

Messung und Modellierung der Evapotranspiration

Debora Jäckel
Simon Roth
Gabriela Schär
Alexandra Schuler

28. März 2013

Die Evapotranspiration kann entweder direkt aus Lysimeterdaten berechnet oder anhand von empirischen Modellen und meteorologischen Daten modelliert werden. In diesem Versuch werden die empirischen Methoden von Penman-Monteith, Turc und Ivanov verwendet. Alle Daten werden mit MATLAB prozessiert und dargestellt.

In einem ersten Teil wird die Korrelation zwischen der realen Evapotranspiration und den meteorologischen Grössen untersucht. Dabei ist zu erkennen, dass besonders die Globalstrahlung einen entscheidenden Einfluss auf die Evapotranspirationsrate hat und die Windgeschwindigkeit in der Schweiz vernachlässigbar ist.

In einem zweiten Teil werden die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration miteinander verglichen. Die modellierten Evapotranspirationsraten liegen bei allen Modellen in derselben Größenordnung, wobei in der täglichen Auflösung die Methode nach Turc und Ivanov eine grössere Abhängigkeit von den meteorologischen Parametern zeigen als dies mit der Penman-Monteith Methode der Fall ist.

Mit einem Pflanzenfaktor kann die Evapotranspiration für jede spezifische Pflanzenart bestimmt werden. In diesem Versuch werden die potentiellen Evapotranspirationsraten von Raps und Weizen miteinander verglichen. Diese verhalten sich im jährlichen Verlauf sehr ähnlich, ausser dass die maximale reale Evapotranspiration des Weizens ein Monat nach jener von Raps erreicht wird.

In einem weiteren Teil wird für jede Methode eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei zeigen bei der Methode nach Penman-Monteith und Ivanov alle Parameter eine etwa gleich grosse Sensitivität. Bei der Turc-Methode ist die relative Luftfeuchtigkeit der dominierende Faktor.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
2. Methode	4
2.1. Lysimeter	5
2.2. FAO Penman-Monteith-Methode	7
2.3. Turc-Methode	8
2.4. Ivanov-Methode	9
2.5. Sensitivitätsanalyse	9
3. Resultate	9
3.1. Korrelation zwischen realer Evapotranspiration und meteorologischen Variablen	10
3.2. Vergleich der verschiedenen Methoden zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration PET	10
3.3. Vergleich Raps und Weizen	11
3.4. Sensitivitätsanalyse	11
4. Diskussion	11
4.1. Korrelation zwischen realer Evapotranspiration und meteorologischen Variablen	11
4.2. Vergleich der verschiedenen Methoden zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration PET	12
4.3. Vergleich Raps und Weizen	12
4.4. Sensitivitätsanalyse	12
5. Schlussfolgerung	13
A. Penman-Monteith	13
B. Korrelationskoeffizient	17
C. Sensitivitätsanalyse	20

1. Einleitung

Wasser verlässt ein Gebiet in dem es entweder als Oberflächenabfluss, Basisabfluss oder Grundwasser abfließt, oder es verdunstet. Wird das Wasser von der Bodenoberfläche verdunstet, spricht man von Evaporation. Verdunstet es von Pflanzenoberflächen, so ist dies die Transpiration. Da es schwierig ist, diese beiden Messgrößen technisch voneinander zu trennen, werden sie zu einer Größe, der Evapotranspiration, zusammengefasst.

In diesem Versuch geht es nun **darum, Evapotranspiration** mit verschiedenen Modellen zu bestimmen. Für die Hydrologie ist es wichtig, die Evapotranspiration zu kennen, da sie ein wichtiger Bestandteil in der Wasserbilanz eines Einzugsgebiets **ausmacht.**

Es gibt verschiedene Methoden, die Evapotranspiration zu bestimmen. Zum einen gibt es empirische Modelle, zum anderen kann die Evapotranspiration auch mit Lysimetern gemessen werden. Empirische Modelle werden entwickelt, in dem die Evapotranspiration als Funktion von meteorologischen Variablen beschrieben wird. Es handelt sich dabei um meteorologische Variablen, die einen starken Einfluss auf die Evaporation haben, zum Beispiel Lufttemperatur, globale Strahlung, Sonnenscheindauer, Luftfeuchtigkeit, etc. Dazu wird die Evapotranspiration in einem Versuchsgebiet gemessen und mit den Meteodaten in Verbindung gesetzt. Da diese Modelle für bestimmte Standorte mit zugehörigen Eigenschaften entwickelt werden, sind sie nicht immer auf andere Standorte übertragbar und können nicht als allgemein gültig angenommen werden.

Für die Auswertungen stehen Lysimeterdaten von der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART und Meteodaten der ANETZ Station in Reckenholz zur Verfügung. Mit den Lysimeter- und den Meteodaten kann **die Evapotranspiration** direkt berechnet werden. Für die **Modellierung mit der** FAO Penman-Monteith-, Turc- und Ivanov-Methode werden nur die Meteodaten verwendet.

Ziel des Versuchs ist es, zu verstehen, was die Evapotranspiration ist und welche Methoden es gibt, diese zu bestimmen. Dazu wird der Zusammenhang zwischen der gemessenen Evapotranspiration und den **dazugehörigen** meteorologischen Größen diskutiert. Zusätzlich werden die Resultate der obigen Methoden zur Bestimmung **der Evapotranspiration** miteinander **verglichen, dies insbesondere in Bezug auf die unterschiedliche zeitliche Auflösungen.**

2. Methode

Für die Bestimmung der Evapotranspiration werden die Lysimeter- und Meteodaten mit MATLAB prozessiert. Da die Meteodaten in UTC und die Lysimeterdaten in MEZ vorliegen, müssen die Datensätze **zuerst an eine Zeit angepasst werden.** Zudem müssen die Einheiten **so angepasst werden, dass sie auf die jeweiligen Berechnungsformeln passen.**

2.1. Lysimeter

Ein Lysimeter ist eine Anlage, die zur Analyse von Wasser- und Stofftransport durch den Boden dient. Es besteht aus einem zylindrischen Topf, der mit Erde gefüllt ist. Am unteren Ende befindet sich ein Auslass für das versickerte Wasser und am Rand befinden sich auf verschiedenen Höhen diverse Messsonden. Wenn das Lysimeter auf einer Waage steht, kann zusätzlich die Gewichtsveränderung und somit der Wasserinput durch Niederschlag und der Wasserverlust durch die Evapotranspiration gemessen werden. Die Abbildung 9 zeigt die oberirdische Ansicht der Lysimeter der ART. Eine Beschreibung der Komponenten der Lysimeter ist in der Abbildung 2 zu sehen.



Abbildung 1: Lysimeteranlage der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART aus [4]

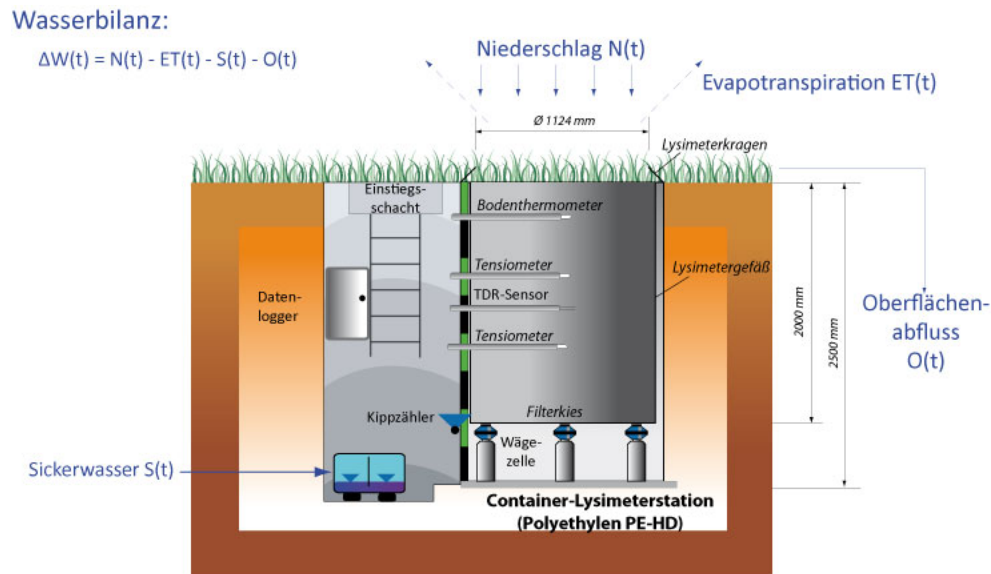


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Lysimeters aus [2]

Zur Berechnung der Evapotranspiration mittels Lysimeterdaten wird die Bilanzformel (1) verwendet.

$$AET = P - SW - \Delta W \quad (1)$$

AET	Reale Evapotranspiration	[H/T]
P	Niederschlagsrate	[H/T]
SW	Sickerwasserrate	[H/T]
ΔW	Änderung des Wasserspeichers	[H/T]

Die Änderung des Wasserspeichers wird aus der Gewichtsänderung des Lysimeters berechnet (2).

$$\Delta W = \frac{\Delta m}{\rho_{Wasser} * A} \quad (2)$$

ΔW	Änderung der Wasserspeichers	[H/T]
Δm	Gewichtsänderung	[kg]
ρ_{Wasser}	Dichte des Wassers	[kg/m ³]
A	Oberfläche des Lysimeters	[m ²]

Zur Bestimmung der Niederschlagsrate werden die Daten eines Niederschlagsmessgeräts verwendet. Die Sickerwasserrate wird aus der Wassermenge, die unter dem Lysimeter aufgefangen wird, bestimmt.

Um den Zusammenhang zwischen der von den Lysimetern gemessenen realen Evapotranspiration und den meteorologischen Bedingungen aufzuzeigen, werden die jeweiligen Korrelationskoeffizienten berechnet.

2.2. FAO Penman-Monteith-Methode

Die Penman-Monteith-Methode kombiniert die Ansätze der Massenbilanz und der Energiebilanz. Alle in der Formel enthaltenen Parameter können entweder direkt gemessen oder **dann** aus **meteorologischen Daten** berechnet werden. Die Methode impliziert, dass der aerodynamische und der Oberflächenwiderstand von der Oberflächenbepflanzung abhängig sind [vgl. Abb. 3].

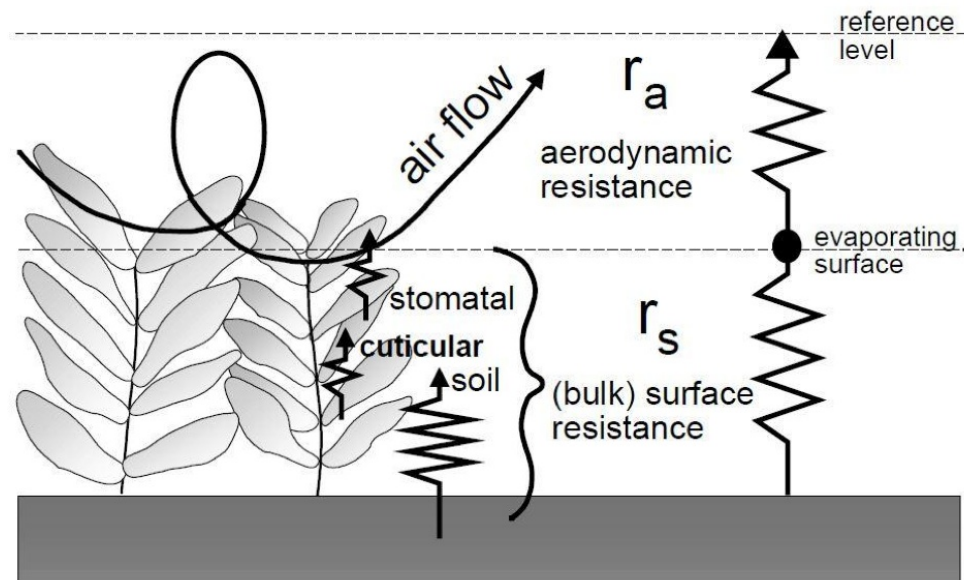


Abbildung 3: Schematische Darstellung des aerodynamischen und des Oberflächenwiderstands in der Penman-Monteith-Methode (aus [3])

Der aerodynamische Widerstand beschreibt die Grösse, welche Wärme und Wasserdampf daran hindert, wegtransportiert zu werden. Diese hängt von der Windgeschwindigkeit und der Bodenrauigkeit ab. Der Oberflächenwiderstand beschreibt den Widerstand des Wasserdampfes, sich zwischen den transpirierenden Pflanzen und dem evaporierenden Boden zu bewegen. Dieser ist abhängig **von** Verhältnis der Blattfläche zur Bodenfläche und dem Stomatawiderstand eines gut bestrahlten Blattes. Unter Berücksichtigung dieser Einflüsse folgt die FAO Penman-Monteith-Formel für die **Referenzfläche:**

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

ET_0	potentielle Referenzevapotranspiration [mm/d]
R_n	Nettostrahlung [MJ/m ² d]
G	Bodenwärmefluss [MJ/m ² d]
Δ	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa/°C]
γ	Psychrometerkonstante [kPa/°C]
T	mittlere Temperatur in 2 m Höhe [°C]
u_2	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s]
e_s	Sättigungsdampfdruck [kPa]
e_a	aktueller Dampfdruck [kPa]

In den folgenden Berechnungen wird der Bodenwärmefluss allerdings vernachlässigt. Um die Evapotranspiration einer spezifischen Pflanze zu bestimmen, wird die Referenzevapotranspiration mit einem Pflanzenfaktor multipliziert. Es folgt daraus:

$$ET_C = K_C * ET_0 \quad (4)$$

ET_0	potentielle Referenzevapotranspiration [mm/s]
K_C	Pflanzenfaktor [-]
ET_C	Evapotranspiration einer spezifischen Pflanze [mm/s]

Die Temperatur T kann aus den Meteodaten entnommen werden. Die übrigen Parameter müssen berechnet werden. Die FAO [3] gibt die im Anhang A ersichtlichen Formeln vor.

2.3. Turc-Methode

Das Modell von Turc ist für Frankreich und Nordafrika entwickelt worden und ist nur für Temperaturen über 0 °C definiert.

Es ist ein strahlungsbasiertes empirisches Modell. Als Input Parameter wird aber nicht nur die globale Strahlung, sondern auch die Temperatur benötigt. Das Modell ist nur für Temperaturen im positiven Bereich anwendbar und wird ungenau bei tiefen Temperaturen. Die potentielle Evapotranspirationsrate berechnet sich zu:

$$PET = 0.31 \left(1 + \frac{50 - RH}{70} \right) (R_G + 2.094) * \frac{T}{T + 15} \quad (5)$$

PET	Evapotranspirationsrate nach Turc [mm/d]
RH	durchschnittliche rel. Luftfeuchtigkeit [%]
T	mittlere Lufttemperatur im gegebenen Zeitintervall [°C]
R_G	globale Strahlung [MJ/m ² d]

2.4. Ivanov-Methode

Das Modell von Ivanov ist eine modifizierte Version des Modells von Turc. Es kann für die Abschätzung der Evapotranspirationsrate bei tieferen Temperaturen in den Monaten November bis Februar genutzt werden und ist ein temperaturbasiertes Modell. Für die Berechnung der täglichen Evapotranspiration wird folgende Formel benutzt:

$$PET = 0.000036(25 + T)^2(100 - RH) \quad (6)$$

PET	Evapotranspirationsrate nach Ivanov [mm/d]
T	mittlere Lufttemperatur im gegebenen Zeitintervall [°C]
RH	mittlere rel. Luftfeuchtigkeit [%]

Für die monatliche Evapotranspiration wird folgende Formel verwendet:

$$PET = 0.0011(25 + T)^2(100 - RH) \quad (7)$$

PET	Evapotranspirationsrate nach Ivanov [mm/Mt]
T	mittlere Lufttemperatur im gegebenen Zeitintervall [°C]
RH	mittlere rel. Luftfeuchtigkeit [%]

Die Ivanov-Methode wird mit der Turc-Methode kombiniert, um die Meteodaten über das ganze Jahr hinweg zu analysieren. So werden die Daten der Monate November bis Februar mit der Ivanov-Formel berechnet und für die restlichen Monate wird die Formel von Turc verwendet.

2.5. Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wird für die Penman-Monteith Formel (3), die Methode nach Turc (5) und die Methode nach Ivanov (6) durchgeführt. Dazu wird jeweils ein Parameter um $\pm 10\%$ verändert und die Auswirkungen auf die berechnete Evapotranspiration dokumentiert. Für die gemessenen Größen wurden Werte festgesetzt und daraus die weiteren Parameter berechnet.

3. Resultate

Die unterschiedlichen Resultate beziehen sich auf die Lysimeterdaten aus dem Jahr 2012 mit Rapsbepflanzung. Es wird angenommen, dass es sich dabei um Winterraps handelt. Dieser wird im Herbst ausgesät und kann bereits im Frühsommer geerntet werden. In Europa wird vorwiegend Winterraps kultiviert [vgl. [1]].

3.1. Korrelation zwischen realer Evapotranspiration und meteorologischen Variablen

Die reale Evapotranspiration (mit Lysimetern gemessene Evapotranspiration, AET) korreliert unterschiedlich stark mit den verschiedenen meteorologischen Parametern wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Luftfeuchtigkeit. Die Korrelationskoeffizienten für die reale Evapotranspiration und verschiedene meteorologische Parameter sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Globalstrahlung die deutlichste Korrelation mit der realen Evapotranspiration zeigt. Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit weisen eine geringere Korrelation mit der realen Evapotranspiration auf und korrelieren in entgegengesetzter Richtung. Die geringste Korrelation besteht zwischen der Windgeschwindigkeit und realer Evapotranspiration. Bei monatlichen Mittelwerten verhalten sich die verschiedenen Parameter relativ zueinander gleich, die Korrelation wird aber für alle Parameter grösser.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten für die reale Evapotranspiration (AET) und verschiedene meteorologische Parameter (Der Korrelationskoeffizient wurde jeweils zwischen AET und dem meteorologischen Parameter berechnet)

meteorologischer Parameter	Korrelationskoeffizient	Korrelationskoeffizient
	täglich	monatlich
Temperatur	0.58	0.74
Relative Luftfeuchtigkeit	-0.51	-0.59
Windgeschwindigkeit	-0.05	-0.17
Globalstrahlung	0.72	0.90

In den Abbildungen 5, 6, 7 und 8 im Anhang B können die berechneten Korrelationskoeffizienten graphisch nachvollzogen werden. So zeigen gut korrelierende Parameter einen sehr ähnlichen dynamischen Verlauf. Diese Beobachtungen werden sowohl bei der täglichen, als auch bei der monatlichen Auflösung gemacht.

3.2. Vergleich der verschiedenen Methoden zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration PET

Alle berechneten potentiellen Evapotranspirationen bewegen sich in derselben Grössenordnung und sind kleiner als die reale Evapotranspiration (vgl. ■). In täglicher Auflösung zeigen die Methoden nach Turc und Ivanov eine grössere Abhängigkeit gegenüber den meteorologischen Parameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung. Das Penman-Monteith Modell dagegen folgt den Parametern nur gedämpft. In der monatlichen Auflösungen können grundsätzliche dieselben Aussagen gemacht werden. Das Penman-Monteith Modell zeigt einen kontinuierlichen Anstieg der Evapotranspiration im Frühling

und Sommer. Das Turc-Ivanov Modell dagegen zeigt einen schnelleren Anstieg und weist eine konstante Evapotranspiration im Sommer auf.

3.3. Vergleich Raps und Weizen

Die Lysimeterdaten zeigen, dass die maximale reale Evapotranspiration des Weizens ein Monat später erreicht wird, als dies bei Raps der Fall ist. Alle übrigen Aussagen können vom Raps auf Weizen übertragen werden. Dies ist in Abbildung ■ ersichtlich.

3.4. Sensitivitätsanalyse

Die Penman-Montheit Methode zeigt gegenüber allen Parametern eine in etwa gleich grosse Sensitivität. Die Methode nach Turc zeigt die grösste Sensitivität gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur hat den kleinsten Einfluss. Die Methode nach Ivanov reagiert auf beide Parameter Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit etwa gleich empfindlich. Die genauen Resultate und die Berechnung ist im Anhang C ersichtlich.

4. Diskussion

Die reale Evapotranspiration zeigt grosse Unregelmässigkeiten und beinhaltet viele Ausreisser. Dies ist damit zu erklären, dass durch die sehr empfindlichen Waagen der fallende Niederschlag als zu grosse Speicheränderung aufgefasst wird. Sobald der Niederschlag aufhört, wird fälschlicherweise eine zu hohe Evapotranspiration aufgezeichnet.

4.1. Korrelation zwischen realer Evapotranspiration und meteorologischen Variablen

Die Globalstrahlung zeigt die grösste Korrelation. Diese überträgt einen Teil der Energie der Sonne auf die Erde. Die Evapotranspiration wird durch den Energieaustausch auf der Oberfläche der Vegetation gesteuert und ist darum durch die zur Verfügung stehende Menge an Energie limitiert. Die Energie ist in Form sensibler Wärme oder Strahlungsenergie präsent ([3] S.11). Die Energie, die durch die Strahlung zur Verfügung steht, ist dabei die wichtigste Energiequelle. Es erstaunt daher nicht, dass die Globalstrahlung die grösste Korrelation mit der realen Evapotranspiration aufweist.

Die sensible Wärme wird durch die Temperatur dargestellt. Zwischen Temperatur und realer Evapotranspiration ist eine nicht zu vernachlässigende Korrelation vorhanden. Der kleinere Korrelationskoeffizient verdeutlicht dabei die untergeordnete Rolle der sensiblen Wärme bei der Beeinflussung der Evapotranspiration.

Die Evapotranspirationsrate ist umso geringer, je grösser die relative Luftfeuchtigkeit ist. Dies zeigt sich im negativen Vorzeichen des Korrelationskoeffizienten. Der Wert des Korrelationskoeffizienten bewegt sich im gleichen Bereich wie bei der Temperatur. Somit

kann gezeigt werden, dass das Feuchtedefizit der Luft ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor für die Bestimmung der Evapotranspiration ist.

Die Windgeschwindigkeit hingegen zeigt keine signifikante Korrelation mit der Evapotranspiration. In der Schweiz erreicht die relative Luftfeuchtigkeit nicht so kritische Werte, die die Evapotranspiration stark beeinflussen würde. Aus diesem Grund ist es für die Pflanze nicht wichtig, dass die feuchte Luft stetig wegtransportiert wird. Somit ist die Evapotranspiration im mitteleuropäischen Klima nur gering vom Wind abhängig. Die meteorologischen Parameter korrelieren besser mit den Monatsmittelwerten der realen Evapotranspiration als mit den Tagesmittelwerten, weil Extremwerte und Ausreisser wegfallen und allgemein Schwankungen ausgeglichen werden.

4.2. Vergleich der verschiedenen Methoden zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration PET

Die potentiellen Evapotranspiration quantifiziert die theoretisch maximal mögliche Evapotranspirationsrate ohne Limitierung durch die Wasserverfügbarkeit. Aus dieser Definition folgt, dass die reale Evapotranspiration die potentielle Evapotranspiration nicht überschreiten darf. Die Resultate zeigen allerdings, dass die AET in den Frühlingsmonaten und im Frühsommer die PET übertrifft. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die untersuchten empirischen Methoden nicht spezifisch für die Schweiz entwickelt wurden. Zudem beinhalten Modelle Unsicherheiten und lassen sich nicht vollständig auf die Realität anwenden.

Die gedämpfte Reaktion der Penman-Monteith Methode auf die meteorologischen Größen beruht auf der Komplexität der Formel und der grossen Anzahl an Inputparametern. Diese wirken sich teilweise gegenläufig auf die potentielle Evapotranspiration aus. Die Methode nach Turc und Ivanov hat weniger Inputparameter und diese zeigen einen direkteren Einfluss auf die PET.

Die Wachstumsphasen der Pflanzen widerspiegeln sich im Anstieg der Evapotranspirationsrate. In diesem Versuch wurde ein konstanter Pflanzenfaktor angenommen. Deshalb stimmt die Wachstumsphase aus der PET nicht mit jener aus der realen Evapotranspiration überein. Der relative Verlauf der realen sowie der beiden potentiellen Evapotranspirationsraten stimmt überein.

4.3. Vergleich Raps und Weizen

Aus dem Vergleich von Raps und Weizen folgt, dass jede Pflanze einen charakteristischen Verlauf der jährlichen Evapotranspirationskurve aufweist. Daraus lassen sich die unterschiedlichen Wachstumsphasen erkennen.

4.4. Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse der Penman-Monteith Methode zeigt, dass alle Parameter einen etwa gleich grossen Einfluss auf die potentielle Evapotranspiration haben. Da die Methode

auf empirische Beobachtungen basiert, kann angenommen werden, dass Faktoren, die einen nur geringen Einfluss auf die Evapotranspiration haben, in der Formel vernachlässigt oder in die numerischen Konstanten einbezogen wurden.

Bei der Methode nach Turc ist bereits aus der Formel (5) ersichtlich, dass die relative Luftfeuchtigkeit linear in die Berechnung der Evapotranspiration eingeht und somit auch den Grössten Einfluss auf das Resultat hat. Die anderen Grössen fliessen nicht linear ein, was auch die Sensitivitätsanalyse widerspiegelt.

Die Methode nach Ivanov zeigt bei tiefen Temperaturen eine ausgeglichene Sensitivität auf die beiden Parameter. Für höhere Temperaturen reagiert die Evapotranspiration allerdings sehr viel sensibler auf die Lufttemperaturen. Daher ist diese Methode auch nur für tiefere Temperaturen in den Monaten November bis Februar anwendbar.

5. Schlussfolgerung

Der Versuch hat gezeigt, dass die Evapotranspiration ein sehr komplexer Vorgang ist. Viele verschiedene Umweltfaktoren beeinflussen die Evapotranspirationsrate. Diese Faktoren lassen sich oft nicht einfach bestimmen und ihr Einfluss ist nicht immer direkt ersichtlich. Um die Evapotranspiration modellieren zu können, wurden viele verschiedene empirische Modelle entwickelt und diese sind meist nur für eine klimatische Region gültig. Will man die Evapotranspirationsrate modellieren ist es wichtig, dass man jene Methode auswählt, welche am besten auf die Fragestellung und die geografischen Gegebenheiten passt. So werden zum Beispiel bei der Penman-Monteith Methode zahlreiche meteorologische Grössen berücksichtigt, allerdings wird durch diese Komplexität die direkte Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen abgeschwächt. In diesem Versuch wurde ein über das ganze Jahr hinweg konstanter Pflanzenfaktor verwendet. Dieser kann allerdings der Wachstumsphase der jeweiligen Pflanze angepasst werden. Speziell für die Landwirtschaft in ariden Gebieten ist es nützlich, über die Evapotranspiration der Pflanzen Bescheid zu wissen. So können Aussaat, Ernte und Bewässerung dem Klima angepasst werden und die Ressourcen und den Ertrag optimiert werden.

A. Penman-Monteith

Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 * e^{\frac{17.27 * T}{T + 237.3}} \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (8)$$

Δ Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa/°C]
 T mittlere Temperatur in 2 m Höhe [°C]

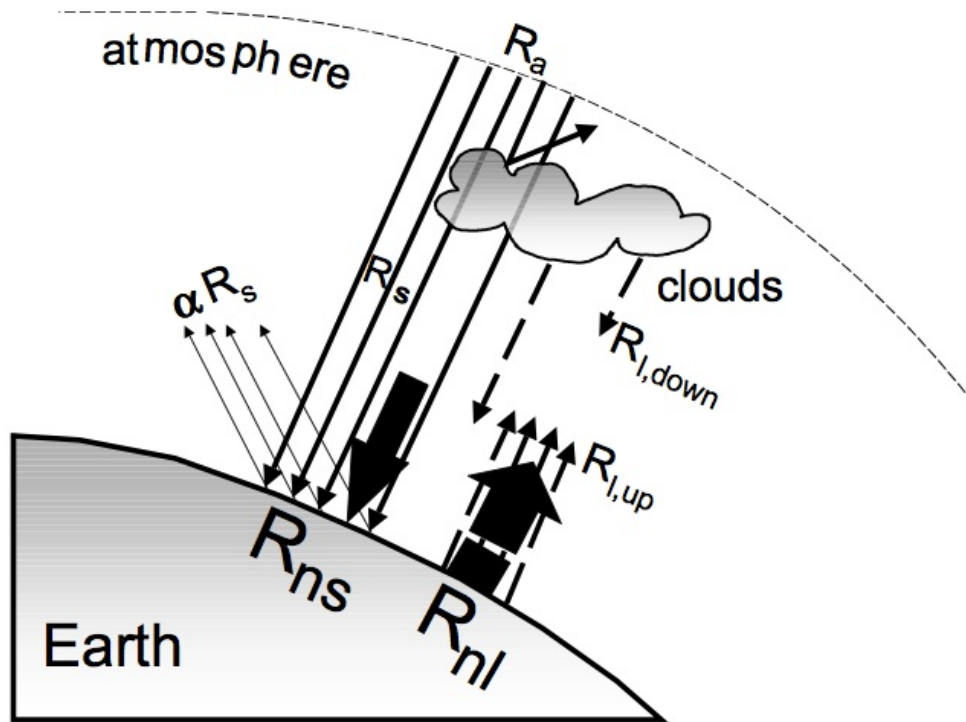


Abbildung 4: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strahlungsarten. R_s ist die kurzwellige Strahlung, R_l die langwellige Strahlung und R_a die atmosphärische Strahlung (aus [3])

Nettostrahlung

$$R_n = 0.77 * R_s - \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \quad (9)$$

R_n	Nettostrahlung [MJ/m ² d]
R_s	Kurzwellenstrahlung [MJ/m ² d]
σ	Stefan Boltzmann Konstante [$4.903 * 10^{-9}$ MJ/K ⁴ m ² d]
$T_{max,K}$	maximale Temperatur während 24 h [K]
$T_{min,K}$	minimale Temperatur während 24 h [K]
e_a	aktueller Dampfdruck [kPa]
R_{s0}	Kurzwellenstrahlung ohne Wolkenbedeckung [MJ/m ² d]

$$R_{s0} = (0.75 + 2 * 10^{-5}z) * R_a \quad (10)$$

R_{s0}	Kurzwellenstrahlung ohne Wolkenbedeckung [MJ/m ² d]
R_a	extraterrestrische Strahlung [MJ/m ² d]
z	Höhe über Meer [m]

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} * d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))] \quad (11)$$

R_a	extraterrestrische Strahlung in einer Stunde (oder in kürzerem Zeitintervall) [MJ/m ² h]
G_{sc}	Solarkonstante = 0.0820 MJ/m ² min
d_r	inverse relative Distanz Sonne-Erde
δ	solare Deklination [rad]
φ	geografische Breite [rad]
ω_1	Sonneneinstrahlwinkel am Anfang der Zeitperiode [rad]
ω_2	Sonneneinstrahlwinkel am Ende der Zeitperiode [rad]

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} * d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (12)$$

R_a	extraterrestrische Strahlung in einem Tag (oder in längerem Zeitintervall) [MJ/m ² d]
G_{sc}	Solarkonstante = 0.0820 MJ/m ² min
d_r	inverse relative Distanz Sonne-Erde [m]
δ	solare Deklination [rad]
φ	geografische Breite [rad]
ω_s	Sonneneinstrahlwinkel [rad]

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (13)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.30\right) \quad (14)$$

d_r	inverse Distanz Sonne-Erde [m]
δ	solare Deklination [rad]
J	Korrekturfaktor (siehe [3] Annex 2 Table 2.5)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (15)$$

ω_s Sonneneinstrahlwinkel [rad]
 φ geografische Breite [rad]
 δ solare Deklination [rad]

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi t_i}{24} \quad (16)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi t_i}{24} \quad (17)$$

ω Sonneneinstrahlwinkel [rad]
 t_i Zeitintervaldauer [h]

$$\omega = \frac{\pi}{12}[(t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (18)$$

ω Sonneneinstrahlwinkel [rad]
 t Zeit [h]
 L_z Längengrad in der Mitte der Zeitzone [rad]
 L_m Längengrad des Messpunktes [rad]
 S_c saisonaler Korrekturfaktor [h]

$$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b) \quad (19)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (20)$$

S_c saisonaler Korrekturfaktor [h]
 J Korrekturfaktor (siehe [3] Annex 2 Table 2.5)

Psychrometerkonstante

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} P \quad (21)$$

γ Psychrometerkonstante [kPa/°C]
 P Atmosphärendruck [kPa]

Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (22)$$

u_2 Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s]
 u_z Windgeschwindigkeit in z m Höhe [m/s]
 z Messhöhe [m]

Sättigungsdampfdruck

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (23)$$

e_s mittlerer Sättigungsdampfdruck [kPa]
 e° Sättigungsdampfdruck bei Temperatur T [kPa]
 T mittlere Temperatur in 2 m Höhe [°C]

$$e^\circ(T) = 0.6108 * e^{\frac{17.27T}{T+273.3}} \quad (24)$$

$e^\circ(T)$ Sättigungsdampfdruck bei Temperatur T [kPa]
 T mittlere Temperatur in 2 m Höhe [°C]

aktueller Dampfdruck

$$e_a = \frac{RH_{mittel}}{100} * e_s \quad (25)$$

e_a aktueller Dampfdruck [kPa]
 e_s mittlerer Sättigungsdampfdruck [kPa]
 RH_{mittel} mittlere relative Luftfeuchtigkeit [%]

B. Korrelationskoeffizient

$$Korrelationskoeffizient(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

mit \bar{x} und \bar{y} als Mittelwerte der Datenreihen

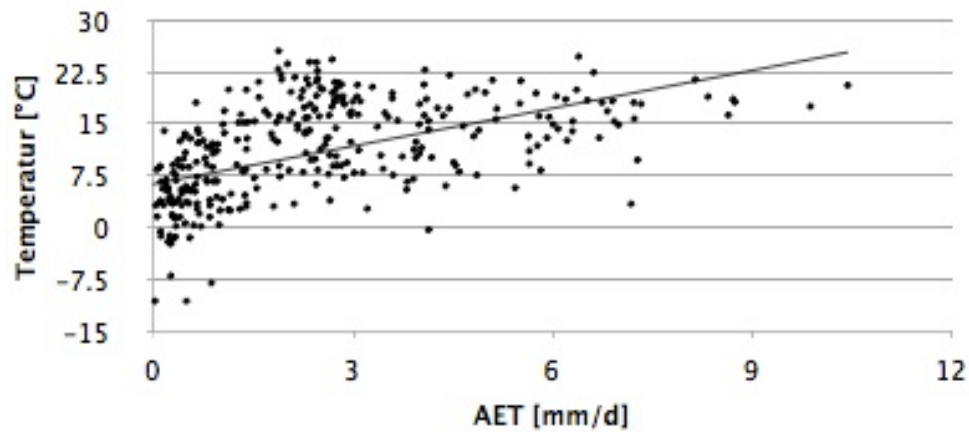


Abbildung 5: grafische Darstellung der Korrelation zwischen der realen Evapotranspiration und der Temperatur

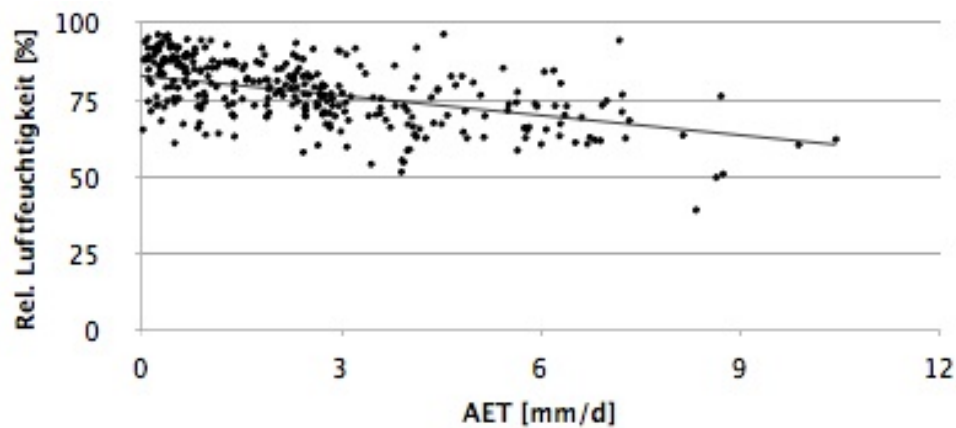


Abbildung 6: grafische Darstellung der Korrelation zwischen der realen Evapotranspiration und der relativen Luftfeuchtigkeit

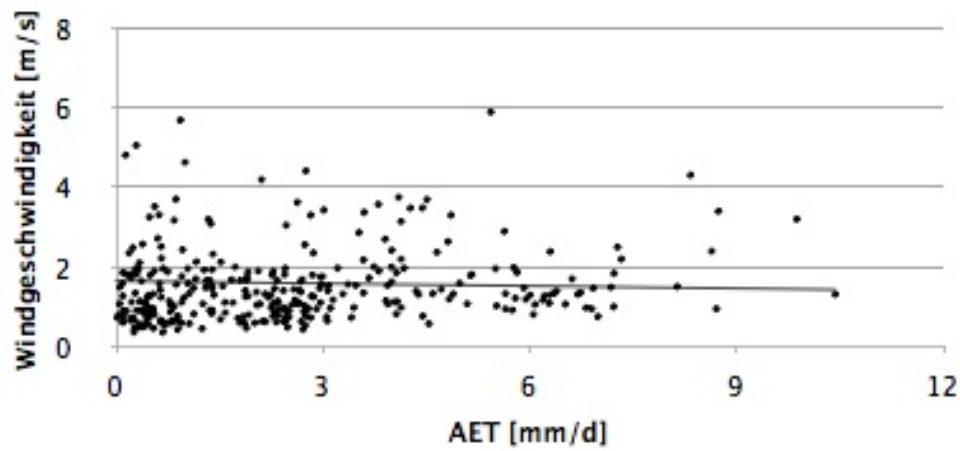


Abbildung 7: grafische Darstellung der Korrelation zwischen der realen Evapotranspiration und der Windgeschwindigkeit

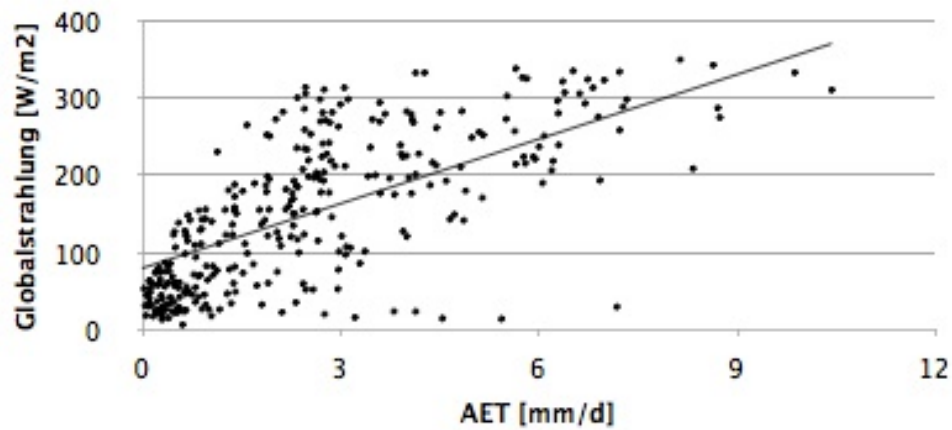


Abbildung 8: grafische Darstellung der Korrelation zwischen der realen Evapotranspiration und der Globalstrahlung

C. Sensitivitätsanalyse

Parameter Penman-Monteith		+10%	-10 %	+10%	-10 %	+10%	-10 %	+10%	-10 %	+10%	-10 %
Lufttemperatur [°C]	15	16.5	13.5	15	15	15	15	15	15	15	15
Globalstrahlung [W/m ²]	2	2	2	2.2	1.8	2	2	2	2	2	2
Luftdruck [hPa]	900	900	900	900	900	990	810	900	900	900	900
rel. Luftfeuchtigkeit [-]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.55	0.45	0.5	0.5
Windgeschwindigkeit [m/s]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5.5	4.5
Steigung Dampfdruckkurve [kPa/°C]	0.110	0.119	0.101	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110
Psychrometernkonstante [kPa/°C]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Sättigungsdampfdruck [kPa]	1.705	1.877	1.547	1.705	1.705	1.705	1.705	1.705	1.705	1.705	1.705
aktueller Dampfdruck [kPa]	0.853	0.939	0.774	0.853	0.853	0.853	0.853	0.938	0.767	0.853	0.853
ET [mm/d]	0.161	0.170	0.153	0.170	0.152	0.168	0.154	0.154	0.168	0.168	0.154
10	1.1	0.9									
Sensitivität [%]		5.23	-4.89	5.56	-5.56	4.37	-4.38	-4.44	4.44	4.40	-4.40

Parameter Turc		+10%	-10 %	+10%	-10 %	+10%	-10 %
rel. Luftfeuchtigkeit [-]	0.4	0.44	0.36	0.4	0.4	0.4	0.4
Globalstrahlung [MJ/m ² d]	78	78	78	85.8	70.2	78	78
Temperatur [°C]	15	15	15	15	16.5	13.5	
ET [mm/d]	4.966	5.462	4.469	5.449	4.482	5.202	4.704
10	1.1	0.9					
Sensitivität [%]		10.00	-10.00	9.74	-9.74	4.76	-5.26

Parameter Ivanov		+10%	-10 %	+10%	-10 %
Temperatur [°C]	15	16.5	13.5	15	15
rel. Luftfeuchtigkeit [-]	0.4	0.4	0.4	0.44	0.36
ET [mm/d]	0.035	0.037	0.032	0.032	0.037
10	1.1	0.9			
Sensitivität [%]		7.64	-7.36	-6.67	6.67

Abbildung 9: tabellarische Berechnung der Sensitivität von der Penman-Monteith-, Turc- und Ivanov-Methode. Die markierten Felder wurden verändert.

Literatur

- [1] Raps - <http://de.wikipedia.org/wiki/Raps>
- [2] Umwelt Geräte Technik GmbH Lysimeter - <http://ugt-online.de/en/produkte/lysimetertechnik/lysimeter.html>
- [3] ALLEN, Richard G. ; PEREIRA, Luis S. ; RAES, Dirk ; SMITH, Martin: *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. 1998
- [4] PRASUHN, Volker: *Lysimeteranlage Zürich Reckenholz*