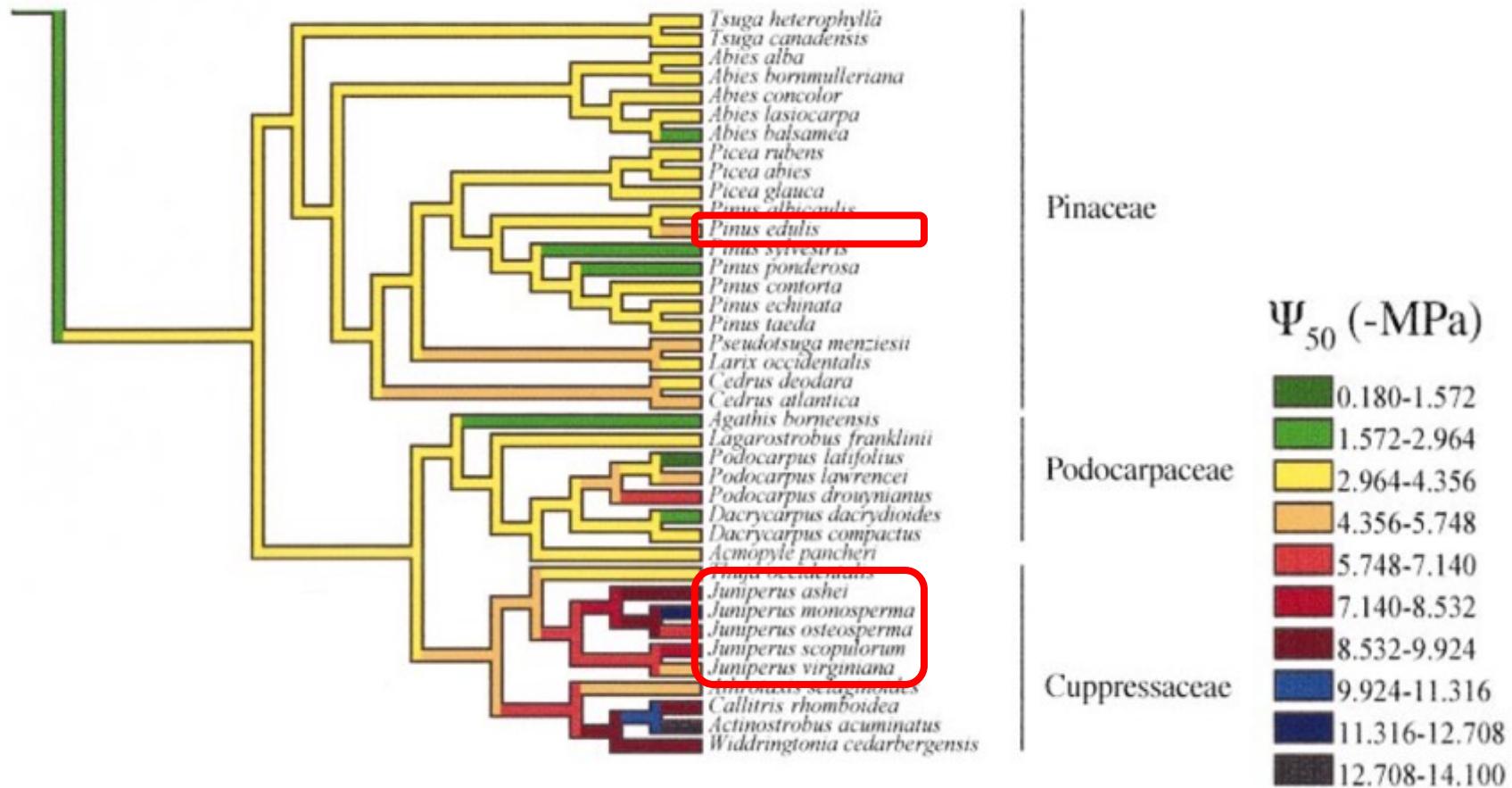


Kennwert  $P_{50}$ : Xylemdruck,  
bei dem 50% der  
hydraulischen Leitfähigkeit  
verloren gehen

# $P_{50}$ -Kennwerte im phylogenetischen Vergleich

*Pinus edulis*  
*Juniperus monosperma*

$P_{50} = -4.4$  bis  $-5.7$  MPa  
 $P_{50} = -11.3$  bis  $-12.7$  MPa



## **4. Transpiration**

# Stomatäre Leitfähigkeit

abhängig von

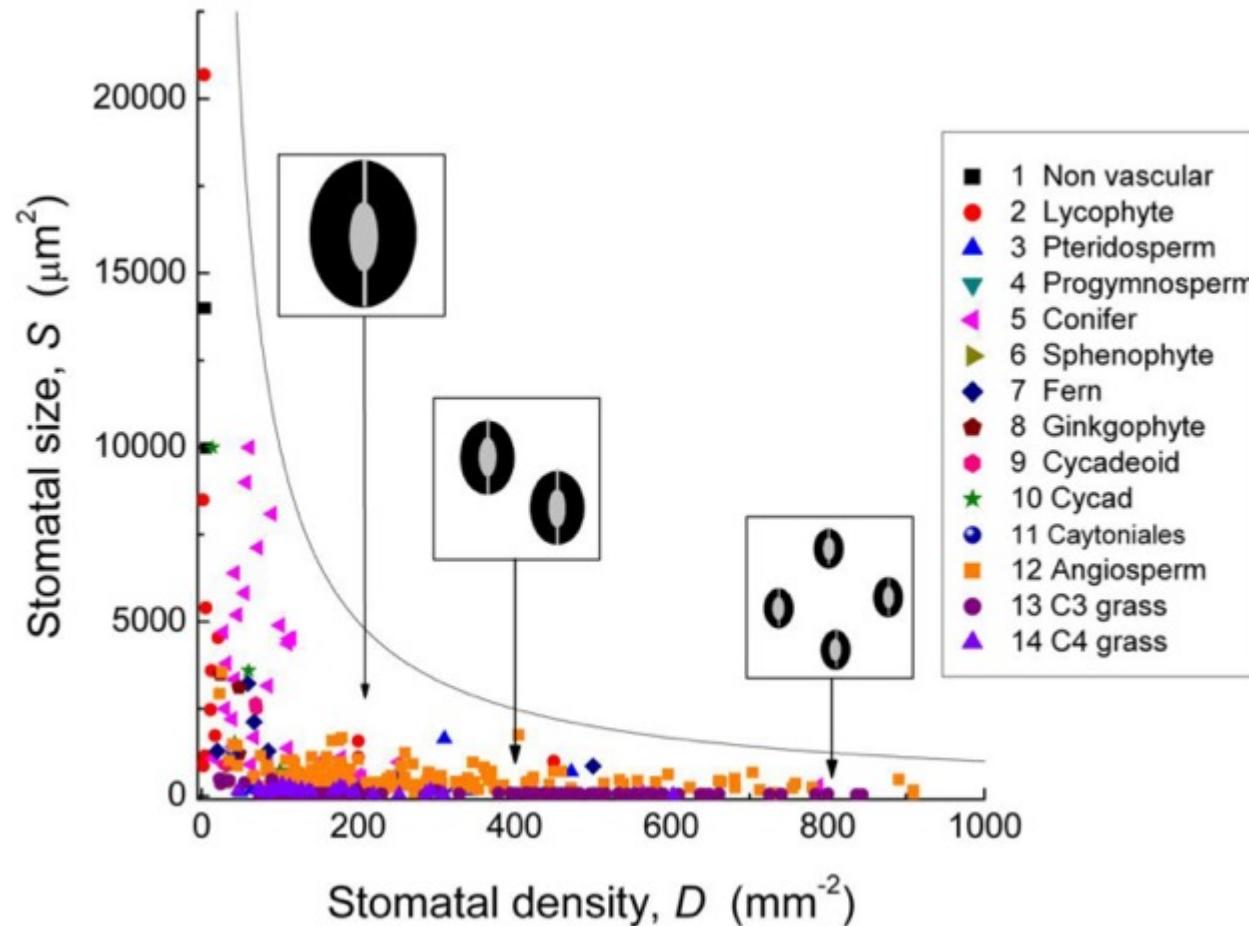
- Zahl der Spaltöffnungen pro Fläche
- Öffnungsgrad der Spaltöffnungen

$$E = g_s \cdot VPD$$

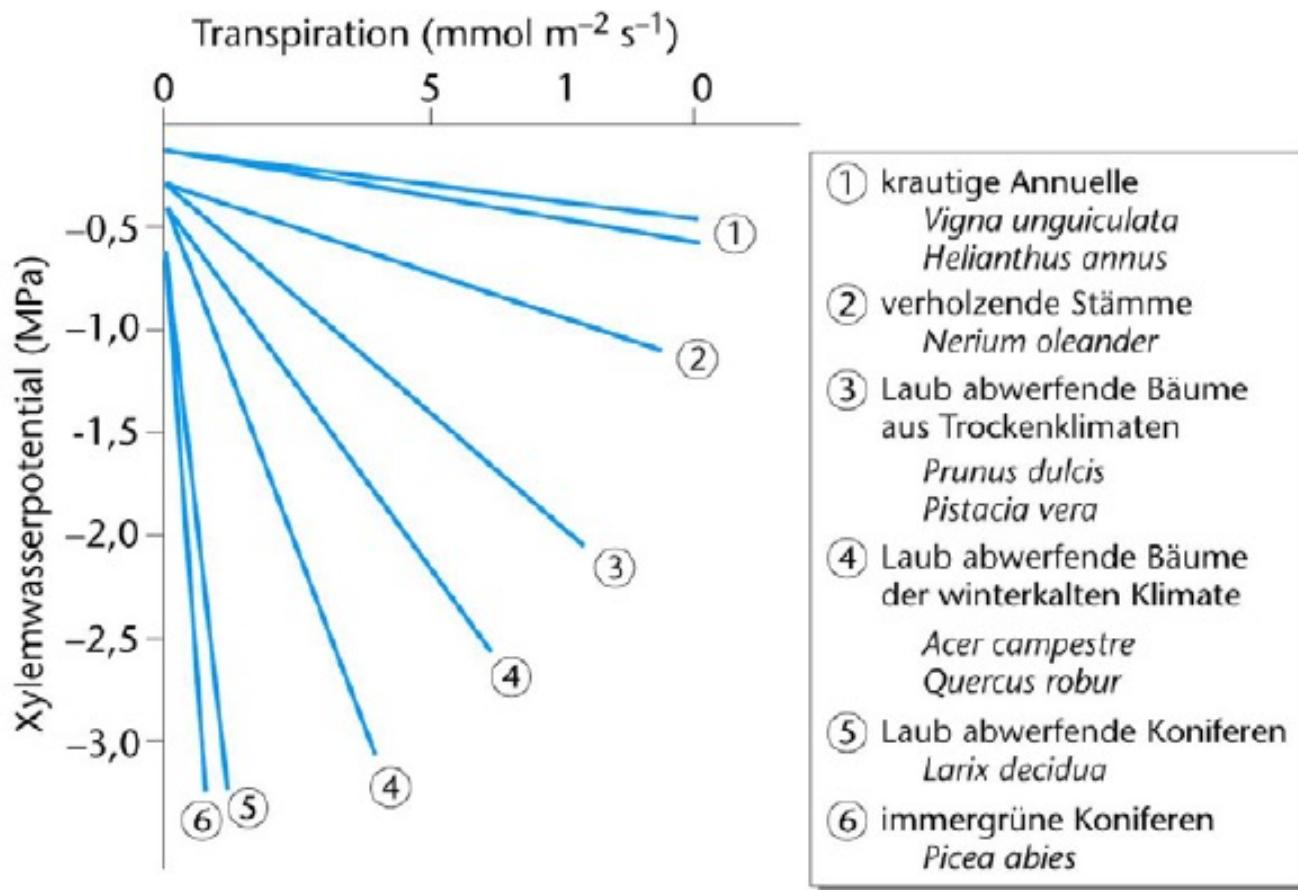
Transpiration = stomatäre Leitfähigkeit · Wassersättigungsdefizit

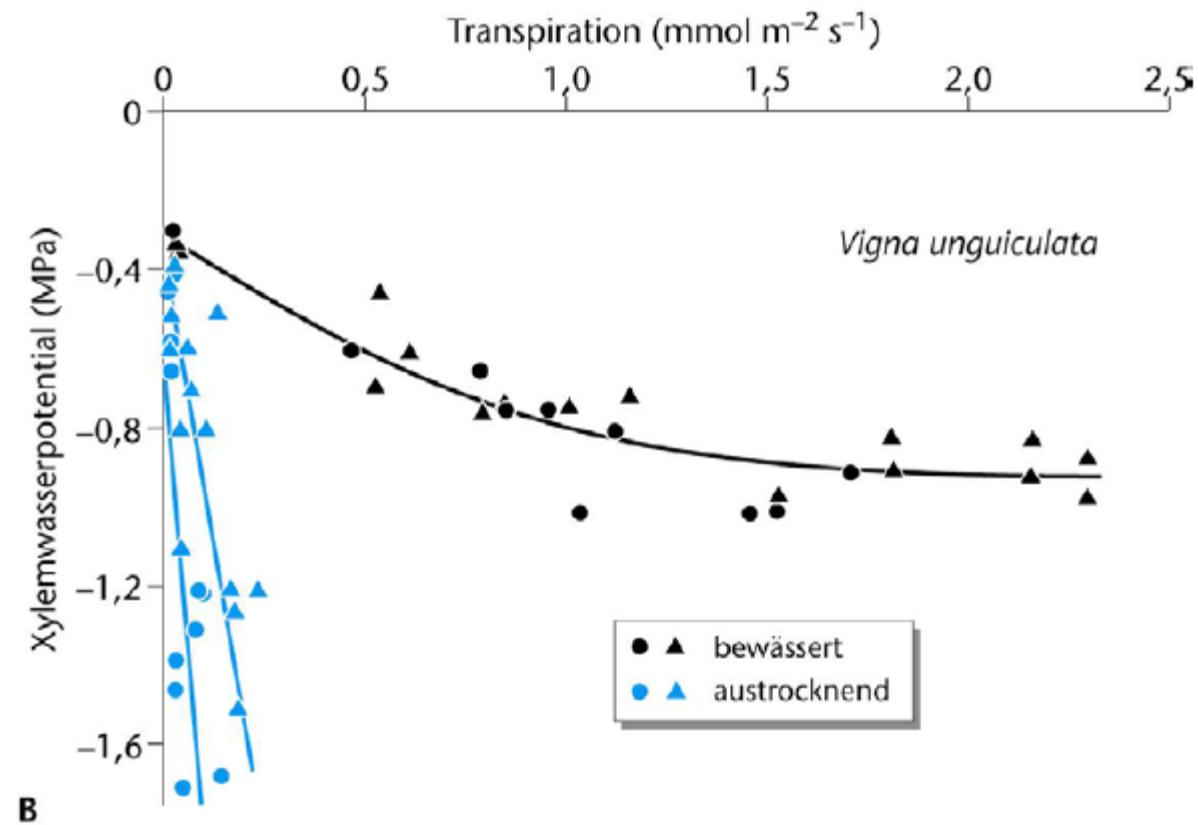
(mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

# Stomatäre Regulation der Transpiration

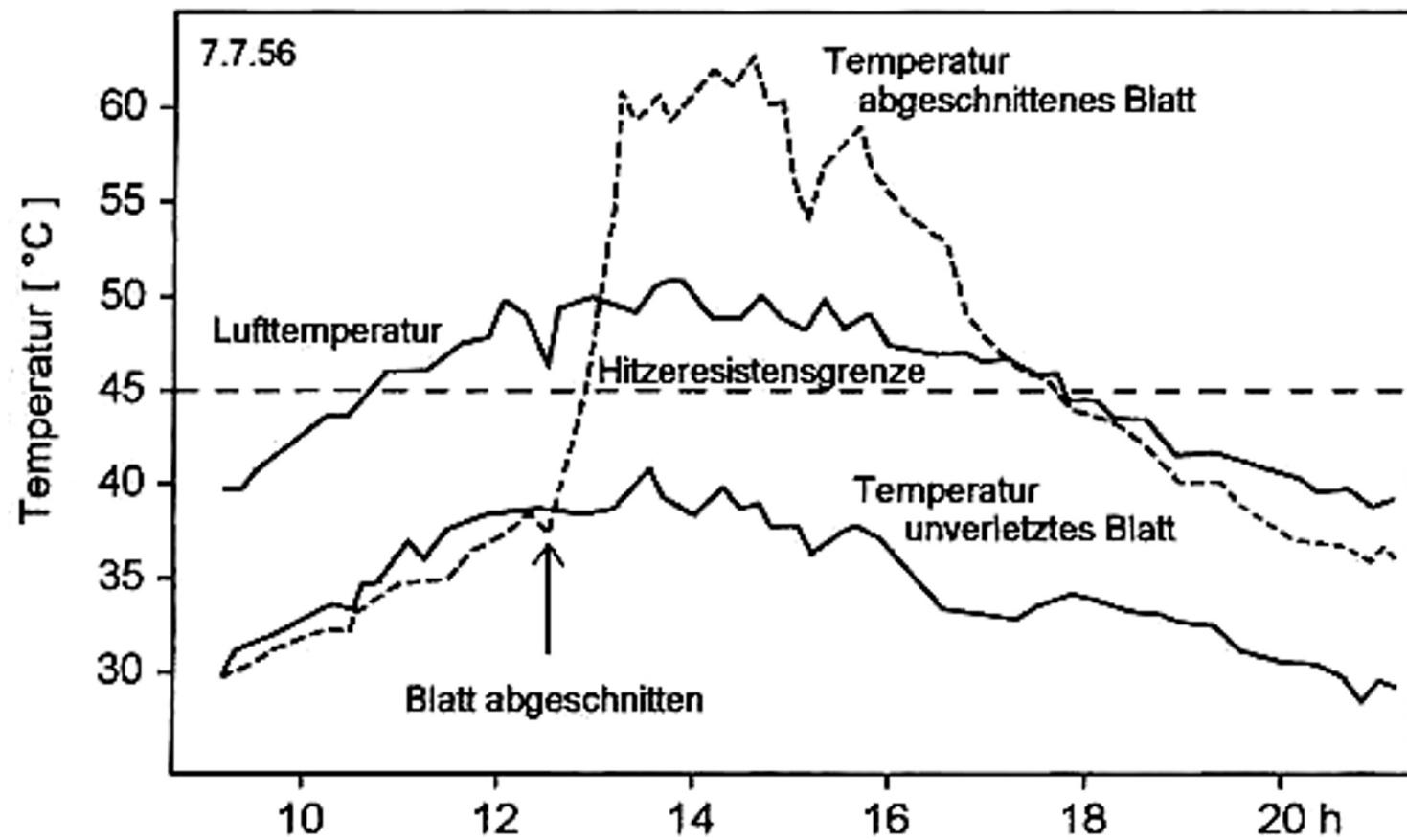


## Transpiration bei unterschiedlichen Pflanzentypen





Transpirationskühlung bei *Citrullus colocynthis*  
(Cucurbitaceae)



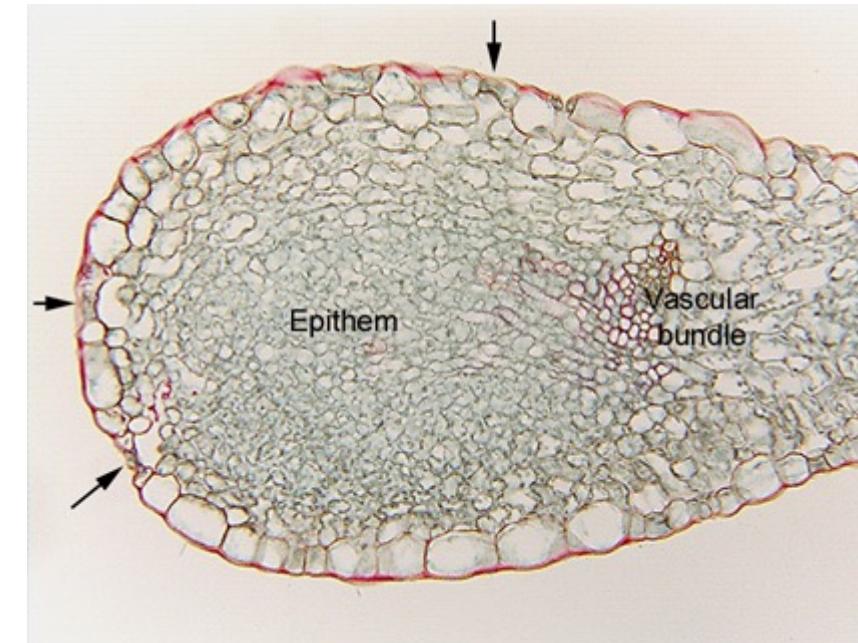
## Guttation

Wasserabgabe über die Blätter durch Wurzeldruck

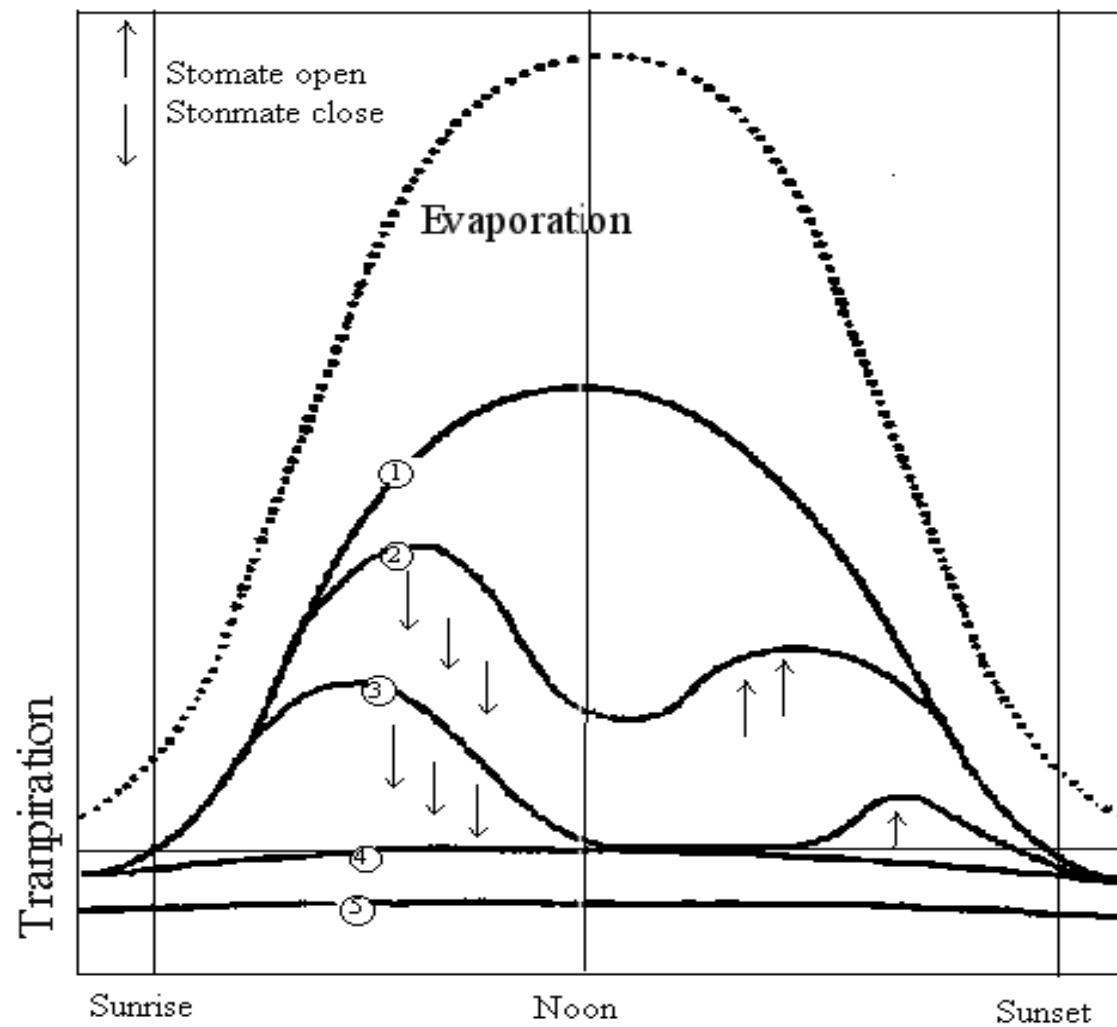
- bei hoher Wasserfügbarkeit im Boden
- und hoher Luftfeuchte



Hydathode

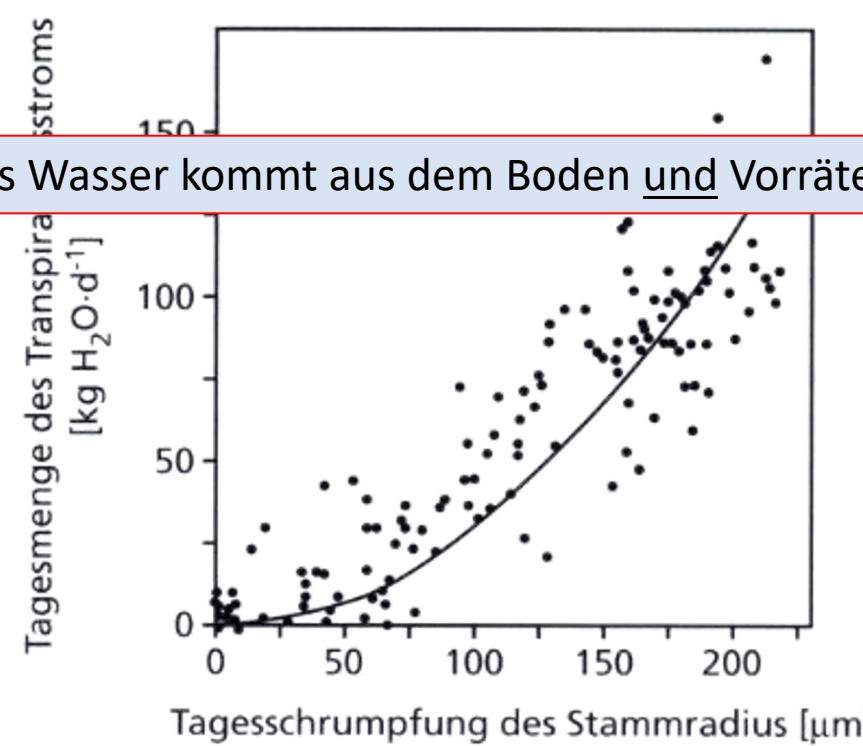


## Trockenstreß bei Pflanzen

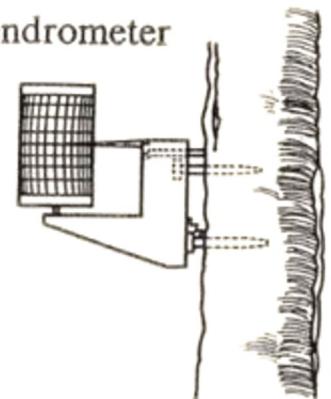


## Wasserverbrauch aus dem Stammholz

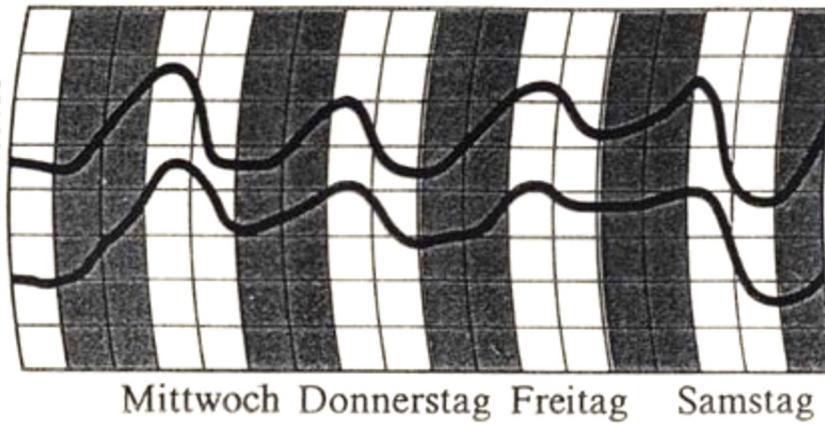
Transpiriertes Wasser kommt aus dem Boden und Vorräten der Pflanze



Dendrometer



Zunahme des Stammdurchmessers



## Wasservorräte in der Pflanze

Stunden an potentieller Transpiration:

	Nadelbäume	Laubbäume	Kräuter
Wurzeln	14	4.9	2.8
Stamm	50 – 180	12	1.5
Blätter	1.1	2.4	0.3



## **5. Wassermangel und Dürreanpassung**

# Blatt- und Wurzelwasserpotentialabsenkung bei Bodenaustrocknung

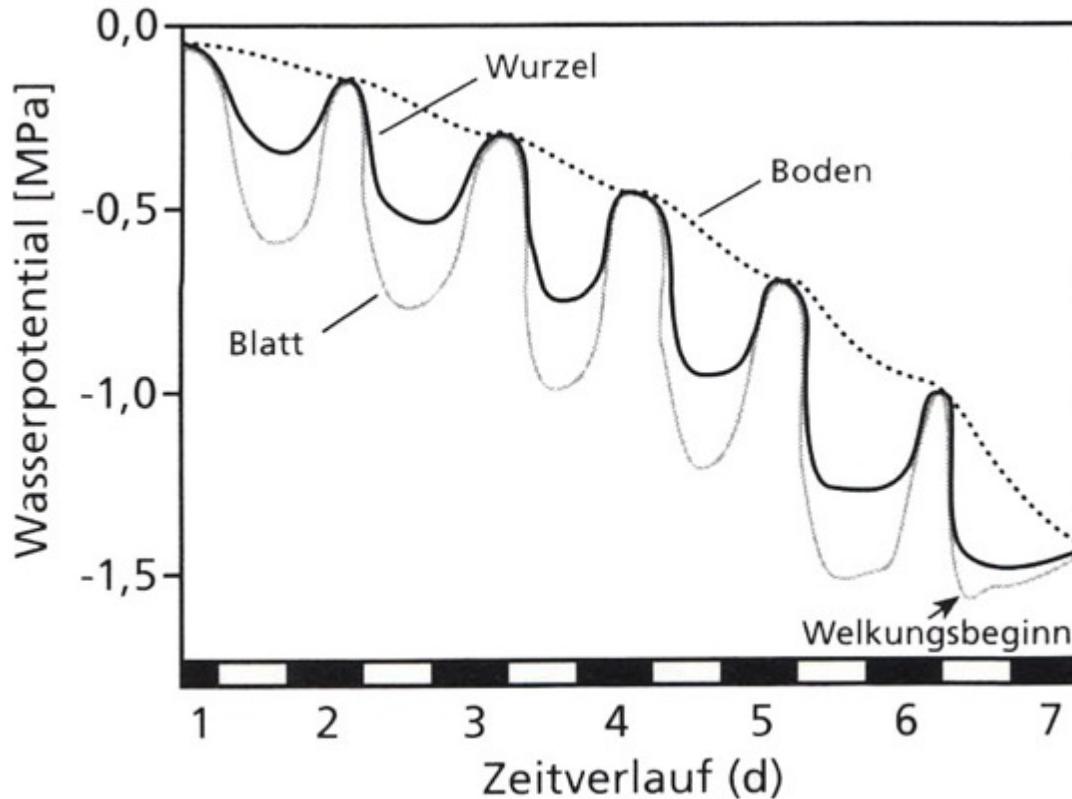
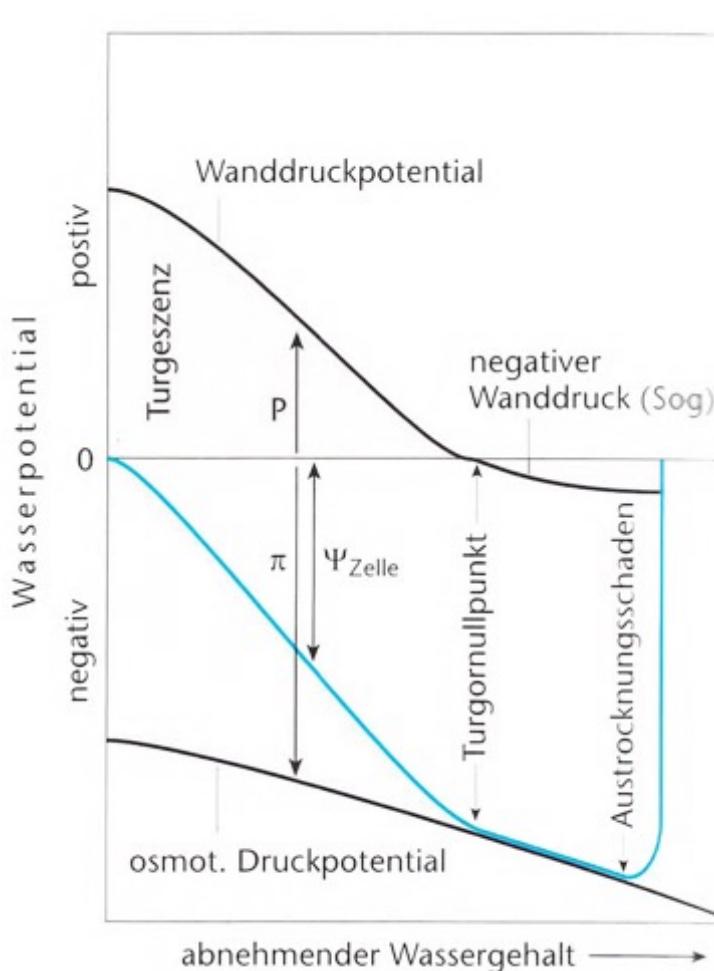


Abb. 4.26. Schematischer Verlauf der allmählichen Verschlechterung des Wasserpotentials in den Blättern, im Wurzelyxem und im Boden während einer einwöchigen Trockenheit. Die größte Tagesschwankung findet in den Blättern statt, die tagsüber der Transpirationsbelastung voll ausgesetzt sind. Nachts (dunkle Balken) erholt sich die Wasserbilanz nicht mehr vollständig, sodaß von Tag zu Tag der Morgenwert des Wasserpotentials absinkt. Nach Slatyer (1967).

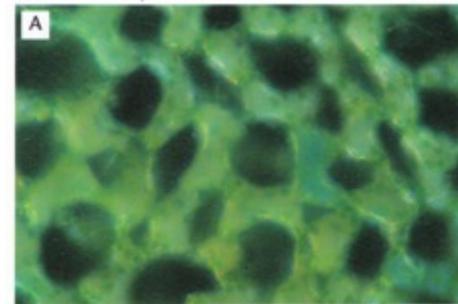
11

7 regenlose Tage führen zur Absenkung von Boden- und Blattwasserpotential und zum Welken, wenn das Blattwasserpotential den Welkepunkt erreicht

# Entwässerung der Zelle



Turgeszent



Entwässert

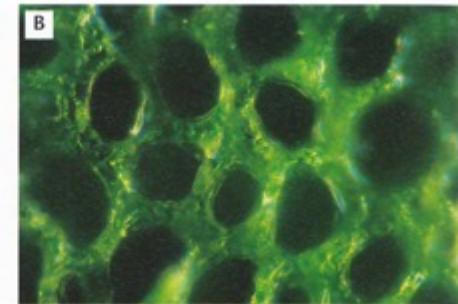


Abb. 1.5.1: Die Austrocknung von Pflanzenzellen an der Luft. A: Schwammparenchym von *Pachysandra terminalis* im turgeszenten Zustand. B: Das gleiche Gewebe nach zweistündiger Lagerung unter Raumluft. Deutlich zu sehen sind die kollabierten Zellen, deren Volumen auf weniger als die Hälfte geschrumpft ist. C: Wasserzustandsdiagramm einer austrocknenden Zelle. Nach dem Verlust der Turgeszenz bleibt der Protoplast wegen des Matrixpotentials an der Wand haften und es entwickelt sich ein negativer Wanddruck. A, B, Fotos J.J. Zhu, C nach Larcher (1994).

Mit der Zellentwässerung fällt der Turgor auf null und sinkt das osmotische Potential (wird negativer) aufgrund der Zellsaftkonzentrierung mit der Folge, dass das Blattwasserpotential ( $\Psi_{Zelle}$ ) sinkt.

# Folgen der Zellentwässerung: Zellschrumpfung

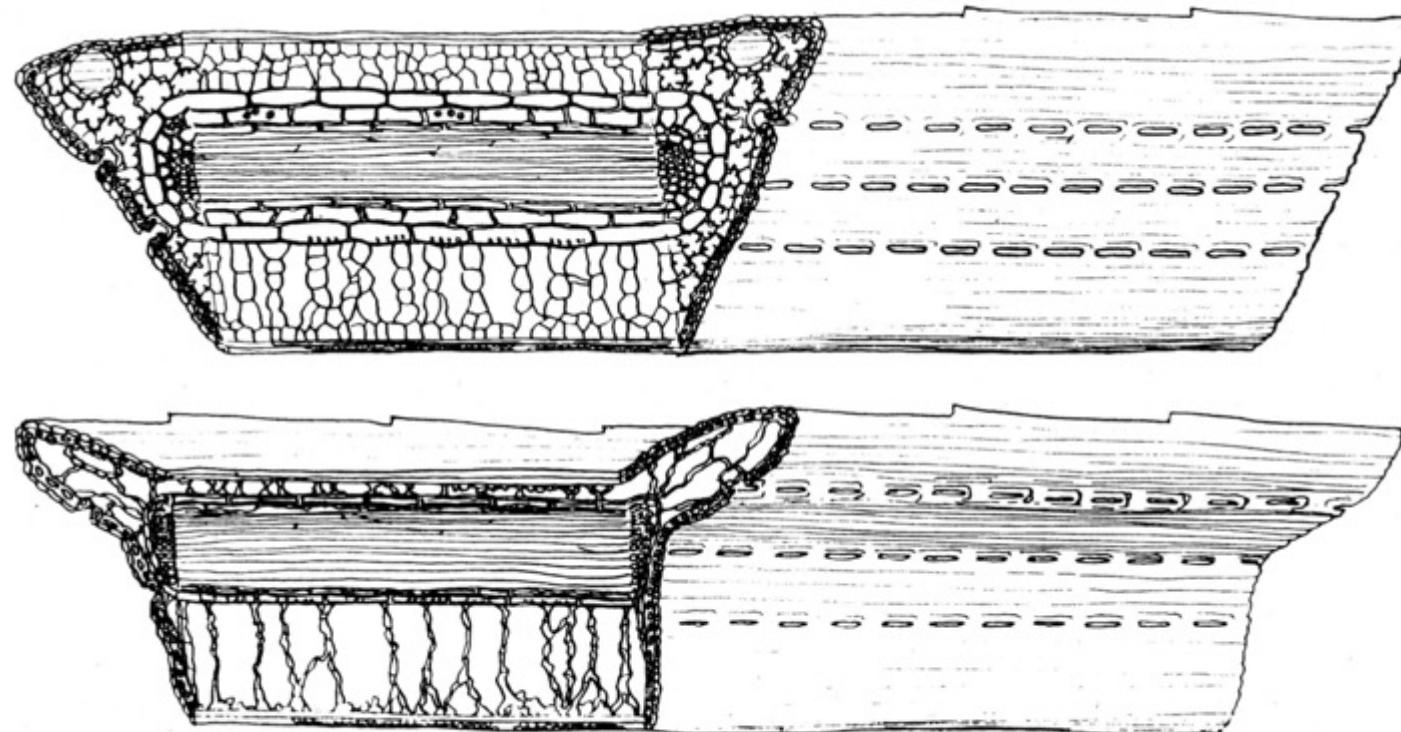
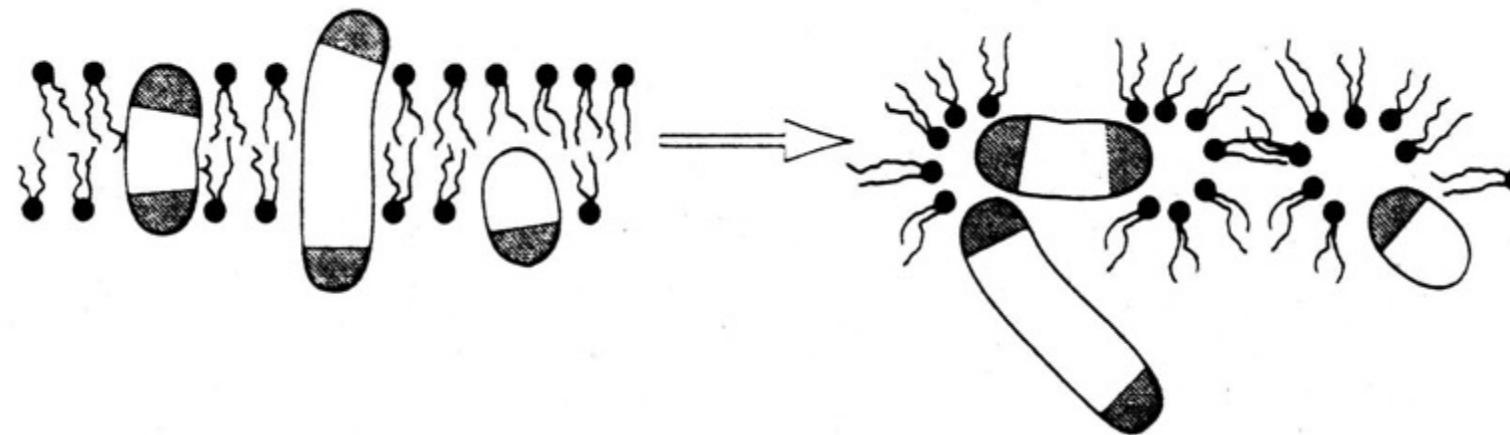


Abb. 6.61. Zellschrumpfung in einer Nadel von *Pinus strobus*. Oben: wassergesättigt. Unten: nach Austrocknung auf 55% des Frischgewichts. Nach PARKER (1952).

# Folgen der Zellentwässerung: Dehydratisierung der Biomembranen



**Membranentwässerung führt  
zum Verlust der Polarität der  
Membran und zur Durchlässigkeit**

Abb. 6.62. Mögliche Veränderungen der Biomembranstruktur bei Austrocknung. *Hydratisierter Zustand links:* Ausrichtung der hydrophilen Pole der Phospholipide (Köpfe) und integrierter Membranproteine (punktierte Bereiche) nach außen zum wässrigen Medium. *Dehydratisierter Zustand rechts:* Umorientierung der Phospholipide entlang eingeschlossener Wasserkanäle und Verlagerung der Proteine. Nach BEWLEY und KROCHKO (1982).

# Dürreempfindlichkeit verschiedener physiologischer Prozesse

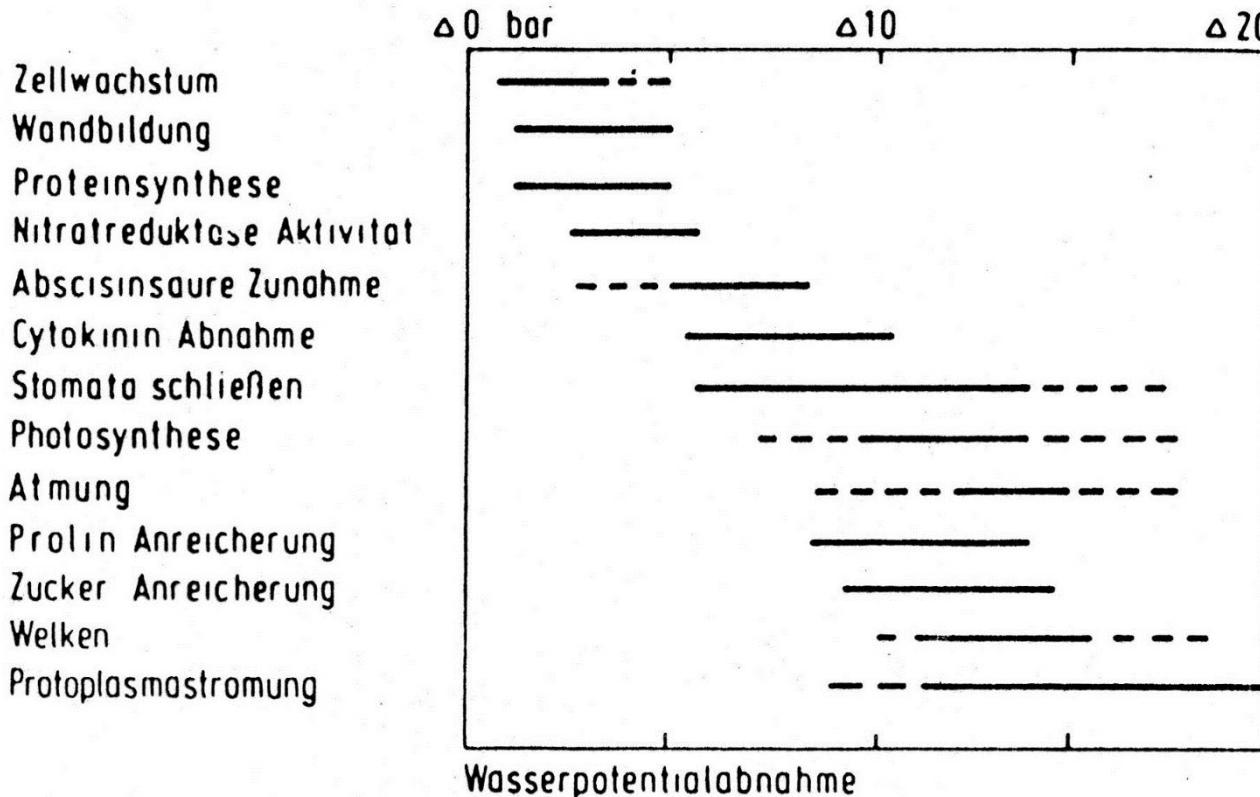


Abb. 169. Empfindlichkeit von Zellfunktionen gegen Wassermangel und Veränderungen in der Pflanze bei Austrocknung.

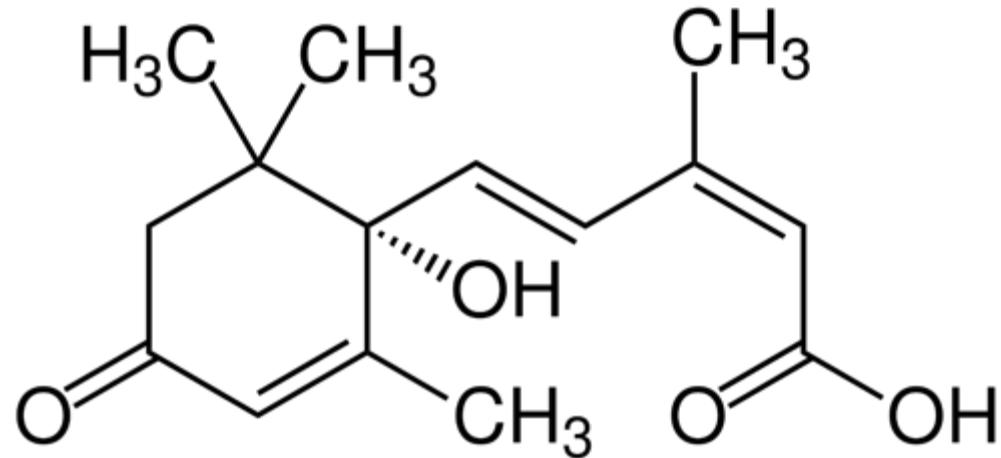
Hsiao 1976

**Besonders austrocknungsempfindlich sind das Zellwachstum und die Proteinsynthese, wenig empfindlich sind Atmung und osmotische Anpassungsreaktionen**

# Perzeption des Wassermangels durch die Pflanze

- Volumenverminderung des Protoplasten
- Konzentrierung der zellulären Lösungen
- Verminderung oder Verlust des Turgors
- Veränderung der transmembranen Wasserpotentialgradienten  
**(Signal!)**
- Membranstörungen und Proteindenaturierung

# Abszisinsäure (ABA) als zentrales Trockenstresssignal



- **Phytohormon (monozyklisches Sesquiterpen)**
- **Farblose Kristalle, die in Wasser gut löslich sind**
- **Biosynthese v.a. in den Blättern über den Xanthophyllzyklus**
- **Wachstumsinhibitor; Stomataregulation**
- **fördert das Wurzelwachstum**

# ABA-Anstieg bei Trockenstress

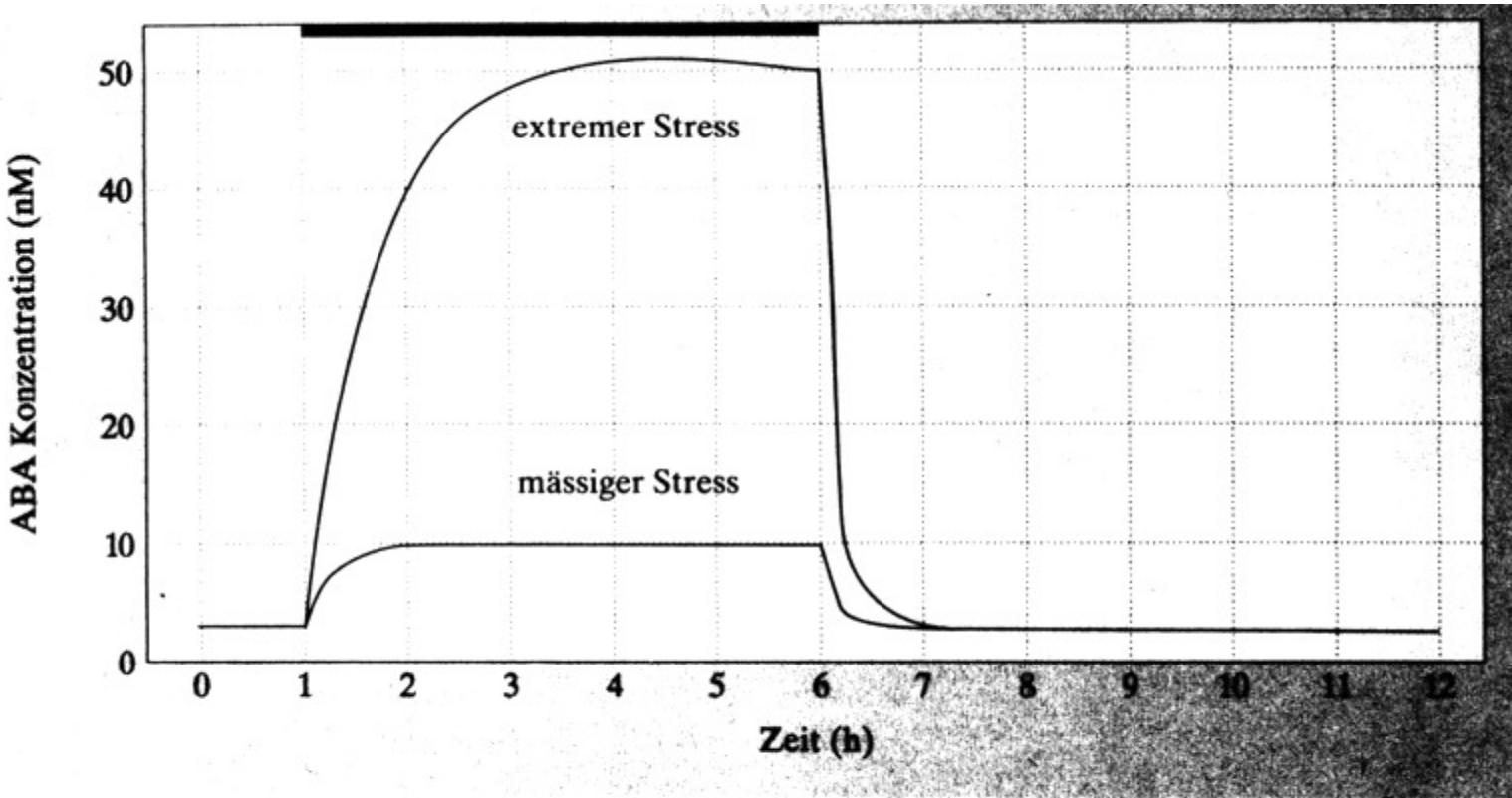


Abbildung 2.52: Veränderung der ABA-Konzentration im schliesszellenumgebenden Apoplasten nach stress-be dingter Einebnung der pH-Gradienten zwischen Mesophyllcytosol und dem Mesophyllapoplasten. Nach einer Stun de beginnt, nach 6 Stunden endigt die Stresseinwirkung. Computersimulation nach Slovik und Hartung (1992).

Bei Gewebeaustrocknung wird innerhalb von Minuten ABA gebildet,  
aber danach auch rasch wieder abgebaut

# ABA-Anstieg bei Zellentwässerung

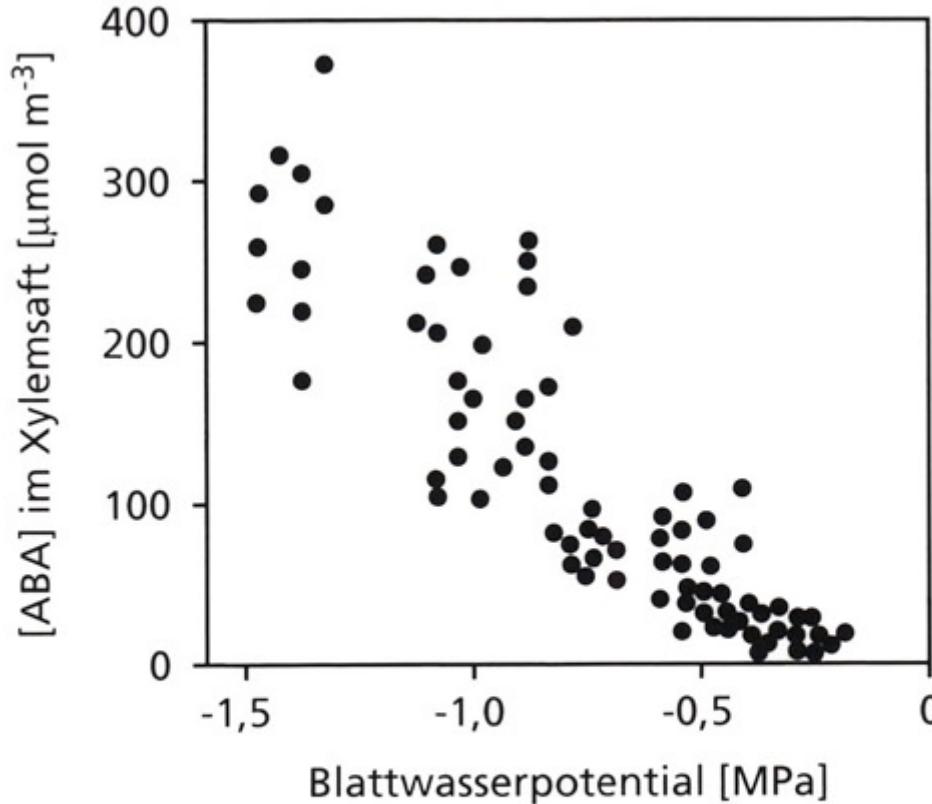


Abb. 4.32. (a) Zunahme der Abscisinsäurekonzentration [ABA] im Xy wholemsaft von Sonnenblumen während einer fortschreitenden Bodentrockenheit (Erniedrigung des Blattwasserpotentials).

Zellentwässerung führt zur ABA-Produktion, die zu Stomaschluss und Hemmung des Blattwachstums führt

# Typisierung der pflanzlichen Trockenstressantwort

1. **Homoiohydr** (gleichfeucht) – **poikilohydr** (wechselfeucht)  
Höhere Pflanzen mit Zentralvakuole: nicht austrocknungsfähig  
vs. niedere Pflanzen ohne Zentralvakuole: austrocknungsfähig

Unter den Homoiohydren Pflanzen:

2. **Hydrolabil** (euryhydr) – **hydrostabil** (stenhydr)  
Große vs. kleine tägliche/saisonale Zellwassergehalts-Schwankung
3. **Anisohydrisch** – **isohydrisch**  
Große vs. kleine tägliche/saisonale Wasserpotentialabsenkung

Hydrolabil – anisohydrisch ist verbunden mit **geringer Stomaregulation** (unsensibel)  
Hydrostabil – isohydrisch ist verbunden mit **intensiver (sensibler) Stomaregulation**

## Isohydrischer und anisohydrischer Wasserhaushaltstyp

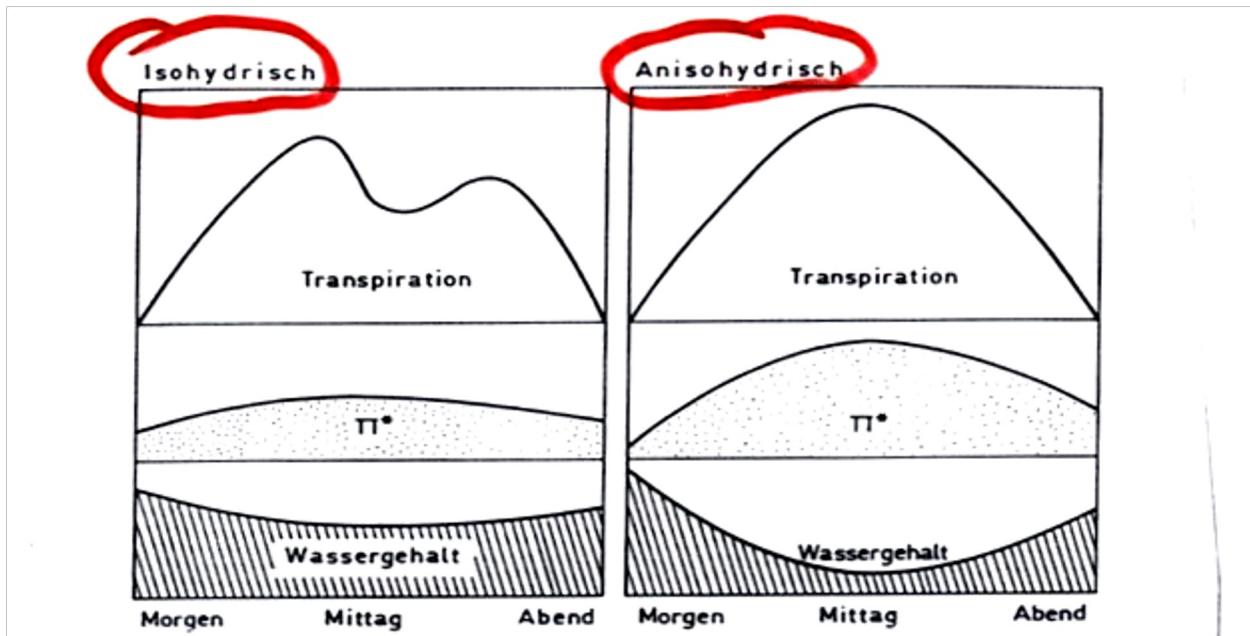


Abb. 155. Schema der Wasserhaushaltstypen nach BERGER-LANDEFELDT (1936). Der *isohydrische Typ* (links) vermeidet starke Tagesschwankungen im Wassergehalt und potentiellen osmotischen Druck durch vorsichtige stomatäre Regulation der Wasserabgabe. Der *anisohydrische Typ* schränkt die Transpiration nur bei extremer Trockenheit ein und riskiert eine starke Anspannung der Wasserbilanz, die sich durch ausladende tageszeitliche Schwankungen des osmotischen Druckes und des Wassergehalts bemerkbar machen. Aus STOCKER (1956).

**Große tägliche Blattwassergehaltsschwankungen sind verbunden mit größeren Tagesschwankungen des osmotischen Potentials aufgrund von Konzentrierung der Osmotika**

# Trockenstressantworten der Pflanze

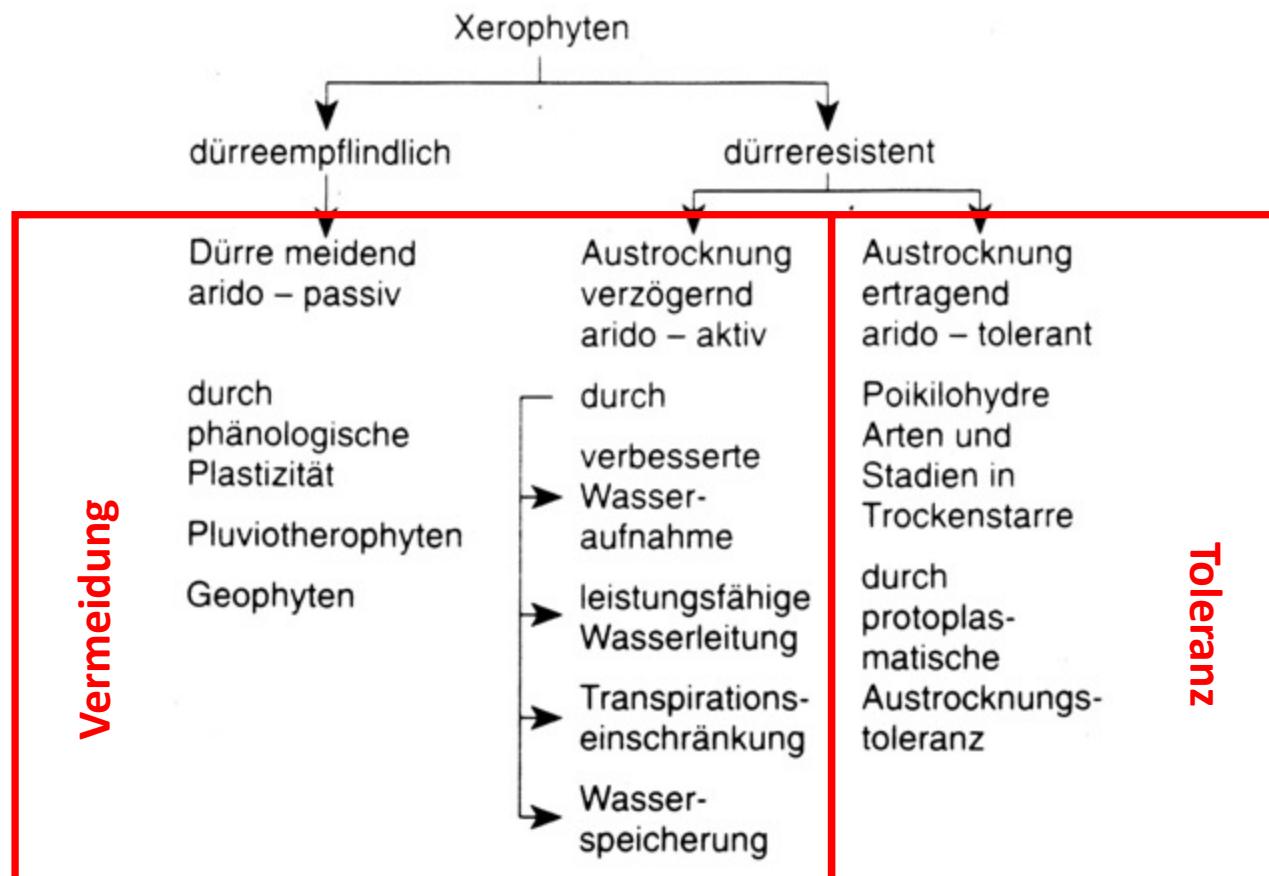


Abb. 6.63. Überlebensweisen von Pflanzen in Trockengebieten. Nach Einteilungssystemen von SHANTZ (1927), EVENARI et al. (1975), TURNER (1979) und LUDLOW (1989).

# Strategien gegen Trockenstreß

- **Austrocknungsverzögerung:**

- bessere Wasseraufnahme: Anpassung des Wurzelsystems
- Blattflächenreduktion
- Erhöhung des Grenzflächenwiderstandes (z. B. durch Behaarung)
- eingesenkte Position der Stomata
- kleinere Stomata, dafür mehr
- Wasserspeicherung

- **Austrocknungsvermeidung:**

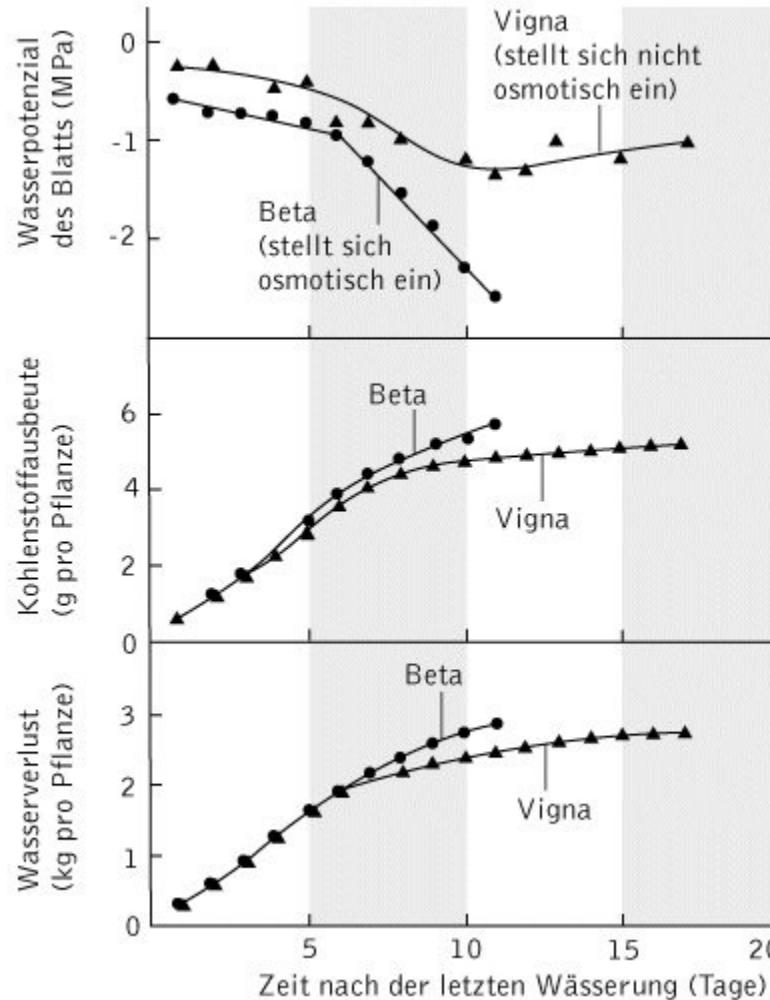
- Pluvio-Therophyten
- Geophyten
- trockenahle Wälder

- **Austrocknungstoleranz:**

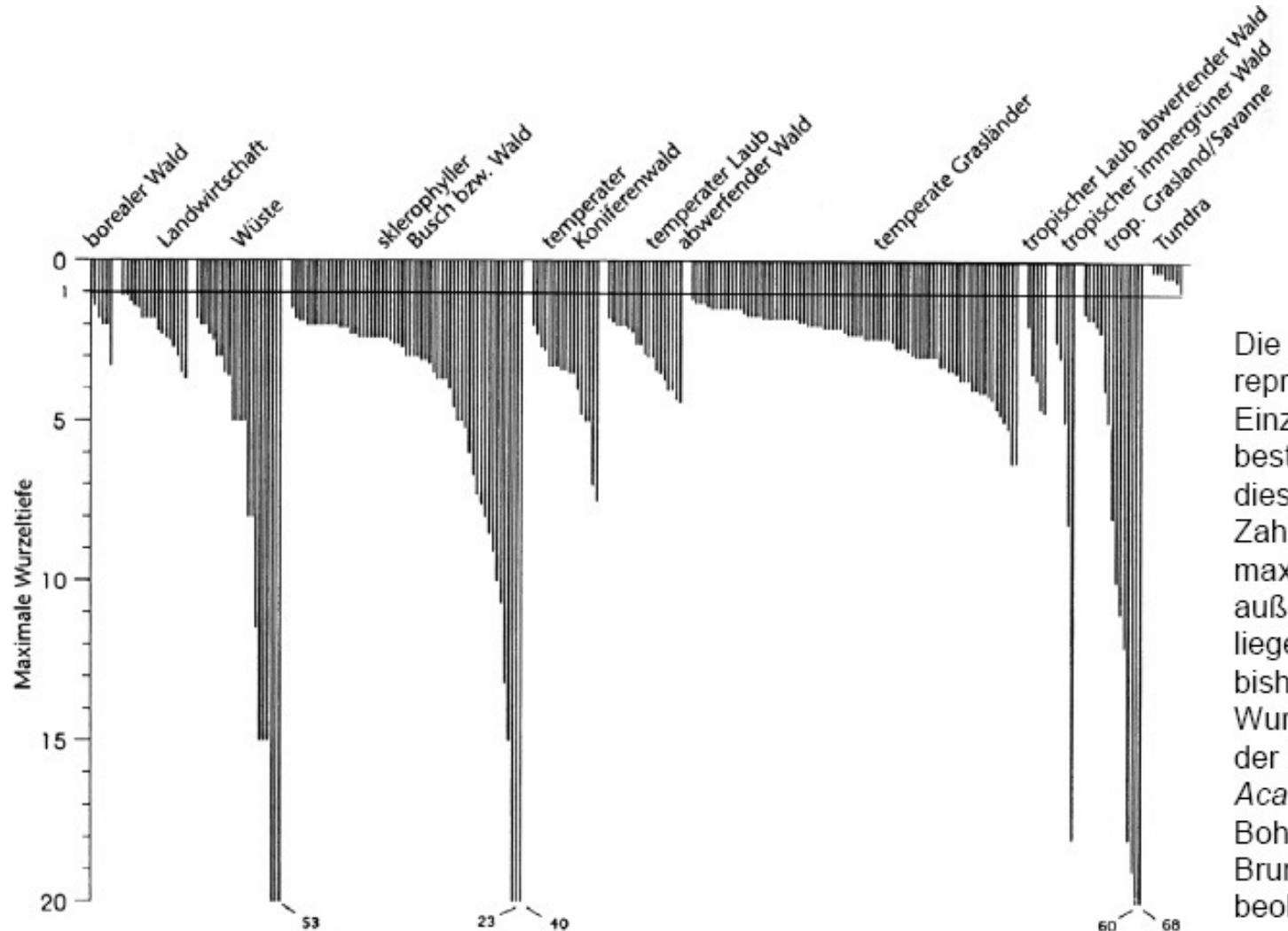
- poikilohydrische Lebensweise
- protoplasmatische Austrocknungstoleranz
- keine Zentralvakuole
- Flechten, z. T. Moose, sekundär einige Farn- und Blütenpflanzen  
(resurrection plants)

## Osmotic adjustment

Mobilisierung osmotisch wirksamer Substanzen zur Absenkung des osmotischen Potentials



# Maximale Wurzeltiefen



Die einzelnen Striche repräsentieren Einzelbeobachtungen bestimmter Arten aus dieser Vegetation. Die Zahlen zeigen die maximalen Tiefen, die außerhalb der Skala liegen. Die grösste bisher bekannte Wurzeltiefe wurde in der Kalahariwüste an *Acacia erioloba* beim Bohren von Brunnenschächten beobachtet.