

Bewässerungstechnik in der Landwirtschaft

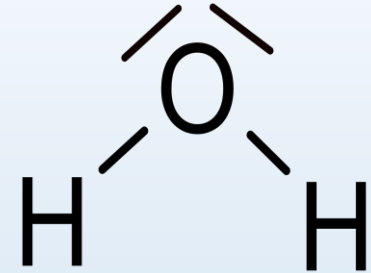
Wasser im Boden-Pflanze-Atmosphäre Kontinuum

Wolfram Spreer

19.03.2026

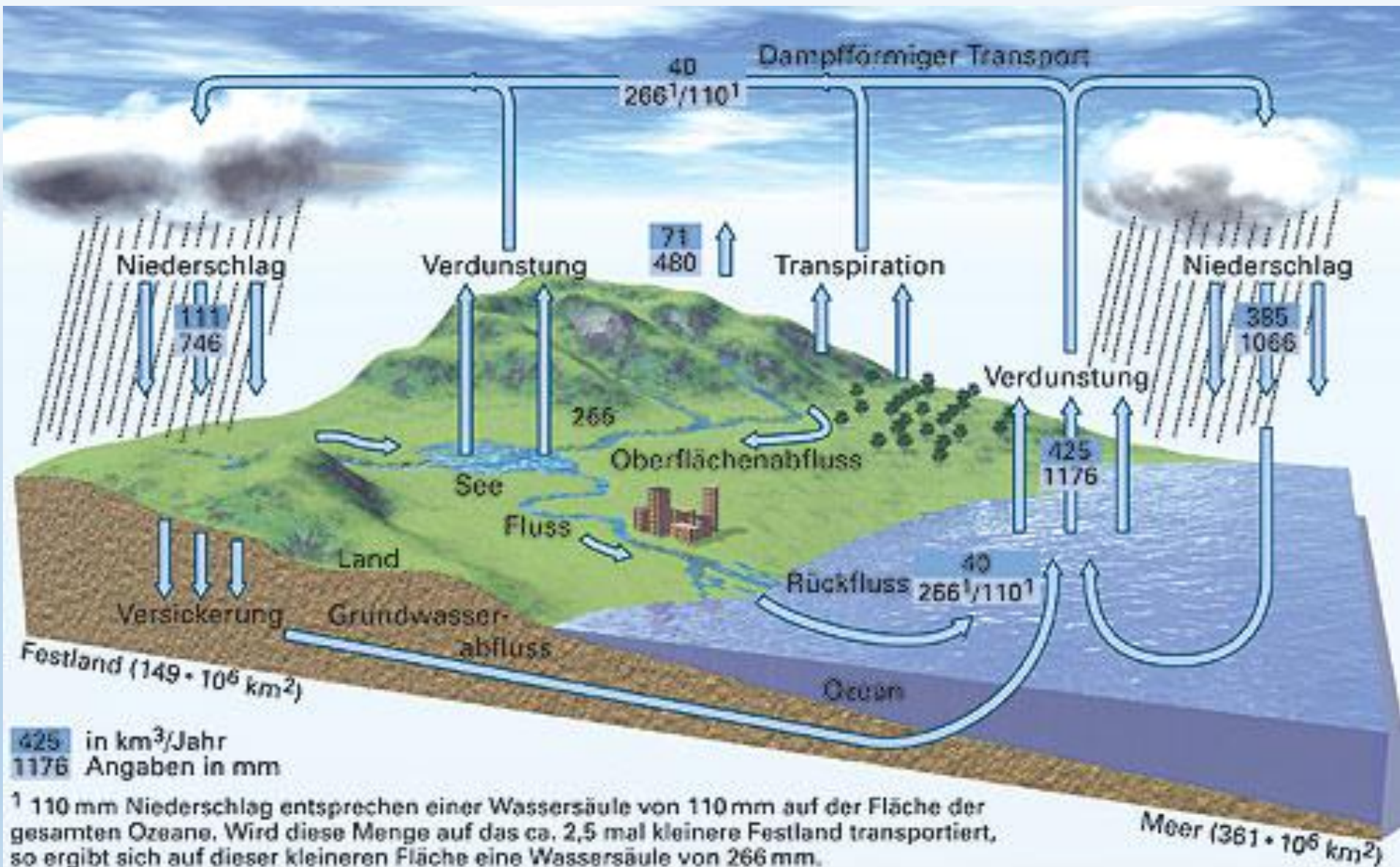
Wasser

- Wasser (lateinisch Aqua, englisch Water) ist insbesondere die chemische Verbindung H_2O , bestehend aus den Elementen Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H).
- Wasser ist die Grundlage allen Lebens auf der Erde.
- Biologische Vorgänge laufen nur dank Wasser ab. Der Mensch als biologisches Wesen (Wasseranteil ca. 70%) nutzt das Wasser zur Sicherung seines eigenen Überlebens und für seine kulturelle und wirtschaftliche Entwicklung. Da Wasser als einziger natürlicher Stoff auf der Erde im festen, flüssigen und gasförmigen Zustand vorkommt, prägt es von geologischen Prozessen im Laufe von Jahrmillionen bis zu Wetterphänomenen die unbelebte Natur. Es gilt als eine der naturwissenschaftlich am besten untersuchten chemischen Verbindungen.
- Wasser besitzt eine herausragende kulturelle Bedeutung in allen Zivilisationen und hat für zahlreiche Zivilisationen eine religiöse Bedeutung erlangt.
- *Die Bezeichnung Wasser wird dabei für den flüssigen Aggregatzustand verwendet.* Im festen Zustand spricht man von Eis, im gasförmigen Zustand von Wasserdampf. In der Natur kommt Wasser selten rein vor, sondern enthält meist gelöste Anteile von Salzen, Gasen und organischen Verbindungen.

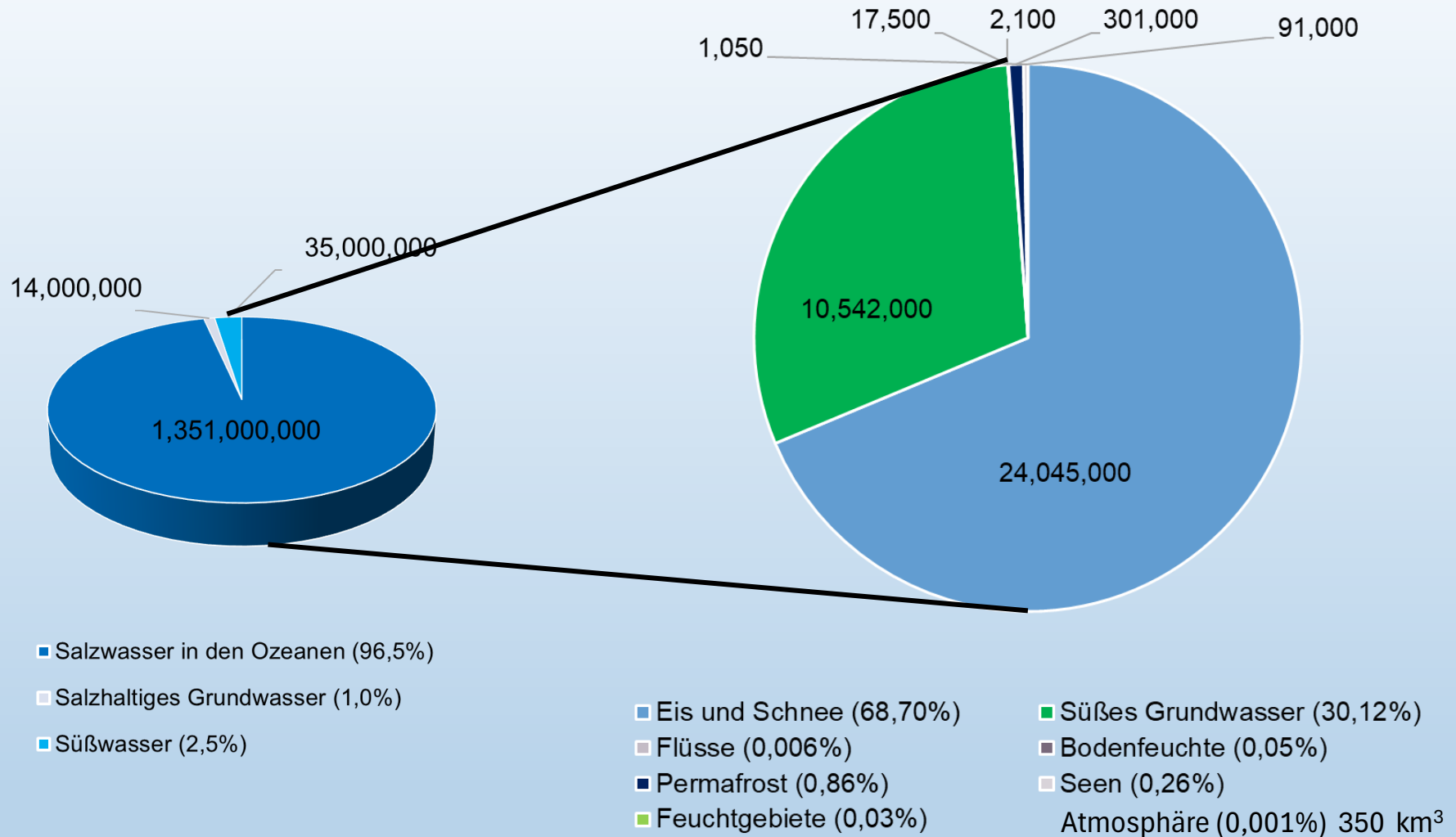


Quelle: Wikipedia

Der Globale Wasserkreislauf



Wasserressourcen der Welt (km³)



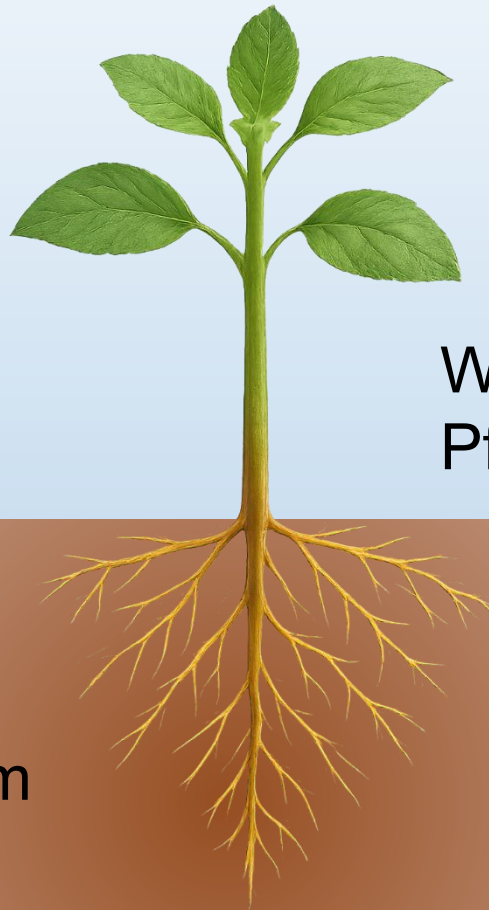
Für die Nutzung potenziell zur Verfügung: 10,654,000 km³

Boden- Pflanzen- Atmosphären Kontinuum

Wassergehalt in
der Luft (ρ_h)

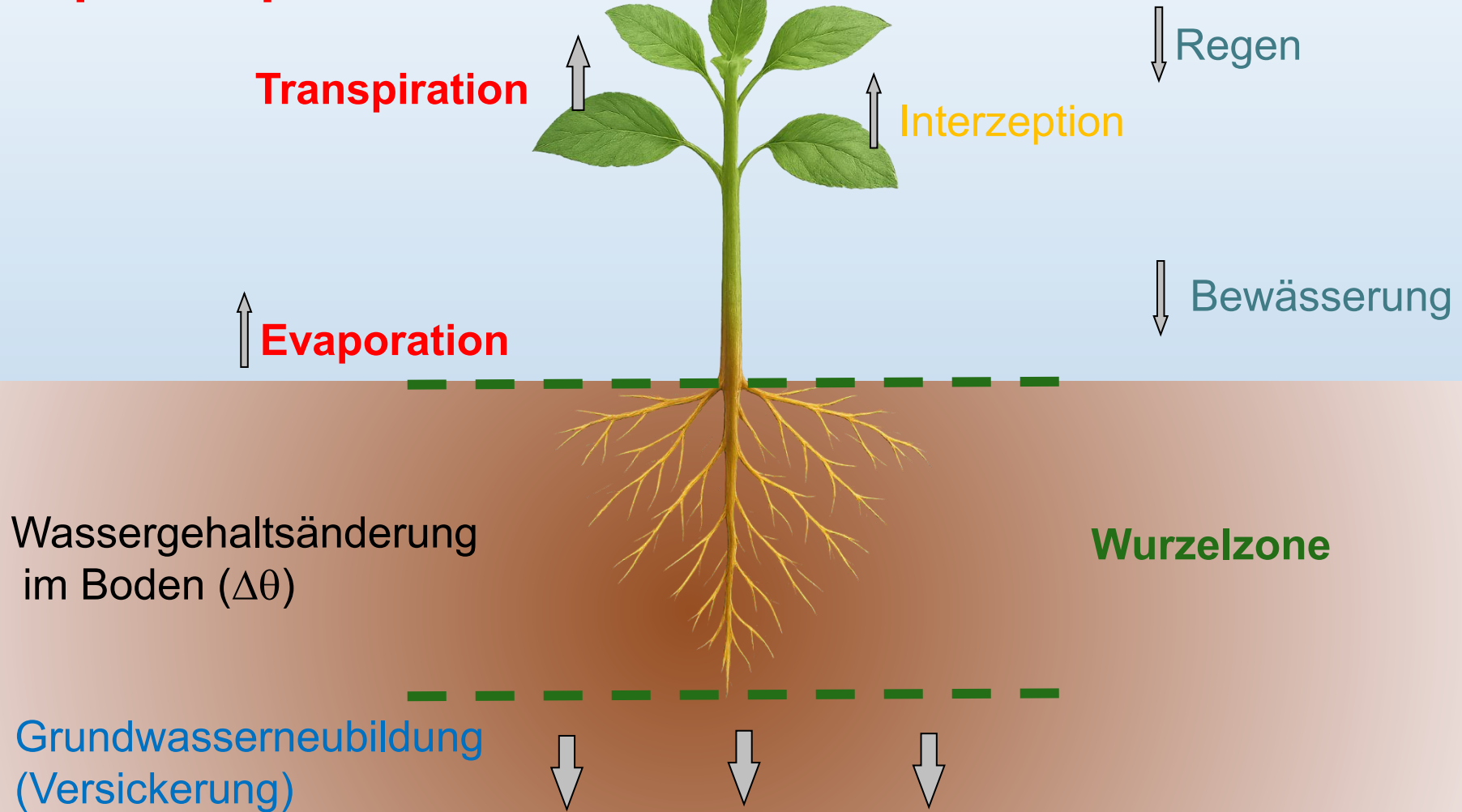
Wassergehalt in der
Pflanze

Wassergehalt im
Boden (θ)



Wasserhaushalt eines Pflanzenstandorts

Evapotranspiration



Wasserhaushalt eines Pflanzenstandorts

Zunahme:

Regen – Bewässerung – Zulauf (run-on)

Abnahme:

Transpiration – Evaporation – Versickerung –
Interzeption – Ablauf (run-off)

Regenmessung



Niederschlagsmenge: Volumen (V) Wasser, das auf eine Fläche (A) fällt

$$Niederschlag = V * A^{-1}$$

Einheiten:

$$1 \text{ Liter} * 1 \text{ m}^{-2} (\text{I/m}^2; \text{L/m}^2)$$

$$0,001 \text{ m}^3 * 1 \text{ m}^{-2} = 0,001 \text{ m} = \mathbf{1 \text{ mm}}$$

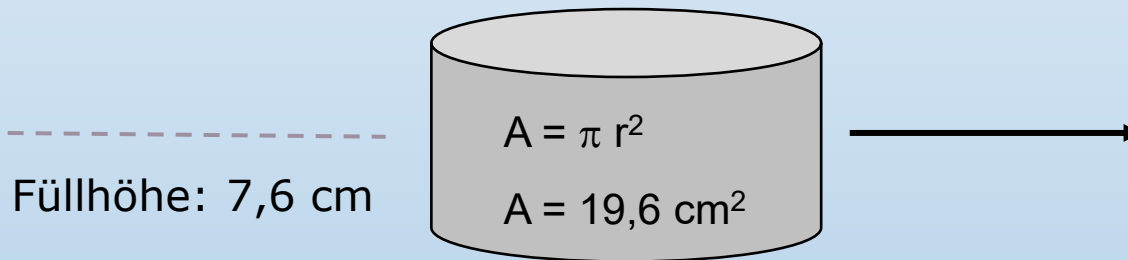
$$0,001 \text{ m}^3 * 0,0001 \text{ ha} = \mathbf{10 \text{ m}^3/\text{ha}}$$

Regenmessung

Fluss (Q): Bestimmtes Volumen (V) Wasser, das in einer bestimmten Zeit (t) durch eine bestimmte Fläche (A) fließt.
z.B.: Infiltration, Evaporation, Transpiration

$$Q = V (A t)^{-1}$$

Beispiel: Regenauffangbehälter



$$\begin{aligned} Q &= V (A t)^{-1} \\ &= 150,0 \text{ ml } (19,6 \text{ cm}^2 * 3 \text{ h})^{-1} \\ &= (150,0 \text{ cm}^3 / 19,6 \text{ cm}^2) * 3 \text{ h}^{-1} \\ &= 7,65 \text{ cm} * 3 \text{ h}^{-1} \\ &= 76,5 \text{ mm} * 3 \text{ h}^{-1} \\ Q &= 25,5 \text{ mm h}^{-1} \end{aligned}$$

Durchmesser Behälter $d = 5,0 \text{ cm}$

Niederschlagsdauer $t = 3 \text{ h}$

Aufgefangener Regen $V = 19,6 \text{ cm}^2 * 7,65 \text{ cm} = 150,0 \text{ cm}^3 \text{ (ml)}$

Regenmessung



Kippeimer
Regenmesser



Kontakt

Wippe

Messung in
Echtzeit

Regenmessung



<https://meteorologyshop.eu/>

Boden



Bilder: DBG

Welche Faktoren beeinflussen den Wasserhaushalt im Boden?

Wassergehalt im Boden, Bodenfeuchte

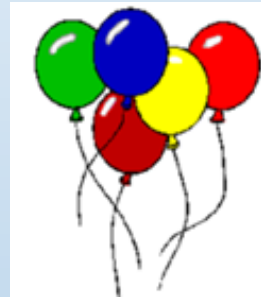
Wasserhaltevermögen

Bewegung des Wassers im Boden

Boden - Zusammensetzung



Mineralische /
organische Bestandteile



Luft



Wasser

Der trockene Boden



Das Gesamtvolumen (V_t) ist das Volumen der mineralischen und organischen Bestandteile (V_s) und der Poren (V_a)

$$V_t = V_s + V_a$$

Lagerungsdichte (ρ_b) ist die Masse des trockenen Bodens (m_s) pro Volumen (V_t)

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t}$$



Porosität (η) ist der Anteil der Poren am Volumen. Die Porosität kann mit der Lagerungsdichte (ρ_b) in Bezug gesetzt werden, wenn die Dichte der Bodenpartikel (ρ_s) bekannt ist :

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) * 100$$

Dichte

Die durchschnittliche Dichte der Bodenpartikel (ρ_s) der meisten mineralischen Böden ist $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Mineral	g/cm^3
Quarz	2.65
Kaolinit	2.62
Calzit	2.72
Gips	2.32
Pyrit	5.02
Hämatit	5.20

Organische Masse hat eine viel niedrigere Dichte (ρ_s) daher haben organische Böden eine niedrigere Lagerungsdichte

Volumetrischer Wassergehalt

Volumetrischer Wassergehalt, θ (Theta)

...ist die Menge an Wasser, die im Boden gespeichert ist.

...beschreibt die Wasserfüllung des Porenraums.

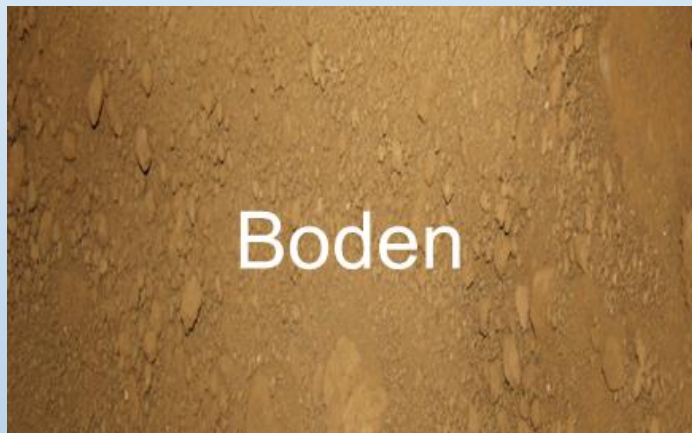
Maximaler vol. Wassergehalt = Porenraum ist wassergesättigt = θ_s

Minimaler vol. Wassergehalt = residualer Wassergehalt = Totwasser = θ_r

Wassergehalt - gravimetrisch

Wie wird der Wassergehalt gravimetrisch bestimmt?

1. Schritt: Entnahme einer Bodenprobe



Stechzylinder



$$V_t = V_s + V_a + V_w = 100 \text{ cm}^3$$

Wassergehalt - gravimetrisch

2. Schritt: Wiegen der feuchten Probe



$$m_t = m_s + m_W = 205g$$

3. Schritt: Trocknen der Probe im Trockenschrank
bei 105°C für 24 Stunden.

Wassergehalt - gravimetrisch

4. Schritt: Wiegen der trockenen Probe



0.180 kg

$$m_s = 180 \text{ g}$$

Wassergehalt - gravimetrisch

Gewicht des Bodens

$$m_s = 180 \text{ g}$$

Lagerungsdichte

$$\rho_b = \frac{180 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 1.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Porosität

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{1.8}{2.65}\right) * 100 = 32\%$$

Gewicht des Wassers

$$m_w = 205 \text{ g} - 180 \text{ g} = 25 \text{ g}$$

Volumen des Wassers

$$V_w = 25 \text{ cm}^3$$

**Volumetrischer
Wassergehalt**

$$\theta_v(\%) = \left(\frac{25 \text{ cm}^3}{100 \text{ cm}^3}\right) * 100 = 25\%$$

Wassergehalt - gravimetrisch

Lagerungsdichte

Abhängig von

- Bodenart
- Management (Verdichtung)
- Organische Masse

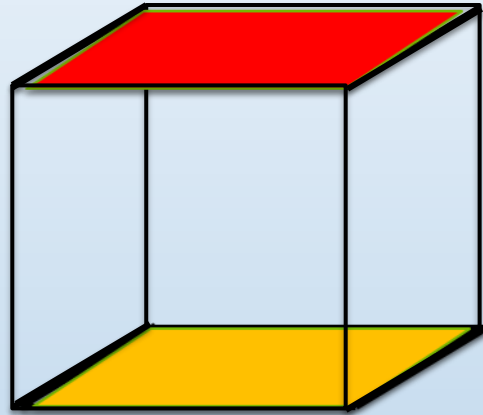
Porosität

Wassergehalt bei *Staunässe*
Maximaler Wassergehalt

Volumetrischer Wassergehalt

Wassergehalt zum Zeitpunkt der Betrachtung

Wassergehalt



Sättigung

32 % Wasser

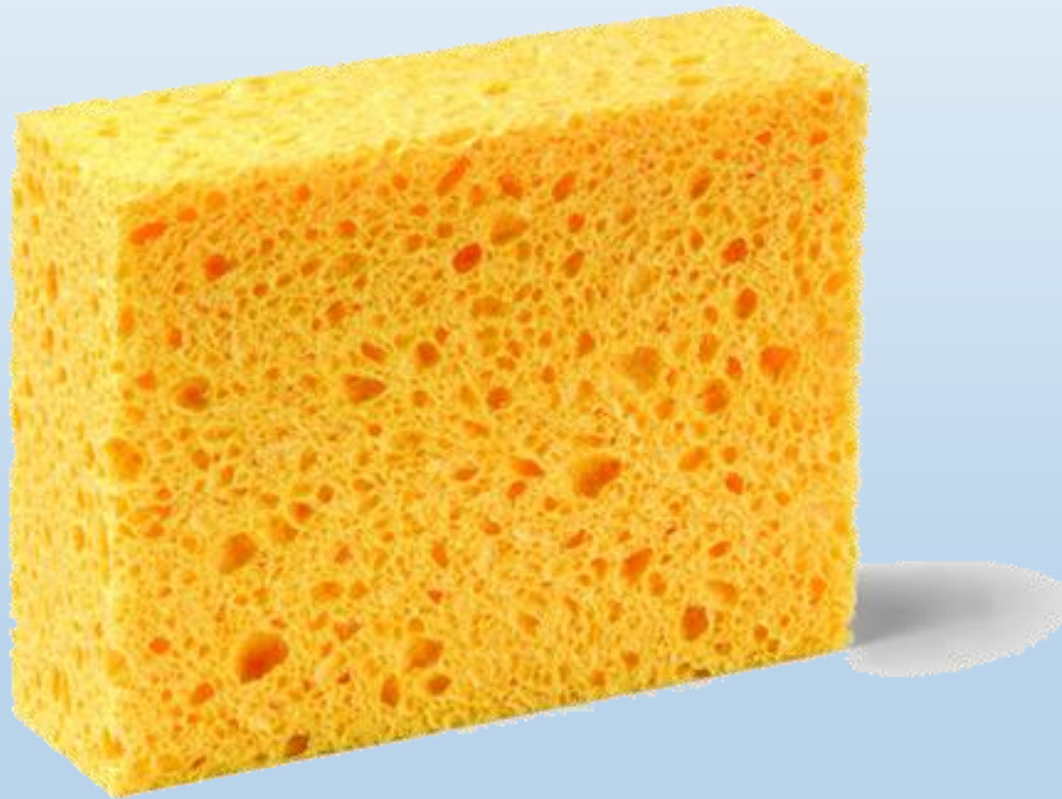
Trockener Boden

0 % Wasser

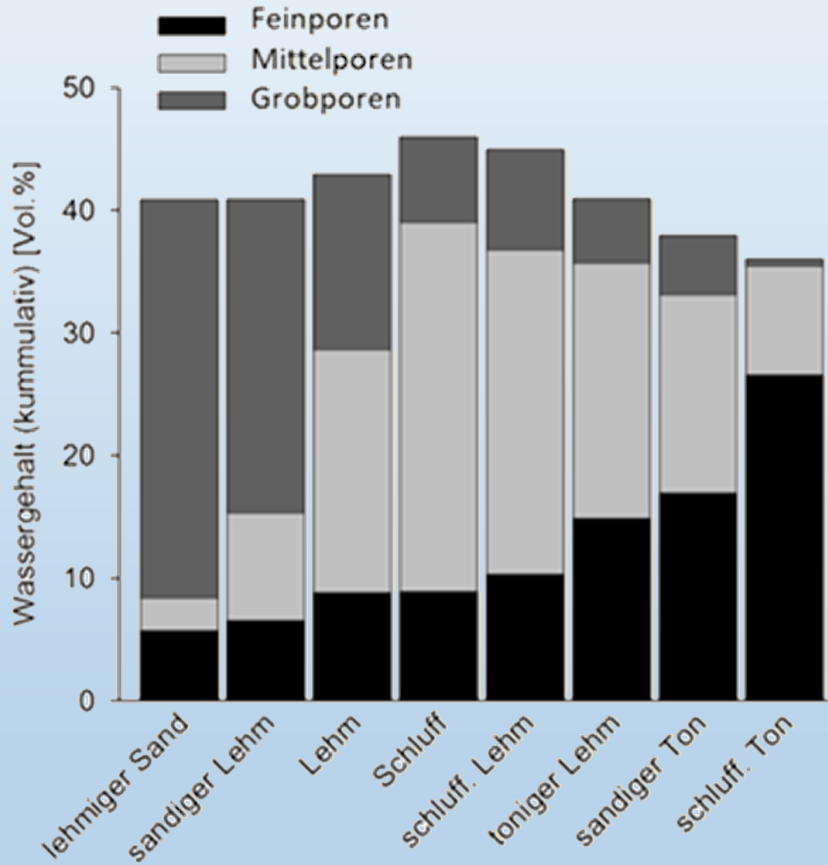
Bei Sättigung hat der Boden im Beispiel einen Wassergehalt von 32% damit befinden sich $3.200 \text{ m}^3/\text{ha}$ Wasser pro 1 m Bodentiefe.

*Was bedeutet der Wassergehalt für die
Versorgung der Pflanze mit Wasser?*

Der Boden – ein poröses Medium



Bodenporen



Grobporen

Porendurchmesser > 10 μ m

Mittelporen

Porendurchmesser 0,2 bis 10 μ m

Feinporen

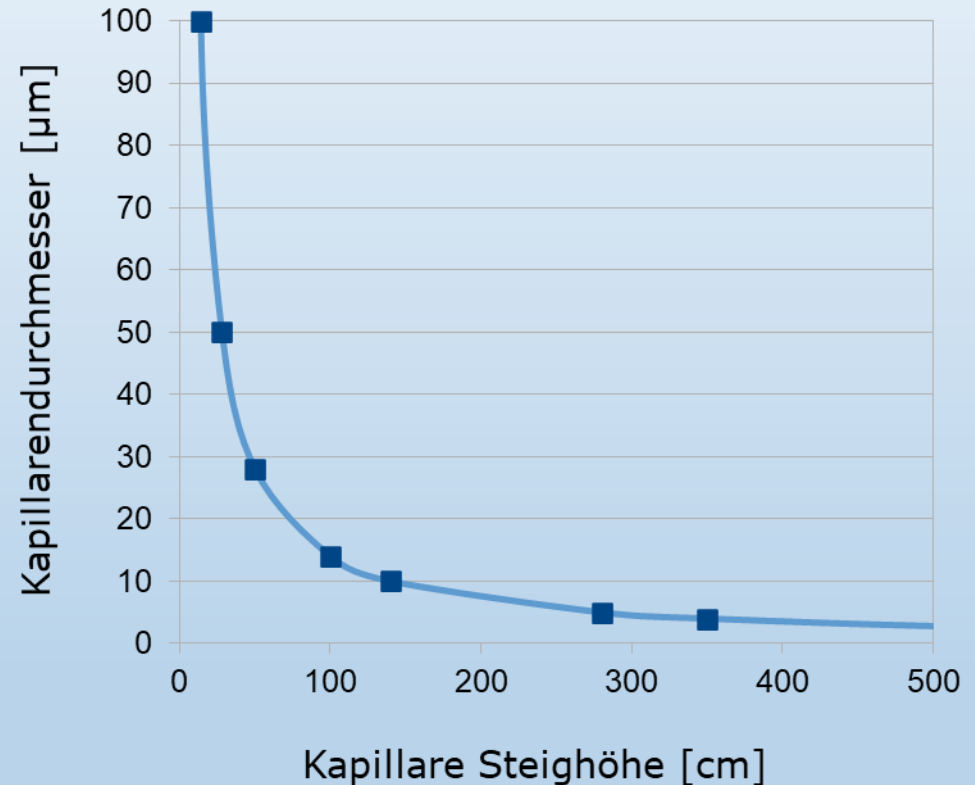
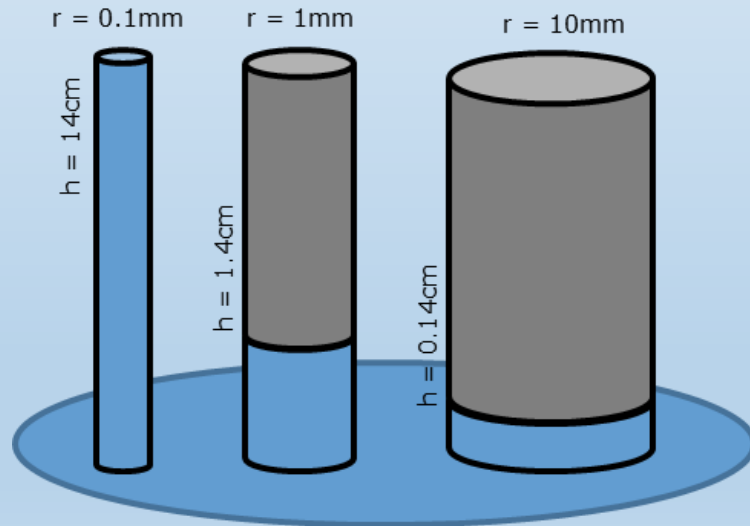
Porendurchmesser < 0,2 μ m

Wasserspannung

Kapillare Steighöhe h :

$$h \approx \frac{1,4 \cdot 10^{-5} \text{m}^2}{r}$$

(r , h in m)



Wasserspannung

Saugspannung, Wasserpotenzial (Ψ) (psi)

...beschreibt wie stark der Boden das Wasser hält.

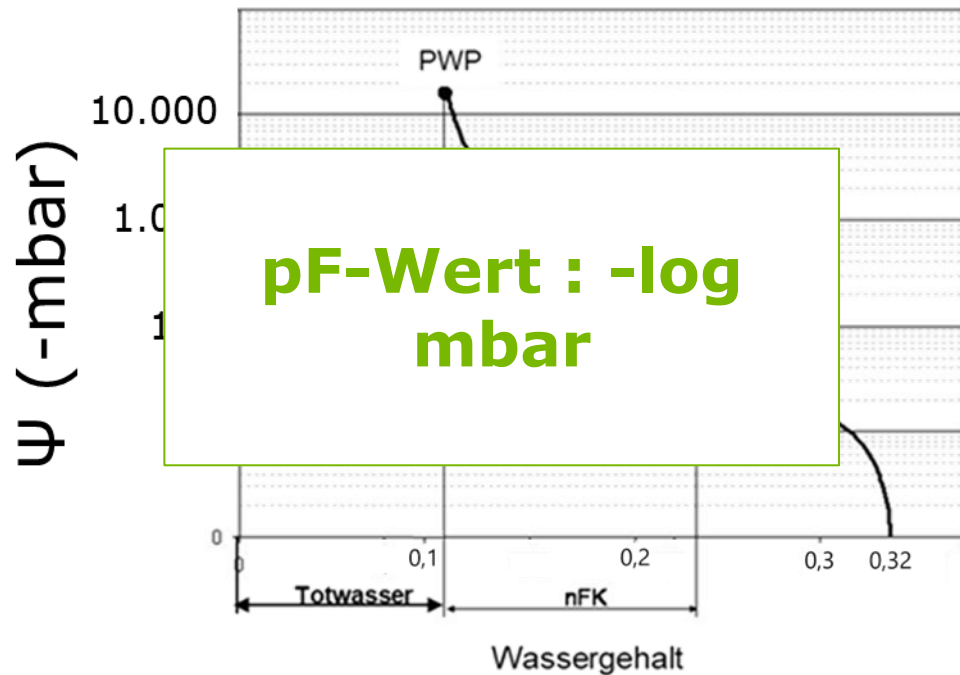
...beschreibt den Durchmesser der wassergefüllten Pore

...beschreibt wie hoch das Wasser in einer Referenz-Pore steigt.

Die Wasserspannung wird als Unterdruck gemessen

$$\mathbf{-1\text{ cmWS} = -1\text{ hPa} = -1\text{ mbar}}$$

Wasserspannungskurve



PWP: Permanente Welkepunkt

Bodenfeuchte, bei der Pflanzen dem Boden kein Wasser entziehen können

FK: Feldkapazität

Menge an Wasser, die der Boden gegen die Schwerkraft halten kann

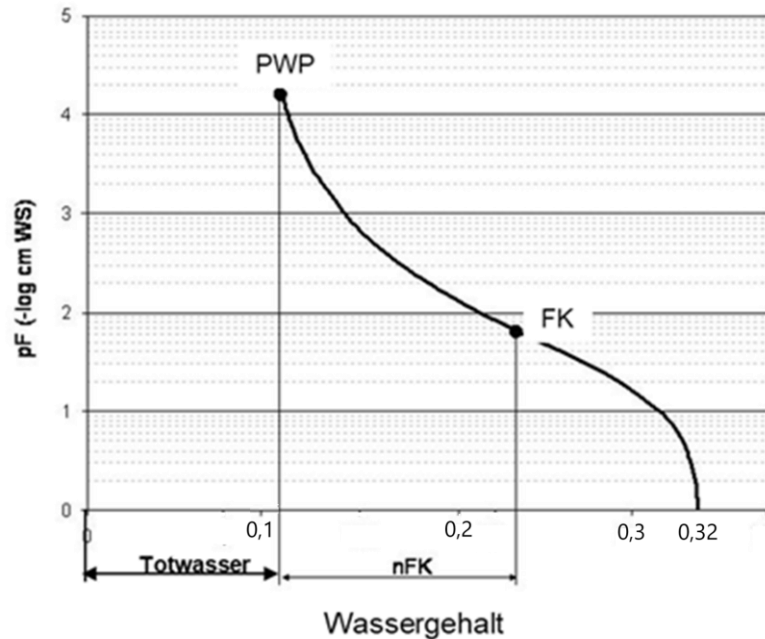
Totwasser (TW)

Nicht pflanzenverfügbares Wasser im Boden

nFK=FK-PWP: nutzbare Feldkapazität

Pflanzenverfügbares Wasser im Boden

Wasserspannungskurve



PWP: Permanente Welkepunkt

Wassergehalt bei pF 4,2

11%

FK: Feldkapazität

Wassergehalt bei pF 1,8

23%

Totwasser (TW)

Über pF 4,2

1,100 m³/ha*m

nFK=FK-PWP: nutzbare Feldkapazität

Zwischen pF 1,8 und 4,2

1,200 m³/ha*m

Wasser im Boden – vereinfachtes Modell



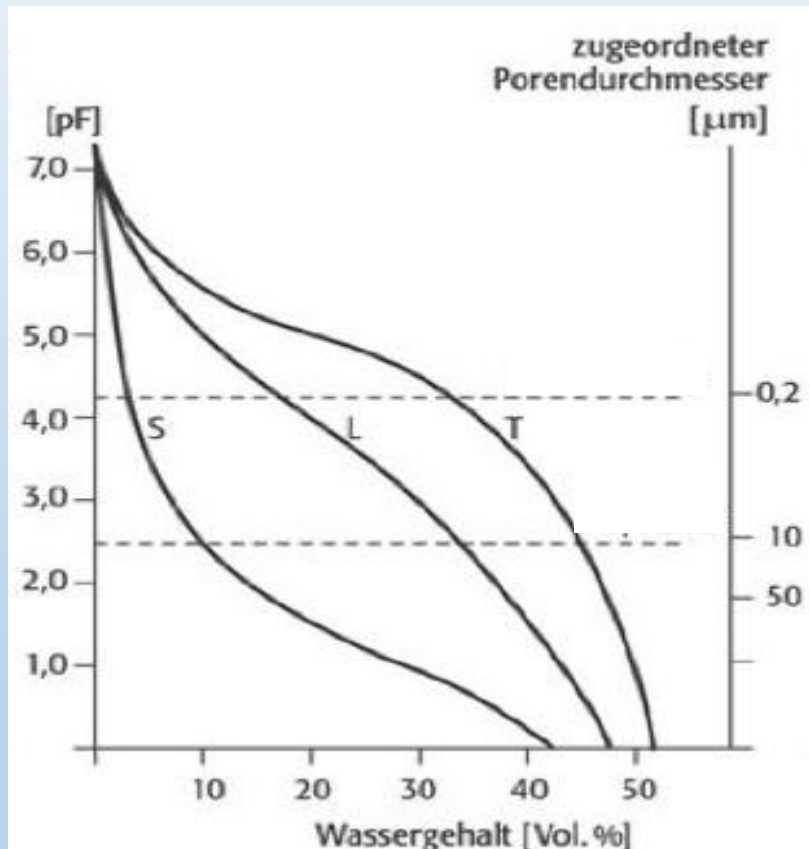
Bei **Feldkapazität** hat der Boden im Beispiel einen Wassergehalt von 23% damit befinden sich dann 2.300 m³/ha Wasser pro 1 m Bodentiefe.

-> z.B. nach längerem Regen oder nach der Bewässerung

Hiervon sind aber nur 1,200 m³/ha pflanzenverfügbar (= **nutzbare Feldkapazität, nFK**). Hat die Bodenfeuchte 11% und damit den **permanenten Welkepunkt** erreicht, können Pflanzen kein Wasser mehr aufnehmen. Die verbleibenden 1.100 m³ bezeichnet man als **Totwasser**.

Wasserspannungskurve

Unterschiede aufgrund Bodentextur



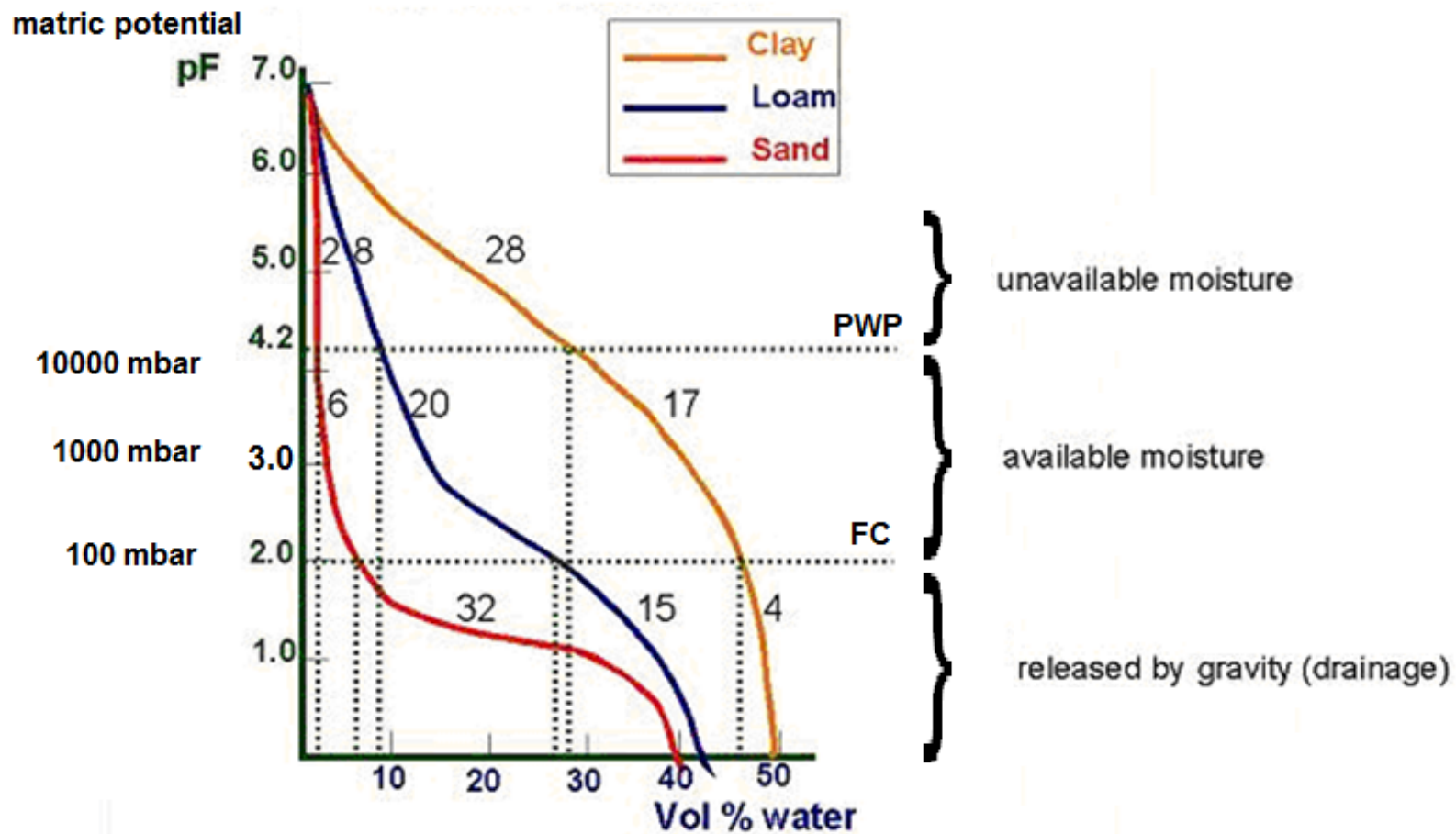
Wasserspannungskurve

Korrelation von vol. Bodenwassergehalt und Bodenwasserspannung (pF-Wert)

→ Wasserspannungskurve ist von der Bodenart (Textur) abhängig

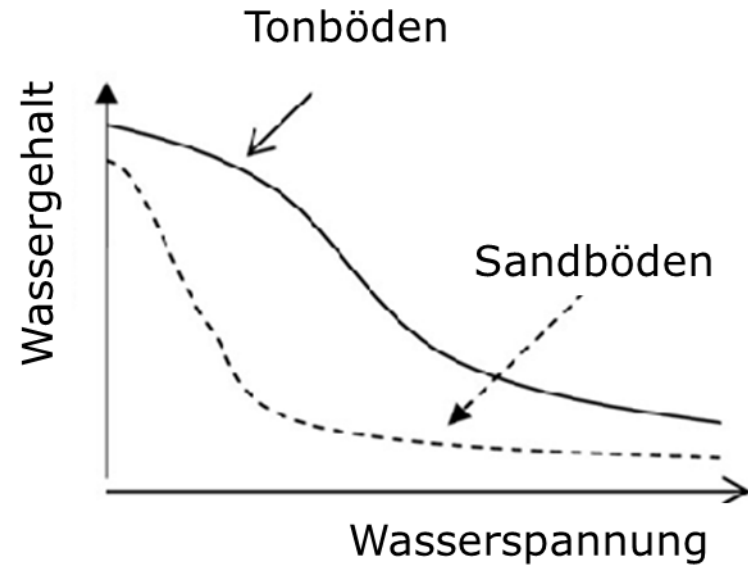
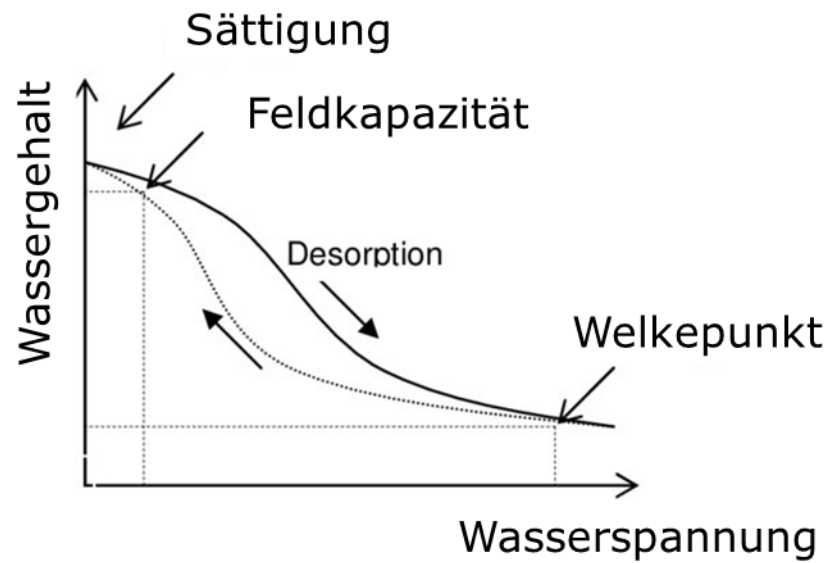
Matric potential

Water retention curves



www.tankonyvtar.hu (2017)

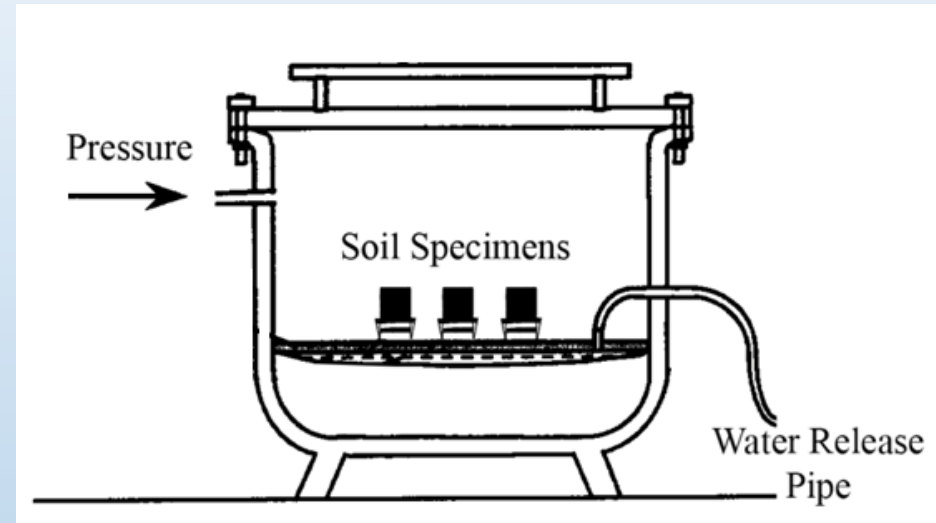
Bestimmung der Wasserspannungskurve



Hillel, 1971

Bestimmung der Wasserspannungskurve

1. Bodenprobe über Nacht aufsättigen
2. Definierten Unterdruck anlegen (100 -> 200 ... 10,000 mbar)
3. Wasser ablaufen lassen
4. Gravimetrische Bestimmung des Wassergehalts



Bestimmung der Wasserspannungskurve



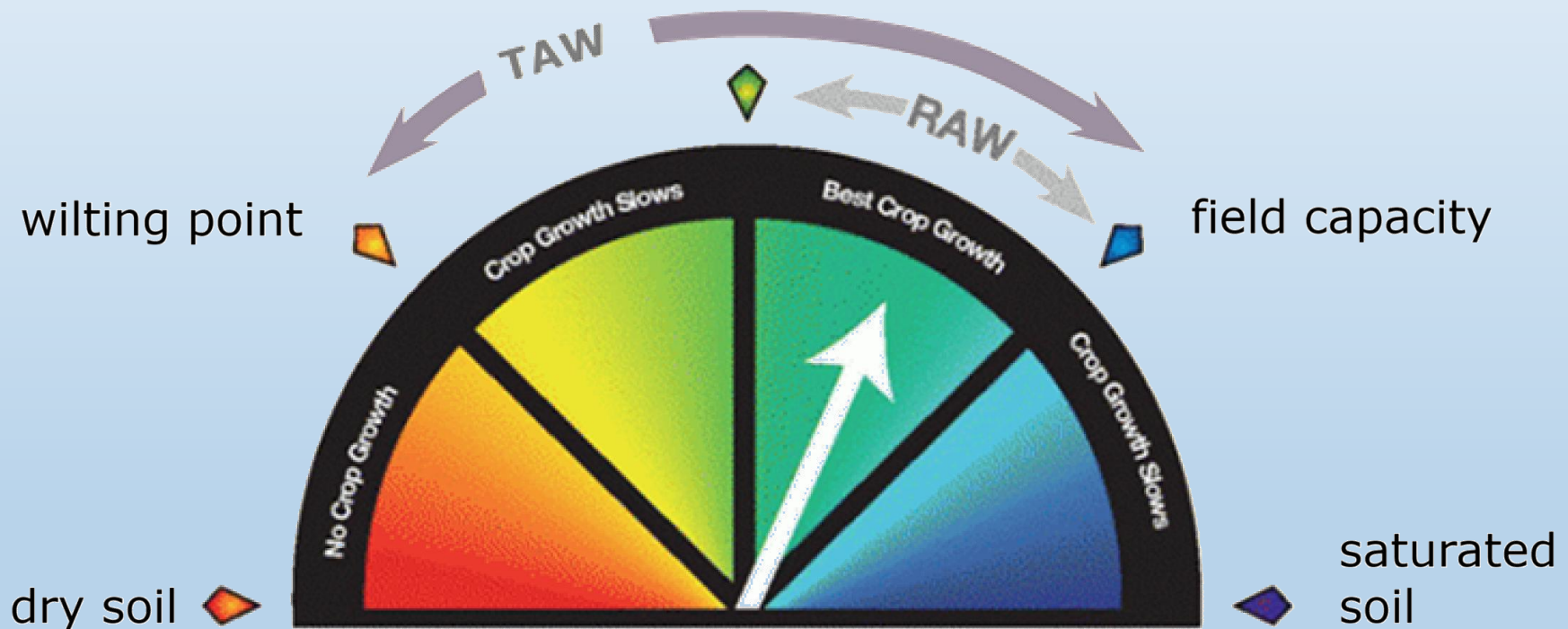
ICAR-IIWM, Bhubaneswar



Pflanzenverfügbares Wasser

Unterteilung des Bodenwasser bzgl. Verfügbarkeit:

1. grundsätzlich verfügbar (TAW = total available water = nFK)
2. In ausreichender Menge verfügbar (RAW = readily available water)



Quelle: <https://www.agric.wa.gov.au/citrus/calculating-readily-available-water>

Pflanzenverfügbares Wasser

Das Verhältnis zwischen TAW und RAW hängt von der Kultur ab. Ist das RAW aufgebraucht, wird ein Schwellenwert erreicht, an dem bewässert werden sollte: die **Bewässerungsschwelle**

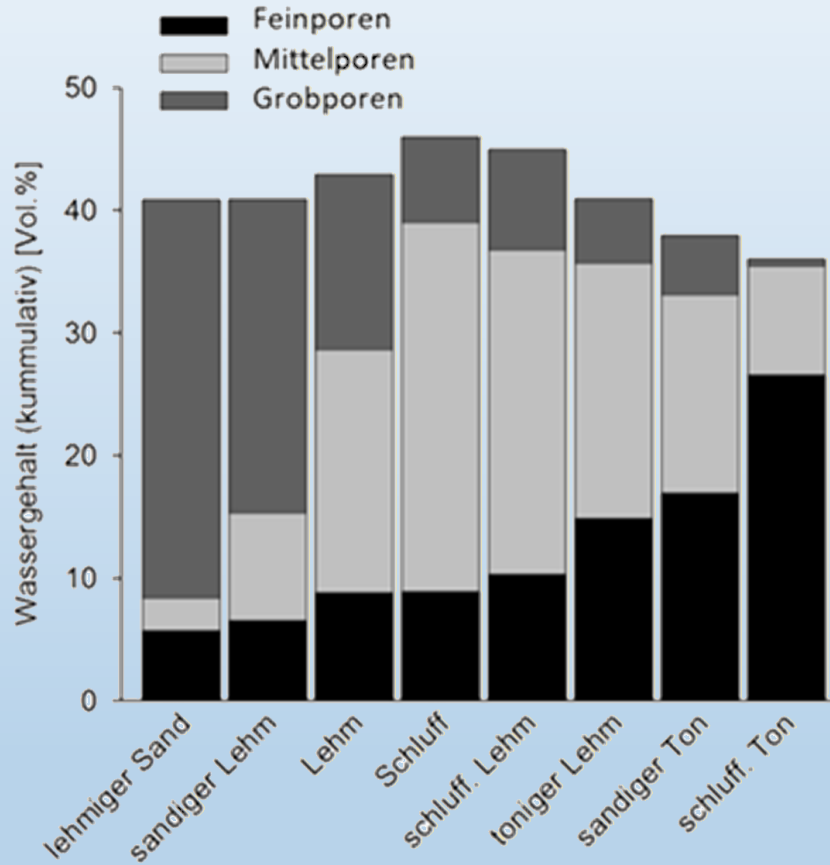
Gemüsekulturen: pF 2,2

Getreide: pF 2,4 – 2,6

Obstbäume: pF 2,8

Die Bewässerungsschwelle bezieht sich auf den physiologischen Bewässerungsbedarf. Ob Bewässerungswürdigkeit besteht, hängt von ökonomischen Faktoren ab.

Wasserspannung



- **Totwasser**
nicht pflanzenverfügbar
- **Nutzbare Feldkapazität (nFK)**
Pflanzenverfügbar in der Bodenmatrix
- **Staunässe**
Kann nicht in der Bodenstruktur gehalten werden

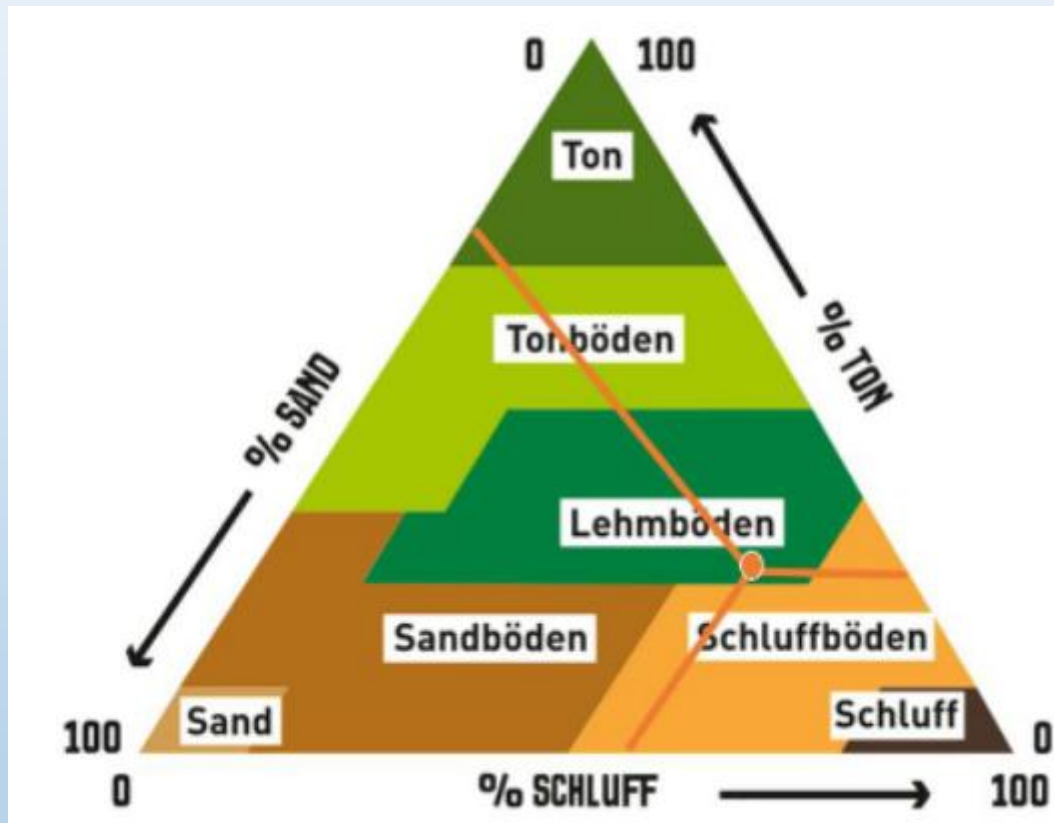
Hausaufgabe

Beschreiben Sie einen typischen Boden Ihrer Heimat in Bezug auf den Wasserhaushalt:

- Korngrößenverteilung (Textur, Bodenart)
- Ggf. unterschiedliche Horizonte
- Gründigkeit

Ermitteln Sie Werte für PWP, FK, nFK

Nennen Sie Ihre Quellen



Bodenart und Bodenwasser

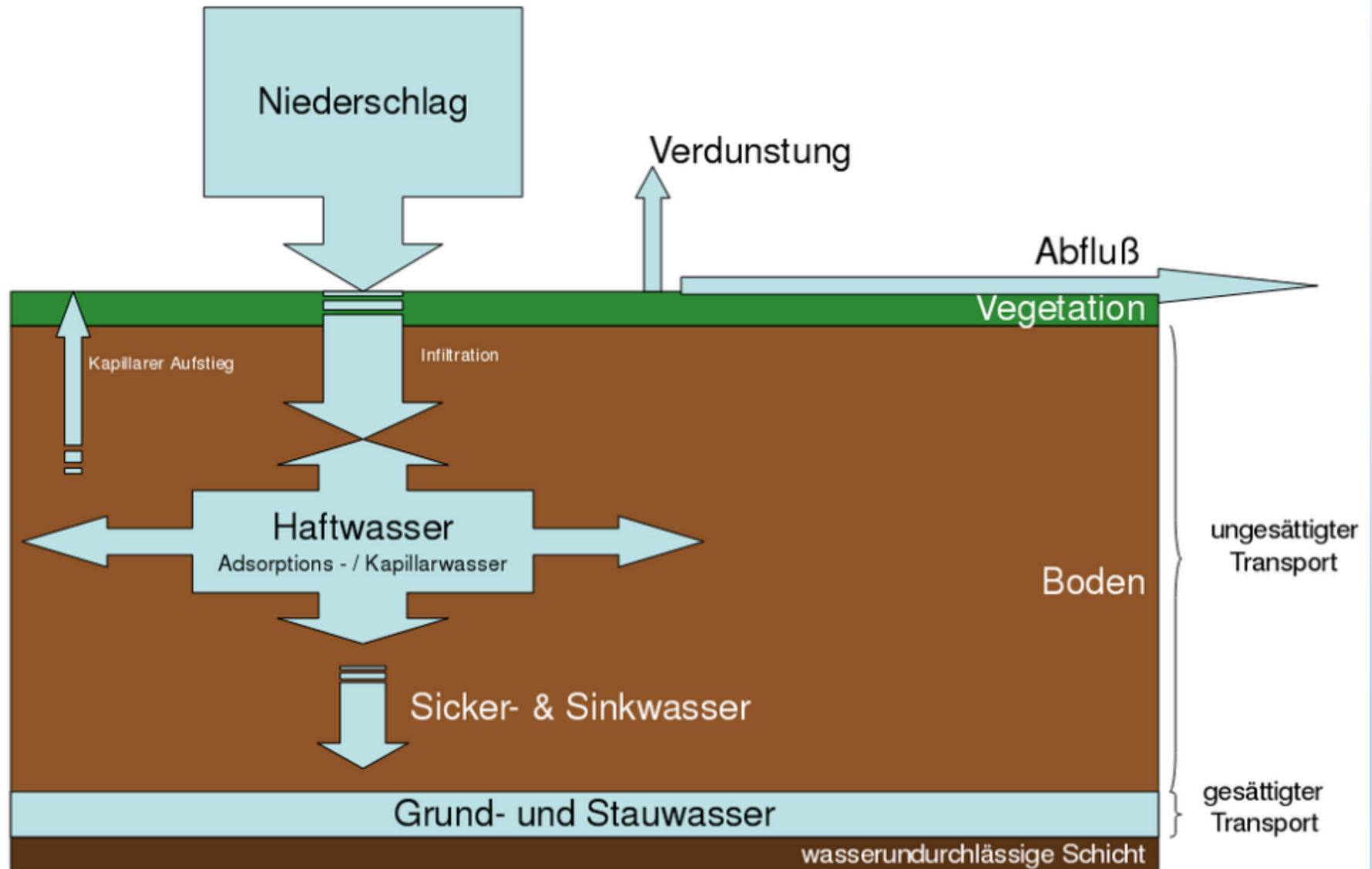
Bodenart	Feldkapazität (Vol.-%)
Grobsand	5–10 %
Sand	10–15 %
Sandiger Lehm	15–25 %
Lehm	25–35 %
Toniger Lehm	30–40 %
Schluffiger Lehm	35–45 %
Ton	40–50 %

Bodenart	Permanenter Welkepunkt (Vol.-%)
Grobsand	1–3 %
Sand	3–5 %
Sandiger Lehm	5–10 %
Lehm	10–15 %
Toniger Lehm	15–20 %
Schluffiger Lehm	10–20 %
Ton	20–30 %

Bewässerungs-App

https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/Steuerungsmodelle/steuerung-berechnung-entscheidungshilfe_BewaesserungsApp.html?expert=true

Bodenwasserhaushalt



Infiltration

Infiltration oder Versickerung:

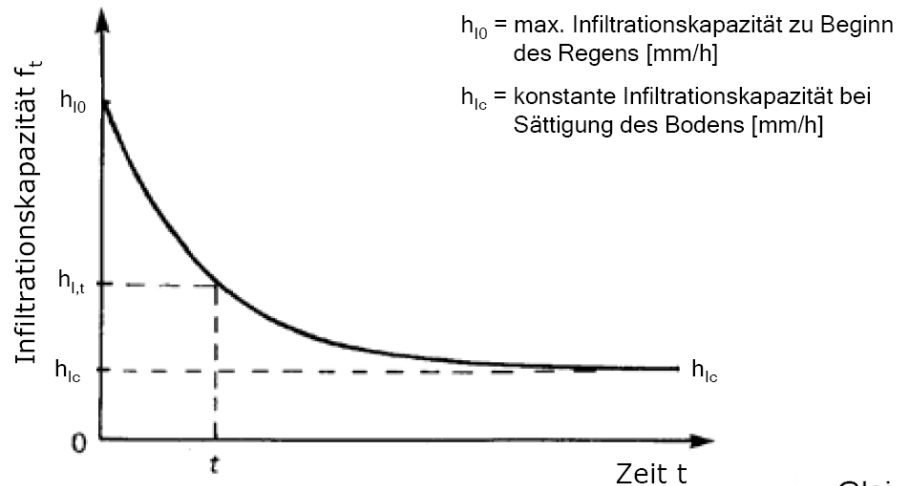
Wasser, das durch die Bodenoberfläche in den Boden eindringt.

Menge: Regen/Bewässerung – Interzeption

Rate: Menge pro Zeiteinheit

Infiltrationskapazität

Bodeninfiltration



Krebs, Abwasserentsorgung I, TU Dresden

Anfangs-Infiltrationsrate h_{10}

Boden- und Oberflächenart	trocken h_{10} (mm/h)	feucht h_{10} (mm/h)
sandige Böden mit wenig oder keiner Vegetation	130	45
lehmmige Böden mit wenig oder keiner Vegetation	75	25
tonige Böden mit wenig oder keiner Vegetation	25	8
sandige Böden mit dichter Vegetation	250	85
lehmmige Böden mit dichter Vegetation	150	50
tonige Böden mit dichter Vegetation	50	18

Gleichgewichts-Infiltrationsrate h_{1c} verschiedener Bodenarten

Bodenart	Gleichgewichts-Infiltrationsrate h_{1c} (mm/h)
Ton, silikiger Ton ¹	0.04 - 4*10 ⁻⁵
toniger Silt ¹	0.4 - 4*10 ⁻⁴
Silt ¹	36 - 0.04
siltiger Sand ¹	36 - 4
Sand ¹	360 - 40
sandiger Kies ¹	3600 - 40
Kies ¹	36000 - 360
Ton, siltiger Ton, sandiger Ton, toniger Lehm ²	0 - 1.3
Lehm mit Sand und Ton ²	1.3 - 3.8
Lehm, siltiger Lehm ²	3.8 - 7.6
lehmmiger Sand, sandiger Lehm ²	7.6 - 11.4

Bestimmung der Infiltrationsrate

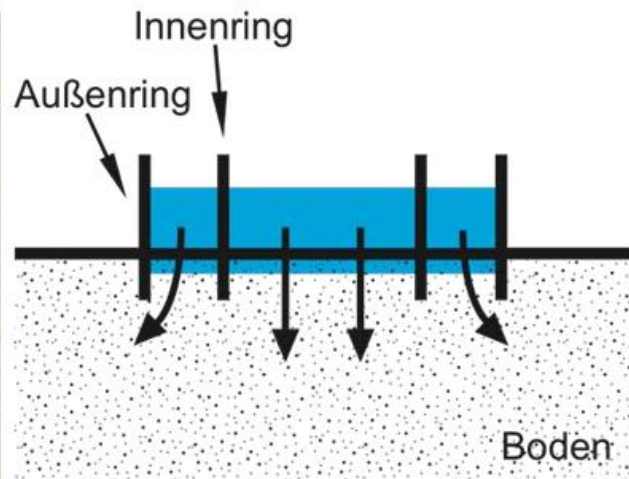


Abbildung 1: schematischer Aufbau des Doppelringinfiltrometers nach Durner (2003)

$$Q = \cancel{V} (\cancel{A} \cancel{t})^{-1}$$

↓

$$Q = \Delta h * t^{-1}$$

Infiltration

Ist der Wassereintrag durch Regen höher als die Infiltrationsrate, führt dies zu Staunässe, oder Abfluss



eben



abschüssig

Potenzialkonzept und Wasserbewegung

Das Wasser besitzt einen bestimmten energetischen Zustand (Wasserpotenzial).
(Gesamtenergie (E_{ges}) = Druckenergie + kinetische Energie + Lageenergie)

Spezifische Energie: z.B. Gesamtenergie bezogen auf Gewicht

Wasser im Boden:

Wasserpotenzial = Matrixpotenzial (+ osmotisches Potenzial + Gaspotenzial)

Saugkraft /Saugspannung = veralteter Begriff für Wasserpotenzial

Potenzialkonzept und Wasserbewegung

Wasser fließt immer vom Punkt der höheren Energie zum Punkt des tieferen Energieniveaus.

Im **ungesättigten** Boden:

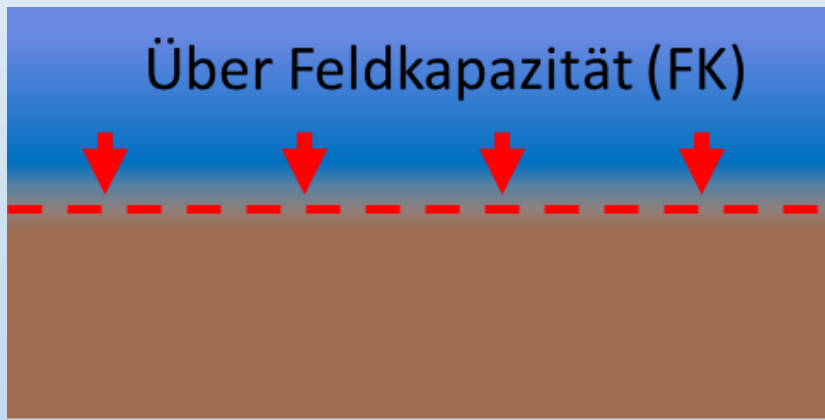


Saugspannung / Bodensaugspannung

Wasserpotenzial / Bodenwasserpotenzial

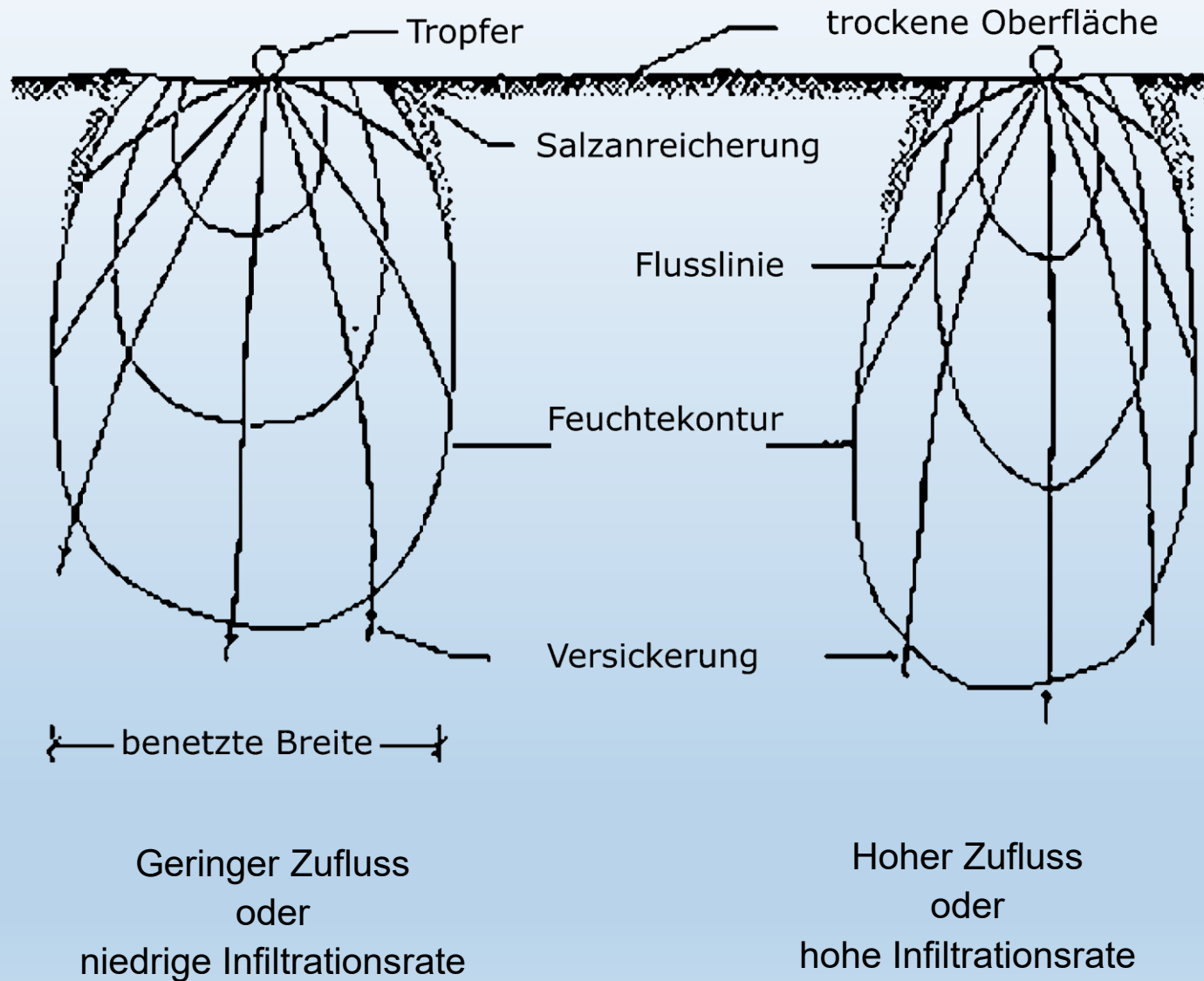
Vorzeichen: **+** oder **-** ?

Verrieselung, Beregnung

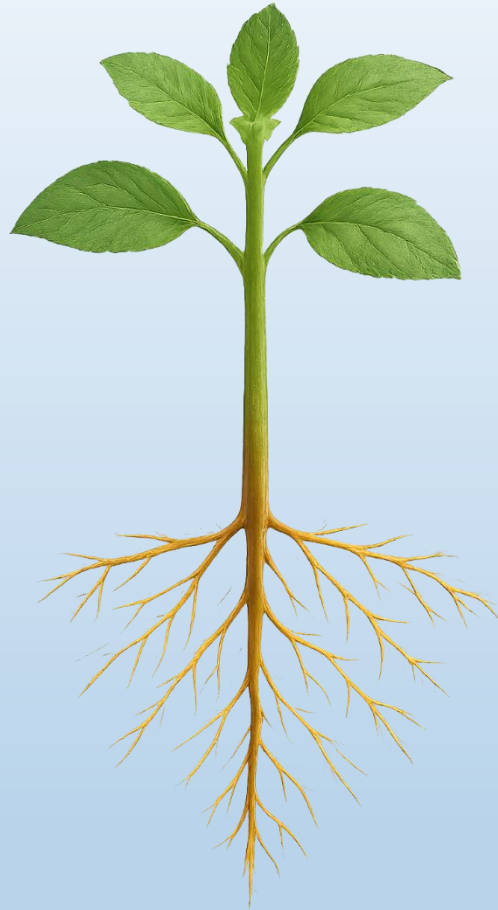


Wird FK im Boden überschritten, bewegt sich das Wasser auch durch die Schwerkraft

Tropfbewässerung



Boden- Pflanzen- Atmosphären Kontinuum



Die Pflanze

Funktionen von Wasser in der Pflanze

- Wasser ist wichtig für biochemisch Prozesse
- Wasser spielt eine strukturelle Rolle
- Wasser transportiert Nährstoffe
- Wasser transportiert Signale

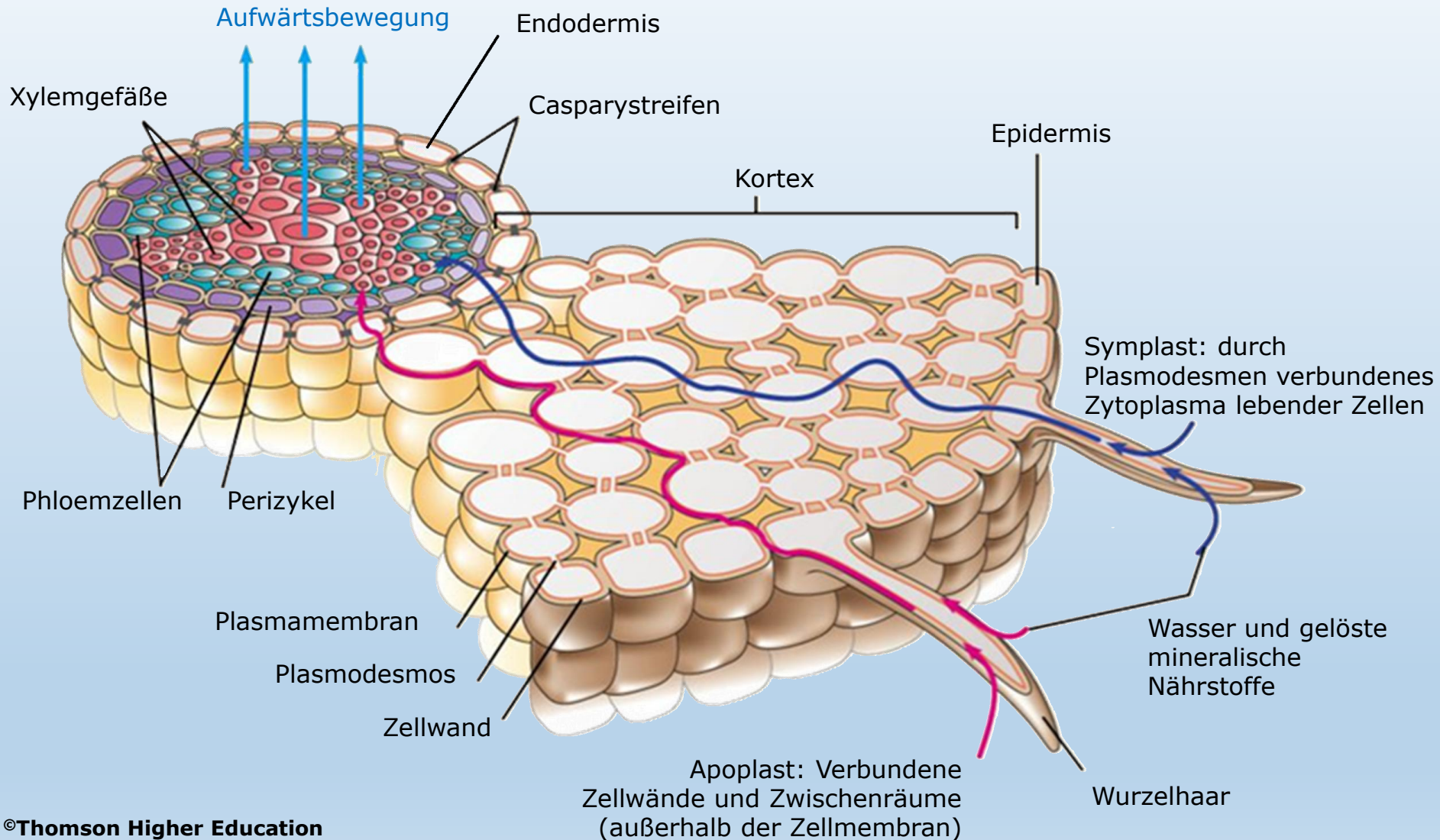
Der Weg des Wassers durch die Pflanze

Aufnahme des Wassers durch die Wurzeln

1. Wasser im Boden
2. Aufnahme durch die Wurzelhaare
3. Interzellulärer Transport im Kortex



Der Weg des Wassers in der Pflanze



©Thomson Higher Education

Der Weg des Wassers durch die Pflanze

Aufnahme des Wassers durch die Wurzeln

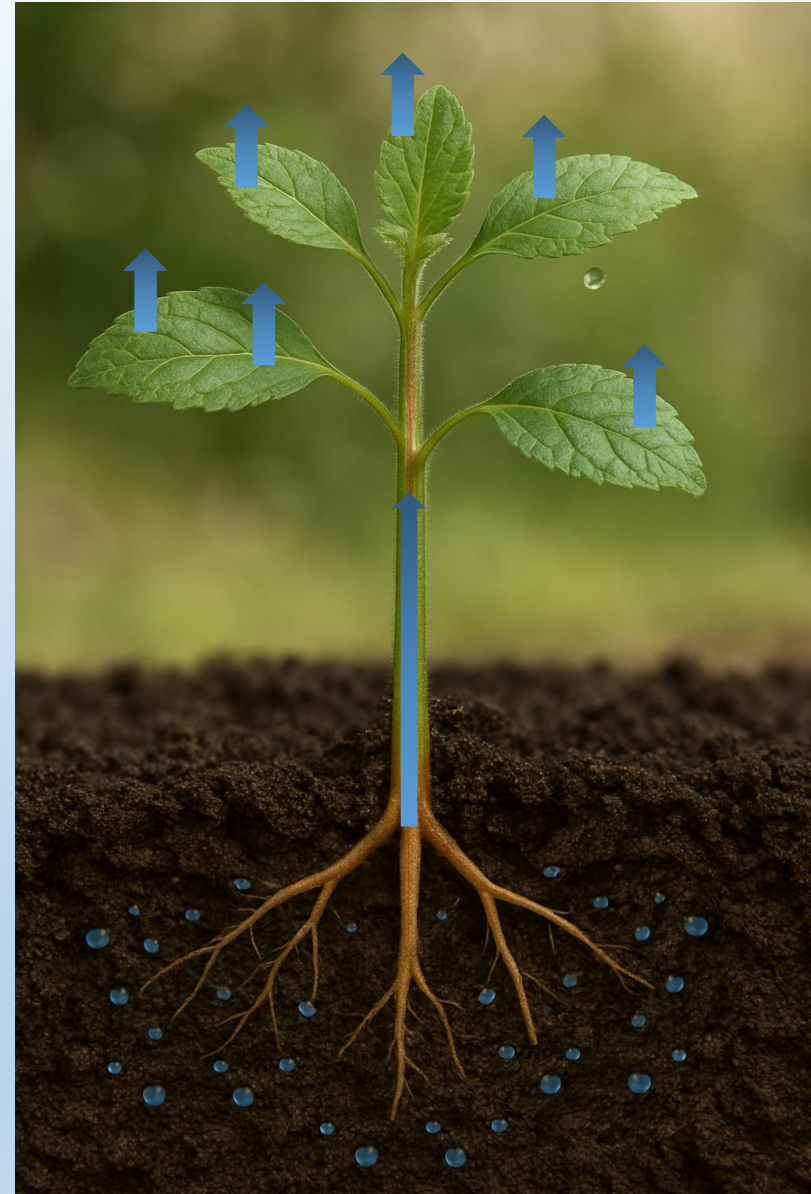
1. Wasser im Boden
2. Aufnahme durch die Wurzelhaare
3. Interzellulärer Transport im Kortex

Transport im Xylem: Aufstieg des Wassers

4. Im Zentralzylinder gelangt das Wasser in die Leitgefäße (Xylem)
5. Transpirationssog

Verwendung des Wassers

6. Fotosynthese
7. Transpiration



Der Weg des Wassers durch die Pflanze

Aufnahme des Wassers durch die Wurzeln

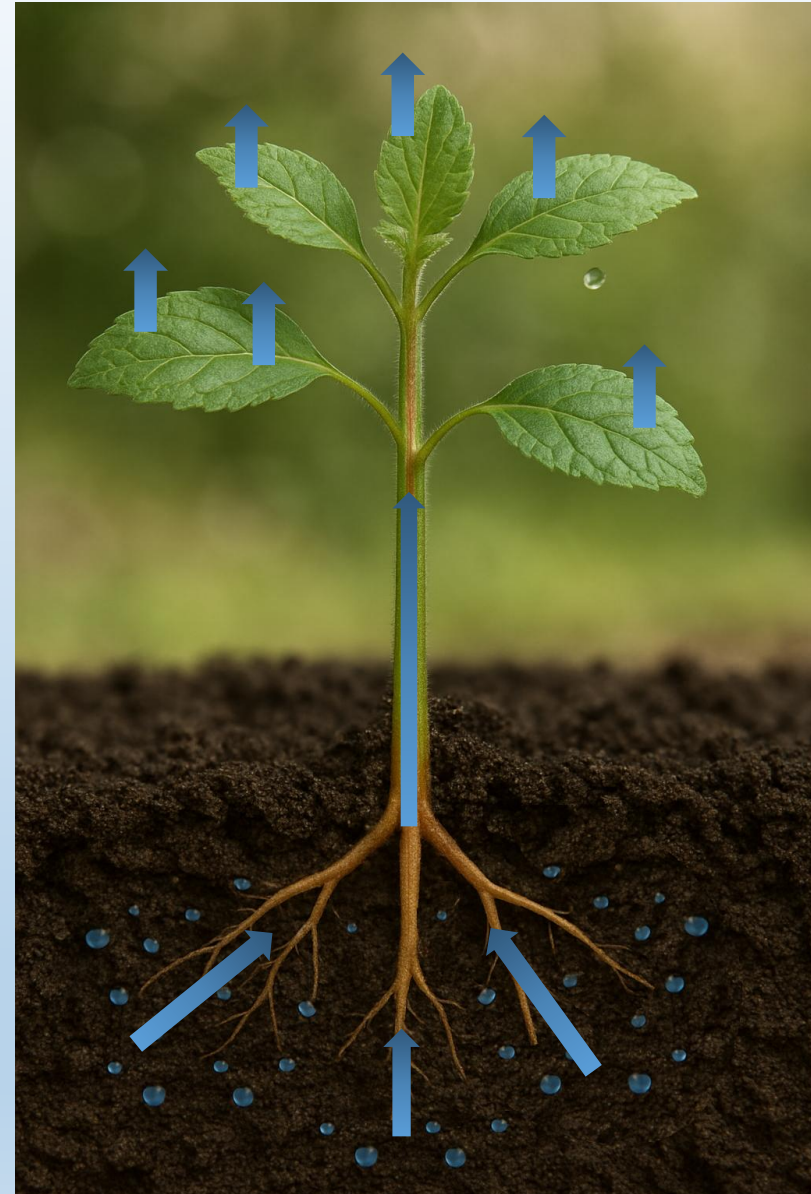
1. Das Wasser befindet sich im Boden zwischen den Bodenpartikeln.
2. Feine Wurzelhaare (Verlängerungen der Wurzelzellen) vergrößern die Oberfläche der Wurzel stark. Durch Osmose (einen Konzentrationsunterschied zwischen Bodenlösung und Zellsaft) gelangt Wasser aus dem Boden in die Wurzelhaarzellen.
3. Von dort durchquert das Wasser den Wurzelkortex von Zelle zu Zelle (interzellulär) Richtung Zentralzylinder der Wurzel. Der interzelluläre Transport findet im Apoplasten durch verbundene Zellwände und Zwischenräume außerhalb der Membrane und im Symplasten durch mit Plasmodesmen verbundene Zellen statt.

Transport im Xylem: Aufstieg des Wassers

4. Im Zentralzylinder gelangt das Wasser in die Leitgefäße (Xylem). Das Xylem besteht aus toten, röhrenförmigen Zellen, die wie Trinkhalme miteinander verbunden sind. Wasser wird durch Kohäsion (Zusammenhalt der Wassermoleküle) und Adhäsion (Haftung an den Gefäßwänden) als zusammenhängende Wassersäule nach oben gezogen.
5. Transpirationssog: Die Diffusion von Wasserdampf aus dem Blatt, auch *Transpiration* genannt, ist der Verdunstungsprozess, bei dem Wasser in Form von Dampf durch die Spaltöffnungen (Stomata) an die Atmosphäre abgegeben wird. Dies geschieht, weil die Luftfeuchtigkeit im Blatt höher ist als in der Umgebung, was zu einem Konzentrationsgefälle führt. Die Diffusion erzeugt einen Unterdruck: den Transpirationssog.

Verwendung des Wassers

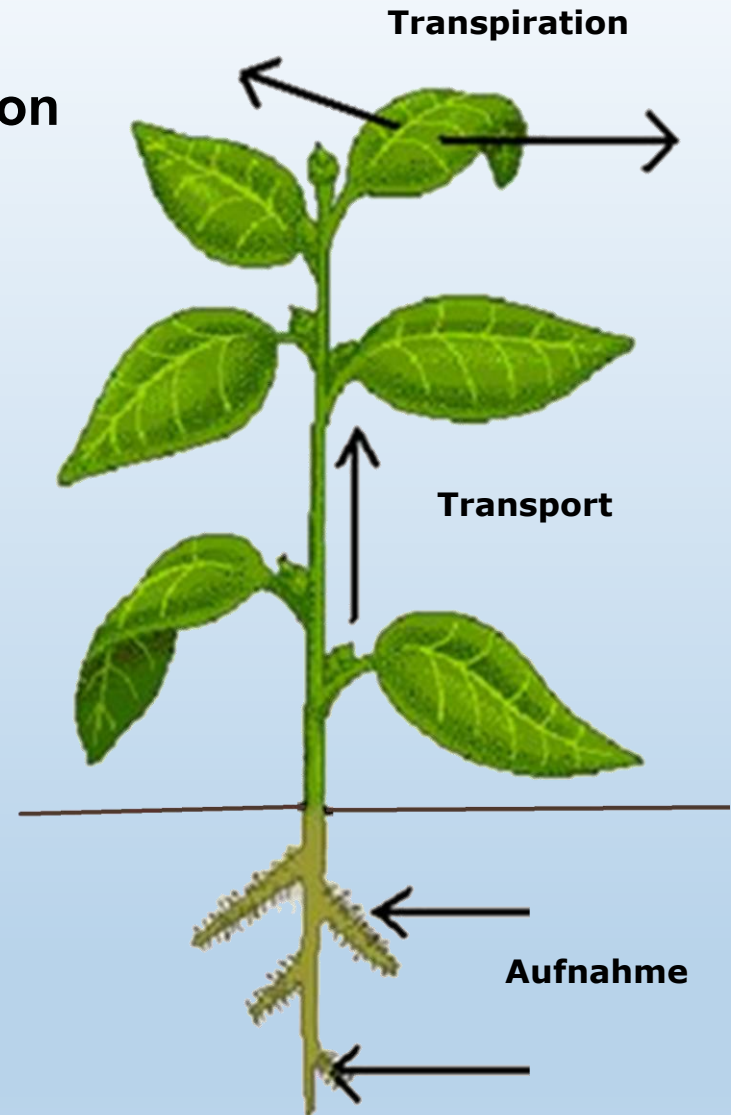
6. Ein Teil des Wassers wird in den Zellen zur Fotosynthese benötigt.
7. Der größte Teil verdunstet und wird über die Blätter abgegeben. So wird die Nachlieferung von Wasser und Nährstoffen betrieben und das Blatt durch Verdunstungskälte gekühlt.



Wassernutzung durch die Pflanze

Das meiste Wasser wird durch Transpiration verbraucht. Beispiel:

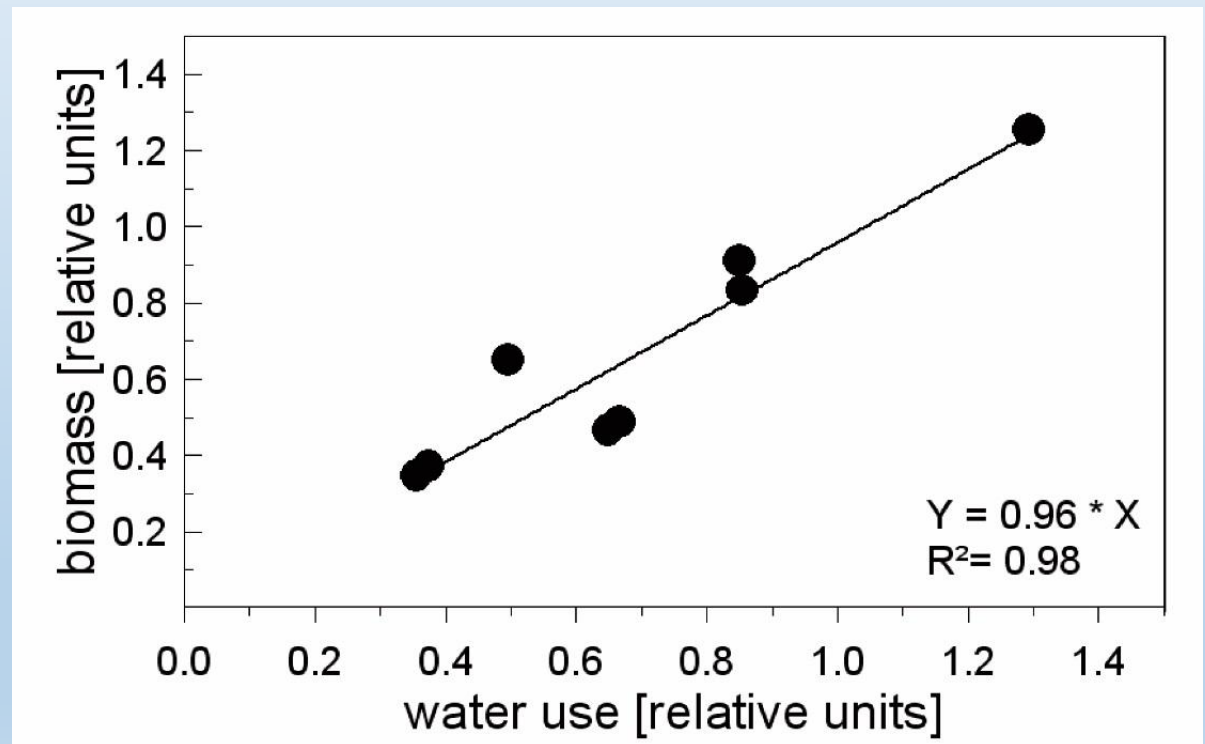
- Maisertrag 60 t/ha
- TM (Trockenmasse) : Wasser = 1 : 2
- TM: 20 t/ha, Wasser: 40 t/ha
- Verbrauch: 120 Tage Wachstumsperiode bei 5 mm/d = 600 mm
- 600 mm = 6.000 m³/ha = 6.000 t/ha
- 40 t/ha / 6.000 t/ha = 0,0067
- < 1% des Wassers wird zum Aufbau von Biomasse verwendet.



Ertragsdaten von: http://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.15_3/Art25.pdf

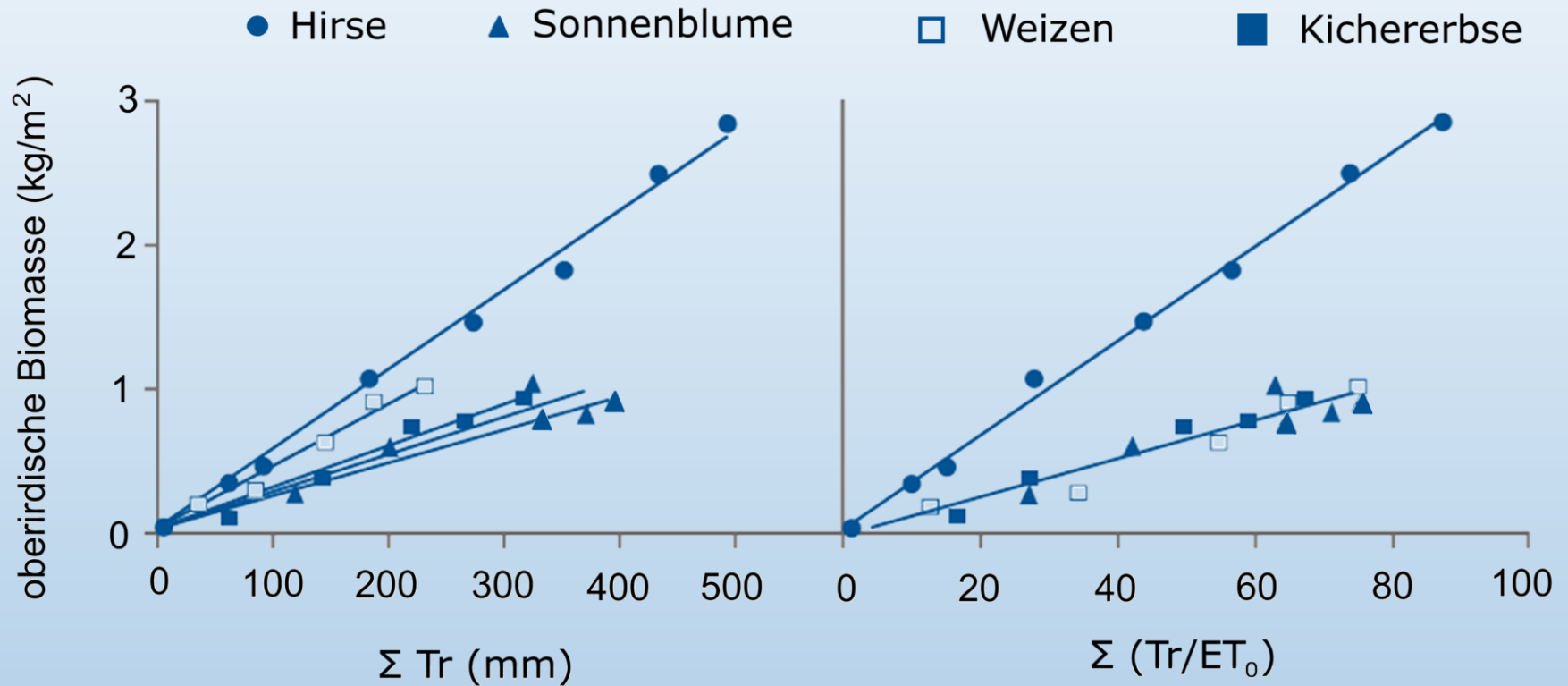
Chemische Bedeutung von Wasser in Pflanzen

- Wasser ist ein Reaktant in der Photosynthese
- Die Produktion von Biomasse ist linear korreliert zum Wasserverbrauch



Mantovani et al., 2013

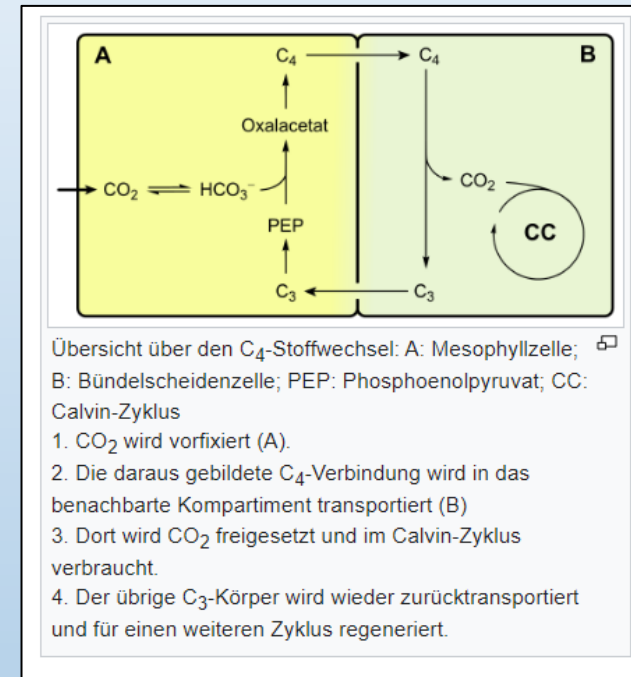
Wasser beim Aufbau von Biomasse



Steduto and Albrizio, 2005

C4 Pflanzen sind an tropisches Klima mit höherer Einstrahlung angepasst, denn sie binden CO₂ effektiver als C3-Pflanzen

- Benennung: das erste Produkt der Photosynthese ist ein Kohlenstoffkörper mit vier C-Atomen
- Räumliche Trennung von CO₂-Assimilation und Calvin-Zyklus
- Höhere Photosynthese durch aktive Anreicherung (Vorfixierung) von CO₂ besonders unter Stomatenschluss durch Wassermangel
- C4-Pflanzen können bei hoher Lichteinstrahlung und Temperatur in kürzerer Zeit mehr Biomasse aufbauen als C3-Pflanzen
- Zu den C4-Pflanzen gehören vor allem Gräser. Wichtige C4-Nutzpflanzen neben Mais: Zuckerrohr, Amaranth und Hirse



Wikipedia.org

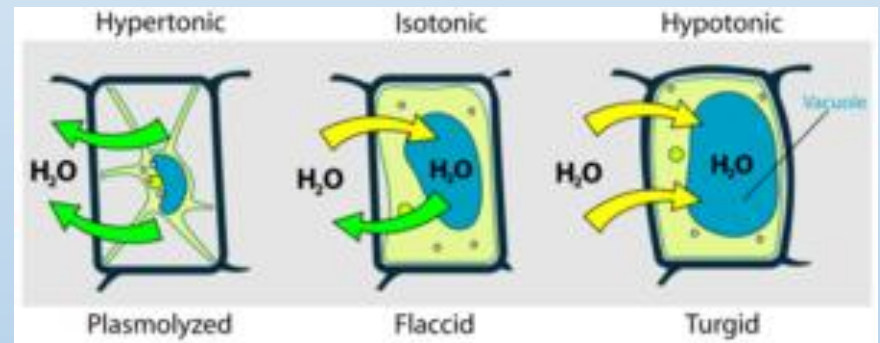
C4 Pflanzen

Familie	Gattung/Art	Deutscher Name	Beschreibung
Poaceae (Gräser)	<i>Zea mays</i>	Mais	Wichtige Kulturpflanze
Poaceae (Gräser)	<i>Sorghum bicolor</i>	Sorghum/Hirse	Getreide- und Futterpflanze
Poaceae (Gräser)	<i>Saccharum officinarum</i>	Zuckerrohr	Zucker- & Bioenergiepflanze
Poaceae (Gräser)	<i>Pennisetum glaucum</i>	Perlhirse	Tropische Trockengebiete
Poaceae (Gräser)	<i>Setaria italica</i>	Kolbenhirse	Alte Kulturhirse Asiens
Poaceae (Gräser)	<i>Eragrostis tef</i>	Teff	Hauptgetreide in Äthiopien
Poaceae (Gräser)	<i>Miscanthus giganteus</i>	Miscanthus	Energiegras
Poaceae (Gräser)	<i>Cynodon dactylon</i>	Bermudagrass	Weit verbreitetes Rasengras
Amaranthaceae	<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Amarant (Kornamarant)	Pseudogetreide
Amaranthaceae	<i>Amaranthus cruentus</i>	Amarant	Korn- und Blattnutzung;
Amaranthaceae	<i>Atriplex spp.</i>	Salzmelden	Halophyten

Weitere Familien: *Cyperaceae* (Sauergräser), *Euphorbiaceae*, *Asteraceae*, *Cleomaceae*, *Boraginaceae*, *Nyctaginaceae*, *Polygonaceae*, *Hydrocharitaceae*

Strukturelle Rolle von Wasser in Pflanzen

- Wasser ist eine Schlüssekomponente der Zellstruktur
- Unterhält Aktivitäten in der Zelle
- Erhält Turgordruck



Bestimmung des Pflanzenwasserstatus

- Messung von Blattwinkeln
- Abhängig von Arten und Umweltfaktoren.
- Messen Sie Zeitpläne, um Änderungen zu erkennen



Bestimmung des Pflanzenwassers

- Relativer Wassergehalt (RWC)
 - Nehmen Sie eine Probe und wiegen Sie sie
 - Bis zur vollständigen Prallheit hydratisieren und erneut wiegen

$$RWC (\%) = \left(\frac{W - DW}{TW - DW} \right) \times 100$$

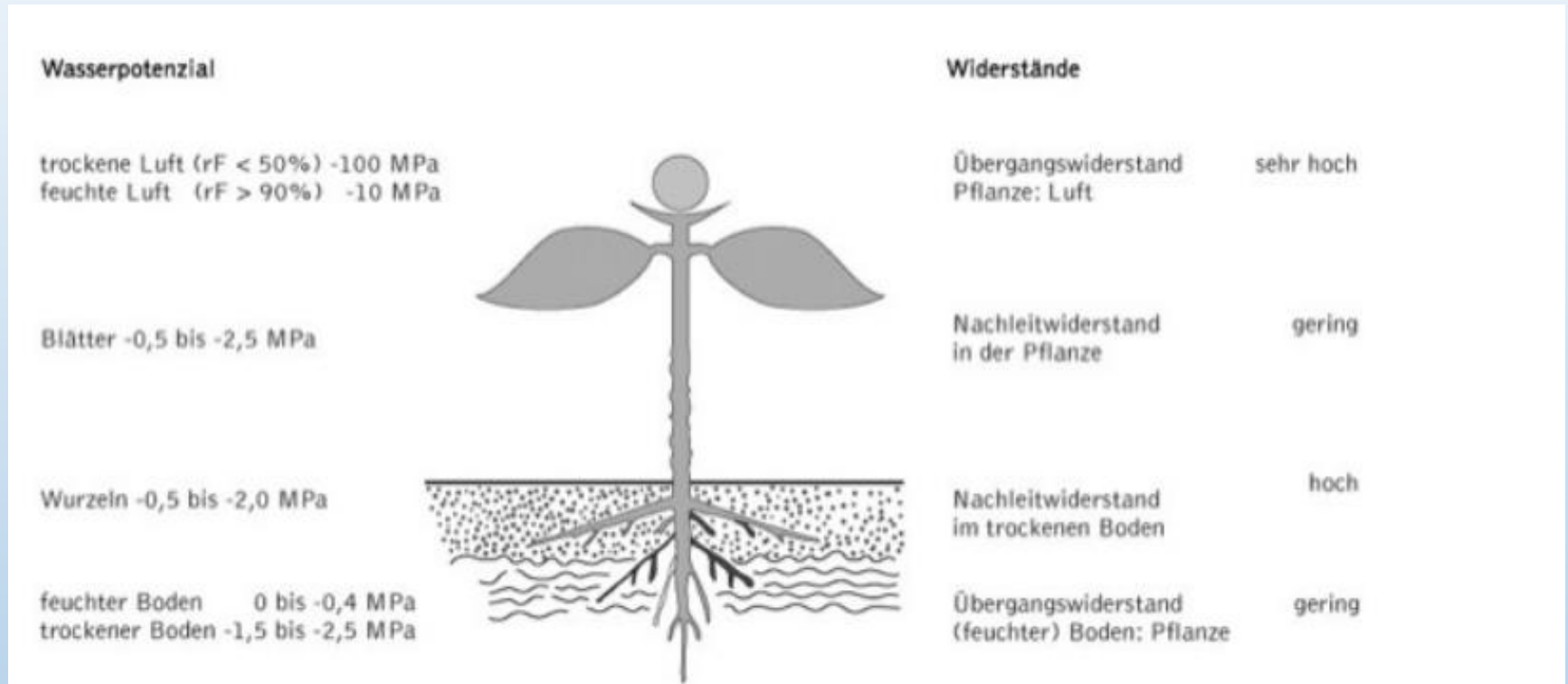
W – Frischgewicht der Probe

TW – Prallgewicht der Probe

DW – Trockengewicht der Probe.



Blattwasserpotential

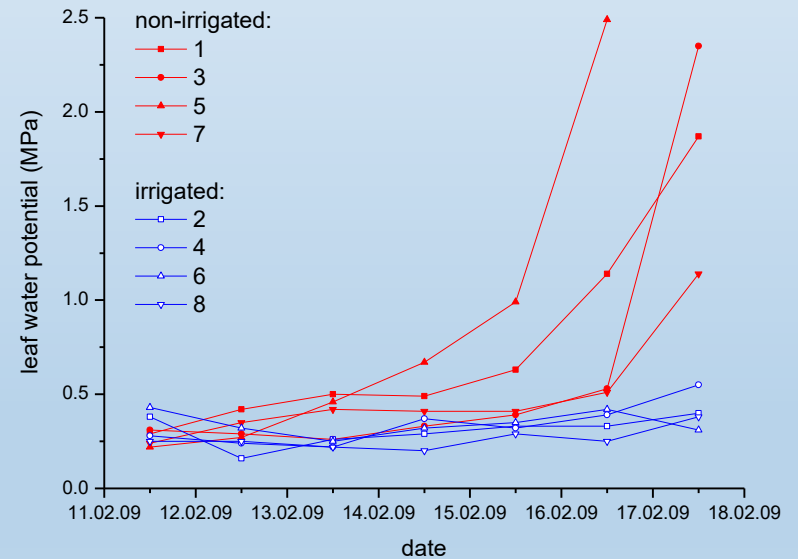


<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/wasserpotenzial/12725>

Blattwasserpotential



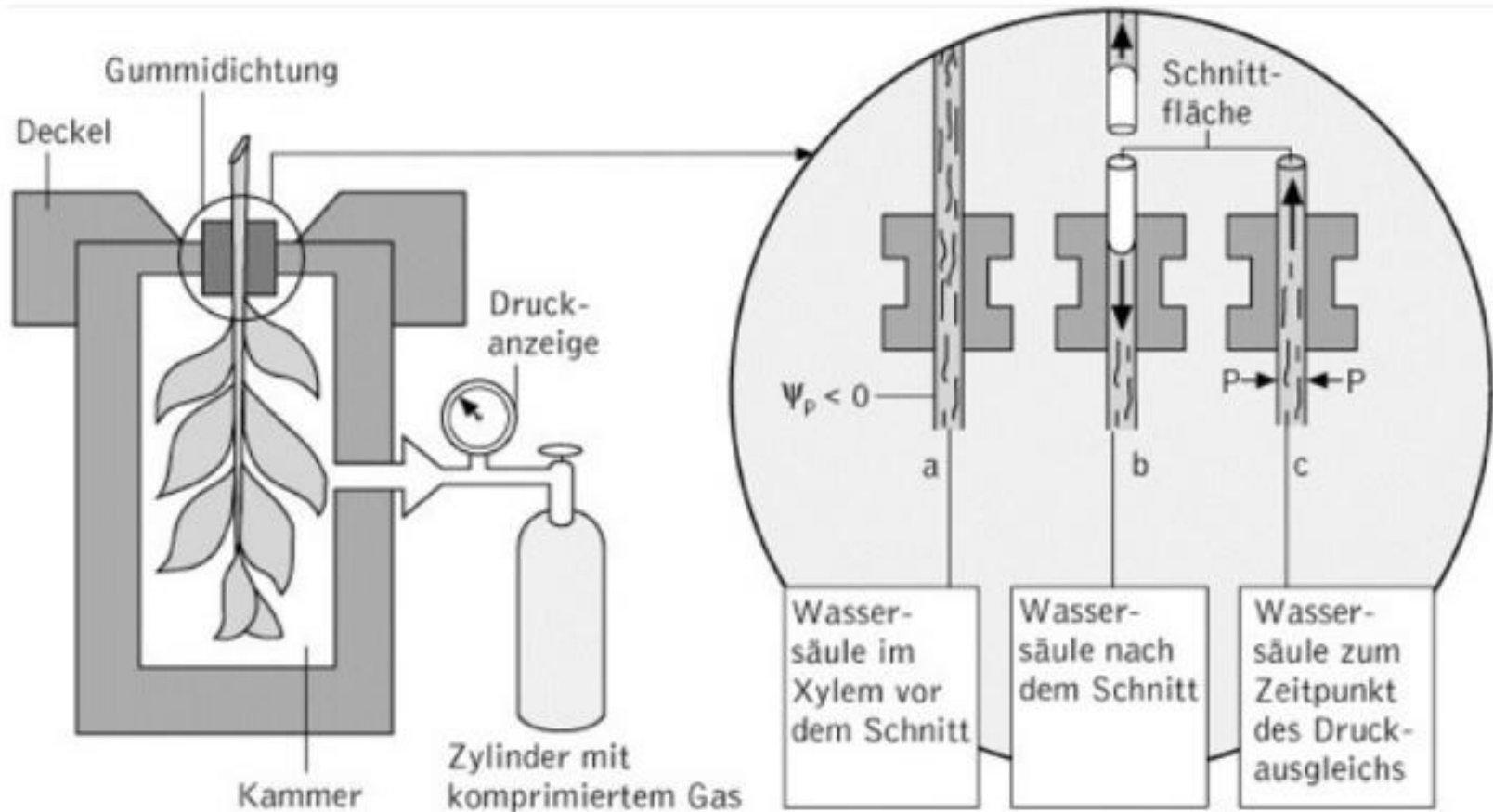
- Bestimmung mittels Druckkammer „Scholander-Bombe“ (Scholander et al. 1965)
- Direktes Maß für den Wasserzustand der Pflanze



Anstieg des LWP während des Austrocknens von Mangobäumen (*unveröffentlicht*)

<http://cesonoma.ucdavis.edu/files/63831.jpg>

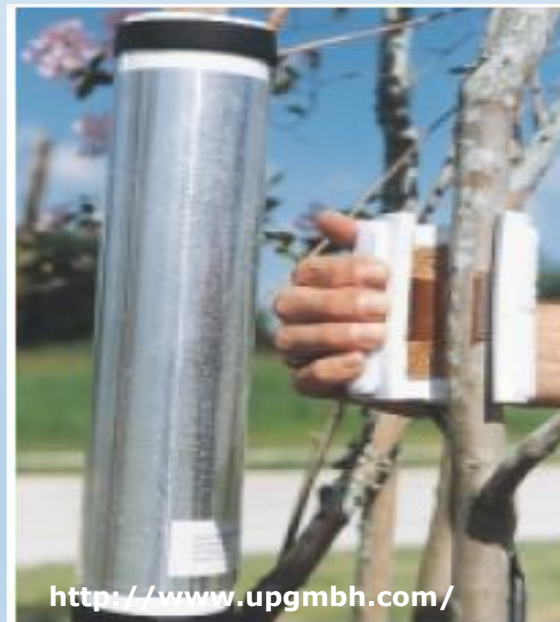
Blattwasserpotential



Messung des Wasserverbrauchs

Saftflussmessung zur Bestimmung des Wassertransports in der Pflanze

- Wärmebilanzmethode (Granier , 1987)
- Wärmeimpulsmethode

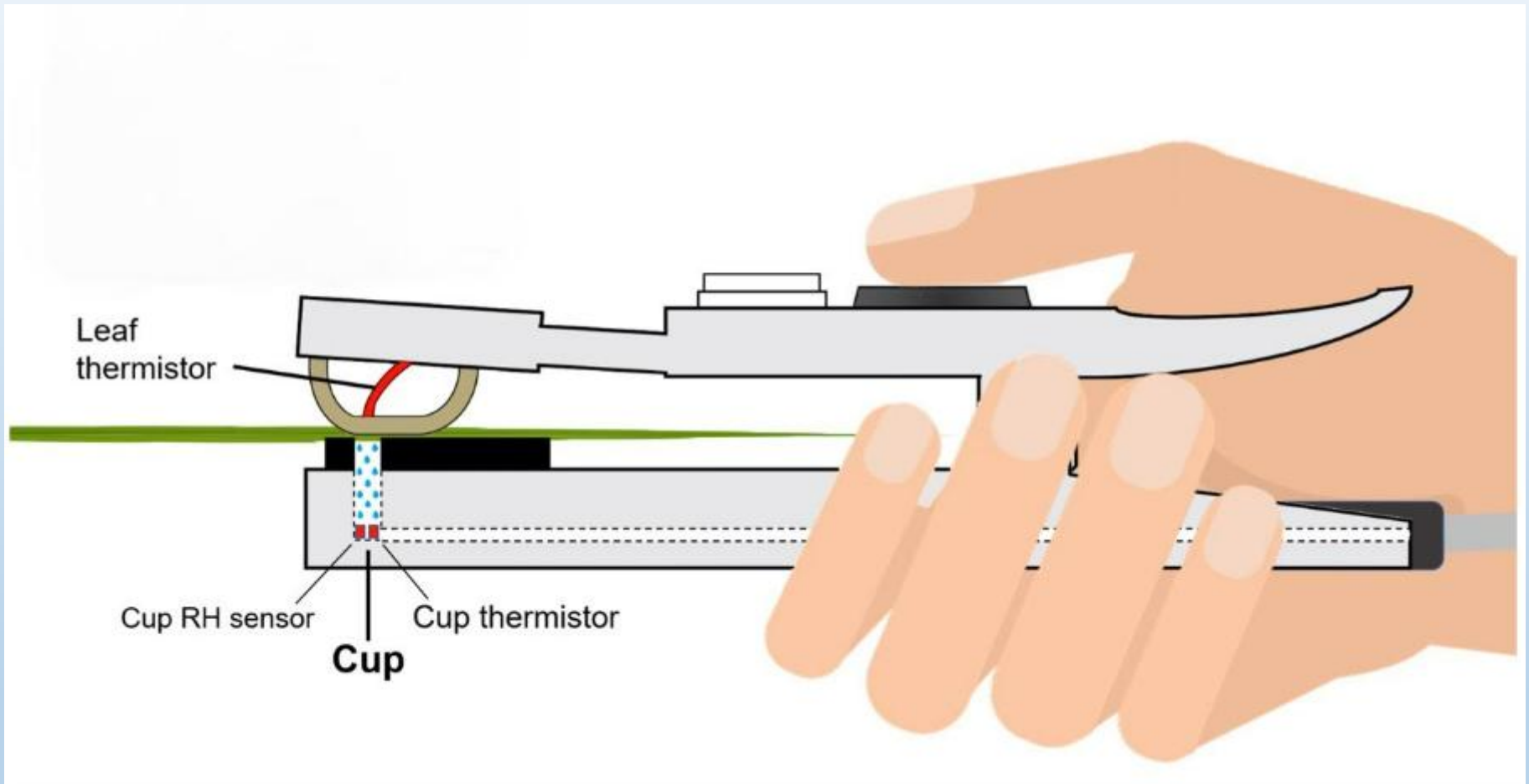


Messung des Wasserverbruachs

Porometer zur Bestimmung der Transpiration der Pflanze



Maßnahmen Die Anstieg der Luftfeuchtigkeit in einem geschlossenen Raum Kammer beigefügt Zu Die untere Seite von Die Blatt



Delta-T Devices

Bestimmung des Pflanzenwassers

- Chlorophyll-Fluoreszenz
- Ein Blatt wird in einer dunklen Umgebung gehalten und mit einem sonnenbeschienenen Blatt verglichen
- Verhältnis F_v / F_m -> niedriges Verhältnis weist auf Stress hin

F_v = Differenz zwischen max. und min. Fluoreszenz
 F_m = max. Fluoreszenz



Messung des Gasaustauschs

- Photosynthese Analysator
 - CO₂ -Rate wird durch Messung der Änderung der CO₂ -Konzentration der durch die Kammer strömenden Luft bestimmt.
 - Ein Gasanalysator bestimmt Die Anstieg von CO₂ in einem geschlossenen Kammer durch IR -Messung



www.licor.com

Abiotischer Stress

Abiotischer Stress im engeren Sinn ist eine ungewöhnliche Belastung eines Organismus durch einen oder mehrere Umweltfaktoren (Stressfaktoren) mit der Gefahr der Störung von physiologischen Prozessen. Dabei können pflanzenendogene biologische Prozesse verlangsamt, beschleunigt oder unterbrochen, andere sogar aktiviert bzw. verstärkt werden.

Stressfaktoren

In der Natur wirken häufig mehrere Stressfaktoren gleichzeitig oder aufeinander folgend auf die Pflanzen ein, wie hohe Licht- und UV-Einstrahlung, Hitze und Wassermangel. Stresssituationen, an denen mehrere Stressoren beteiligt sind, werden als komplexer oder multipler Stress bezeichnet. Auf kombinierte oder sequenziell einwirkende Störfaktoren können Pflanzen sehr unterschiedlich reagieren: Es kann zu synergistischen oder antagonistischen Stressreaktionen, Überdeckungsreaktionen oder sogar zur Wirkungsumkehr kommen.

Pflanzenanpassung an Trockenstress

- Die Anpassung von Pflanzen an Dürre geht häufig mit einer Wachstumsminderung einher
- Neuanpassung zwischen vegetativem und generativem Wachstum
- Der Wassergehalt des Pflanzengewebes ist im Vergleich zu dem Wasser, das für seine Produktion verwendet wird, gering



Pflanzenstress

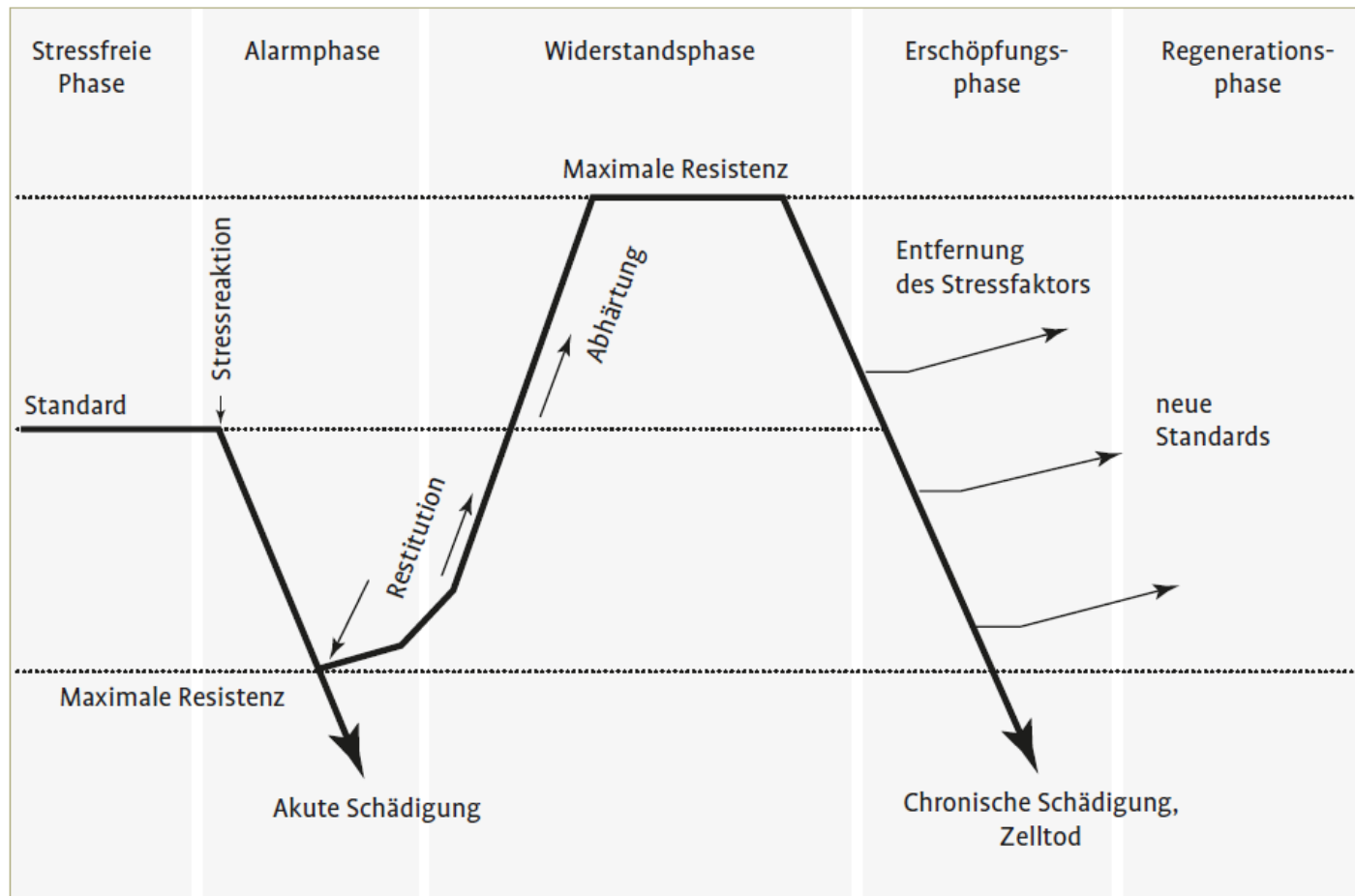


Abb. 22 Phasenmodell des Stressgeschehens (nach LICHTENTHALER 1996).

Reaktion auf Trockenstress

- Frühstadium und leichter Stress: Verminderung des Pflanzenwachstums
- Starker Stress: Stomataschluss -> verminderter Gasaustausch
- Stärkerer Stress: frühe Seneszenz

Indikatoren für Trockenstress:

- Reduzierte Stomaöffnung
- Niedrigerer Turgor -> Änderung der Blattwinkel
- Erhöhte Blatttemperatur
- Geringerer Zellwassergehalt
- höheres Blattwasserpotential (stärkere Wasserretention)
- Welken, Blätter abwerfen, sterben

Root to shoot signalling - Wurzel-Spross Signale

Wurzeln spüren eine Veränderung des Bodenwasserzustands und übermitteln chemische Signale an die Triebe, um die Physiologie der Triebe zu regulieren.

Ein Wurzel-Spross-Signal ist eine Verbindung, die sich entlang des Xylems bewegt und Prozesse in einem Zielorgan beeinflusst, das vom Syntheseort (Wurzel) entfernt liegt.

Table 1. Xylem-mobility of the classical plant hormones

Hormone Class	Xylem-mobile compounds (species - reference)
Abscisic acid	ABA, ABA-GE
Auxin	IAA
Cytokinins	DHZ-9G, ZR, iP (sunflower – Hansen and Dörffling, 2003) ZR, Z, iP-type CKs (pea-Beveridge et al., 1997) ZR, DHZR, Z-OG, DHZ-OG, DHZR-OG, nucleotides of Z, DHZ, DHZ-OG (bean - Palmer and Wong, 1985)
Ethylene	ACC
Gibberellins	GA _{15,17-19,23,44,53} (apple-Motosugi et al., 1996)

Abbreviations: ABA – abscisic acid; ABA-GE – ABA glucose ester; ACC – Aminocyclopropane-1-carboxylic acid; CK – cytokinin; DHZ – dihydrozeatin; DHZ-9G – dihydrozeatin-9-glucoside; DHZ-OG – dihydrozeatin-O-glucoside; DHZR – dihydrozeatin riboside; DHZR-OG – dihydrozeatin riboside-O-glucoside; GA – gibberellin; IAA – indole-acetic acid; iP – isopentenyladenine; Z – zeatin; Z-OG – zeatin-O-glucoside; ZR – zeatin riboside.

Dodd , 2015

■ Ethylen, Aminocyclopropan-carbonsäure (ACC)

- Reaktion auf Überschwemmungen (Reduzierung des Gasaustauschs), physische Schäden und biotische Stressfaktoren
- Stimuliert das Wurzelwachstum
- Hemmt das Triebwachstum
- Stimuliert die Alterung und Fruchtreife
- Fördert das Abszissieren der Blätter

Dodd I (2005) Root-to-Shoot-Signalisierung:
Bewertung der Rolle von „oben“ in der Auf- und Ab-
Welt der Fernsignalisierung in *Planta* . Pflanze und
Boden 274: 251-270

Hormone

- **Gibberilline (Giberrellinsäuren , GA)**
 - Wirkt ABA entgegen, das an der Blüte und Samenruhe beteiligt ist.
 - Kältestress verringert GA
 - Ein Anstieg der GA induziert die Keimung
- **Auxine (Indolessigsäure, IAA)**
 - Stress senkt typischerweise die IAA-Werte
 - IAA stimulieren die Zellverlängerung
 - In Kombination mit CK stimuliert es die Zellteilung
- **Zytokinine (CK)**
 - Seneszenz verzögern
 - Stress verringert die CK-Konzentration im Xylemsaft
 - CK fördert die Blüte

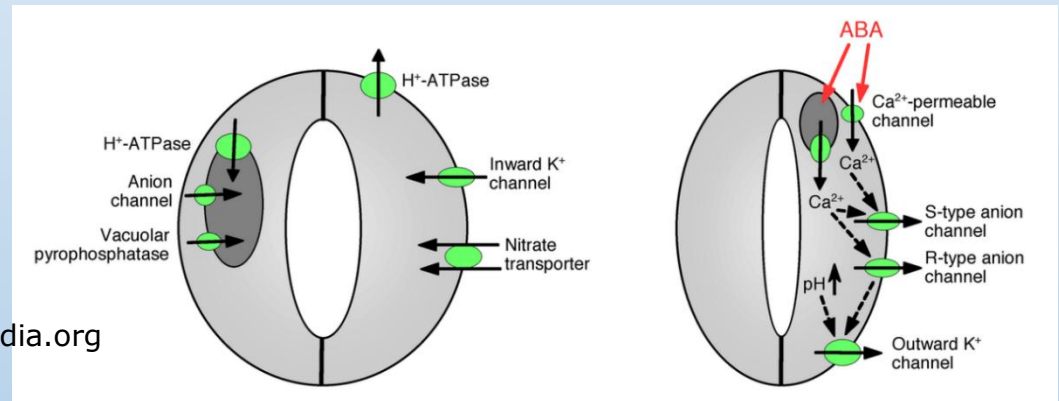
Hegele , M., Sritontip , C., Chattrakul , A., Tiayon , P., Naphrom , D., Sringarm , K., Srumsiri , P., Manochai , P. und Wünsche , JN (2010).
Hormonelle Kontrolle der Blüteninduktion bei Litschi und Longan. Acta Hortisch . 863, 305-314

Hormone

■ Abscisinsäure (ABA)

- ABA wird unter Dürre und anderen Stressfaktoren (biotisch und abiotisch) produziert.
- Das Vorhandensein von ABA in Pflanzenblättern führt zum Verschluss der Stomata
- Es wird angenommen, dass es die Blattverlängerung durch Hemmung der Zellteilung verringert

en.Wikipedia.org

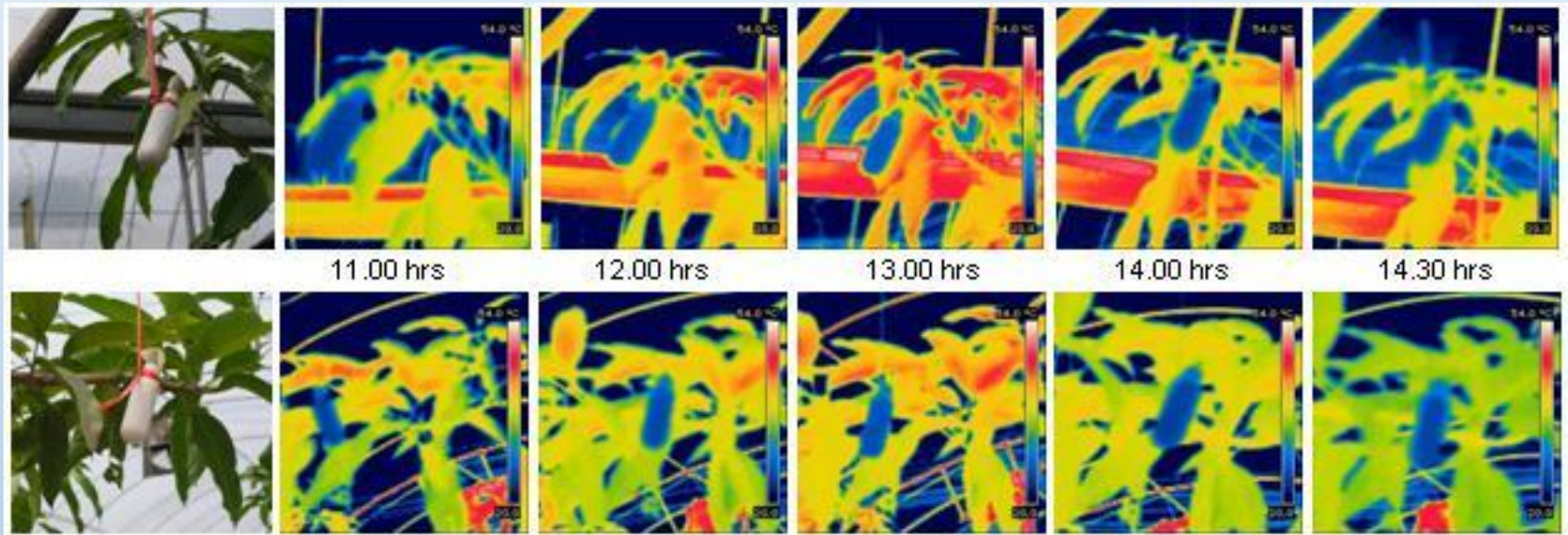


ABA wird im Blattgewebe produziert und ist vermutlich an der Blattabszision beteiligt. Dies konnte in vielen Anlagen und unter vielen Bedingungen nicht nachgewiesen werden.

Unter Trockenstress wird es typischerweise in den Wurzeln produziert und zu den Blättern transportiert.

Die Blatttemperatur hängt mit der Transpiration der Pflanze zusammen

Wassermangel – geringe Transpiration



Kontrolle: gut bewässert – hohe Transpiration

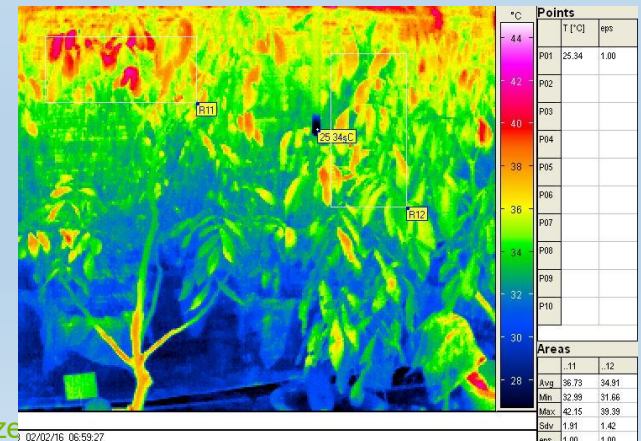
Bestimmung des Pflanzenwasserstresses

Die Änderung der Blatttemperatur kann anhand des Crop Water Stress Index (CWSI) quantifiziert werden.



beschichtet Blatt (Vaseline) als
Trockenreferenz ($T_{\max}$) und mit
Wasser besprühtes Blatt als
Nassreferenz (T_{Basis})

$$CWSI = \frac{T_{\text{canopy}} - T_{\text{base}}}{T_{\max} - T_{\text{base}}}$$



Jones, 1999



Study on the use of thermal imaging for plant stress detection



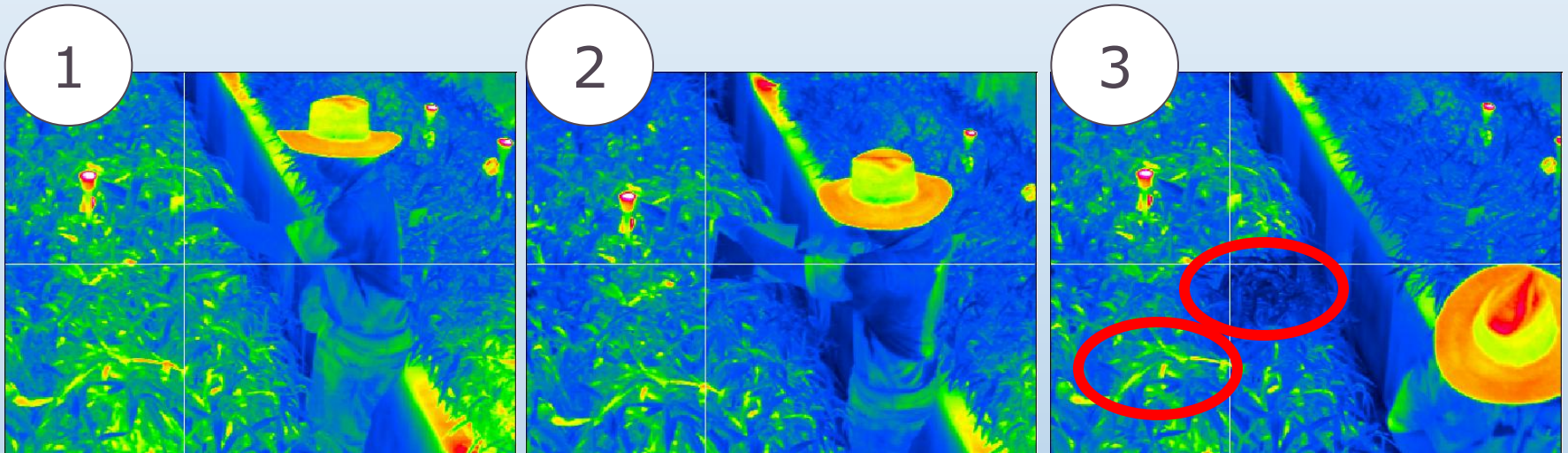
Soil Material

- Acrisol (Maesa Mai)
 - Clay loam
 - 43% sand, 44% clay, 13% silt
 - FC 37.4 %, PWP 23.0 %
 - Bulk density 1.1

- Vertisol (Mae Ai)
 - Clay
 - 25% sand, 51% clay, 24% silt
 - FC 48.2 %, PWP 37.0 %
 - Bulk density 1.2

- Regosol (Mae Jo)
 - Loamy sand
 - 66% sand, 10% clay, 24% silt
 - FC 12.8 %, PWP 6.0 %
 - Bulk density 1.1

Sampling & Analysis



Leaves where transpiration is suppressed by vaseline coating (upper threshold temperature)

Water sprayed leaves and therefore the threshold for maximum evaporative cooling

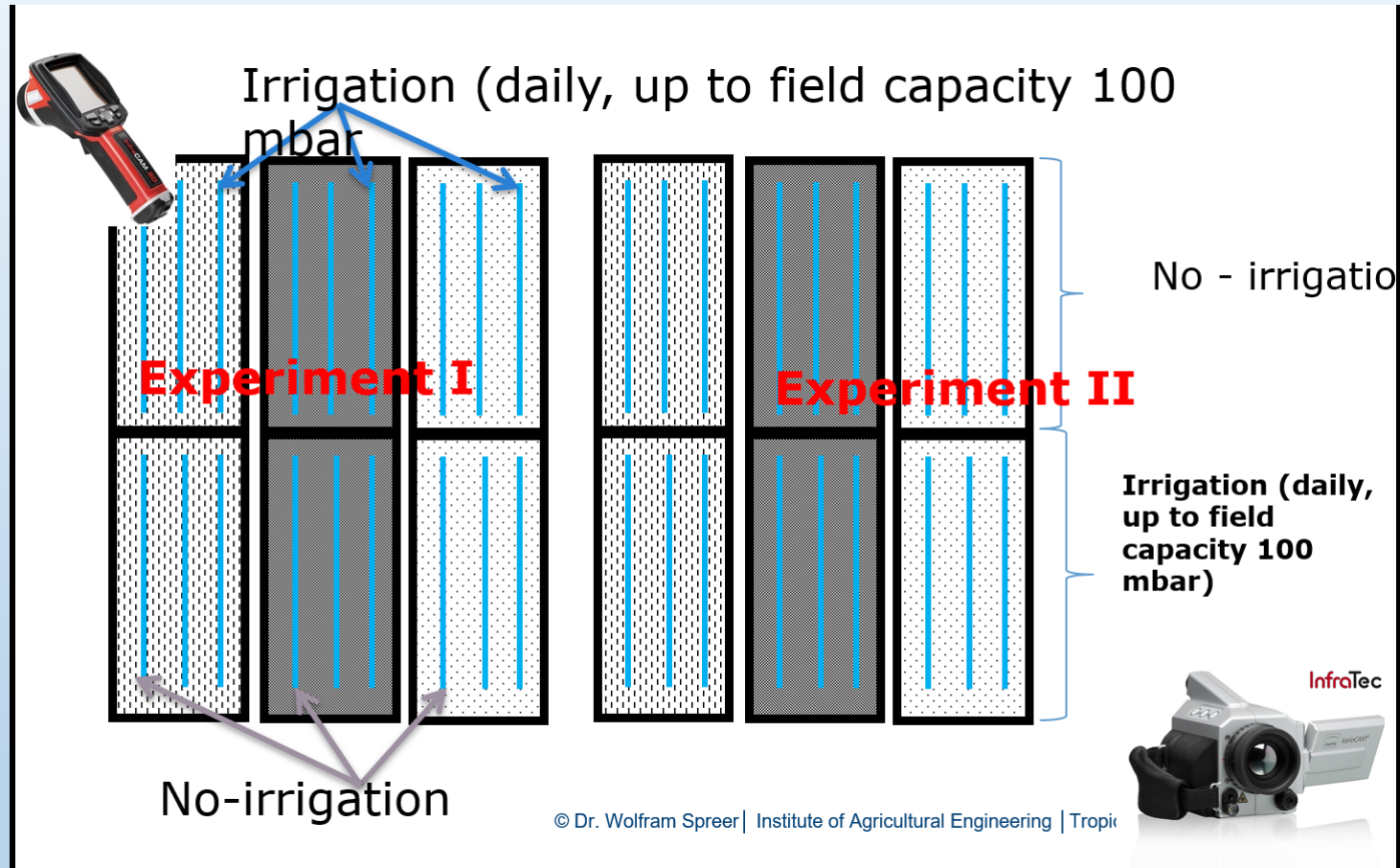
Thermocameras

Infratec Variocam 384s | FLIR InfraCAM SD

Resolution:	384 x 288	120x120 pixels
Autofocus:	yes	no
True color image:	yes	no
Weight:	1300 g	550 g
Temp. resolution:	0.05 K	0.1 K

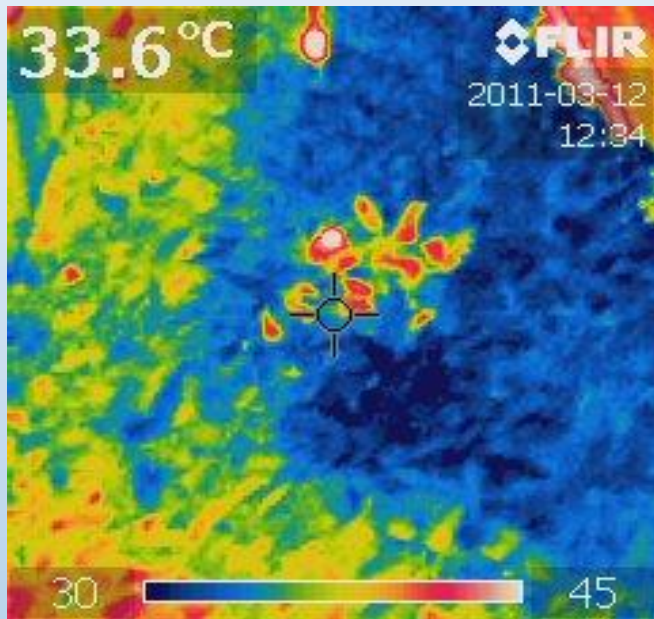


Experimental & Irrigation Setup

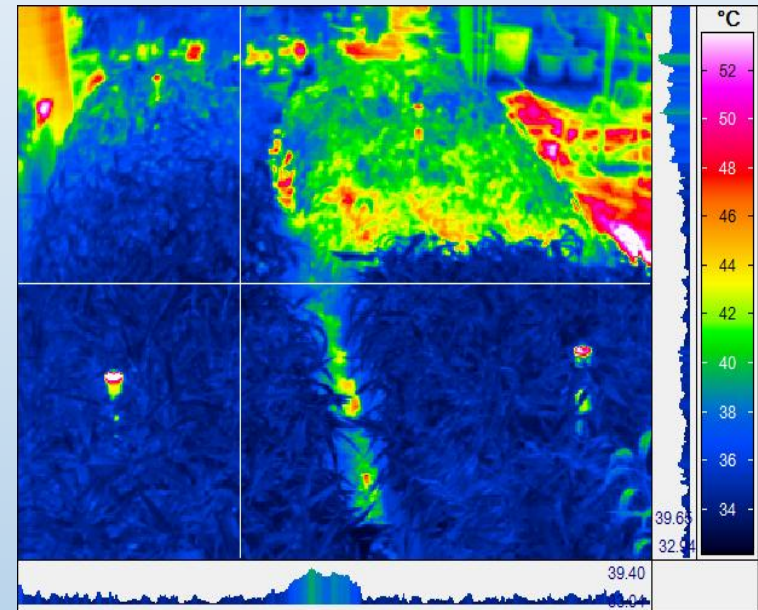


Comparison of two thermo cameras of different price

InfraCAM SD (FLIR, Sweden) at a price of about 5,000 Euros (Thermo I)



VarioCAM HiRes 384 sl (Infratec, Germany) at a price of about 25,000 Euros (Thermo II)

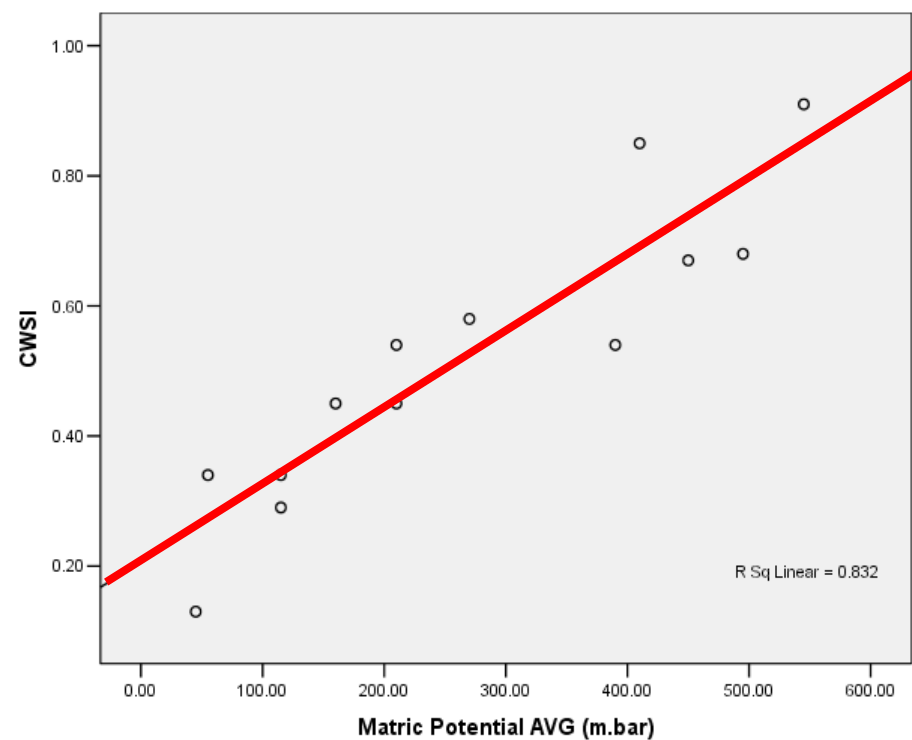
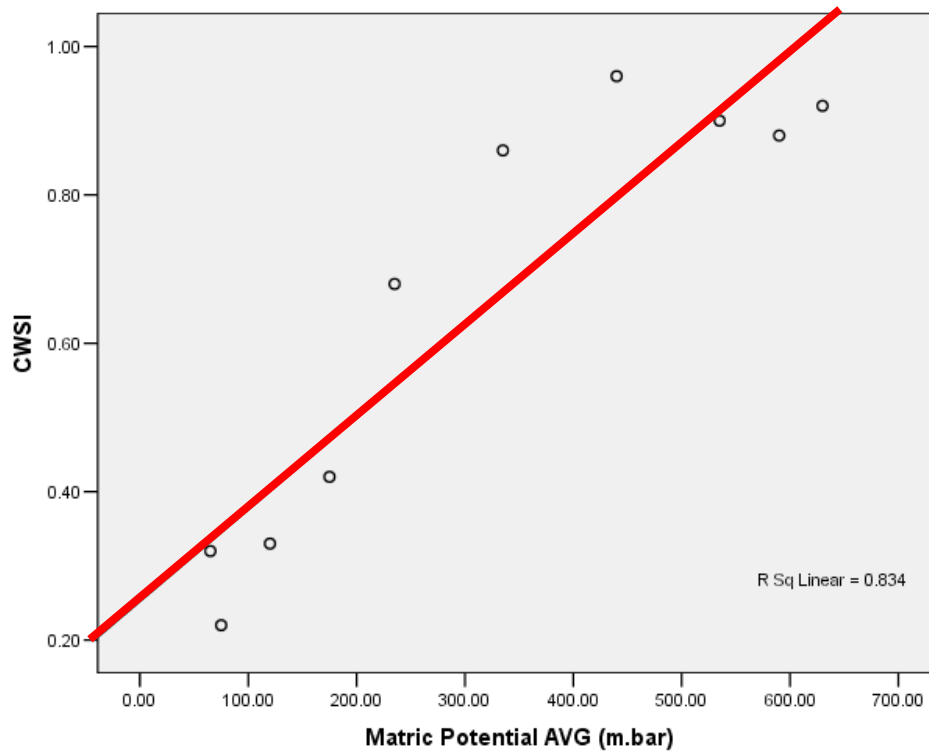


Correlation CWSI – Matric Potential

Regosol
No-irrigation

$r = 0.913^{**}$
 $R^2 = 0.834$

$r = 0.912^{**}$
 $R^2 = 0.832$

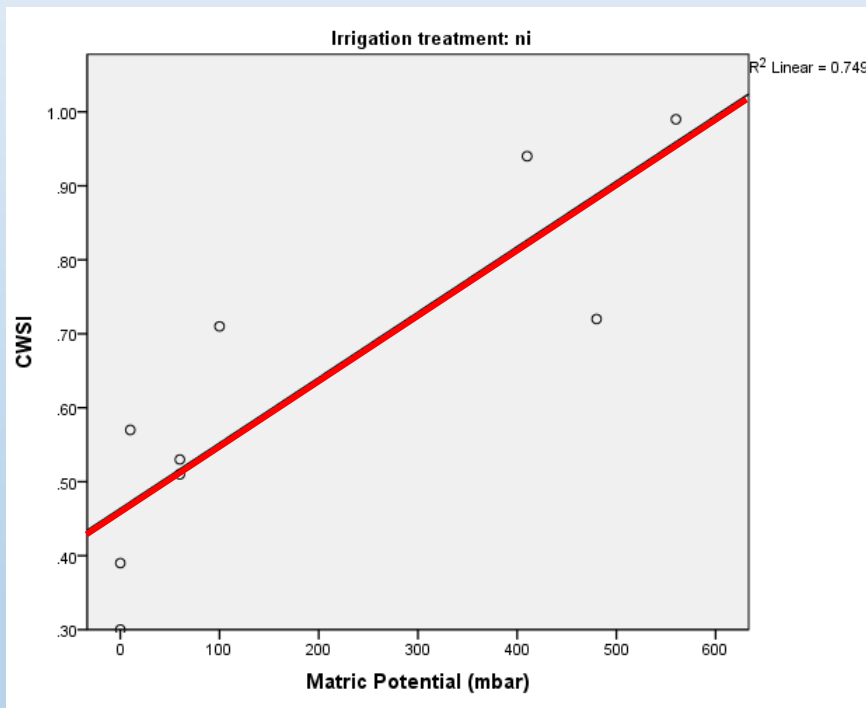


****** The correlation is significant on the significance level of 0.01 (1%). 1% is the probability of error

Correlation CWSI – Matric Potential

Regosol
No- irrigation

$r = 0.87^{**}$
 $R^2 = 0.75$



High correlation in all trials

-> *good stress indication!*

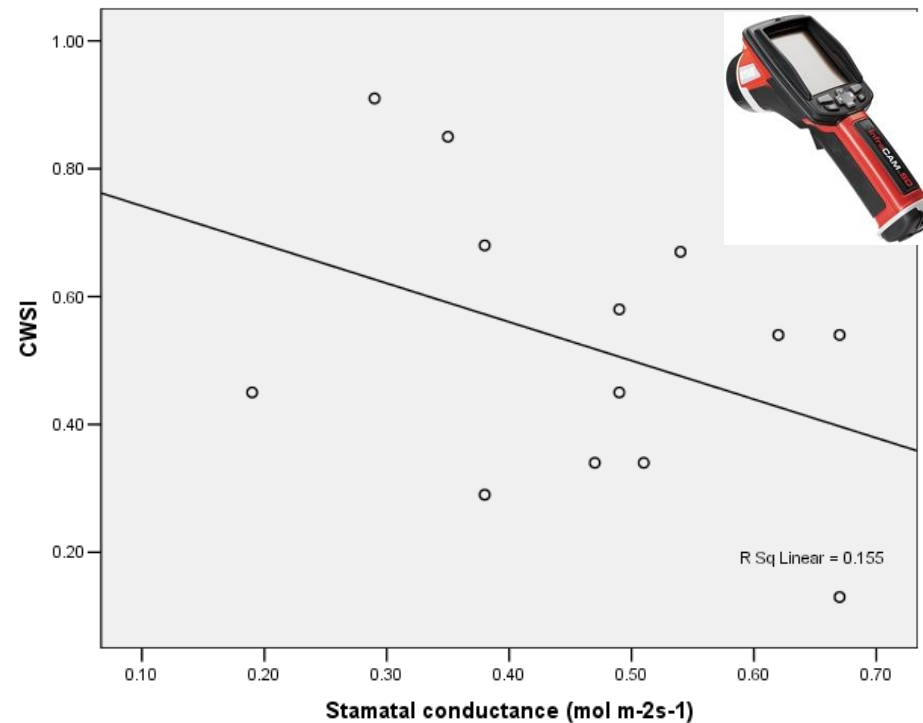
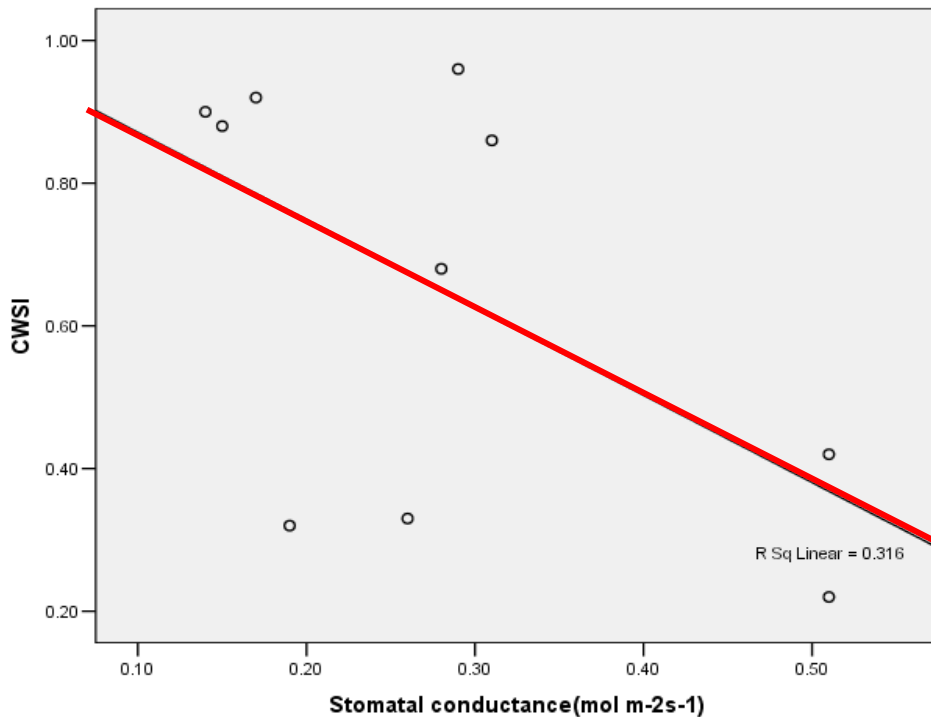
** The correlation is significant on the significance level of 0.01 (1%). 1% is the probability of error

Correlation CWSI – Stomatal Conductance

Regosol
No- irrigation

$r = 0.562^*$
 $R^2 = 0.316$

$r = 0.393$
 $R^2 = 0.155$

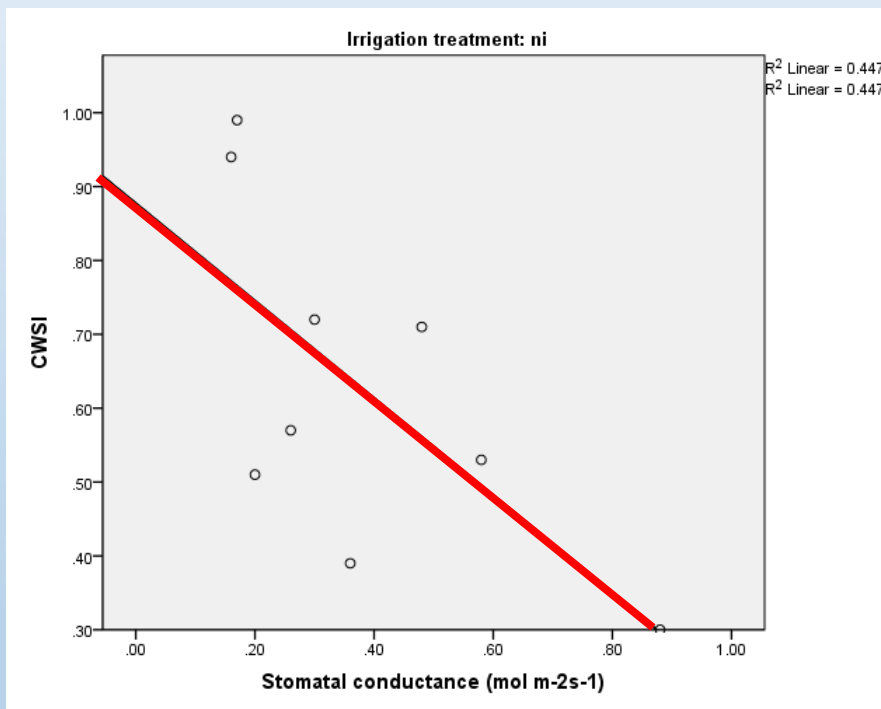


* The correlation is significant on the significance level of 0.05 (5%). 5% is the probability of error

Correlation CWSI – Stomatal conductance

Regosol
No- irrigation

$$r = -0.67^*$$
$$R^2 = 0.45$$



- Significant correlation in two trials
- High variability due to single leaf analysis in stomatal conductance

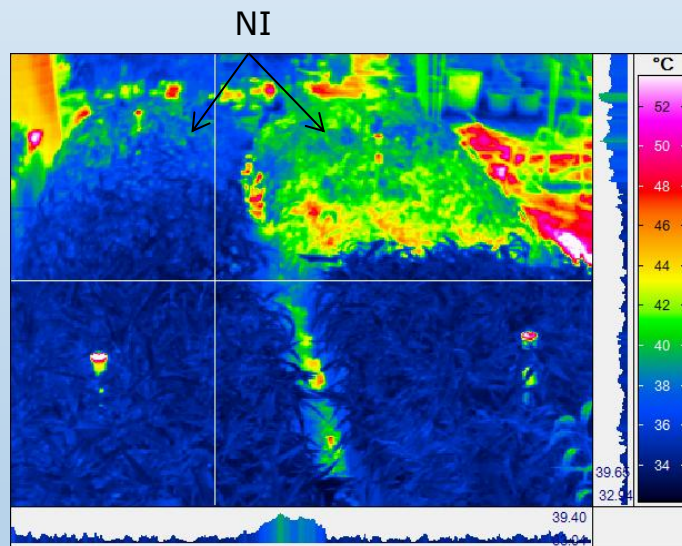


* The correlation is significant on the significance level of 0.05 (5%). 5% is the probability of error

Differences in Leaf Temperature

- After 12 days of drought

Soil B Soil C



Shows stress before obvious visual damage

