

Bewässerungstechnik in der Landwirtschaft

Wasser im Boden-Pflanze-Atmosphäre Kontinuum Teil 2

Wolfram Spreer

23.03.2026

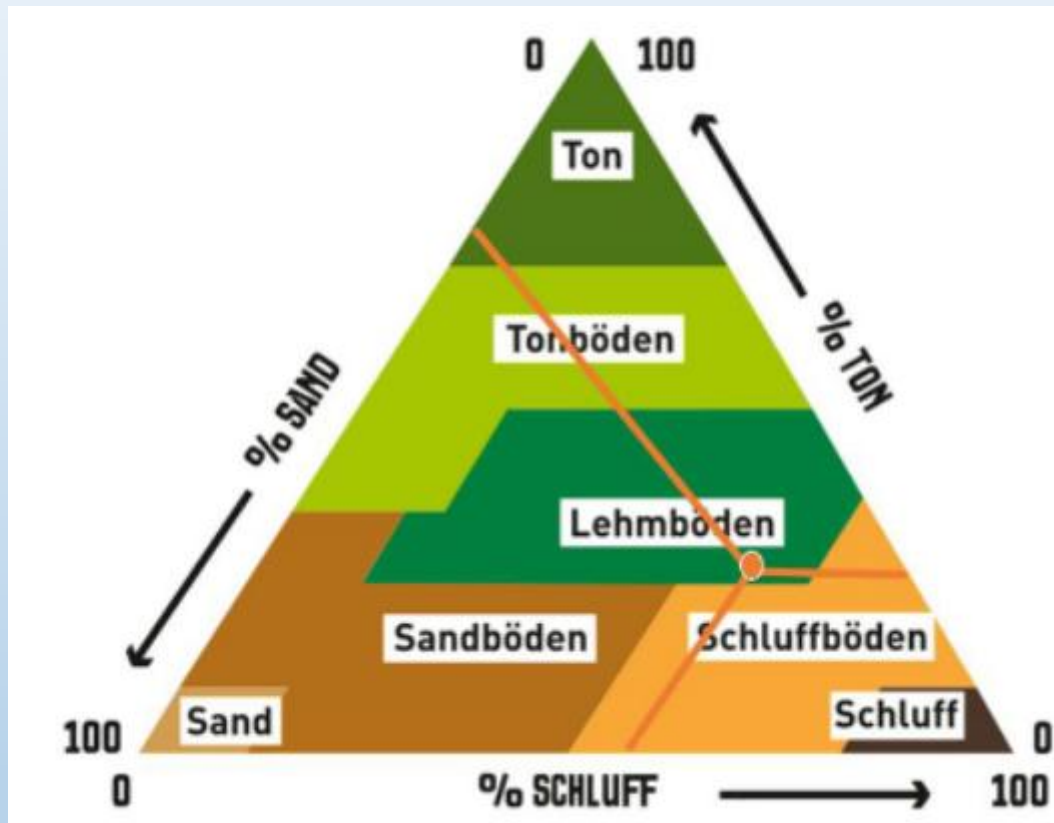
Hausaufgabe

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

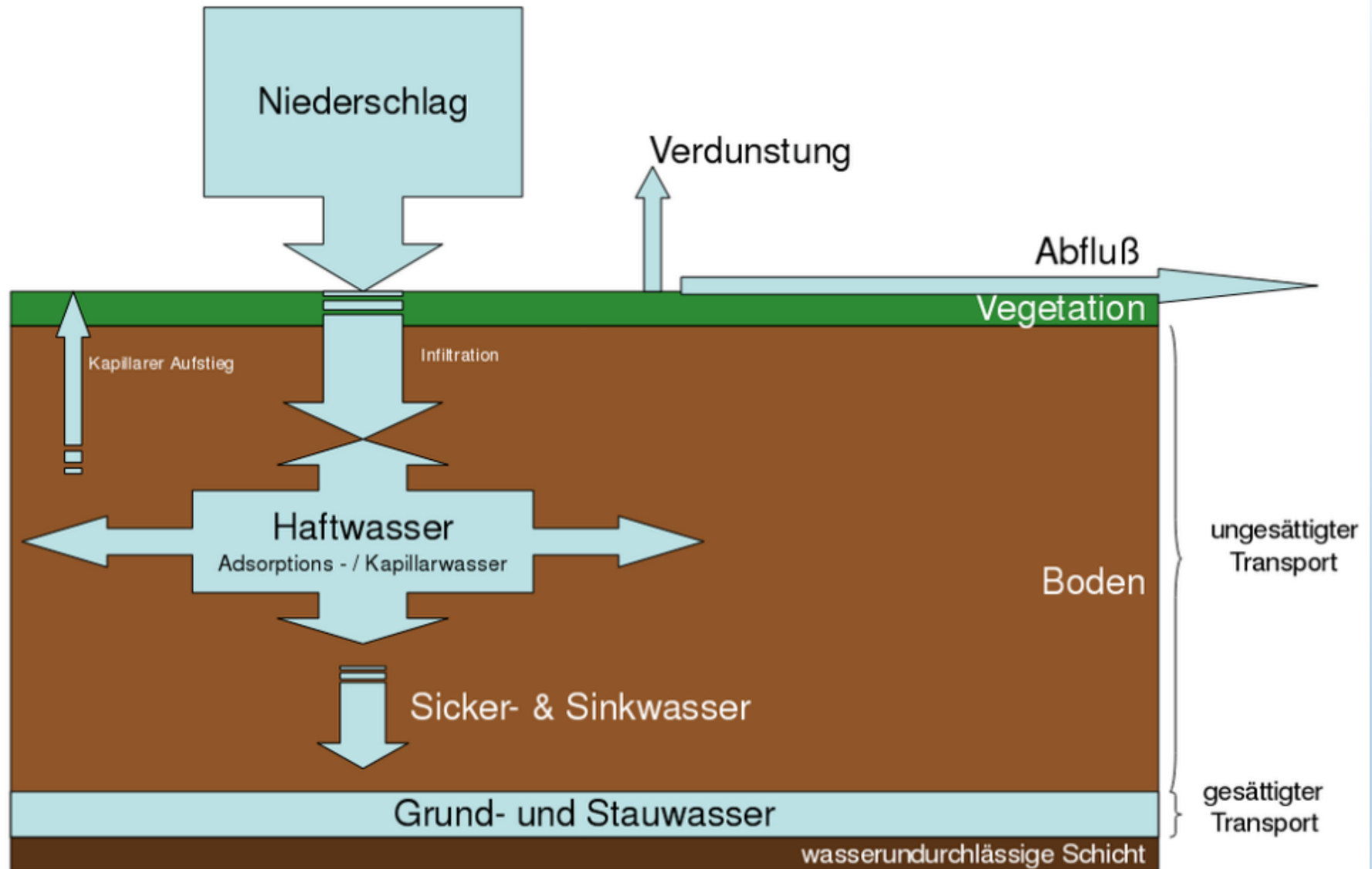
Bodenart	Feldkapazität (Vol.-%)
Grobsand	5–10 %
Sand	10–15 %
Sandiger Lehm	15–25 %
Lehm	25–35 %
Toniger Lehm	30–40 %
Schluffiger Lehm	35–45 %
Ton	40–50 %

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:

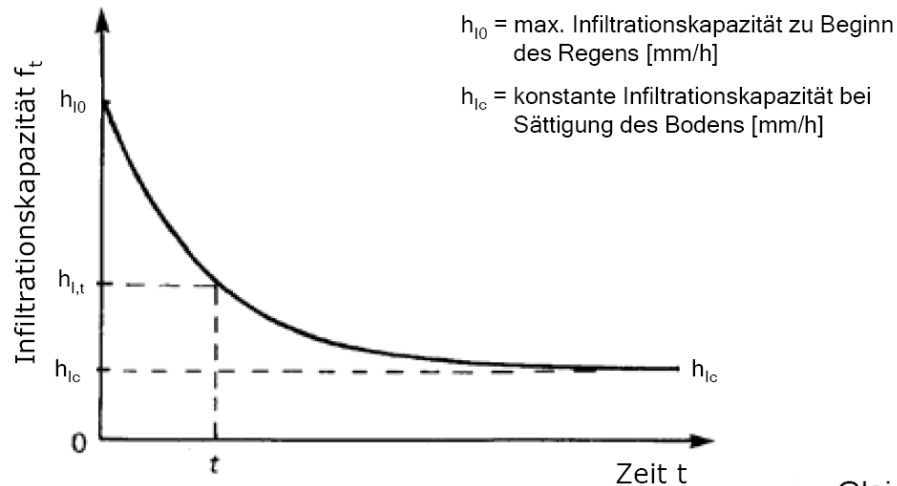
Wasser, das durch die Bodenoberfläche in den Boden eindringt.

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
lehmiger Sand, sandiger Lehm ²	7.6 - 11.4

Bestimmung der Infiltrationsrate

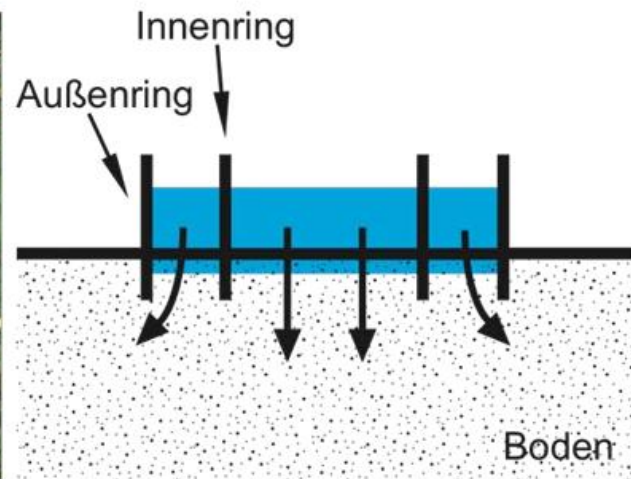


Abbildung 1: schematischer Aufbau des Doppelringinfiltrometers nach Durner (2003)

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



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

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:

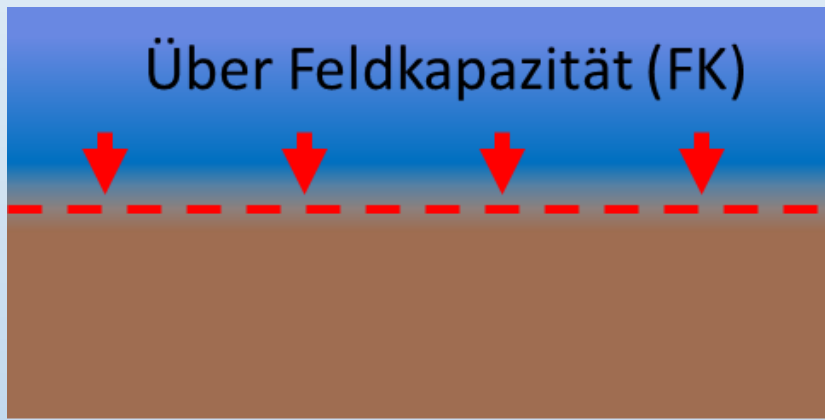


Saugspannung / Bodensaugspannung

Wasserpotenzial / Bodenwasserpotenzial

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

Verrieselung, Beregnung

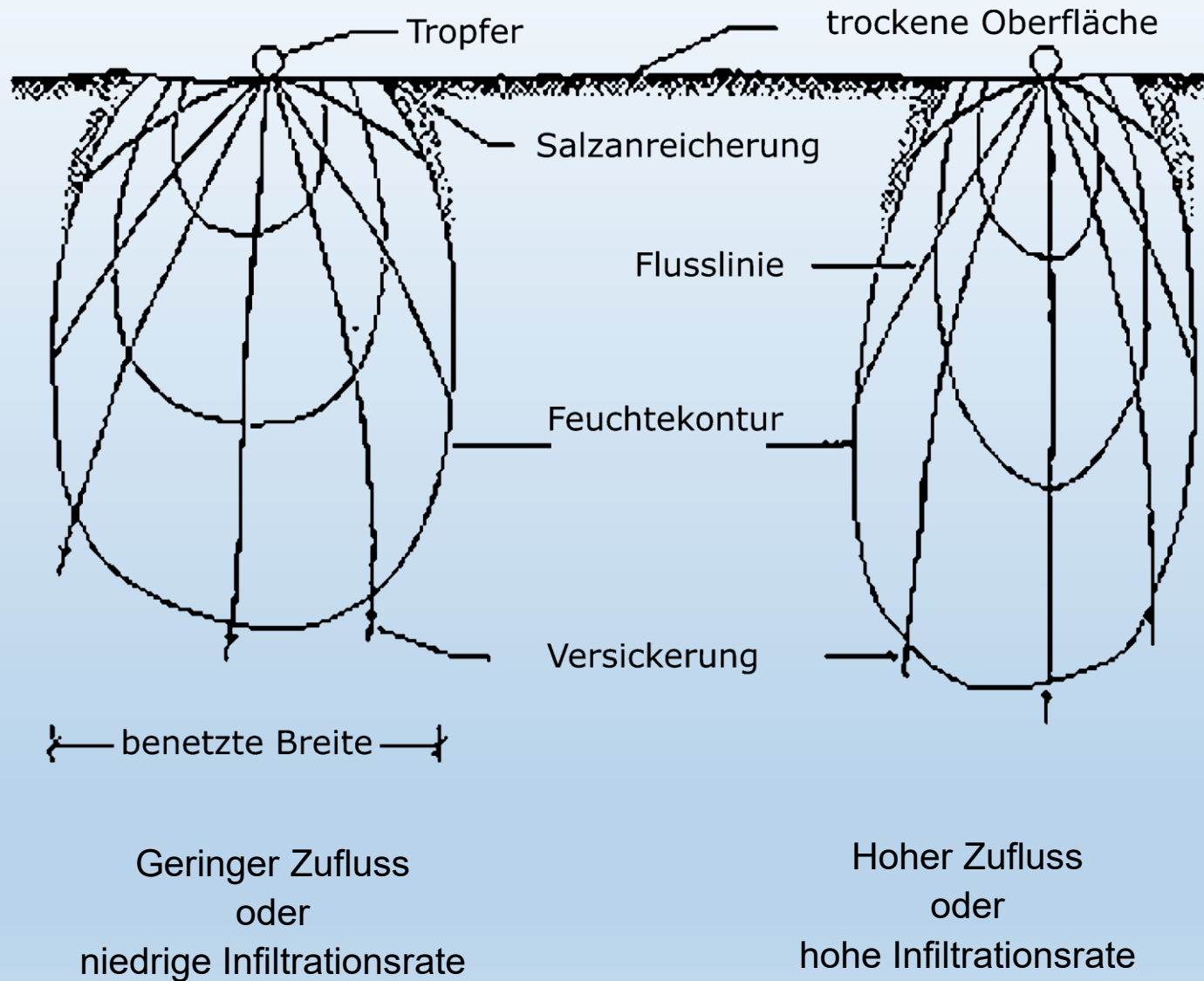


Wasserfront

Wetting front

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

Tropfbewässerung



Der Boden als Wasserspeicher

Rechenbeispiel – Teil 1 Wasser im Boden

Nach mehreren Regentagen, fällt kein Niederschlag mehr. Die durchschnittliche ET_0 sei 5 mm/d. Der Wasserbedarf von 1 ha Mais bei voll entwickeltem Bestand soll ermittelt werden. FK sei 25%, PWP bei 10%. Nach wie vielen Tagen leidet die Kultur unter Stress?

Fläche:	1 ha; 10.000 m ²
Vol. Bodenfeuchte bei Feldkapazität (FK):	25% (v/v)
Vol. Bodenfeuchte bei Permanentem Welkepunkt (PWP):	10% (v/v)

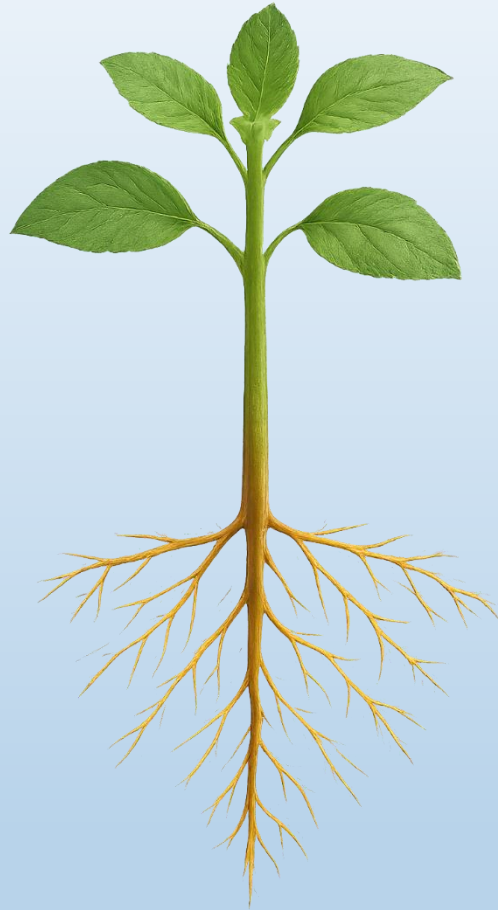
Wasser im Boden bei Feldkapazität:

$$25\% = 0,25 * 10.000\text{m}^2 * 1\text{m (Tiefe)} = 2.500 \text{ m}^3/\text{ha} * \text{m Bodentiefe}$$

$$\text{Totwasser: } 10\% = 0,1 * 10.000 \text{ m}^2 = 1.000 \text{ m}^3/\text{ha} * \text{m Bodentiefe}$$

$$\begin{aligned} \text{Nutzbare Feldkapazität (nFK): } & 25\% - 10\% = 15\% = 10.000 \text{ m}^2 * 0,15 \\ & = \mathbf{1.500 \text{ m}^3/\text{ha} * \text{m Bodentiefe}} \end{aligned}$$

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

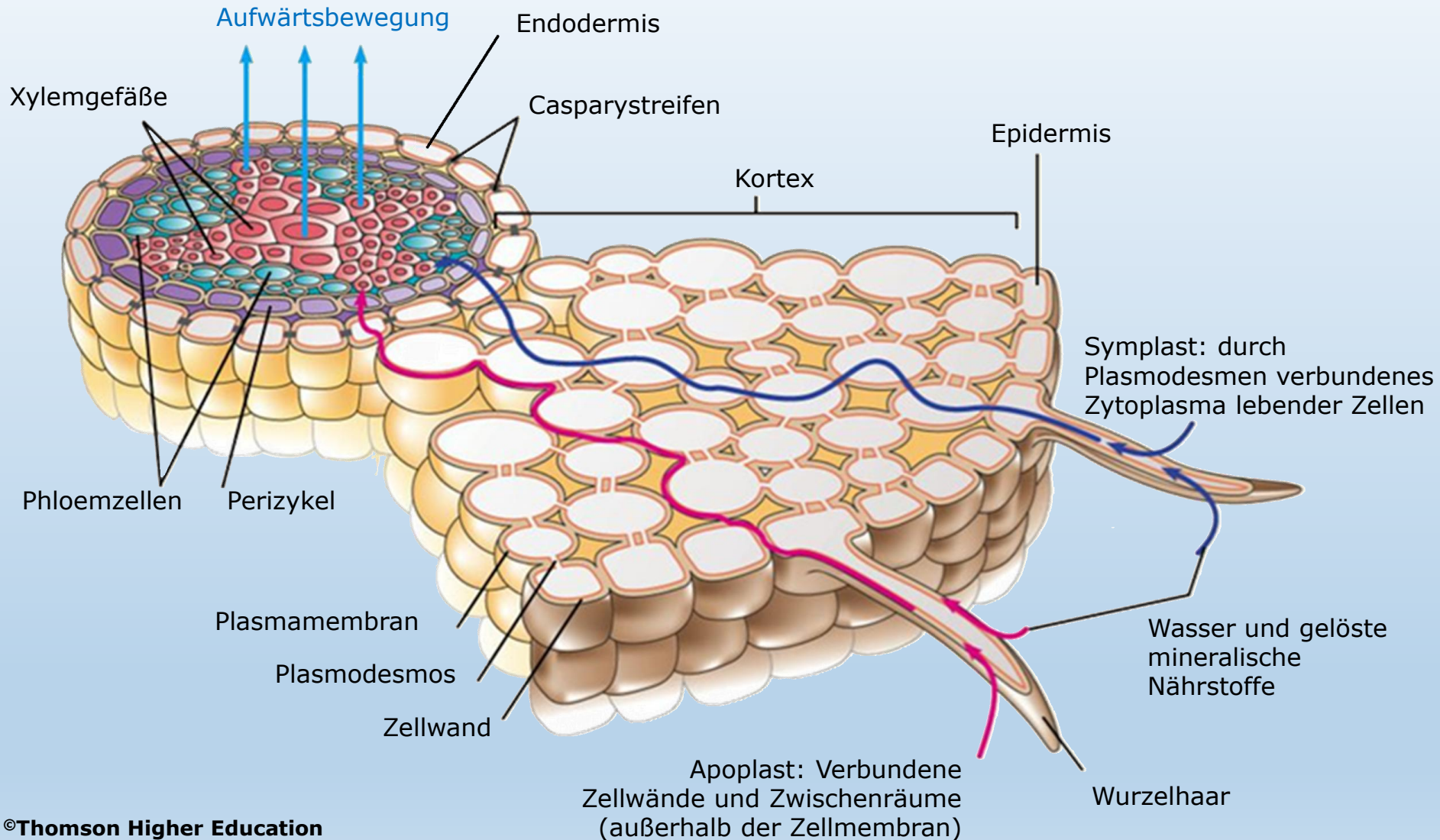
Der Weg des Wassers durch die Pflanze

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

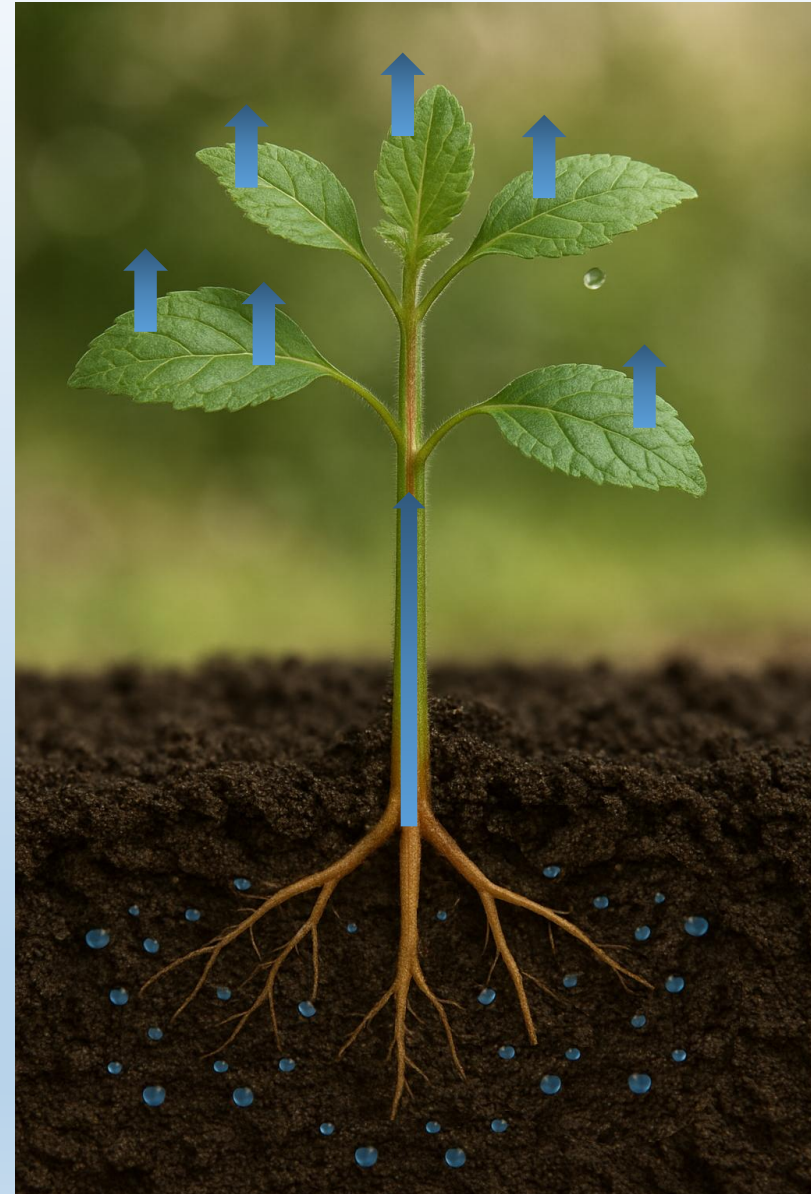
1. Wasser im Boden
2. Aufnahme durch die Wurzelhaare
3. Interzellulärer Transport im Kortex

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

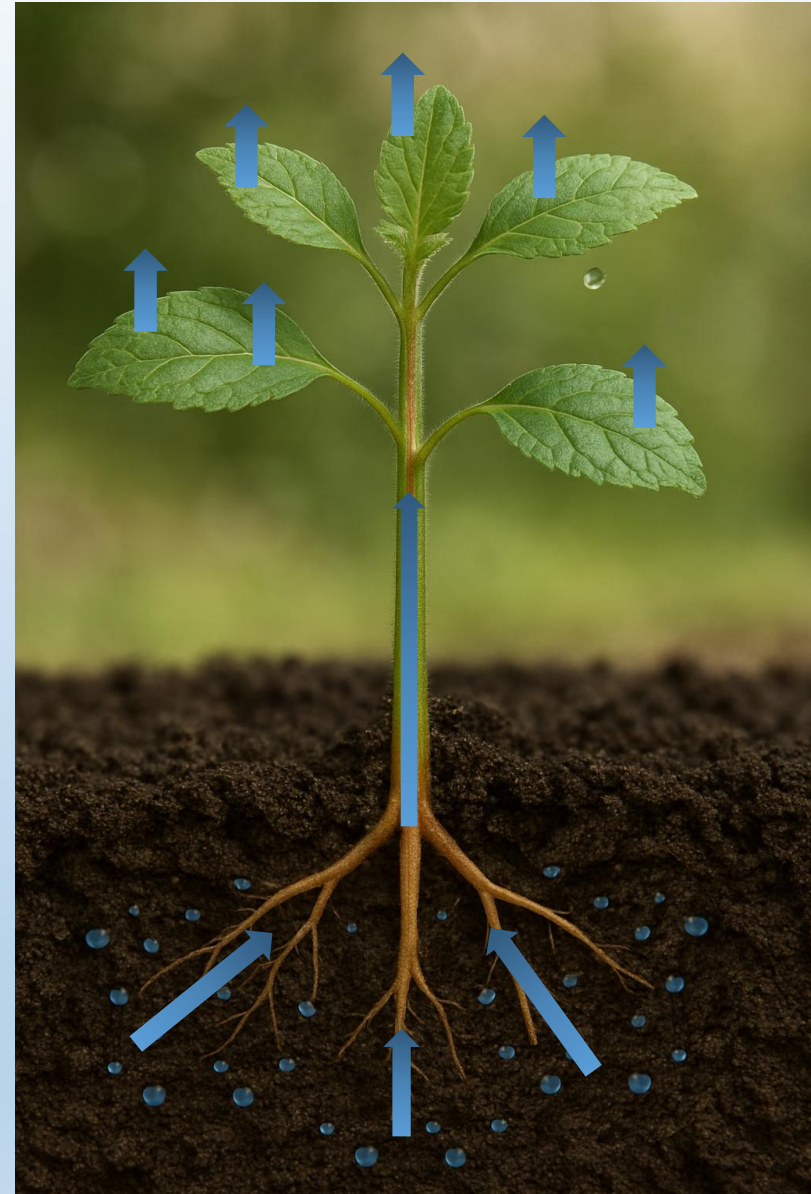
1. Das Wasser befindet sich im Boden zwischen den Bodenpartikeln.
2. Feine Wurzelhaare (Verlängerungen der Wurzelzellen) vergrößern die Oberfläche der Wurzel stark. Durch Osmose (einen Konzentrationsunterschied zwischen Bodenlösung und Zellsaft) gelangt Wasser aus dem Boden in die Wurzelhaarzellen.
3. 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

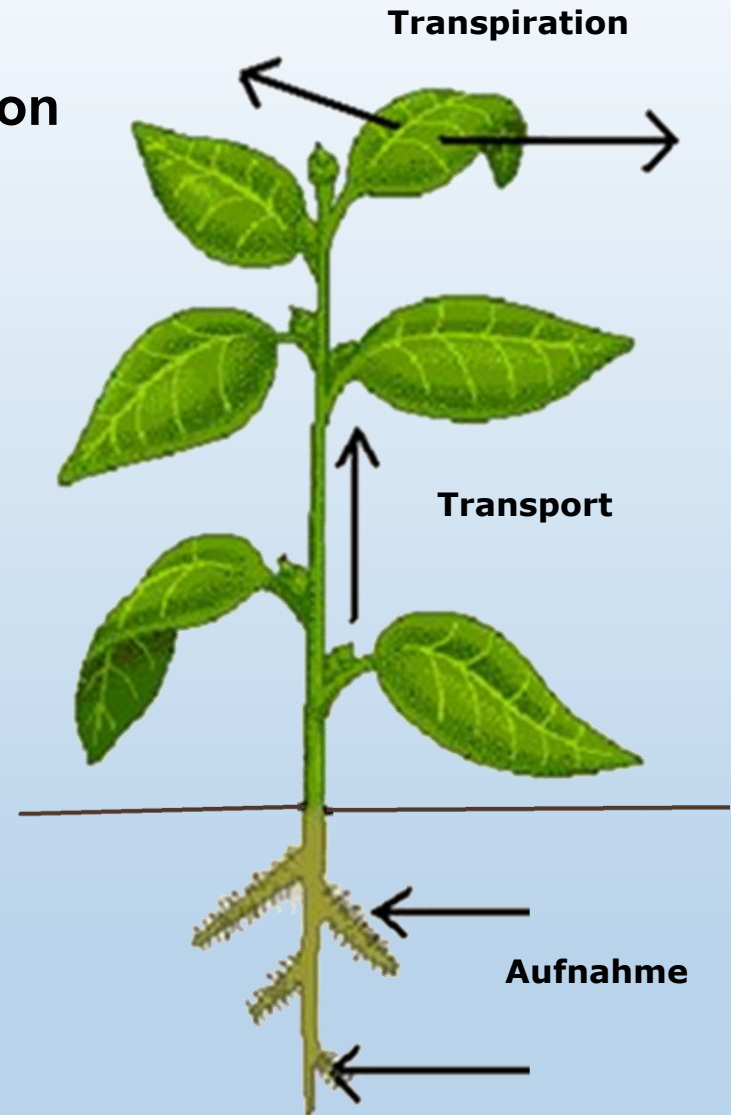
6. Ein Teil des Wassers wird in den Zellen zur Fotosynthese benötigt.
7. Der größte Teil verdunstet und wird über die Blätter abgegeben. So wird die Nachlieferung von Wasser und Nährstoffen betrieben und das Blatt durch Verdunstungskälte gekühlt.



Wassernutzung durch die Pflanze

Das meiste Wasser wird durch Transpiration verbraucht. Beispiel:

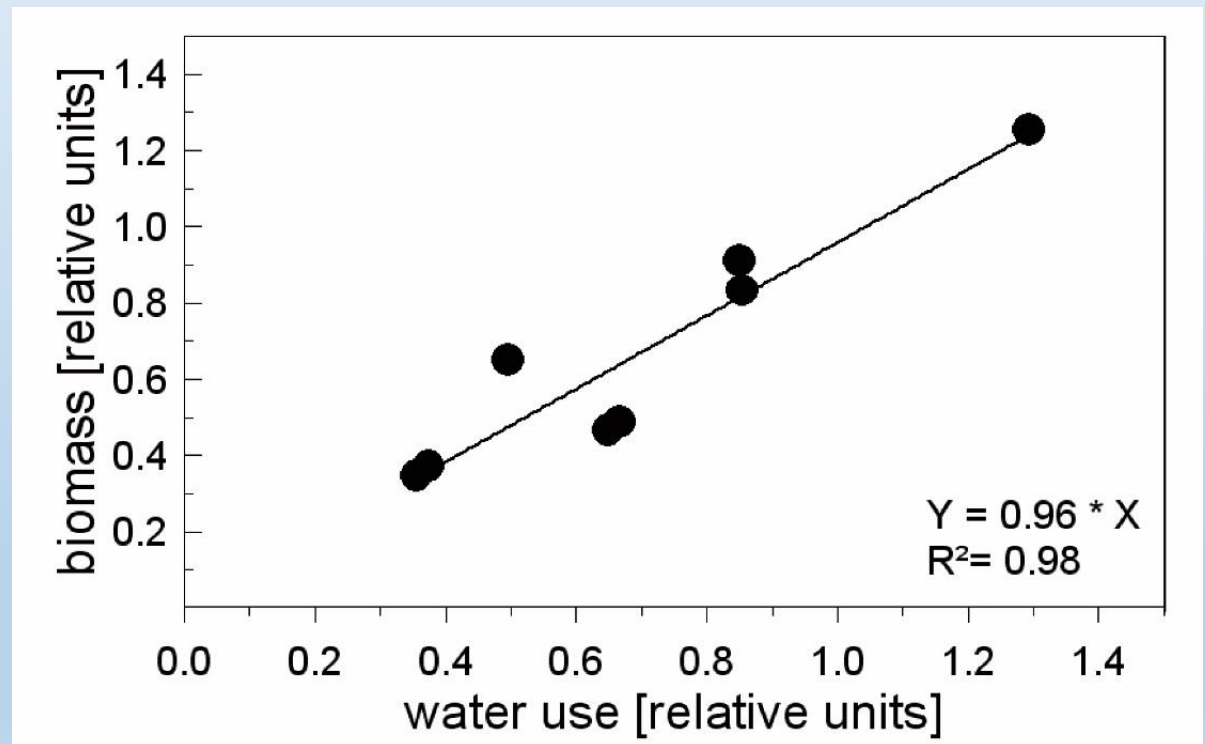
- Maisertrag 60 t/ha
- TM (Trockenmasse) : Wasser = 1 : 2
- TM: 20 t/ha, Wasser: 40 t/ha
- Verbrauch: 120 Tage Wachstumsperiode bei 5 mm/d = 600 mm
- 600 mm = 6.000 m³/ha = 6.000 t/ha
- 40 t/ha / 6.000 t/ha = 0,0067
- < 1% des Wassers wird zum Aufbau von Biomasse verwendet.



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

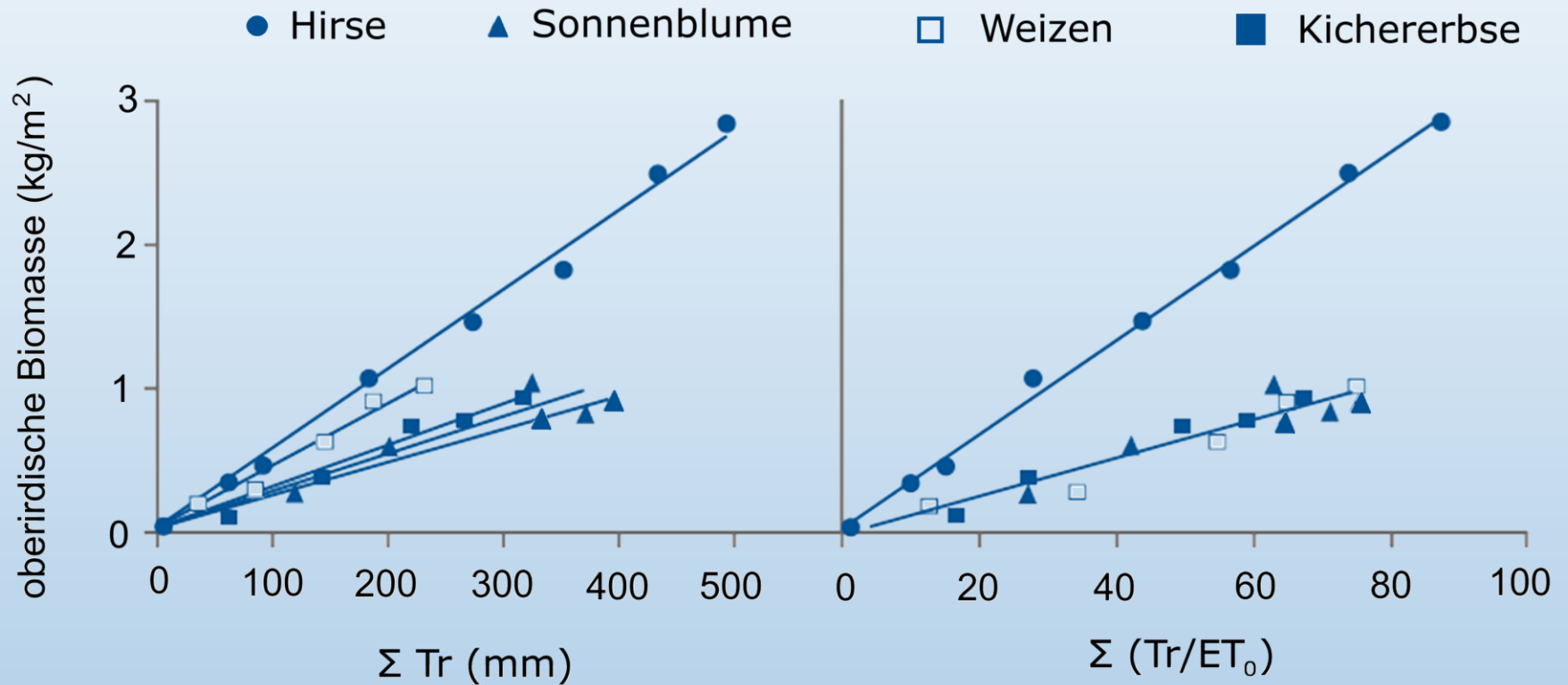
Chemische Bedeutung von Wasser in Pflanzen

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



Mantovani et al., 2013

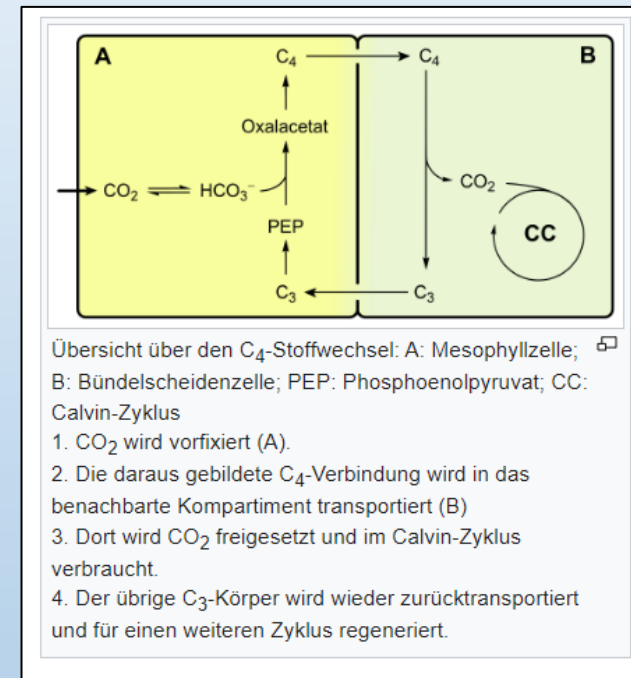
Wasser beim Aufbau von Biomasse



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

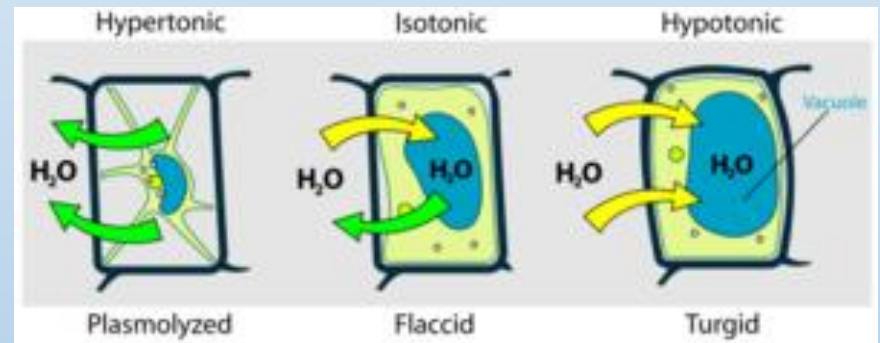
C4 Pflanzen

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

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

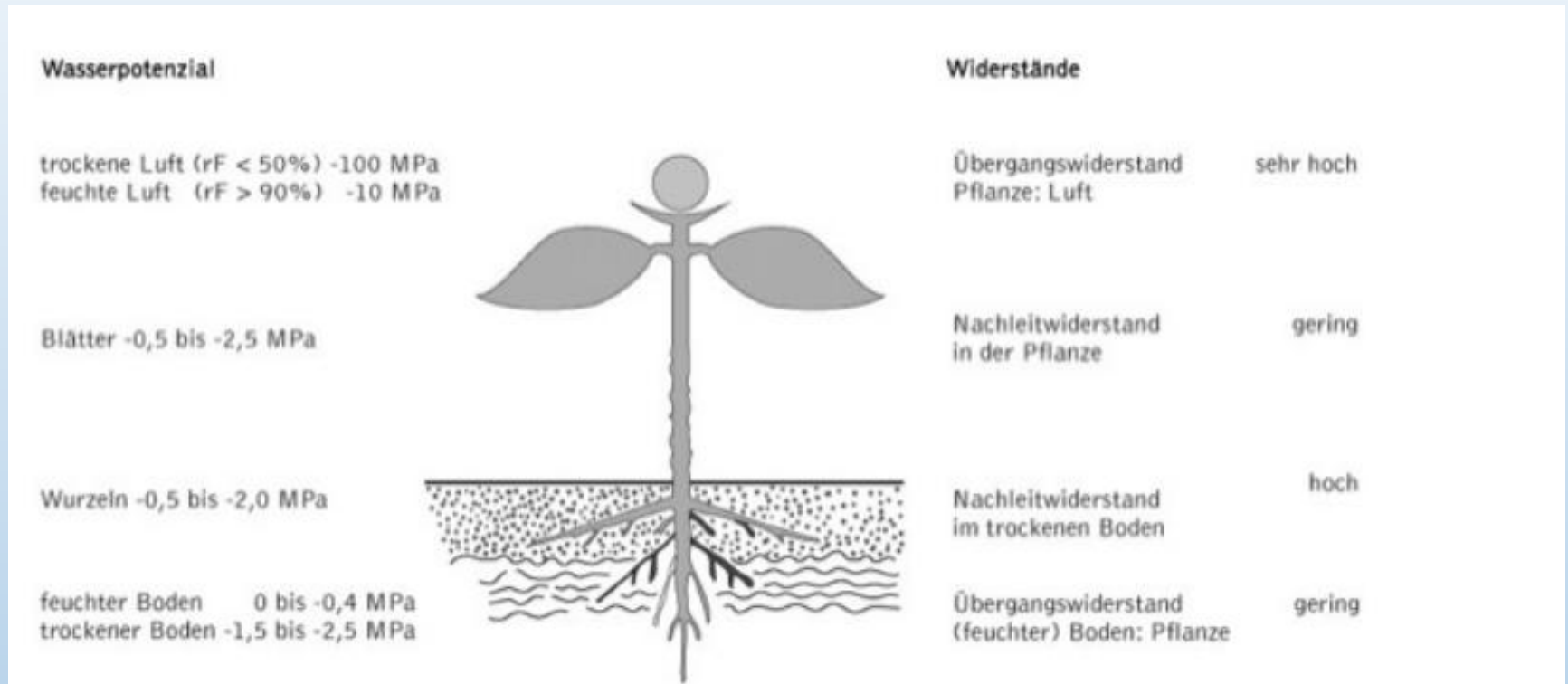
W – Frischgewicht der Probe

TW – Prallgewicht der Probe

DW – Trockengewicht der Probe.



Blattwasserpotential



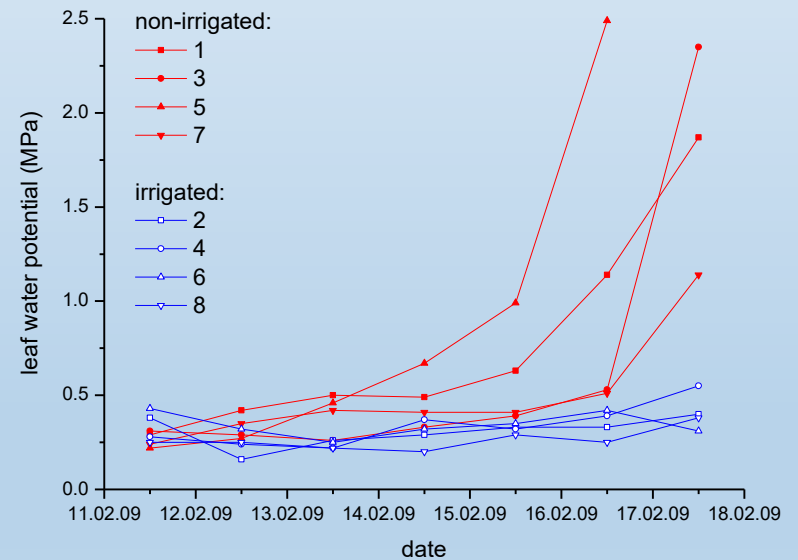
<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/wasserpotenzial/12725>

Blattwasserpotential



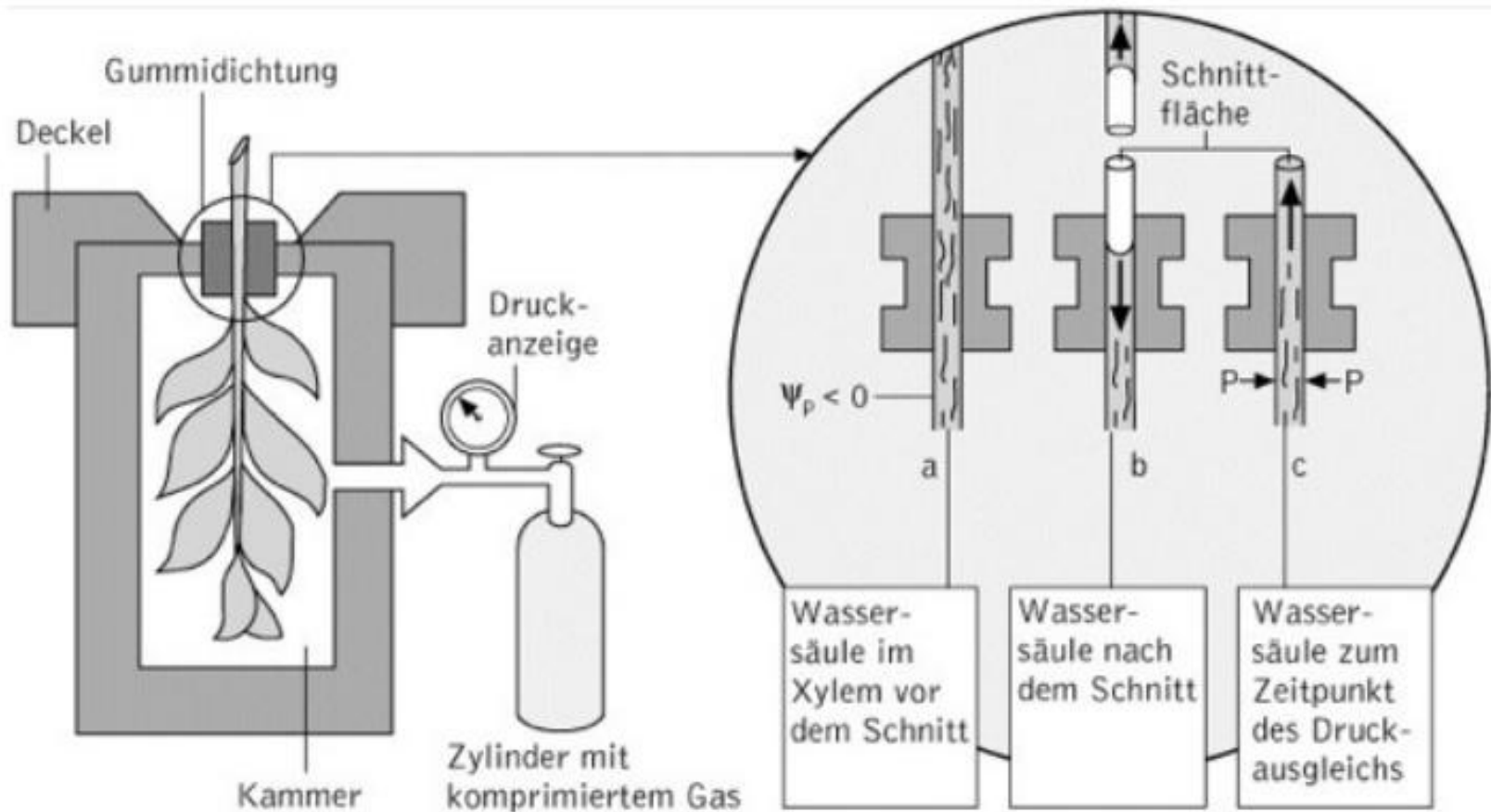
<http://cesonoma.ucdavis.edu/files/63831.jpg>

- 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*)

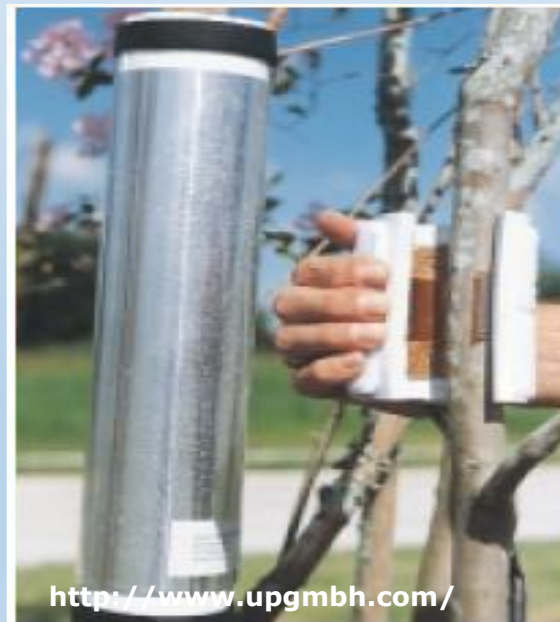
Blattwasserpotential



Messung des Wasserverbrauchs

Saftflussmessung zur Bestimmung des Wassertransports in der Pflanze

- Wärmebilanzmethode (Granier , 1987)
- Wärmeimpulsmethode

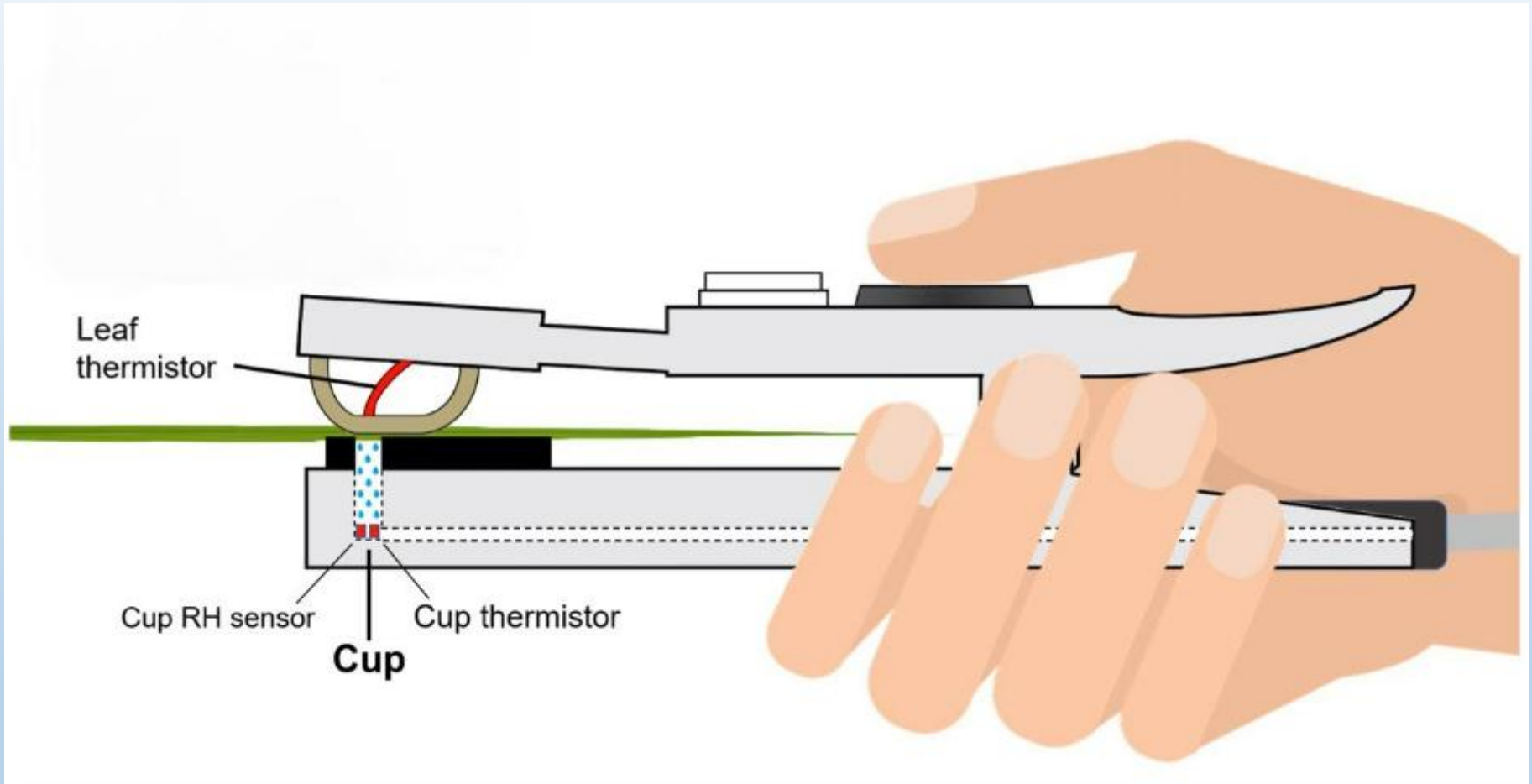


Messung des Wasserverbruachs

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

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



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

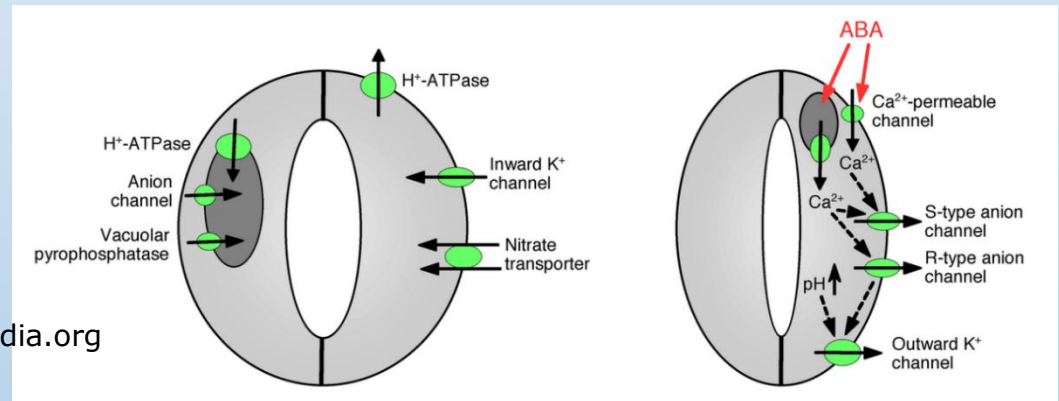
Hegele , M., Sritontip , C., Chattrakul , A., Tiayon , P., Naphrom , D., Sringarm , K., Srumsiri , P., Manochai , P. und Wünsche , JN (2010).
Hormonelle Kontrolle der Blüteninduktion bei Litschi und Longan. Acta Hortisch . 863, 305-314

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

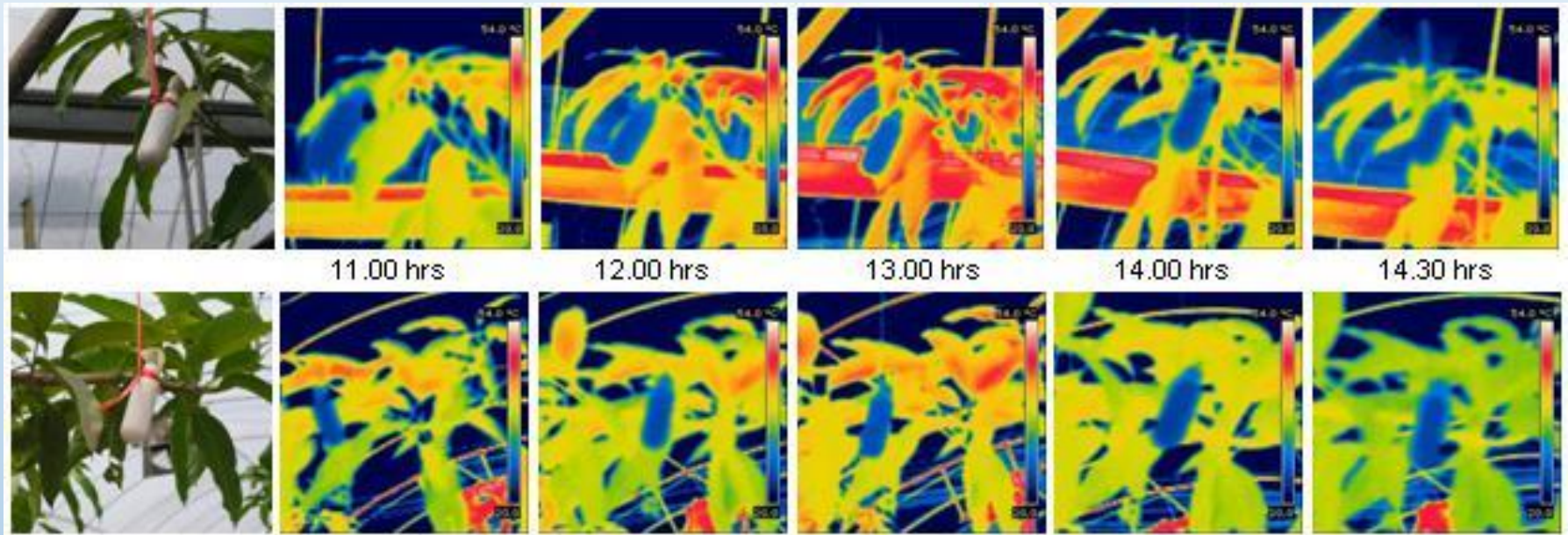


ABA wird im Blattgewebe produziert und ist vermutlich an der Blattabszision beteiligt. Dies konnte in vielen Anlagen und unter vielen Bedingungen nicht nachgewiesen werden.

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

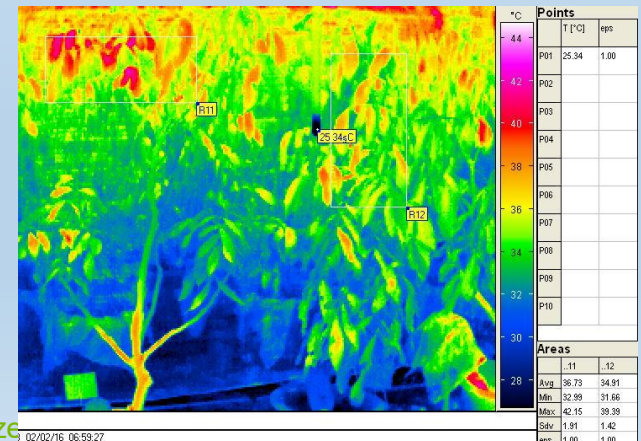
Bestimmung des Pflanzenwasserstresses

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



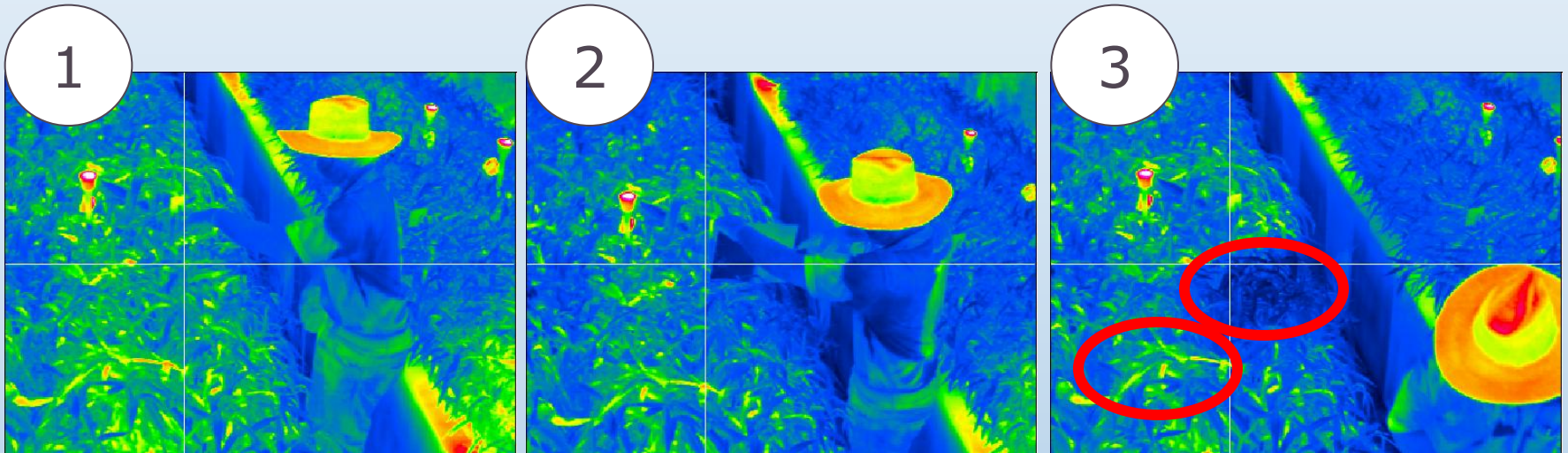
Soil Material

- 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

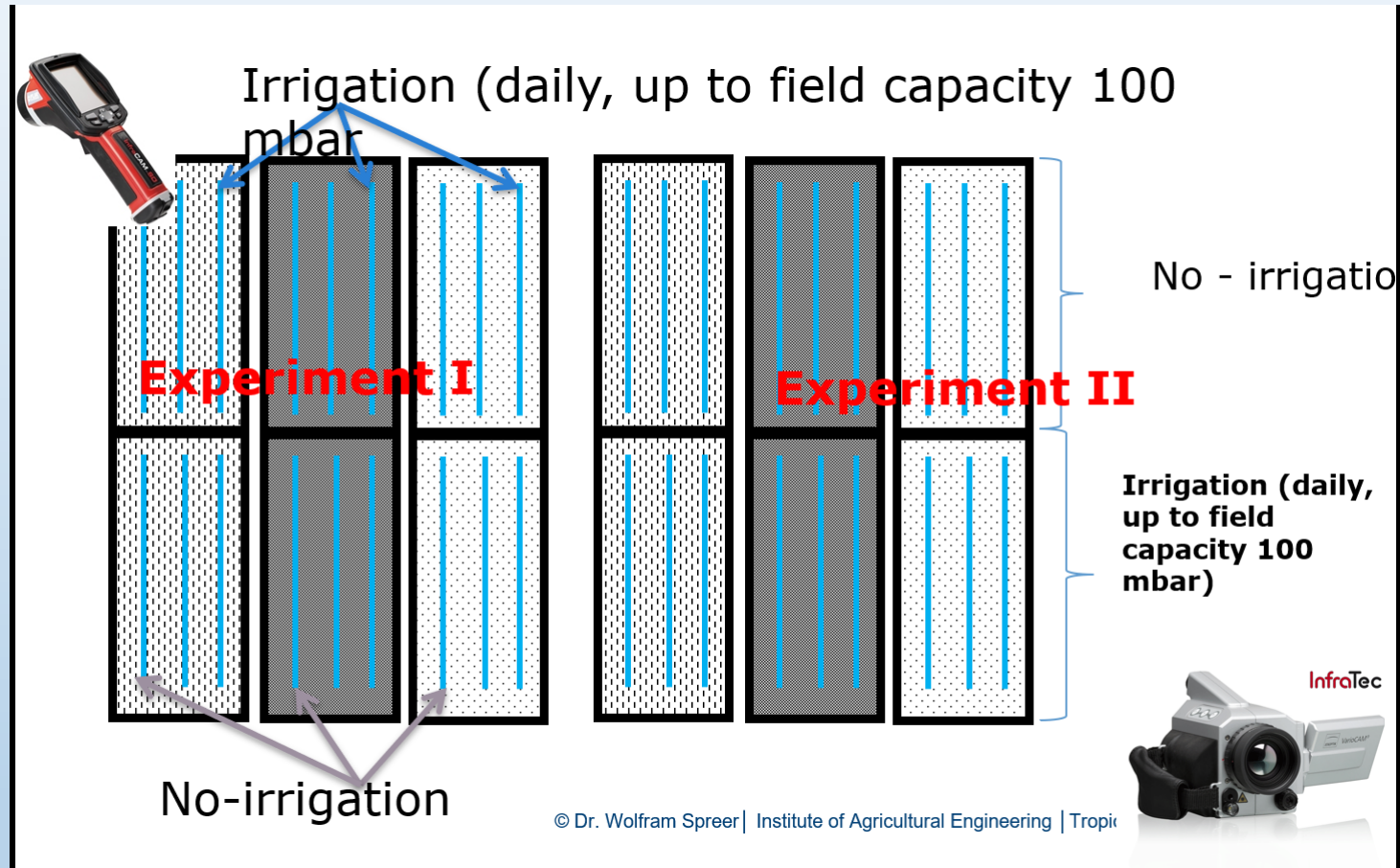
Thermocameras

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

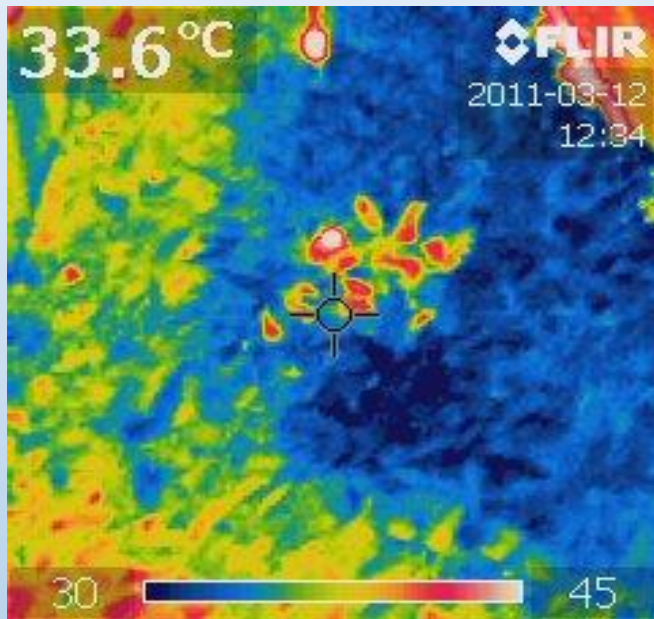


Experimental & Irrigation Setup

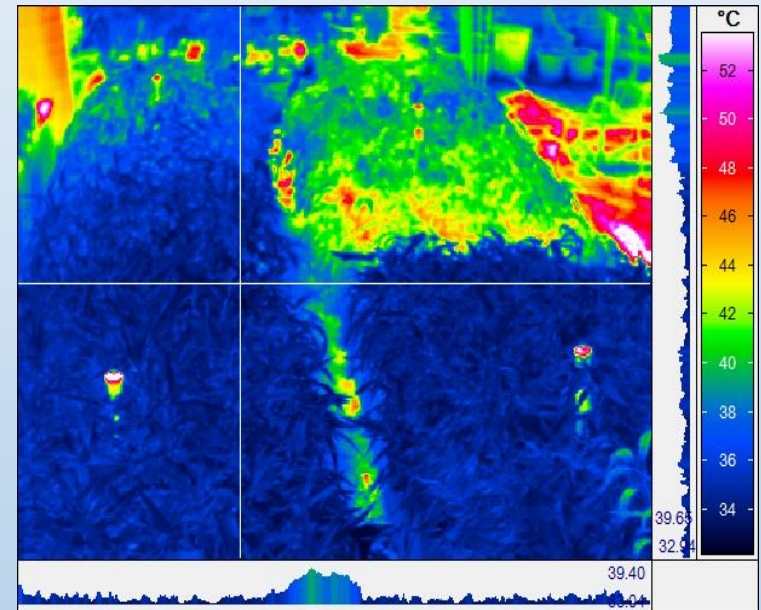


Comparison of two thermo cameras of different price

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)

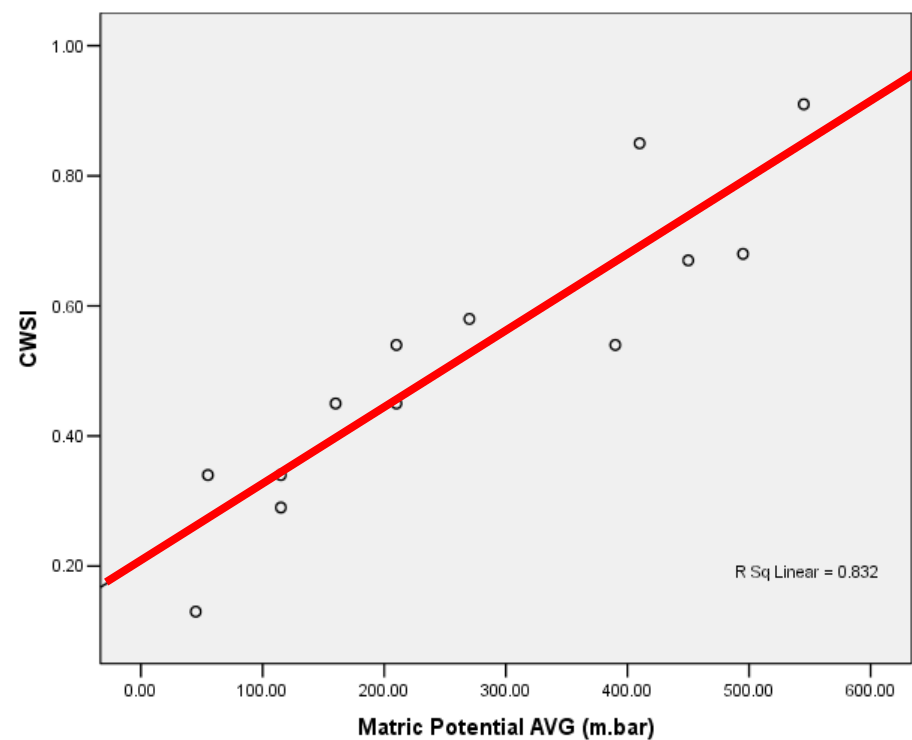
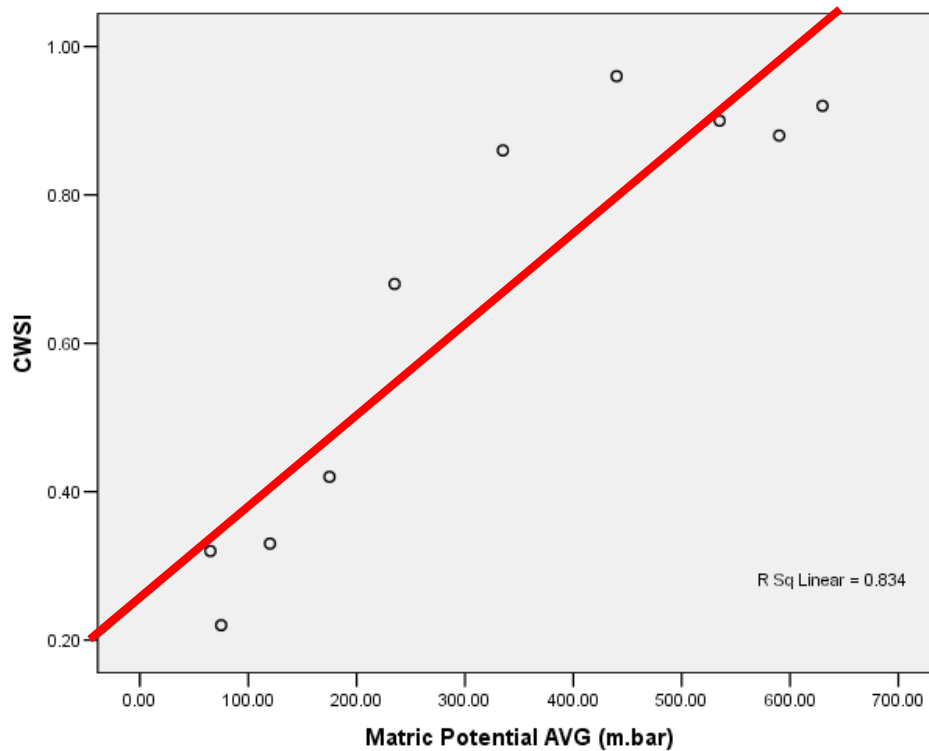


Correlation CWSI – Matric Potential

Regosol
No-irrigation

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

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

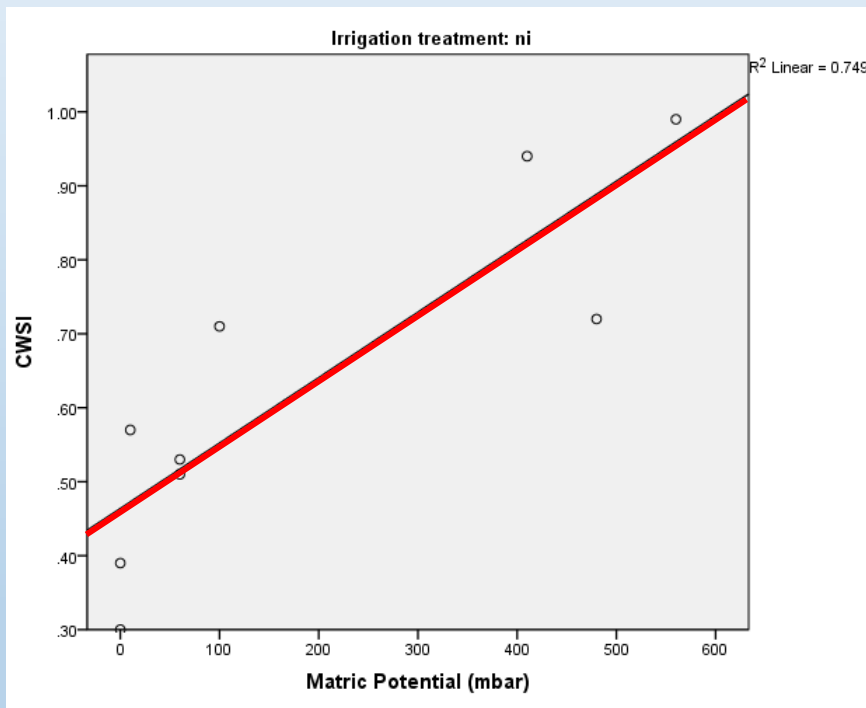


****** The correlation is significant on the significance level of 0.01 (1%). 1% is the probability of error

Correlation CWSI – Matric Potential

Regosol
No- irrigation

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



High correlation in all trials

-> *good stress indication!*

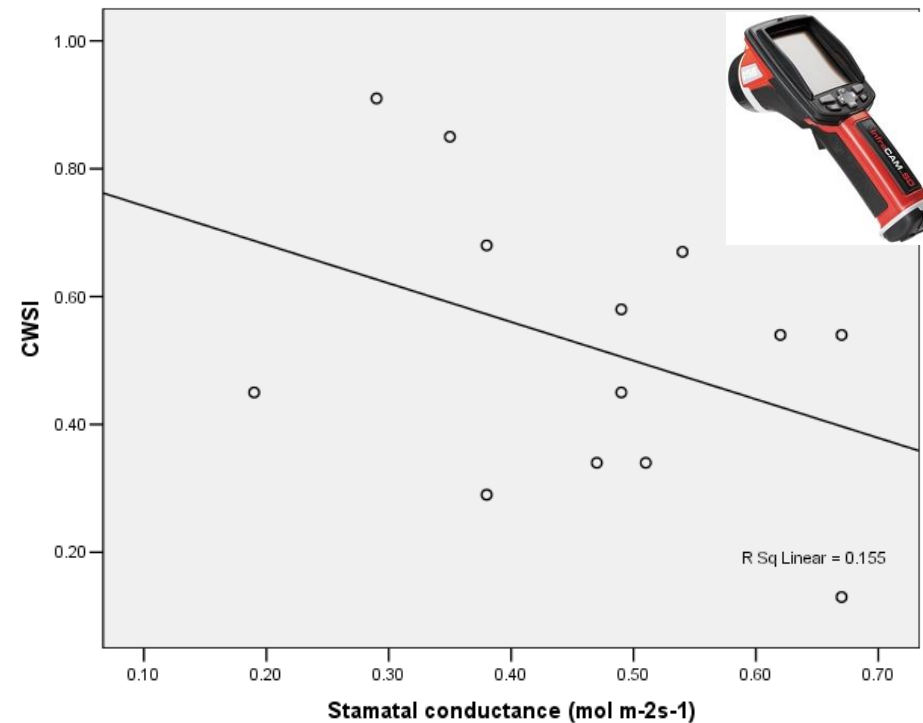
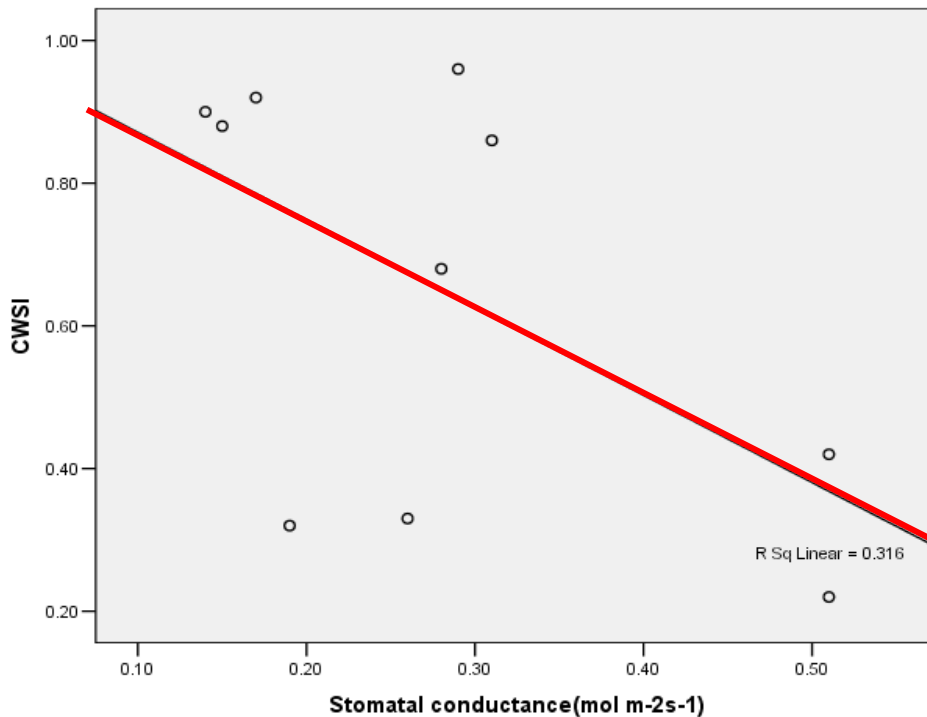
** The correlation is significant on the significance level of 0.01 (1%). 1% is the probability of error

Correlation CWSI – Stomatal Conductance

Regosol
No- irrigation

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

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

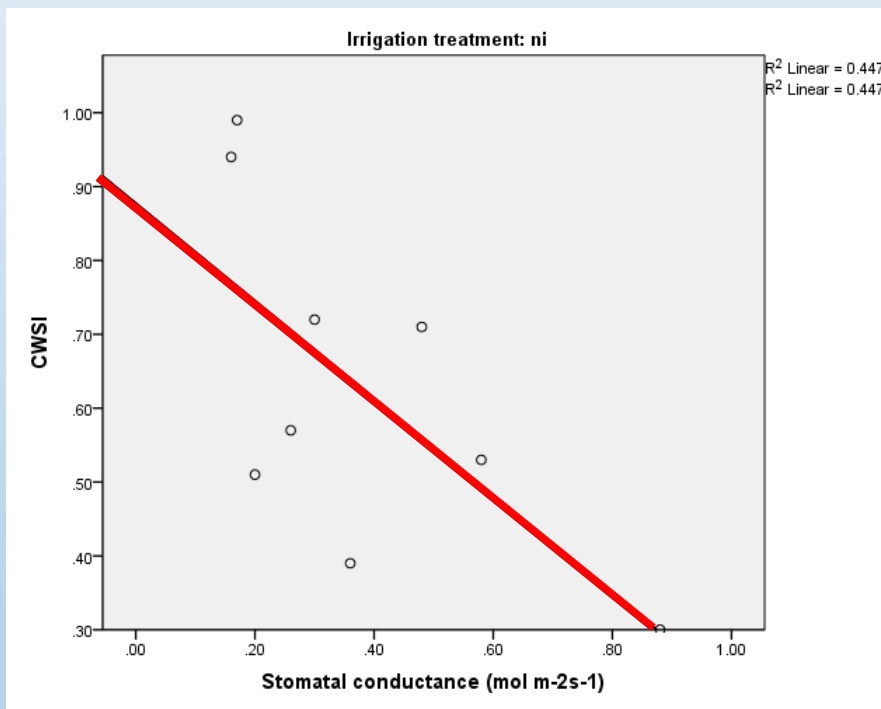


* The correlation is significant on the significance level of 0.05 (5%). 5% is the probability of error

Correlation CWSI – Stomatal conductance

Regosol
No- irrigation

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



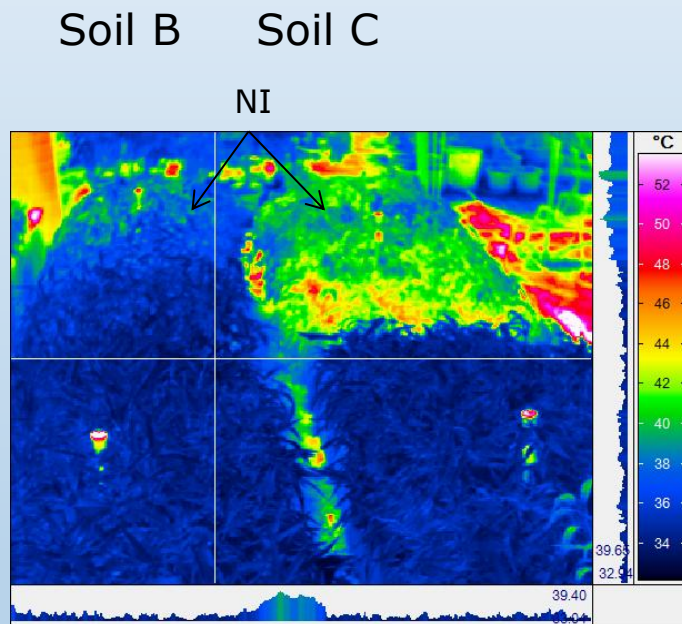
- Significant correlation in two trials
- High variability due to single leaf analysis in stomatal conductance



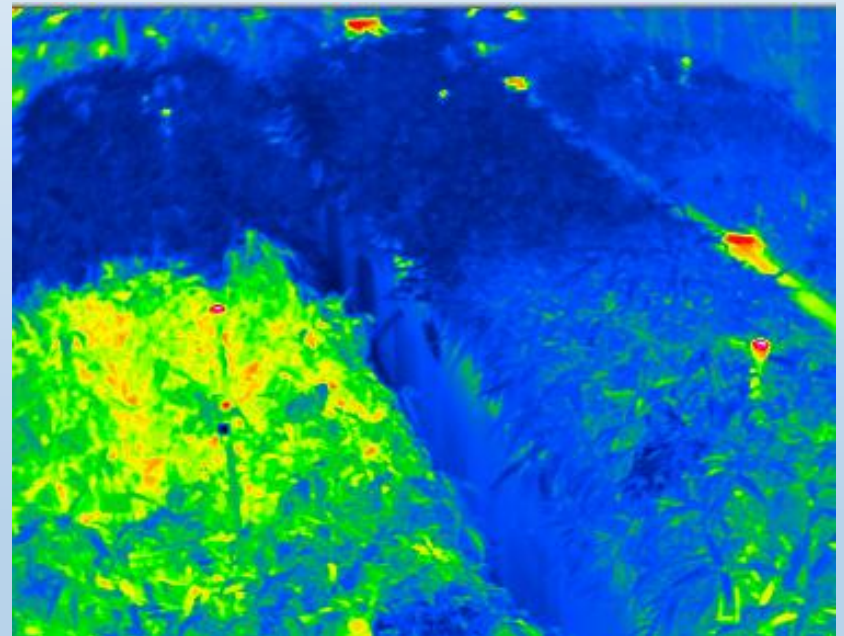
* The correlation is significant on the significance level of 0.05 (5%). 5% is the probability of error

Differences in Leaf Temperature

- After 12 days of drought

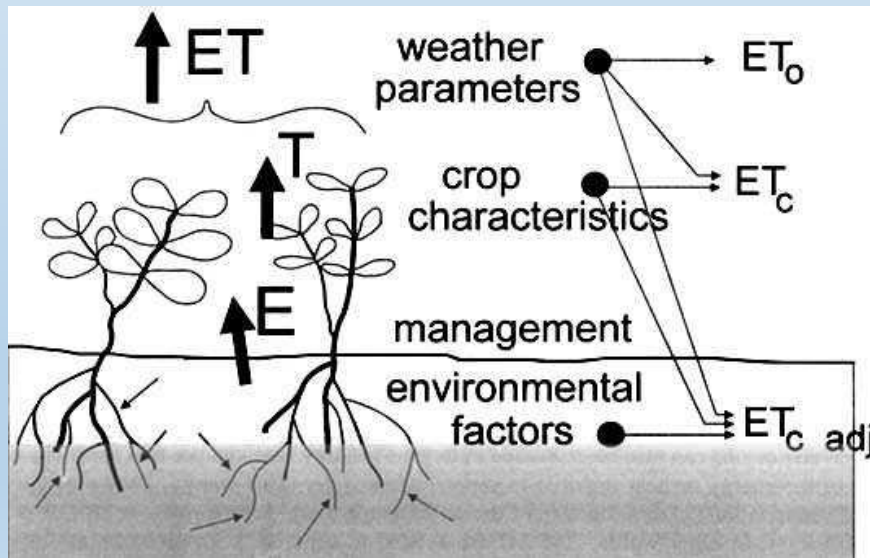


Shows stress before obvious visual damage



Evapotranspiration ET

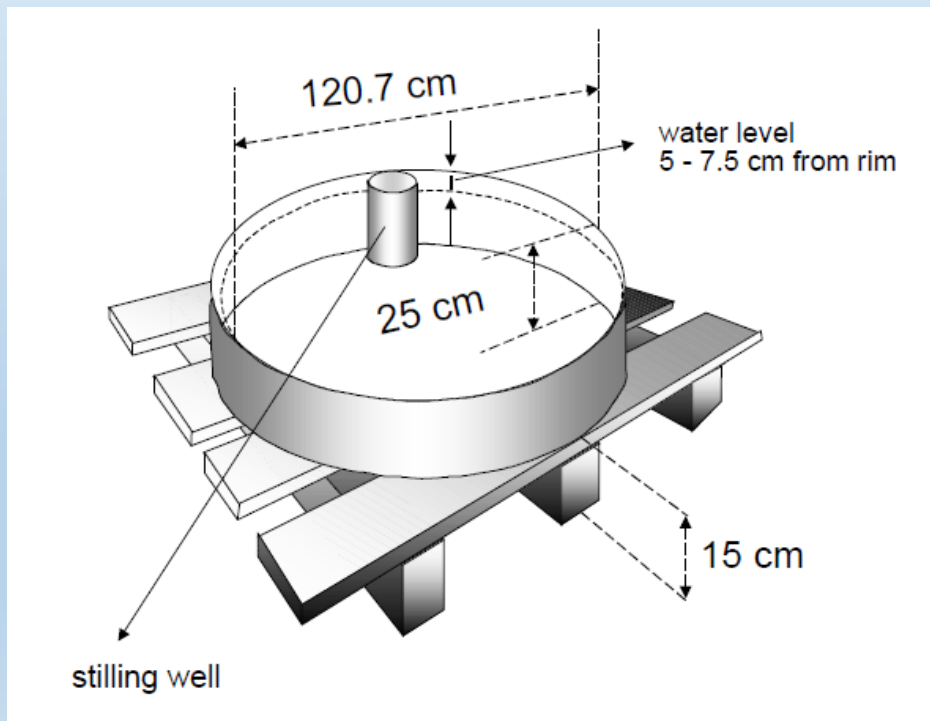
- E Evaporation passive Wasserverdunstung einer Bodenoberfläche
- T Transpiration aktive Wasserverdunstung einer Pflanze
- T_0 potentielle Transpiration einer Referenzpflanze
- T_c potentielle Transpiration einer Pflanze c
- ET_0 potentielle Evapotranspiration
- $ET_{c\ adj}$ tatsächliche Evapotranspiration eines Pflanzenbestandes



<http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>

Evapotranspiration Class A Pan (U.S. Weather Bureau)

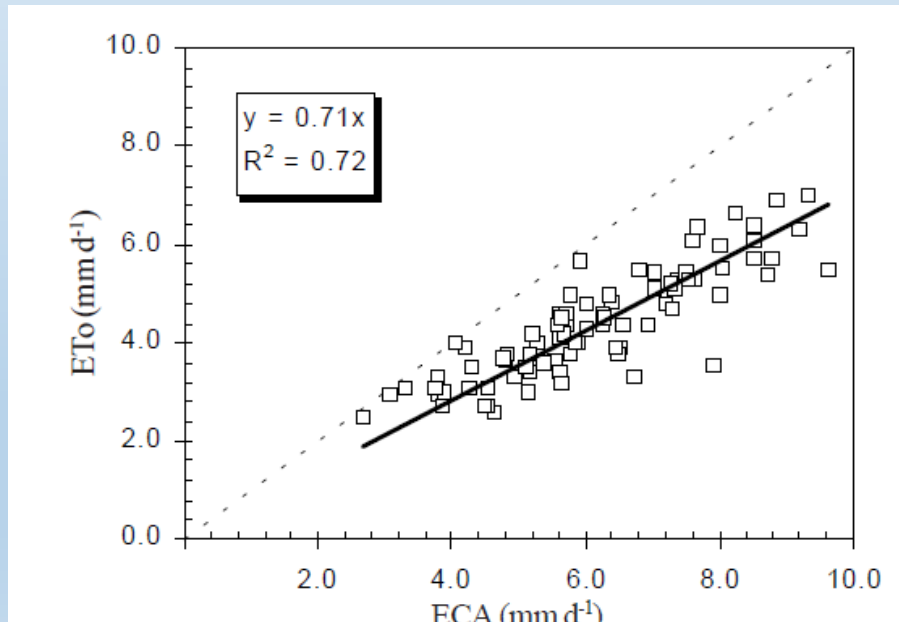
- Durchmesser 120,7 cm
- Wandhöhe 25 cm
- Aufstellung 15 cm über dem Boden
- Mit Wasser gefüllt bis 5 cm unter Oberkante
- Tägliche Messung in mm/Tag



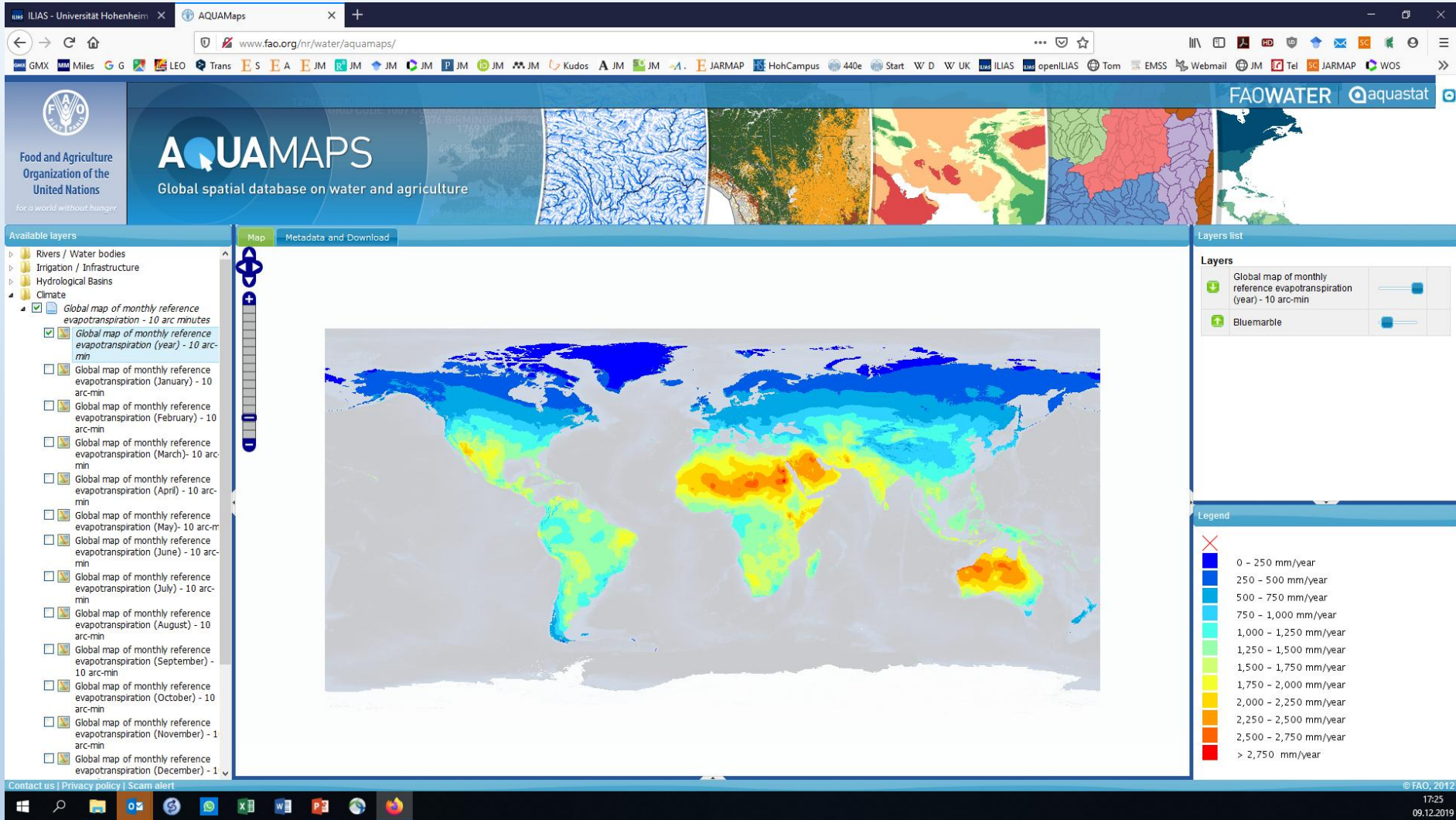
Evapotranspiration Class A Pan (U.S. Weather Bureau)

$$ET_0 = K_{pan} \cdot E_{pan}$$

K_{pan} 0,35 – 0,85 (Mittelwert 0,70)



Sentelhas & Folegatti 2003



<https://data.apps.fao.org/aquamaps/>

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

- Modelle basierend auf Wetterdaten
- Benötigte Messwerte:
 - Strahlung R
 - Temperatur T
 - Rel. Luftfeuchte RH
 - Windgeschwindigkeit u

$$ET_0 = f(R, T, RH, u)$$



<http://static.panoramio.com/photos/large/40410966.jpg>



Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

The Blaney-Criddle Formula

$$ET_0 = p(0.46 \cdot T_{mean} + 8)$$

Critchley, W., Siegert, K. et al., 1991. Water harvesting - A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production - (AGL/MISC/17/91) Land and Water Development Division FAO, Rome, Italy.

The Hargreaves Method

$$ET_0 = 0.0023 \cdot RA \cdot (T + 17.8) \cdot TD^{0.5}$$

Hargreaves, G.H., 1994. Defining and Using Reference Evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120/6: Technical Note No. 6395.

ET_0 =	reference crop evapotranspiration (mm/day)
RA =	extraterrestrial radiation (equivalent mm/day)
T =	Temperature (° C)
T_{mean} =	mean daily temperature (° C)
TD =	mean max minus mean min temperature (° C)
p =	mean daily percentage of annual daytime hours

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

The Penman-Monteith Equation

$$ET_0 = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

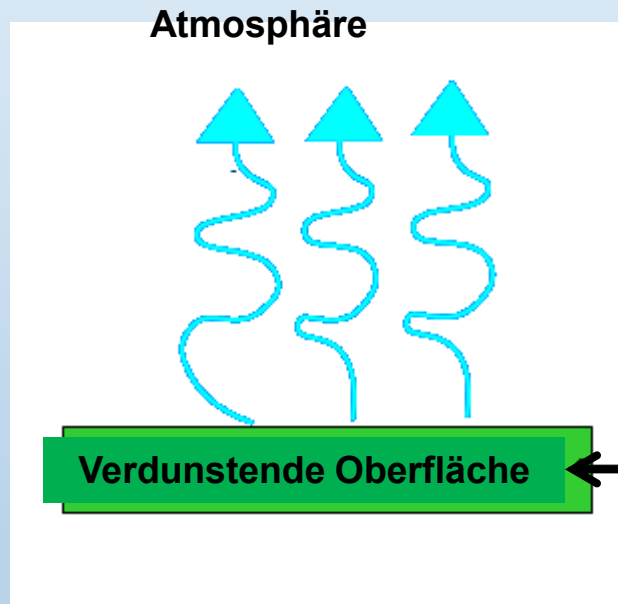
Raes, 2010

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

The Penman-Monteith Equation

Abfuhr von
Wasserdampf

Verdampfung

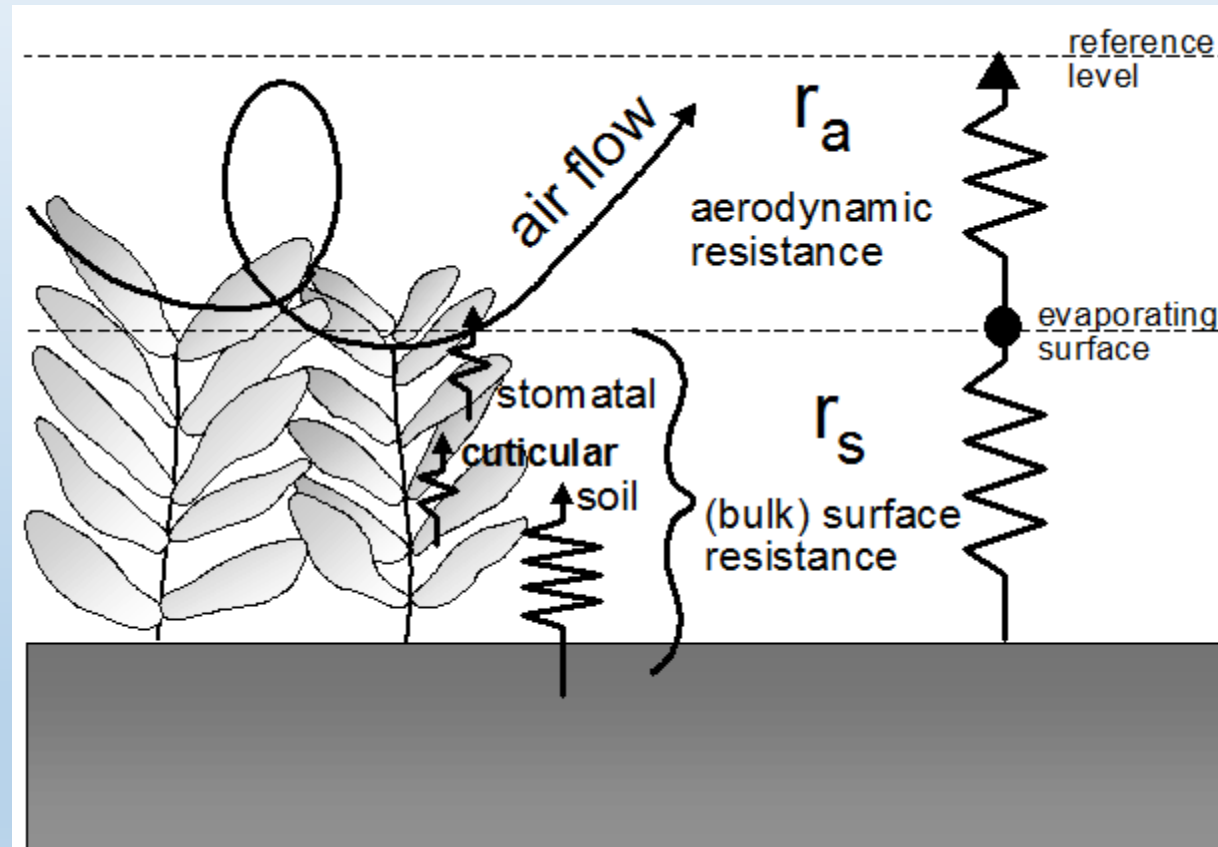


Gültig für eine beliebige
Oberfläche der Verdunstung,
beschrieben durch
Widerstandswerte

Raes, 2010

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

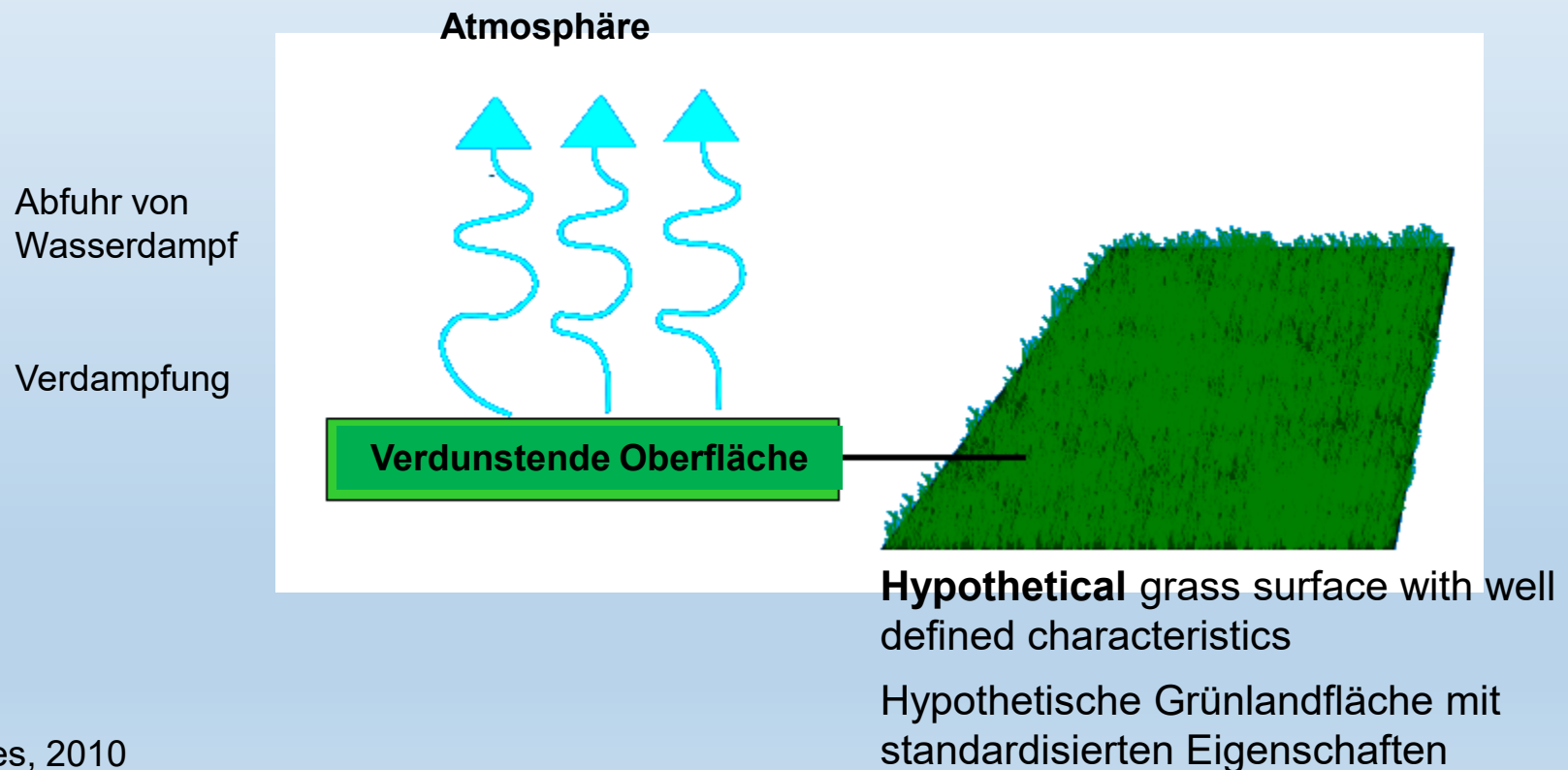
The Penman-Monteith Equation



Raes, 2010

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

The Penman-Monteith Equation



Raes, 2010

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

The modified Penman-Monteith Equation

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

ET_0	reference evapotranspiration	mm/d
R_n	net radiation at the crop surface	MJ/m ² d
G	soil heat flux density	MJ/m ² d
T	mean daily air temperature (2 m heigth)	°C
u_2	wind speed (2 m heigth)	m/s
e_s	saturation vapour pressure	kPa
e_a	actual vapour pressure	kPa
Δ	slope vapour pressure curve	kPa/°C
γ	psychrometric constant	kPa/°C

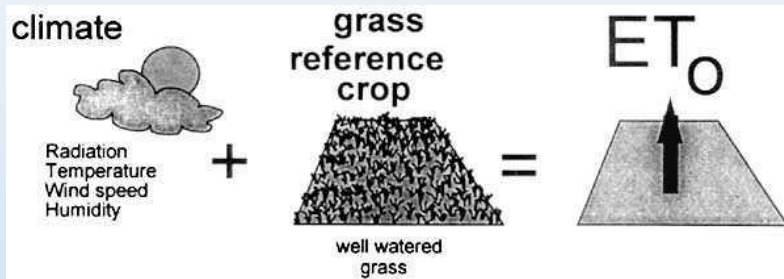
Allen, R.G., Pereira, J.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirement. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, Italy

FAO Penman-Monteith Gleichung

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

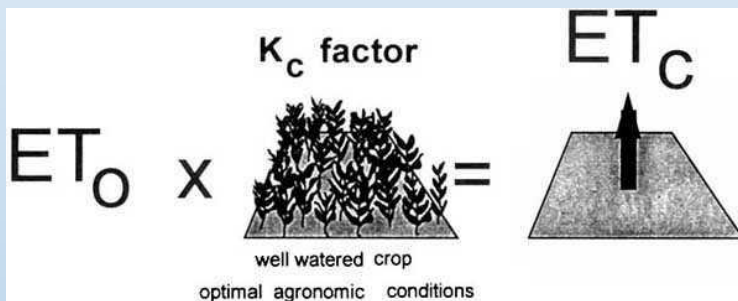
ET_0	reference evapotranspiration	mm/d
R_n	net radiation at the crop surface	MJ/m ² d
G	soil heat flux density	MJ/m ² d
T	mean daily air temperature (2 m height)	°C
u_2	wind speed (2 m height)	m/s
e_s	saturation vapour pressure	kPa
e_a	actual vapour pressure	kPa
Δ	slope vapour pressure curve	kPa/°C
γ	psychrometric constant	kPa/°C

FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56



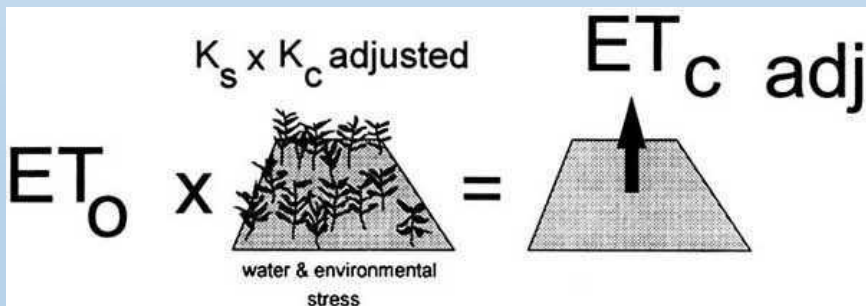
Potential reference (grass)
evapotranspiration (ET_0)

*Potenzielle Referenz -
Evapotranspiration (ET_0)*



Potential crop
evapotranspiration (ET_c)

*Potenzielle Kultur -
Evapotranspiration (ET_c)*



Actual (adjusted) crop
evapotranspiration ($ET_{c \text{ adj}}$)

*Tatsächliche Kultur -
Evapotranspiration ($Et_{c \text{ adj}}$)*