

Bewässerungstechnik in der Landwirtschaft

Wasser im Boden-Pflanze-Atmosphäre Kontinuum Teil 2

Wolfram Spreer

23.03.2026

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

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.

Bewässerungsschwelle

Kultur	Bewässerungsschwelle (% nFK)	Einheit
Mais	40–50% nFK	
Getreide	40–50% nFK	
Zuckerrüben	40–50% nFK	
Freilandgemüse	40–50% nFK	
Kopfsalat	60–70% nFK	
Frischgemüse	60–70% nFK	
Erdbeeren	60–70% nFK	
Speisekartoffeln	50% nFK	
Frühkartoffeln	45% nFK	
Kartoffeln mittlerer Reifegruppe	40–50% nFK	
Kartoffeln späte Reifegruppe (Knollenansatz bis Blüte)	35% nFK	

Bewässerungsplanung - Bewässerungssteuerung

Bewässerungsplanung:

Abschätzen des Wasserbedarfs

Erstellen eines Bewässerungsplans:

- Intervall
- Menge

Bewässerungssteuerung:

Entscheidung

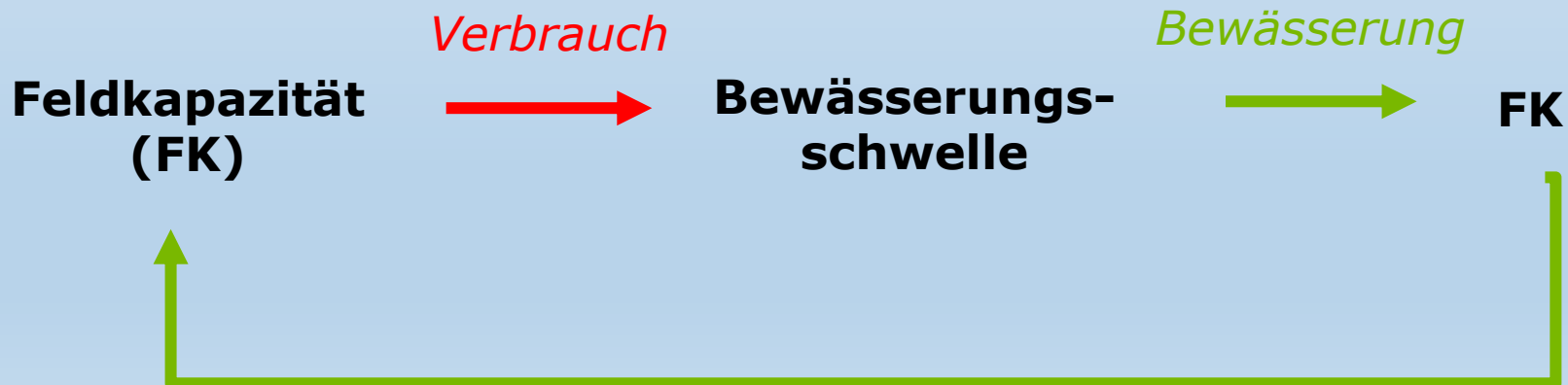
- Bewässerungsstart
 - Bewässerungsende (Dauer)
-
- ✓ *Bodenfeuchte*
 - ✓ *Versorgungszustand der Pflanze*
 - ✓ *Wasserbilanzmodell*

Bewässerungsplanung

Wasserbilanzrechnung

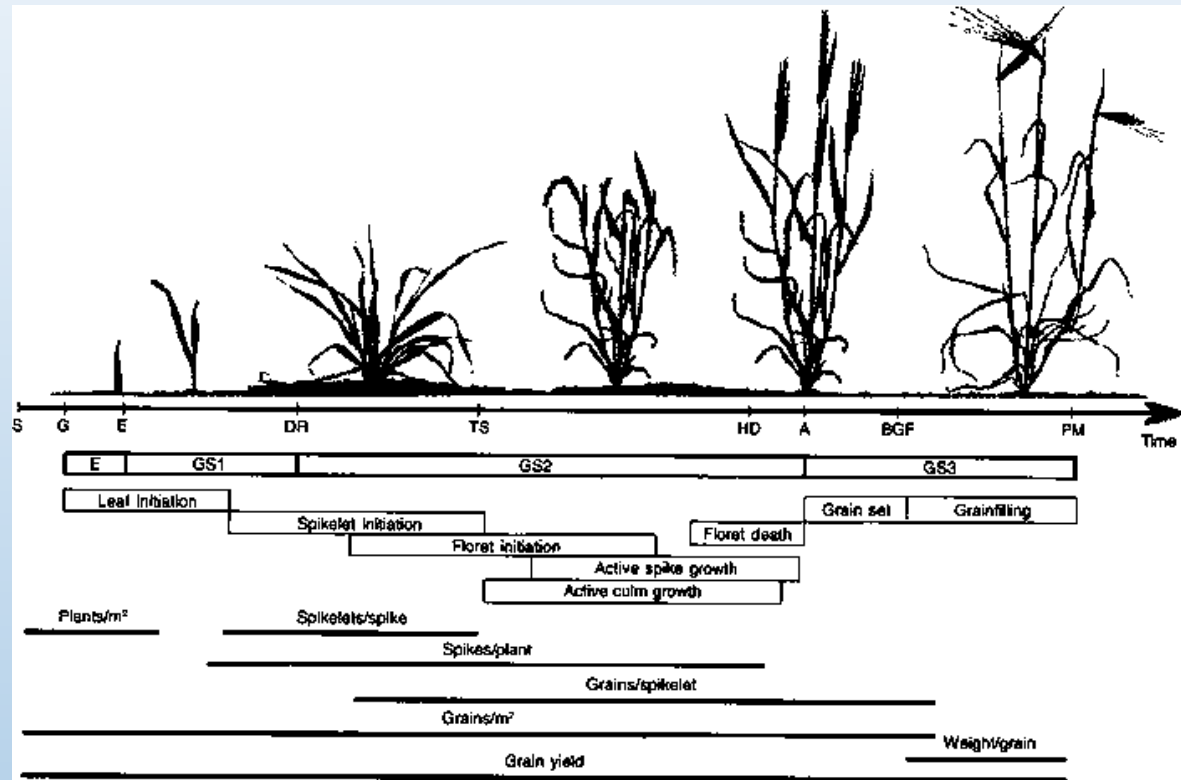
-> Veränderung des Bodenwassergehalts

- Bestimmen des Bodenwassers
- Definieren des Wurzelraums
- Bestimmen der nFK -> total available water (TAW)
- Bestimmen des readily available water (RAW) = Bewässerungsschwelle



Entwicklungsstadien

Winterweizen



<http://www.fao.org/docrep/006/y4011e/y4011e06.htm>

Entwicklungsstadien

BBCH	Entwicklungsstadium Mais	ca. Tage nach Aussaat	typische Wurzeltiefe / Durchwurzelungstiefe (cm)
00-09	Keimung / Auflaufen	5-20	2-8
10-12	1-2-Blattstadium	10-20	5-15
13-16	3-6-Blattstadium	18-35	15-35
17-19	7-9-Blattstadium	30-45	35-60
30-39	Streckungsphase / 3 bis 9+ Stängelknoten	40-65	60-100
51-59	Rispenschieben	55-75	90-130
61-69	Blüte	60-85	100-150
71-79	Fruchtbildung / Milchreife	80-110	100-160
83-87	Teigreife / physiologische Reife	110-140	100-160
89	Vollreife	130-170	100-160

Wasserbedarf der Pflanze

Durchwurzelungstiefe der wichtigsten landwirtschaftlich genutzten Fruchtarten

Fruchtart	Mittlere Durchwurzelungstiefe cm	Maximale Durchwurzelungstiefe cm
W.- Weizen	150	200
W. - Roggen	150	170
So. - Gerste	120	150
W. - Raps	130	160
Mais	100	160
Kartoffeln	80	150
Z. - Rüben	150	200
Rotklee	130	170
Luzerne	160	250
Sonnenblume	100	150

Durchwurzelungstiefe ist nicht notwendigerweise gleichbedeutend mit dem Wurzelraum, in dem Wasser aufgenommen wird.

Die Annahme, dass die Hauptaufnahme in den obersten 80% der Durchwurzelungstiefe stattfindet kann sinnvoll sein.

Körschens, 2005

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

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

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

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?

Durchwurzelungstiefe: 80 cm

Wurzelraum: $0,8 \text{ m} * 10.000 \text{ m}^2 = 8.000 \text{ m}^3$

nFK im Wurzelraum: $8.000 \text{ m}^3 * 0,15 = 1.2000 \text{ m}^3$

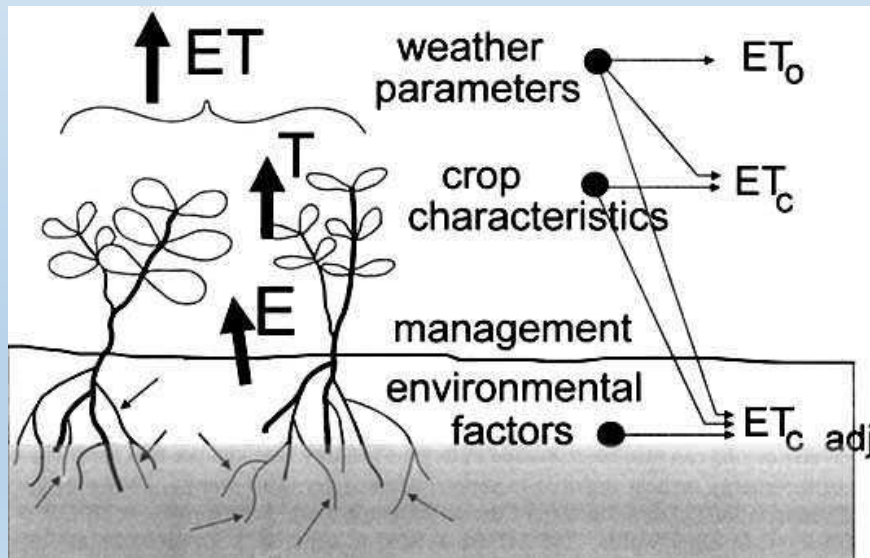
$1.500 \text{ m}^3/\text{ha} * \text{m Bodentiefe} * 0,8 \text{ m} = 1.200 \text{ m}^3/\text{ha}$

Bewässerungsschwelle Mais: 40% nFK

RAW im Wurzelraum: $1.200 \text{ m}^3 * 0.4 = 480 \text{ m}^3$

Evapotranspiration ET

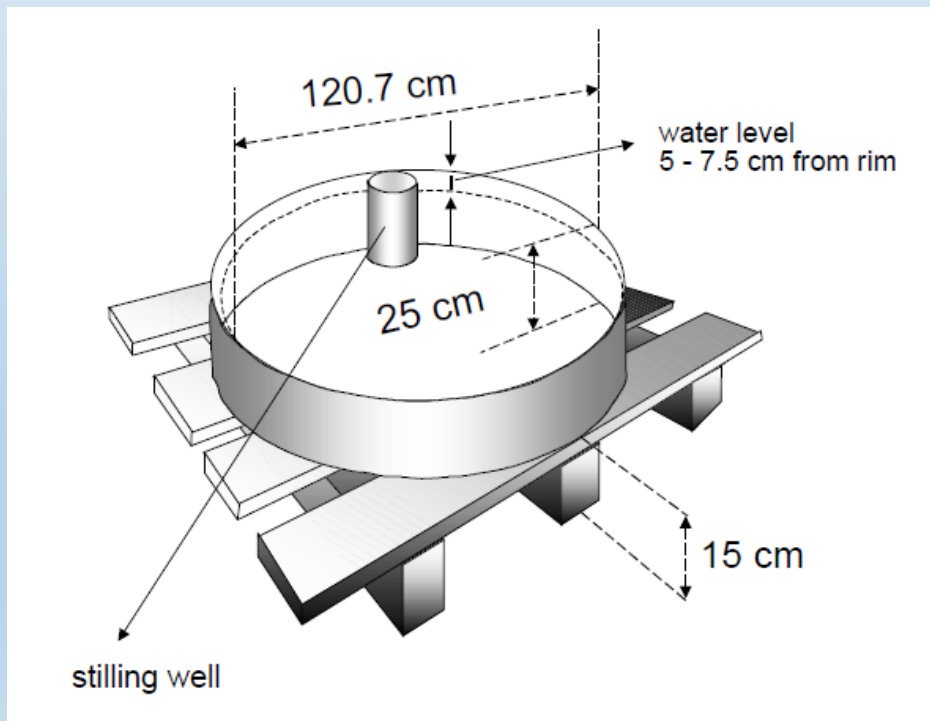
- E Evaporation passive Wasserverdunstung einer Bodenoberfläche
- T Transpiration aktive Wasserverdunstung einer Pflanze
- T_0 potentielle Transpiration einer Referenzpflanze
- T_c potentielle Transpiration einer Pflanze c
- ET_0 potentielle Evapotranspiration
- $ET_{c\ adj}$ tatsächliche Evapotranspiration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



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

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

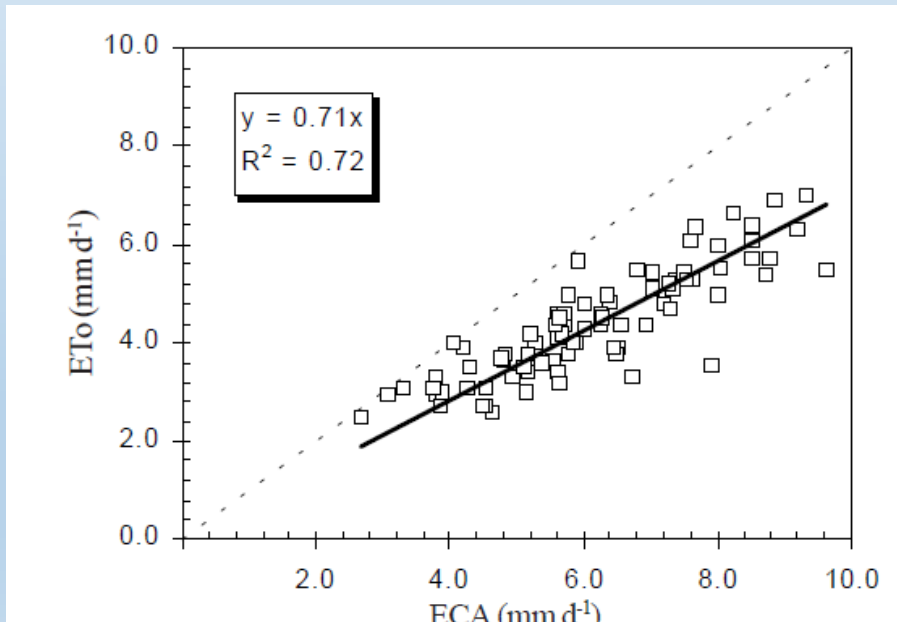
- Durchmesser 120,7 cm
- Wandhöhe 25 cm
- Aufstellung 15 cm über dem Boden
- Mit Wasser gefüllt bis 5 cm unter Oberkante
- Tägliche Messung in mm/Tag



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

ILIAS - Universität Hohenheim x AQUAMaps x

www.fao.org/nr/water/aquamaps/

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations for a world without hunger

AQUAMAPS
Global spatial database on water and agriculture

FAOWATER aquastat

Available layers

- Rivers / Water bodies
- Irrigation / Infrastructure
- Hydrological Basins
- Climate
 - ☒ Global map of monthly reference evapotranspiration - 10 arc minutes
 - ☒ Global map of monthly reference evapotranspiration (year) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (January) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (February) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (March) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (April) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (May) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (June) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (July) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (August) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (September) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (October) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (November) - 10 arc-min
 - ☐ Global map of monthly reference evapotranspiration (December) - 10 arc-min

Map Metadata and Download

Layers list

Layers

- ☒ Global map of monthly reference evapotranspiration (year) - 10 arc-min
- ☒ Blumebare

Legend

- 0 - 250 mm/year
- 250 - 500 mm/year
- 500 - 750 mm/year
- 750 - 1,000 mm/year
- 1,000 - 1,250 mm/year
- 1,250 - 1,500 mm/year
- 1,500 - 1,750 mm/year
- 1,750 - 2,000 mm/year
- 2,000 - 2,250 mm/year
- 2,250 - 2,500 mm/year
- 2,500 - 2,750 mm/year
- > 2,750 mm/year

Contact us | Privacy policy | Scam alert

© FAO, 2012
17:25
09.12.2019

<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

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

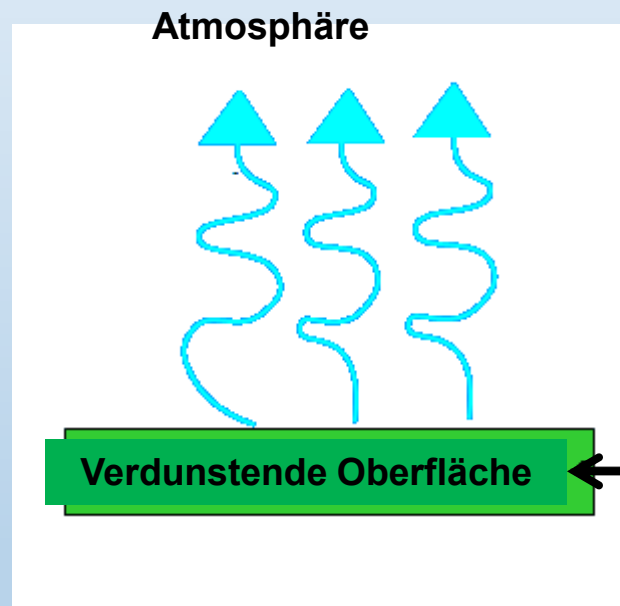
Raes, 2010

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

The Penman-Monteith Equation

Abfuhr von
Wasserdampf

Verdampfung

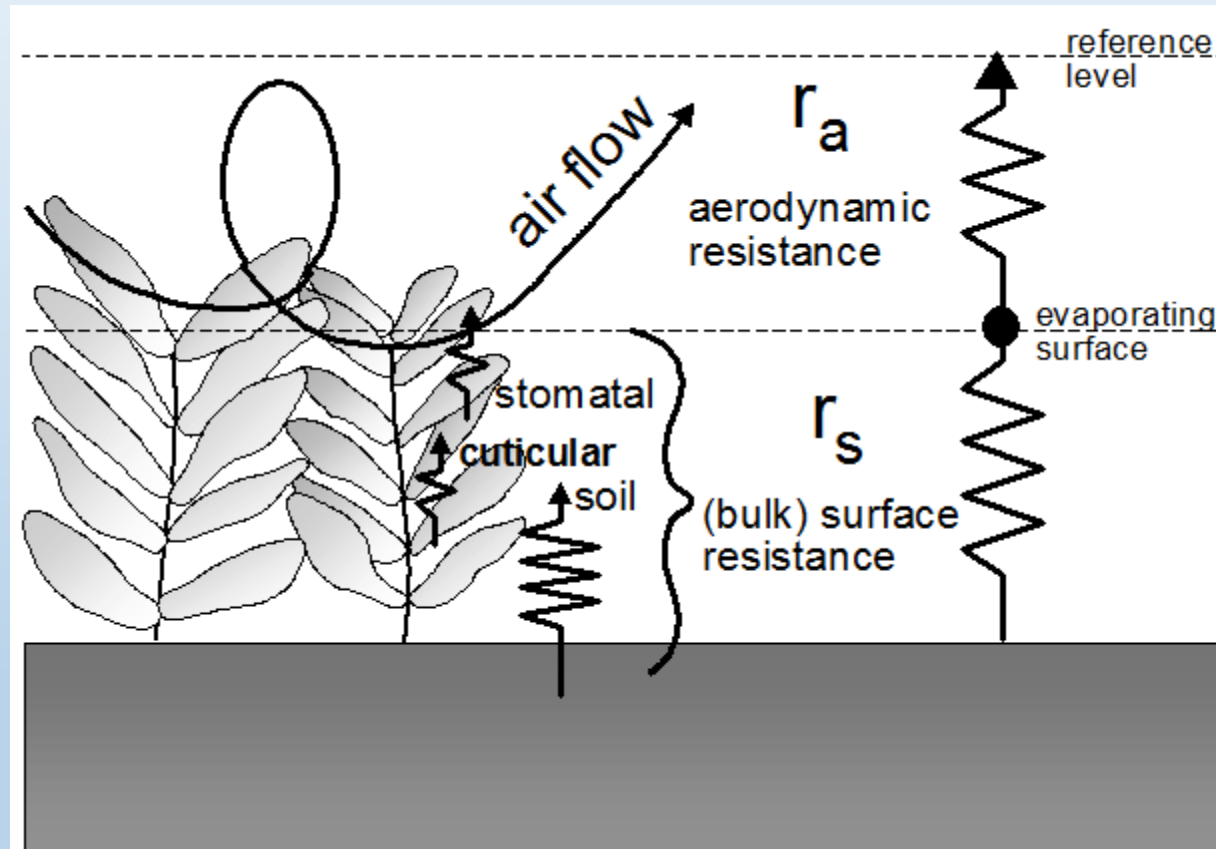


Gültig für eine beliebige
Oberfläche der Verdunstung,
beschrieben durch
Widerstandswerte

Raes, 2010

Berechnung der Evapotranspiration aus Wetterdaten

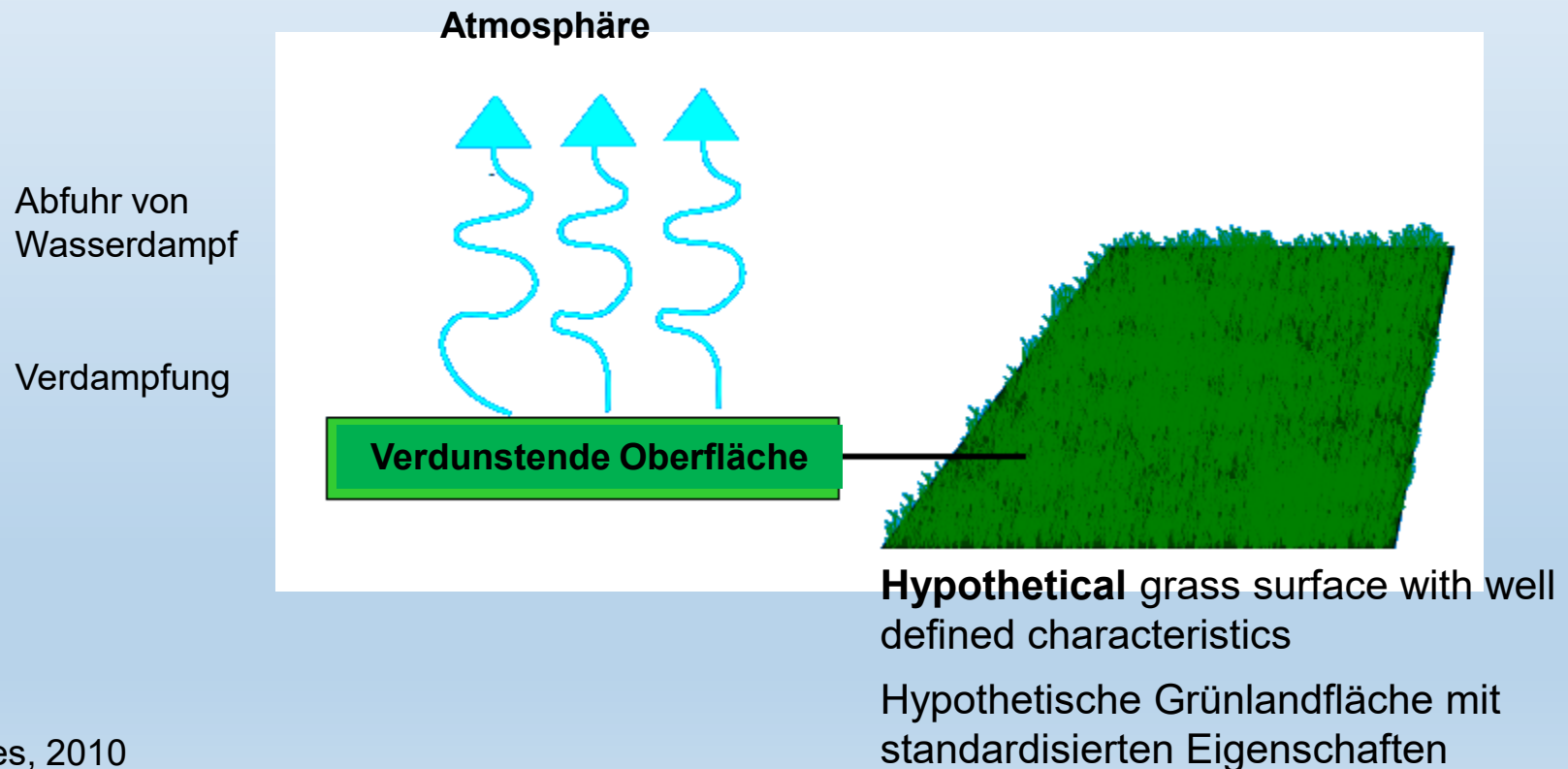
The Penman-Monteith Equation



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

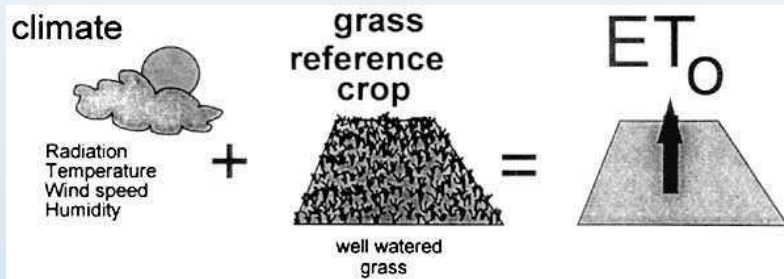
Allen, R.G., Pereira, J.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirement. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, Italy

FAO Penman-Monteith Gleichung

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

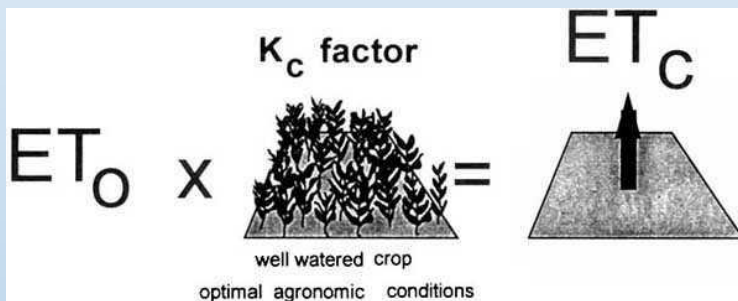
ET_0	reference evapotranspiration	mm/d
R_n	net radiation at the crop surface	MJ/m ² d
G	soil heat flux density	MJ/m ² d
T	mean daily air temperature (2 m height)	°C
u_2	wind speed (2 m height)	m/s
e_s	saturation vapour pressure	kPa
e_a	actual vapour pressure	kPa
Δ	slope vapour pressure curve	kPa/°C
γ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

FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56



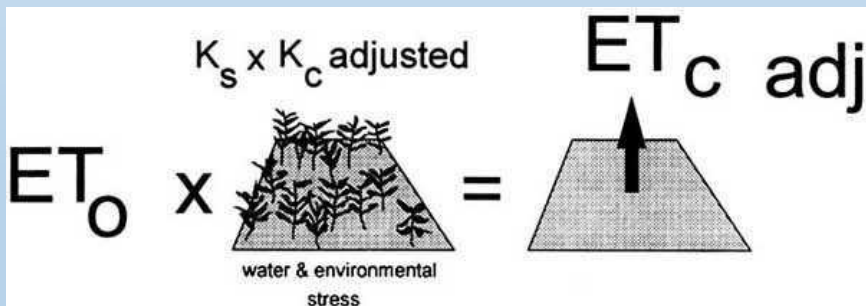
Potential reference (grass)
evapotranspiration (ET_0)

*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 ($Et_{c \text{ adj}}$)*

Download für CROPWAT und CLIMWAT

<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/en/>



Trans SC S SC A SC JM R⁰ JM JM JM P JM ID JM JM JM Kudos A JM SC JM JARMAP HohCampus 440e Start W D W U

AQUASTAT

AquaCrop

AQUAMAPS

Crop Information

CropWat

CLIMWAT

Diagnostic Tools for Investment

FAO Nile

ETo Calculator

CAE7

Databases and software

In a world with 7 billion people to feed amid growing concerns about land and water scarcity, today's land and water professionals need easy access to up-to-date information, models, approaches and technologies for sustainable food production.

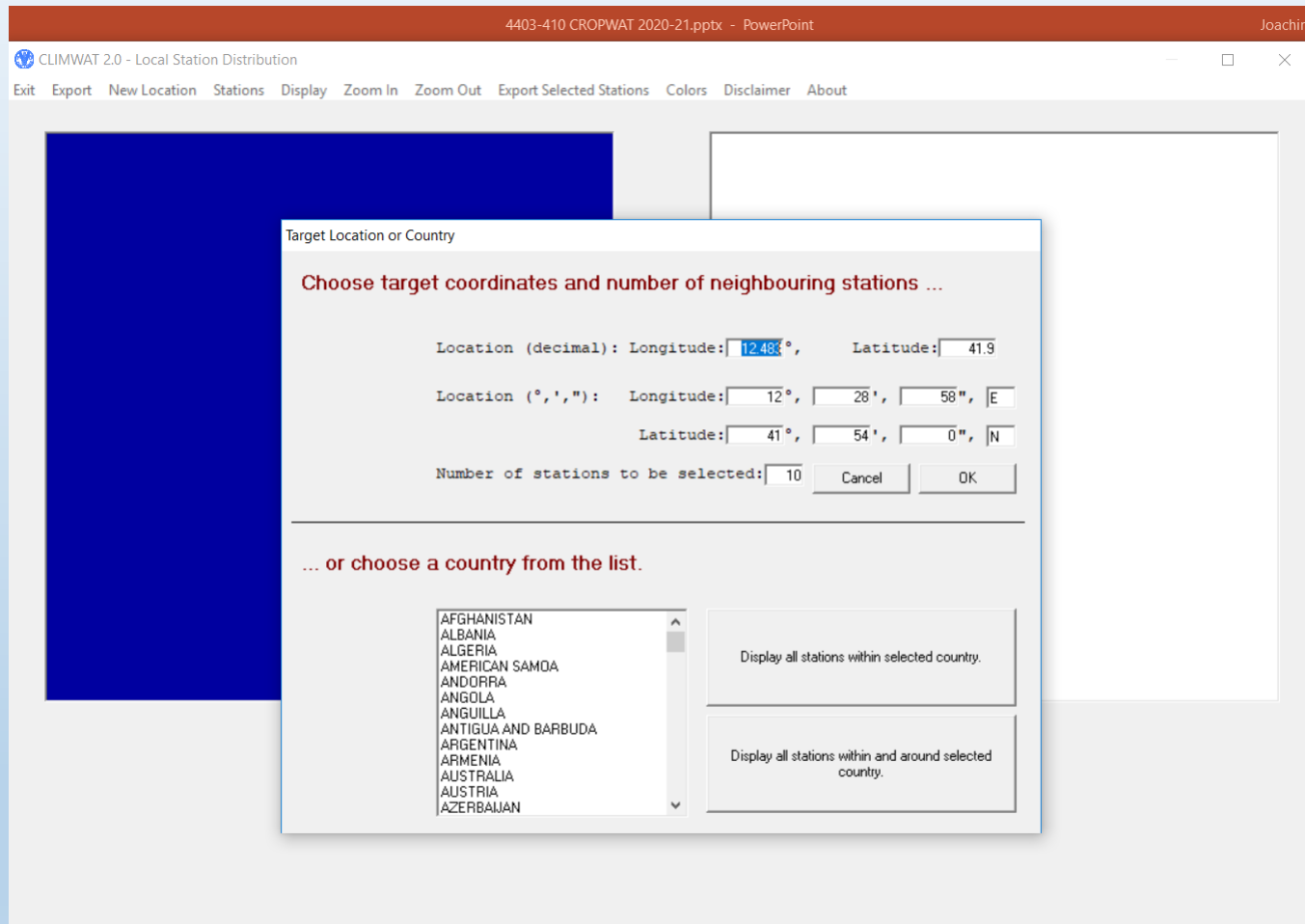
FAO hosts state-of-the-art databases and software to monitor and manage the many variables required to ensure food security while minimizing environmental impacts.

All FAO's standalone software models and other tools can be downloaded free, for use directly in the field or to assist in research projects.

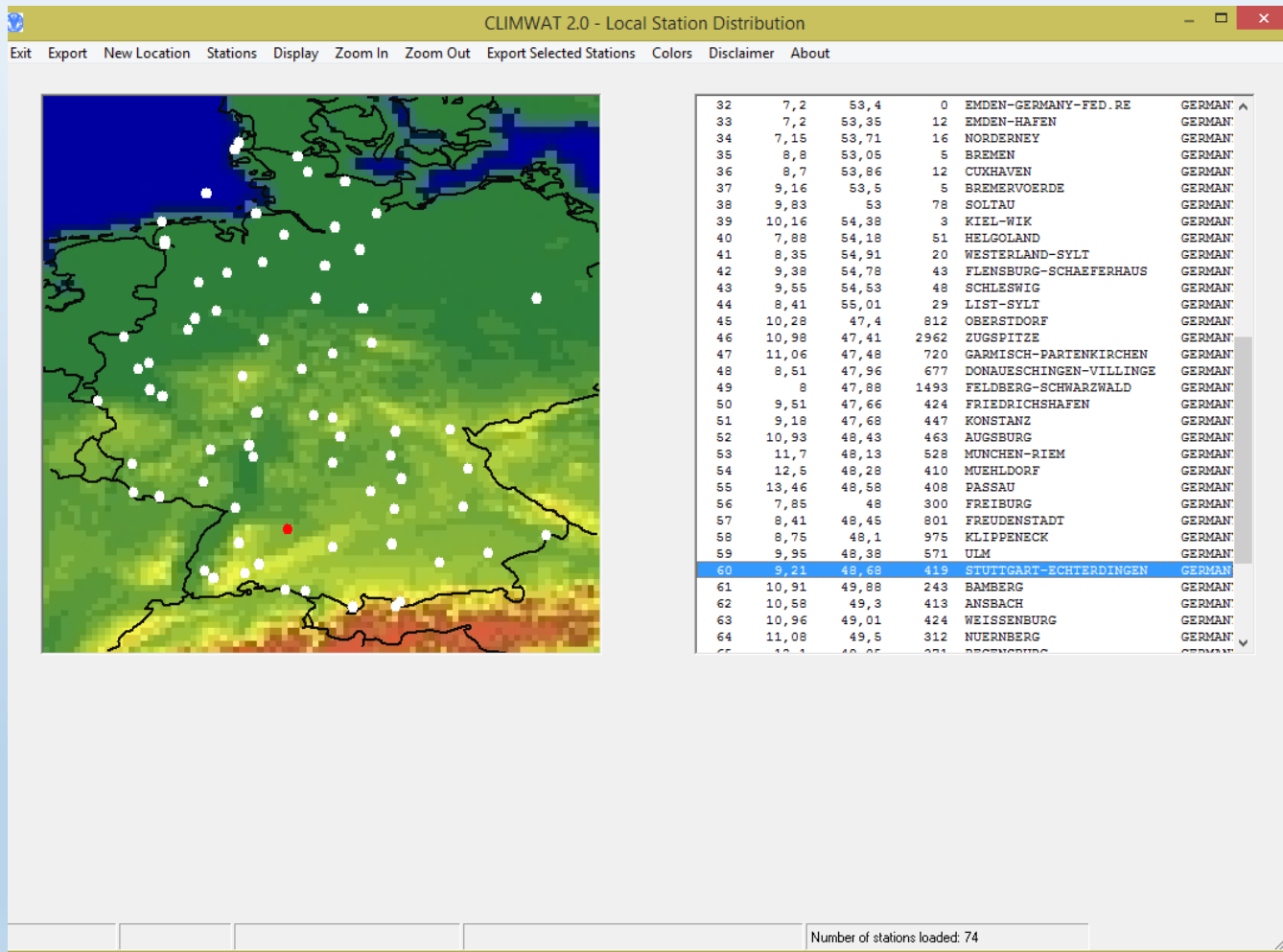
See also

- AQUASTAT - FAO's Information System on Water and Agriculture
- FAOSTAT
- FAO Soils Portal: Maps and Databases

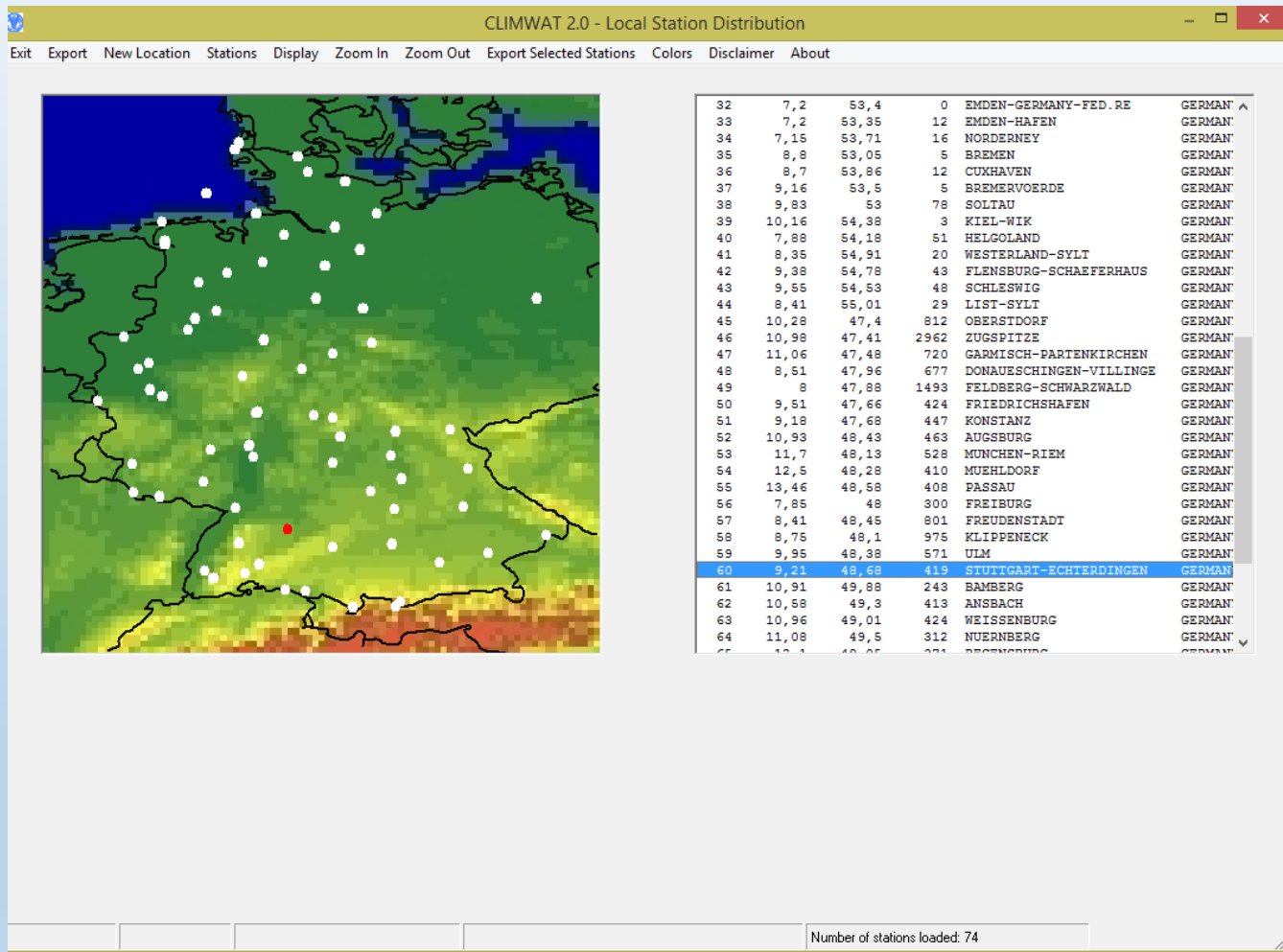
CLIMWAT



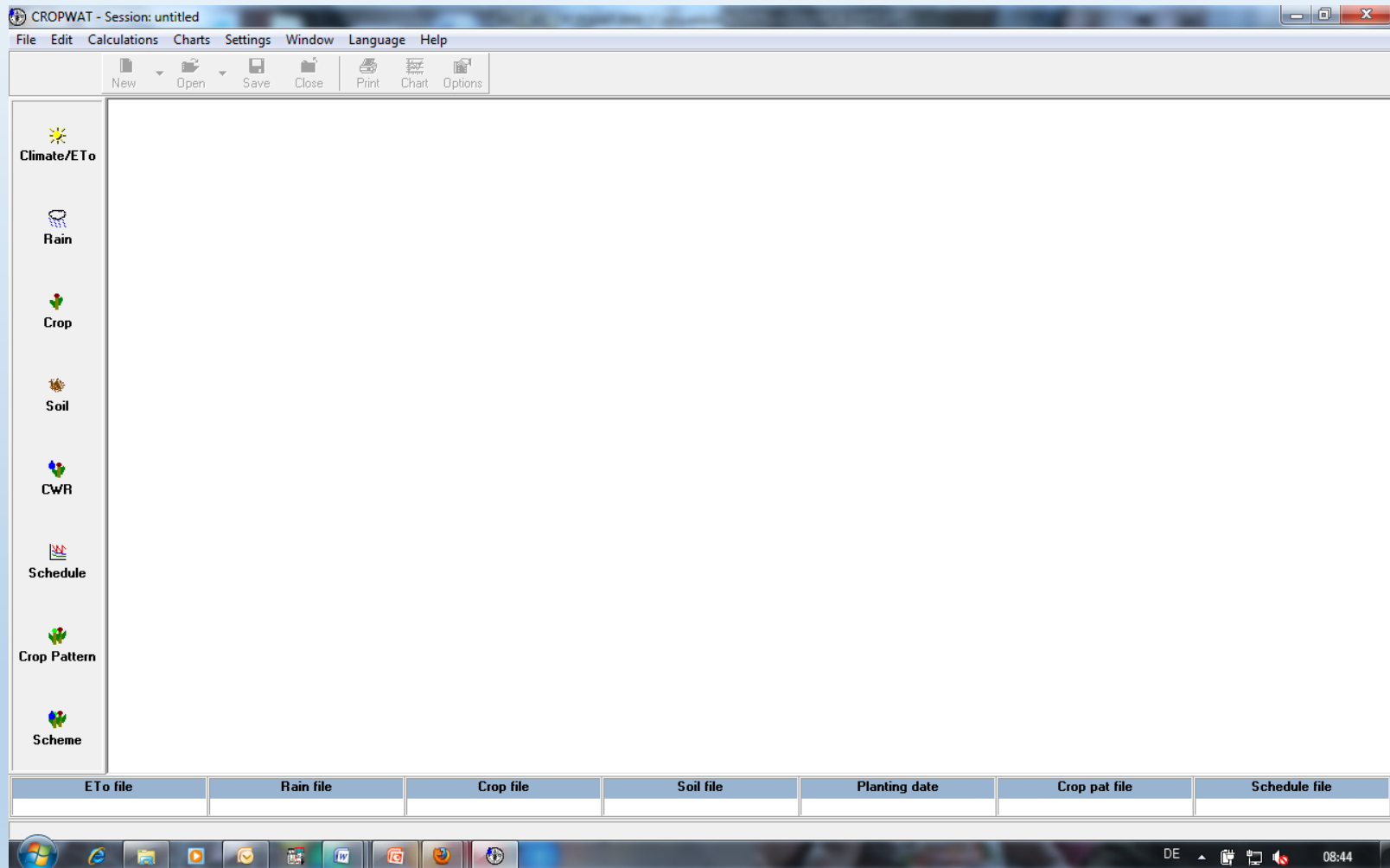
CLIMWAT



CLIMWAT



CROPWAT



CROPWAT

CROPWAT - Session: untitled

File Edit Calculations Charts Settings Window Language Help

New Open Save Close Print Chart Options

Climate/ETo Rain Crop Soil CWR Schedule Crop Pattern Scheme

Monthly ETo Penman-Monteith - C:\ProgramData\CROPWAT\data\climate\STUTTGART-ECHT...

Country Location 67 Station STUTTGART-ECHTERDING

Altitude 419 m. Latitude 48.68 °N Longitude 9.21 °E

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m ² /day	ETo mm/day
January	-3.4	2.6	83	156	2.0	3.6	0.39
February	-2.5	4.4	77	164	2.7	5.9	0.69
March	0.3	8.7	69	164	3.4	8.2	1.05
April	3.5	13.1	66	164	4.1	10.5	1.31
May	7.5	17.5	66	164	4.8	12.8	1.57
June	10.8	20.8	68	164	5.5	15.1	1.83
July	12.6	23.1	66	164	6.2	17.4	2.09
August	12.2	22.6	68	164	6.9	19.7	2.35
September	9.3	19.7	73	164	7.6	17.0	2.11
October	5.1	14.3	77	164	8.3	14.3	1.87
November	0.6	7.7	80	164	9.0	11.6	1.63
December	-2.2	3.6	83	164	9.7	8.9	1.39
Average	4.5	13.2	73	164	5.5	12.8	1.83

Monthly rain - C:\ProgramData\CROPWAT\data\rain\STUTTGART-ECHTERDINGEN.cli

Station STUTTGART-ECHTERDI Eff. rain method USDA S.C. Method

	Rain mm	Eff rain mm
January	28.0	35.7
February	37.0	34.8
March	40.0	37.4
April		
May		
June		
July		
August		
September		
October		
November		
December		
Total		

Dry crop - C:\ProgramData\CROPWAT\data\crops\Filderkraut.CRO

Crop Name Filderkraut Planting date 15/05 Harvest 21/09

Kc Values

Stage (days)

Rooting depth (m)

Critical depletion (fraction)

Yield response f.

Cropheight (m)

Soil - C:\ProgramData\CROPWAT\data\soils\Filder Loess.SOI

Soil name Filder Loess

General soil data

Total available soil moisture (FC - WP) 180.0 mm/meter

Maximum rain infiltration rate 30 mm/day

Maximum rooting depth 900 centimeters

Initial soil moisture depletion (as % TAM) 50 %

Initial available soil moisture 80.0 mm/meter

ETo file stuttgart-echterdingen.pen Rain file stuttgart-echterdingen.cli Crop file filderkraut.cro Soil file filder loess.soi Planting date 15/05 Crop pat file Schedule file

10°C Regenwahrsch. 17:01 01.11.2021