

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die ständige Unterstützung und der Österreichischen Hagelversicherung

**Institut für Meteorologie
Universität für Bodenkultur
Wien**

Auswirkungen von Trockenheit auf landwirtschaftliche Kulturpflanzenerträge anhand eines agrarmeteorologischen Modells.

Diplomarbeit

von

Martin Reinhold Zetter

Betreuer: Ao. Prof. Dipl. Ing. Dr. Josef Eitzinger

Wien, Februar 2008

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Allgemeines.....	2
2.1 Wetter und Klima.....	2
2.2 Meteorologische Parameter.....	2
2.2.1 Strahlung.....	2
2.2.2 Temperatur.....	7
2.2.3 Luftfeuchtigkeit.....	10
2.2.4 Luftdruck.....	11
2.2.5 Wind.....	12
2.2.6 Niederschlag.....	14
3 Verdunstung.....	17
3.1 Evaporation.....	17
3.2 Transpiration.....	17
3.3 Interzeption.....	18
3.4 Evapotranspiration.....	18
3.5 Guttation.....	19
3.6 Wasser und Pflanze.....	19
3.7 Wasser und Boden.....	20
3.8 Ertragsbildung bei Wassermangel.....	22
4 Trockenschadenerhebungsmodelle in Österreich.....	28
4.1 Erhebungsmethode der Österreichischen Hagelversicherung.....	28
4.2 Das FAO - Wasserbilanz Modell.....	32
4.2.1 Verdunstungsansatz nach Penman- Monteith.....	32
4.2.2 Berechnung der Wasserbilanz.....	42
4.2.3 Ergebnisse für Winterweizen der Gemeinde Großkadolz.....	44
4.2.4 Sensitivitätsanalyse.....	47
4.3 SPI (Standardized Precipitation Index)	54
4.3.1. Definition des SPI.....	54
4.3.2. Berechnung des SPI.....	56
4.3.3. Ergebnisse der Stationen in Österreich.....	57

4.4 Trockenschadensmodell der Österreichischen Hagelversicherung.....	64
4.4.1 Beschreibung der Methode	64
4.4.2 Phänologische Daten.....	69
4.4.3 Ergebnisse.....	71
5 Zusammenfassung und Diskussion.....	76
6 Summary.....	78
7 Literatur.....	80

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1:	$K_{c\ ini}$: Doorenbos und Kassam 1979 $K_{c\ mid}$ und $K_{c\ end}$: Doorenbos und Pruitt 1977, Pruitt 1986, Wright 1981, 1982 Snyder et al. 1989 (in Allen, 2005).....	38
Tabelle 2:	leicht verfügbares Wasser (Allen, 2005).....	42
Abbildung 1:	Strahlungshaushalt, (Ehlers, 1994).....	3
Abbildung 2	Assimilationsleistungen verschiedener C3-Pflanzen in Abhängigkeit der Lichtstärke (aus Ehlers, 1996).....	7
Abbildung 3:	Die pF-Kurve (aus Ehlers, 1996).....	21
Abbildung 4:	Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Winterweizen, Wintergerste und Triticale für konventionelle Betriebe. (Hagelversicherung, 2004).....	30
Abbildung 5:	Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Winterweizen Wintergerste und Triticale für Biobetriebe. (Hagelversicherung, 2004).....	31
Abbildung 6:	Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Sommerweizen und Sommergerste für konventionelle Betriebe. (Hagelversicherung, 2004).....	31
Abbildung 7:	Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Sommerweizen und Sommergerste für Biobetriebe. (Hagelversicherung, 2004)...	32
Abbildung 8	Vergleich der tatsächlichen Verdunstung mit der potentiellen Verdunstung für das Erntejahr 2003.....	45
Abbildung 9:	Bodenwassergehalt für das Erntejahr 2003.....	46
Abbildung 10:	Vergleich der tatsächlichen Verdunstung mit der potentiellen Verdunstung für das Erntejahr 2005.....	46
Abbildung 11:	Bodenwassergehalt für das Erntejahr 2005.....	47
Abbildung 12:	Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Temperatur.....	48
Abbildung 13:	Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors Temperatur.....	49
Abbildung 14:	Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors relative Luftfeuchtigkeit	49
Abbildung 15:	Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors relative Luftfeuchtigkeit.....	50

Abbildung 16:	Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Wind50
Abbildung 17:	Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors Wind.....51
Abbildung 18:	Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Niederschlag.....52
Abbildung 19:	Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Globalstrahlung.....52
Abbildung 20:	Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors Globalstrahlung.....53
Abbildung 21:	SPI- Werte in der Schoßphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2000.58
Abbildung 22:	SPI- Werte in der Schoßphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2001.....59
Abbildung 23:	SPI- Werte in der Schoßphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2002.....60
Abbildung 24:	SPI- Werte in der Schoßphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2003.....61
Abbildung 25:	SPI- Werte in der Schoßphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2004.....62
Abbildung 26:	Funktion des Wasserbilanzmodells. Verdunstung und Niederschlag werden während des Vegetationszeitraumes gegenübergestellt (© Österreichische Hagelversicherung).....65
Abbildung 27:	Beispiel für eine Niederschlagsanalyse vom 1. April 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).....67
Abbildung 28:	Tagesmitteltemperatur 1. April 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).....67
Abbildung 29:	Globalstrahlung 1. April 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).....68

Abbildung 30:	Mittlere Luftfeuchtigkeit 1. April 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).....	68
Abbildung 31:	Mittlere Windgeschwindigkeit 5. April 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).....	69
Abbildung 32:	PTU-Summen (© Österreichische Hagelversicherung).....	70
Abbildung 33:	Beispiel für die Darstellung der Entwicklungsstadien anhand von Winterweizen 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).....	71
Abbildung 34:	Entschädigungsberechnung bei Winterweizen 2003 (© Österreichische Hagelversicherung).....	72
Abbildung 35:	Entschädigungsberechnung bei Winterweizen 2004 (© Österreichische Hagelversicherung).....	73
Abbildung 36:	Entschädigungsberechnung bei Winterweizen 2005 (© Österreichische Hagelversicherung).....	74

Einleitung

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Auswirkung von Trockenheit auf landwirtschaftliche Kulturpflanzenerträge. Zur Quantifizierung der Trockenheit werden drei verschiedene agrarmeteorologische Modelle getestet. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, um die Schadenserhebung mit Hilfe von Ertragsmodellen abwickeln zu können. Seit dem Jahr 2000 wird von der Österreichischen Hagelversicherung eine Trockenschadensversicherung an landwirtschaftlichen Kulturen angeboten. Diese Versicherung wird seitdem ständig verbessert.

Im Kapitel 2 werden die meteorologischen Parameter, wie Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Wind und Niederschlag, die für die Berechnung notwendig sind, beschrieben.

Das dritte Kapitel beschreibt die Verdunstung und ihre Auswirkungen auf die Kulturpflanzen.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Erhebung von Trockenschäden an landwirtschaftlichen Kulturen mit Hilfe von agrarmeteorologischen Modellen.

Das FAO-Wasserbilanzmodell basiert auf dem Ansatz von Penman-Monteith und stellt einen internationalen Standard für die Grasreferenzverdunstung dar (Zenker, 2003). Für diese Referenzverdunstung werden Widerstandswerte festgelegt. Die reale Verdunstung des Pflanzenbestandes wird durch den Einsatz von k-Faktoren berechnet (Zenker, 2003).

Der Standardized Precipitation Index basiert rein auf Niederschlagsdaten. Hier fließen keine anderen meteorologischen Parameter in die Berechnung ein. Bei diesem Modell wird festgestellt, ob es in einem Jahr mehr oder weniger im Verhältnis zu den letzten 20 Jahren geregnet hat.

Das Trockenschadensmodell der Österreichischen Hagelversicherung basiert auf dem FAO-Modell, und soll in Zukunft die Schadensabwicklung erleichtern.

Allgemeines

2 Allgemeines

2.1 Wetter und Klima

Der Begriff Wetter beschreibt den Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das Wetter an einem bestimmten Ort und über einen längeren Zeitraum betrachtet, wird als Witterung bezeichnet. Der Begriff Klima umfasst den Zustand der Atmosphäre in einer Region im langjährigen Mittel. Das Wetter wird von den Wetterelementen Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind sowie der Sonnenstrahlung bestimmt.

2.2 Meteorologische Parameter

2.2.1 Strahlung

Definition

Unter Strahlung versteht man entweder einen Fluss von elektromagnetischen Wellen oder auch von rasch bewegten Partikeln (Cehak, 1994). Die Strahlung von rasch bewegten Partikeln, wie z.B. Photonen, wird Teilchen- oder Korpuskularstrahlung genannt. Durch Absorption kann Strahlungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt werden (Cehak, 1994).

Einheit der Strahlung: Da die Strahlung einen dauernden Energietransport darstellt, wird der Strahlungsfluss als Leistung (z.B. $1 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ J/m}^2/\text{s}$) oder als Arbeit (Energiesumme pro Zeitperiode) angegeben (wie z.B. $\text{MJ/m}^2/\text{d}$).

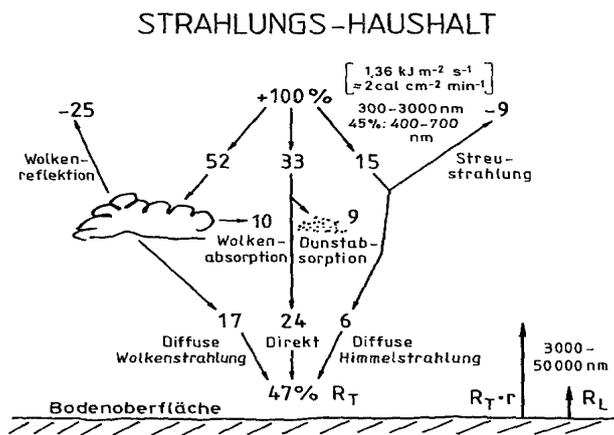


Abb. 5.5: Strahlungshaushalt auf der Nordhemisphäre. Für Erklärungen siehe Text (nach LAI 1973).

Abbildung 1: Strahlungshaushalt, (Ehlers, 1994)

Wirkungen

Der für die Pflanzen wichtigste Teil der Strahlung liegt im sichtbaren Bereich. Die Strahlung verschiedener Wellenlängen beeinflusst die Keimung, den Aufbau der Biomasse durch Assimilation (Photosynthese) und Respiration, die Verlagerung der Trockenmasse und das Streckenwachstum.

Wärmestrahlung

Heiße Körper geben in Form von elektromagnetischen Wellen Wärme an die Umgebung ab. Diese Emission hängt von der Temperatur, die der Körper besitzt, und vom Emissionsfaktor des Körpers im langwelligen Bereich ab.

Sonnenstrahlung

Die Sonnenstrahlung ist für unsere Pflanzen eine unabdingbare Größe. Sie besteht aus dem sogenannten sichtbaren Anteil, der sich von 400 nm bis 700 nm Wellenlänge erstreckt, und einem für das menschliche Auge unsichtbaren Teil. Der gesamte Wellenlängenbereich zwischen 290 nm und 3000 nm wird Globalstrahlung genannt und kann in direkte Sonnenstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung unterteilt werden. Beide sind messbar. Die für uns wichtige photosynthetische aktive Strahlung liegt im Wellenbereich von 400 nm bis 700 nm.

Die Globalstrahlung umfasst den spektralen Bereich der sogenannten kurzwelligen Strahlung. Die Sonnenstrahlung stellt einen Energiegewinn für die Erde dar. Gewöhnlich wird die Temperatur der Sonne mit 6000 °K angegeben (Cehak, 1994). Das Intensitätsmaximum liegt bei etwa 500 nm.

Allgemeines

Die direkte Sonnenstrahlung wird als die Menge an Sonnenstrahlungsenergie definiert, die in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit, welche senkrecht zur Strahlungsrichtung steht, durchgeht. Die Sonnenstrahlung, die die Erdoberfläche erreicht, wird beim Durchgang durch die Atmosphäre in verschiedenen Wellenlängenbereichen mehr oder minder geschwächt. Diese Extinktion der Sonnenstrahlung ist im längerwelligen (infraroten) Bereich der Strahlung stärker als im kürzwelligeren Bereich, verursacht durch den Wasserdampfgehalt bzw. Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, die Streuung teils an den Molekülen der Luft, teils an den Staubteilchen und anderen in der Luft schwebenden Partikeln (Cehak, 1994). Die direkte Sonnenstrahlung wird darüber hinaus vor allem durch Nebel bzw. Wolken, chemische Substanzen, wie Schwefeldioxid (im sichtbaren Bereich) oder Ozon (im UV-Bereich), oder Staubpartikel geschwächt.

Je kürzer die Wellenlängen der Strahlung werden, umso energiereicher sind sie. Daher kann die UV-Strahlung zerstörerisch wirken, wenn sich der Ozongehalt der Stratosphäre weiter verringert.

Die Globalstrahlung an der Erdoberfläche setzt sich aus diffuser, direkter und reflektierter Strahlung zusammen. Ein Maß für die Reflexion erhält man durch Angabe der Albedo (aus dem griech. sinngemäß „Weißheit oder Helligkeit“) der Erdoberfläche (Cehak, 1996).

Albedowerte:

Schneefreier Boden	5 - 20%
Heller Boden	bis zu 50%
Dunkler Boden	ca. 10%
Getreide grün	15 - 17%
Reiner Schnee	80 - 90%
Meer	10%

Terrestrische Strahlung

Die terrestrische Strahlung wird auch langwellige (thermische) Strahlung genannt. Sie umfasst den Wellenlängenbereich zwischen 4 und 100 μ m.

Die terrestrische Abstrahlung an der Erdoberfläche bedeutet einen Energieverlust.
Strahlungsbilanz

Allgemeines

Eine positive Strahlungsbilanz bewirkt eine Erwärmung der Erdoberfläche, ist sie hingegen negativ, bewirkt sie eine Abkühlung.

Formel: Nettostrahlungsbilanz

$$R_n = (R_s + R_d) * (1 - A) - R_e + R_a \quad (\text{Gleichung 1})$$

R_n = Nettostrahlungsbilanz der lang- und kurzwelligen Strahlung

R_s = Direkte Sonnenstrahlung (kurzwellig)

R_d = Diffuse Sonnenstrahlung (kurzwellig)

A = Albedo

R_e = langwellige von der Oberfläche emittierte Strahlung

R_a = langwellige atmosphärische Einstrahlung

Strahlungsmessgeräte

Die wichtigsten Strahlungsmessgeräte beruhen auf der Wärmewirkung der Strahlung, andere auf der Lichtmessung (Photonenfluss). Geräte zur Messung der direkten Sonnenstrahlung heißen Pyrheliometer, solche zur Messung der Globalstrahlung Pyranometer und solche zur Messung der terrestrischen Strahlung Pyrgeometer (Brockhaus, 1973).

Pyranometer

Das Pyranometer misst die Globalstrahlung, und zwar sowohl die direkte als auch die diffuse Strahlung.

Die Messung beruht auf Temperaturunterschieden zwischen einer weißen und einer schwarzen Fläche. Eine weitere Methode wäre, das Verhältnis von Gehäusetemperatur zur Temperatur einer schwarzen Fläche zu messen.

Die Sensoren werden durch eine Quarzkuppel, die für den Globalstrahlungsbereich transparent ist, vor Umwelteinflüssen geschützt.

Strahlungsbilanzmesser (Pyrradiometer)

Besteht aus 2 gleichartigen Sensoren, nach oben und unten gerichtet mit Lupolenkuppeln (durchlässig für kurz- und langwelligen Bereich von ca. 300 bis 50000nm je nach Bauart).

Wirkungen der Strahlung auf die Pflanzen

Im sichtbaren Bereich ist die Strahlung verantwortlich für die Keimung, für den Aufbau von Biomasse, für die Verlagerung der Trockenmasse innerhalb der Pflanze und für das Streckenwachstum. Hier ist das Verhältnis von rotem zu dunkelrotem Licht ausschlaggebend. Aufgrund von Verlusten der Strahlung durch Reflexion und Transmission und dadurch, dass nur ein bestimmter Teil für die Photosynthese wirksam ist, liegt die Effizienz der Photosynthese bei maximal 5-7% der einfallenden Globalstrahlung (bei bestimmten Algen) und bei Kulturpflanzen in einem Bereich von 0,5-1% (Eitzinger, 2005). Ab einer bestimmten Einstrahlungsintensität kann die Photosyntheserate durch Erhöhung der Einstrahlung nicht mehr gesteigert werden.

C₃-Pflanzen erreichen ihre Lichtsättigung früher als C₄-Pflanzen, daher wird stärkere Einstrahlung nicht vollständig ausgenutzt. C₄-Pflanzen können eine höhere Beleuchtungsstärke photosynthetisch ausnützen (Oehmichen, 1983). Sie haben ihre größte CO₂-Aufnahme bei größter Strahlungsintensität. Schattenpflanzen haben ihre größte CO₂-Aufnahme morgens und abends.

Durch die Reife bzw. die Alterung der Blätter wird die Photosyntheserate reduziert bzw. vollkommen eingestellt.

Entscheidend für die Photosynthese in einem Bestand ist die Stellung der Blätter. Bei steil gestellten Blättern (erectophile Blatthaltung) kann die Strahlung bei niedrigem Sonnenwinkel direkter auf die Blätter fallen, vor allem Blätter weiter unten im Bestand werden auch belichtet. Andererseits kann bei geringer Strahlungsintensität eine planophile Blattanordnung für eine bessere Strahlungsausnutzung von Vorteil sein (Ehlers, 1996).

Die Tageslänge nimmt großen Einfluss auf die Entwicklungsstadien der Pflanzen. Hier wird zwischen Kurztags- und Langtagspflanzen unterschieden. Langtagspflanzen erreichen ihre Blühstimmung, wenn die Tageslänge 14 Stunden überschreitet.

Allgemeines

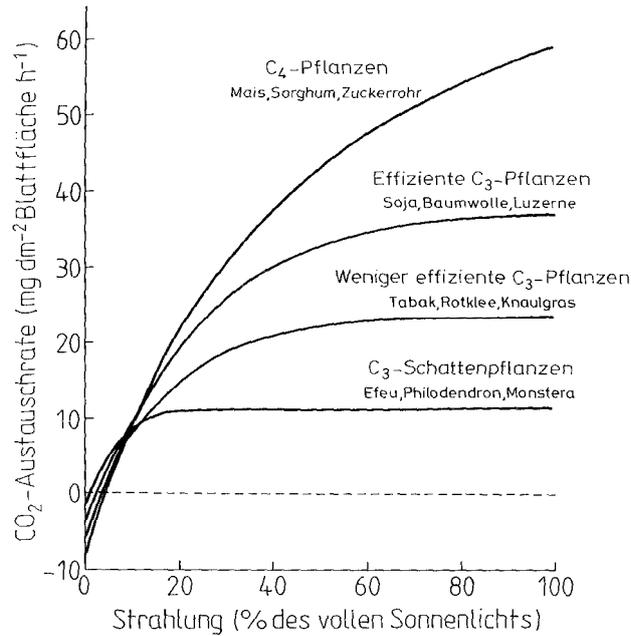


Abbildung 2 : Assimilationsleistungen von C₃- und C₄-Pflanzen in Abhängigkeit der Lichtstärke (aus Ehlers, 1996)

Summenformel der Photosynthese:



2.2.2 Temperatur

Einflussgrößen auf die Temperatur

Die Lufttemperatur wird durch die Strahlungsverhältnisse, insbesondere durch die lang- und kurzwellige Strahlungsbilanz und die Eigenschaften der Oberflächen (Vegetation oder totes Material, Albedo) bestimmt. Weiters wird sie durch die Wärmeleitfähigkeit der obersten Erdbodenschicht, durch die Meereshöhe, durch die Topographie des Gebietes, durch die Windverhältnisse, durch die Advektion und durch die Bewölkungsverhältnisse bestimmt.

Temperaturmessung

Die Lufttemperatur ist der Ausdruck der ungeordneten Molekularbewegungen in der Luft (Cehak, 1994).

Die Temperatur ist ein Zustand, der leicht gemessen werden kann, und darf nicht mit der Wärme verwechselt werden, die eine Energie darstellt. Wichtig ist, dass

Allgemeines

die Thermometer nicht in der prallen Sonne angebracht werden, da sonst die Ergebnisse verfälscht werden (Eigenerwärmung).

Thermometer beruhen auf drei Prinzipien:

1. der Längen oder Volumsänderung
2. der elektrischen Spannungsdifferenz
3. der Änderung des elektrischen Widerstands

Das Quecksilberthermometer ist das klassische Instrument zur Messung der Lufttemperatur in einem Bereich zwischen minus 30°C und plus 200°C. Wichtig bei solchen Flüssigkeitsthermometern ist, dass sich die Flüssigkeit möglichst stark und über einen weiten Temperaturbereich möglichst gleichmäßig ausbreitet. Durch die Zugabe von Thallium kann der messbare Temperaturbereich bis minus 60°C erweitert werden. Um noch weitere Temperaturbereiche messen zu können, muss auf andere Methoden zurückgegriffen werden. Hier bieten sich zum Beispiel elektronische Messgeräte an. Solche Lufttemperatursensoren enthalten ein Thermoelement. Sie eignen sich vor allem für die Aufzeichnung von Temperaturdaten über längere Perioden.

Energiebilanz

Die Energie der Nettostrahlung (Strahlungsbilanz R_n) wird an der Oberfläche in andere Energieformen umgewandelt:

$$R_n = G + H + L \cdot E \quad \text{(Gleichung 2)}$$

R_n = Nettostrahlung

G = Bodenwärmestrom

H = Fühlbarer Wärmetransport in die Luft

L = Verdampfungswärme ($2,45 \cdot 10^6$ J/kg)

E = Menge an verdunstetem Wasser

$L \cdot E$ = latenter Wärmetransport in die Luft

Einfluss der Temperatur auf die Pflanzen

Allgemeines

Lufttemperatur

Der Substanzaufbau, die Atmung und die Photosynthese werden von der jeweiligen Umgebungstemperatur beeinflusst. Die photosynthetischen Primärprozesse sind von der Temperatur nahezu unabhängig. Die Sekundärprozesse, wie z.B. die Fixierung und Reduktion des CO₂, werden dagegen von der Temperatur beeinflusst. Die Photosynthese erfolgt bei steigender Temperatur immer schneller bis zu einem Maximum; wenn das erreicht ist, nimmt sie wieder ab. Je höher die Temperatur ist, die auf eine Pflanzengesellschaft einwirkt, desto mehr Wasser muss den Pflanzen zur Realisierung einer bestimmten Nettoprimärproduktion zur Verfügung stehen, weil von den Pflanzen eine höhere Wassermenge transpiriert wird (Ehlers, 1996).

Auch die Atmung ist temperaturabhängig, speziell die Dunkelatmung nimmt mit steigender Temperatur exponentiell zu.

Die Pflanzen haben in jedem Entwicklungsstadium bestimmte Temperaturgrenzen, die als Kardinalpunkte definiert sind.

Kältengrenze – Temperaturminimum für die Photosynthese

Temperaturoptimum

Hitzegrenze – Temperaturmaximum

Wo das jeweilige Optimum liegt, hängt von der Pflanzenart ab.

Schäden an Pflanzen können durch Frost und Hitze entstehen, die je nach Adaptierung der Pflanzen mehr oder weniger große Schäden anrichten können. Hitzeschäden sind für die Pflanzen oft schlechter als Kälteschäden, weil die Strukturen schnell irreparabel geschädigt werden (Eitzinger, 2005).

Dass Pflanzenwachstum, Trockensubstanzbildung, Korngewicht etc. von der Temperatur abhängig sind, ist erwiesen, aber schwer vom Zusammenspiel anderer Klimafaktoren zu differenzieren.

Die Phänologie ist ein wichtiger Indikator für den Eintritt und die Dauer von Entwicklungsphasen. Sie wird wesentlich von der Temperatur beeinflusst.

Die Temperatursummenmethode ist ein beliebtes Konzept bezüglich der Berechnung des phänologischen Entwicklungsfortschritts. Hier werden alle mittleren Tagestemperaturen über einem bestimmten Schwellenwert, der meist zwischen 5 und 10°C liegt, addiert. Das Problem ist, dass Tagesschwankungen oder eine

Allgemeines

Kombination von einem warmen Frühjahr und einem kalten Sommer nicht berücksichtigt werden. Außerdem wird der Einfluss von hoher Temperatur überbewertet (Ehlers, 1996).

Bodentemperatur

Die Bodentemperatur ist für alle chemischen und biologischen Prozesse von Bedeutung. Erst ab gewissen Bodentemperaturen ist die Keimung möglich. Das anschließende Wachstum wird durch höhere Bodentemperaturen positiv beeinflusst. Die Wärmekapazität eines Bodens ist von der Bodenart, der Lockerung und der Bodenfarbe abhängig. Nasse Böden und Moore werden daher als kalte Böden bezeichnet (Oehmichen, 1983). Solche Böden erwärmen sich im Frühjahr nur langsam, können ihre Temperatur im Herbst besser halten. Die Wärmeleitfähigkeit eines Bodens wird in erster Linie durch sein Luftvolumen beeinflusst. Lockerer Boden gibt die Temperatur nur langsam in die Tiefe ab, das bedeutet, dass sich solche Böden im Frühjahr schneller erwärmen. Wassergesättigte Böden leiten hingegen die Wärme in tiefere Schichten rasch weiter. Durch geeignete Bodenbearbeitungsverfahren kann daher die Bodentemperatur beeinflusst werden.

2.2.3 Luftfeuchtigkeit

Definition

Die Luft ist in Abhängigkeit von der Temperatur in der Lage, Wasserdampf aufzunehmen und zu speichern. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Wasserdampf kann aufgenommen werden.

Absolute Luftfeuchtigkeit

ist der tatsächliche Gehalt an Wasserdampf in der Luft.

Relative Luftfeuchtigkeit

ist das Verhältnis des tatsächlichen Wasserdampfgehaltes (aktueller Dampfdruck) zur maximalen Sättigung der Luft mit Wasserdampf (Sättigungsdampfdruck) bei einer bestimmten Temperatur.

Luftfeuchtigkeitsmessgeräte

Allgemeines

Psychrometer

Das Psychrometer besteht aus zwei gleichen Thermometern, die nebeneinander montiert sind, wobei eines die Temperatur der trockenen Luft misst. Das andere wird mit einem dünnen Tuch z.B. Mousselin umhüllt und mit Wasser getränkt. Somit kann dieses die Feuchttemperatur (durch Verdunstungskühlung niedriger) messen. Über die Temperaturdifferenz zwischen Trocken- und Feuchttemperatur kann mit Hilfe einer empirischen Formel die relative Luftfeuchte bestimmt werden. Damit die Feuchtigkeits- und Temperaturmessungen zuverlässig werden, muss das Psychrometer ventiliert werden, wobei die Ventilationsgeschwindigkeit 3 bis 4 m/s oder mehr betragen soll (Cehak, 1994).

Haarhygrometer

Aufgrund von hygrokopischen Eigenschaften eines entfetteten Menschenhaares ändert sich die Länge des Haares unter Einwirkung von Feuchtigkeit. Daher dient die Länge des Haares als Maß für die relative Feuchte der Luft.

Elektronische Feuchtefühler

Diese funktionieren nach dem Prinzip, dass sich die Kapazität eines Halbleiters mit der Feuchte ändert.

Taupunktspiegel

Eine verspiegelte Metalloberfläche wird abgekühlt und die Temperatur, bei der sich die Oberfläche beschlägt, wird gemessen (Taupunkttemperatur).

2.2.4 Luftdruck

Definition

Unter dem Einfluss der Schwerkraft übt die Luft einen Druck aus, den hydrostatischen Druck, der von der Luftmenge oberhalb des betrachteten Niveaus abhängt (Cehak, 1994). Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe der Erdoberfläche ab.

Die Einheit ist $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$; $100\text{Pa} = 1\text{mbar}$ (Messgenauigkeit 0,1mbar)

Allgemeines

Messgeräte

Gemessen wird der Luftdruck mit Quecksilberbarometern und Aneroidbarometern. Siedepunktsbarometer (Hypsometer) kommen vereinzelt als Kontrollinstrument zum Einsatz.

Quecksilberbarometer (Absolutinstrument)

Das Instrument besteht aus einem 1m langen einseitig geschlossenen Glasrohr. Wird dies mit Quecksilber gefüllt, geschlossen, gekippt und mit dem unteren Ende in ein Quecksilbergefaß gestellt, dann sinkt die Quecksilbersäule im Rohr, bis das obere Ende der Quecksilbersäule etwa 75cm über der Quecksilberoberfläche im Gefäß steht (Cehak, 1994).

Bauarten: Heberbarometer, Gefäßbarometer

Aneroidbarometer (Relativinstrument)

Das Aneroidbarometer besteht aus einer elastischen Metalldose, aus der Luft zum Teil ausgepumpt wurde, wobei eine elastische Metallfeder das Zusammenziehen der Dose durch den Luftdruck verhindert. Erhöht sich der Luftdruck, wirkt auf die Feder eine größere Kraft und verbiegt sie.

Dieses Instrument liefert nur Relativwerte, die mit Absolutwerten verglichen werden müssen (Cehak, 1994).

Siedepunktbarometer

Dieses Instrument beruht auf dem Zusammenhang zwischen dem Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes und der Temperatur. Um zum Beispiel Luftdruckbeobachtungen für die Wettervorhersage mit anderen Stationen vergleichen zu können, müssen die Luftdruckwerte auf Standardniveau, das ist normalerweise Meeresniveau, reduziert werden.

2.2.5 Wind

Definition

Wind entsteht dadurch, dass sich Luftmassen vom Hochdruck zum Tiefdruck bewegen. Es müssen Luftdruckunterschiede vorherrschen. Neben der Windge-

Allgemeines

schwindigkeit, die z.B. in m/s angegeben wird, ist auch die Windrichtung von entscheidender Bedeutung, um den Wind genau zu definieren.

Windmessgeräte

Windmessungen sollen möglichst in freier Lage ausgeführt werden. Außerdem ist es notwendig, die Messungen in Bodennähe und in 10m über der Erdoberfläche, dies gilt als WMO-Standard, durchzuführen (Cehak, 1994), um das vertikale Windprofil bestimmen zu können.

Windrichtungsmessgeräte

Windsack

Windfahne

Windgeschwindigkeitsmesser (Anemometer)

Schalenkreuzanemometer

Es ist ein einfaches und verlässliches Windmessgerät für den horizontalen Wind. Es eignet sich vor allem für die Windmessung über einen längeren Zeitraum, dagegen gibt das Gerät keine Aufzeichnungen über Windböen von kurzer Dauer.

Windpropeller

Mit Hilfe der Windpropeller kann man den Wind je nach Ausrichtung in einer 3-dimensionalen Ebene bestimmen.

Ultraschallanemometer

Misst die Luftströmung mit Hilfe von Ultraschall in 2- oder 3-dimensionaler Form.

Laminare Strömung

Die laminare Strömung beschreibt die Bewegungen von Flüssigkeiten und Gasen, bei denen keine Verwirbelungen auftreten. Sie haben aufgrund der geringen Querdiffusion deutlich kleinere Strömungsverluste als turbulente Strömungen. Die Stromlinien verlaufen parallel. Laminare Strömung kann durch Erhöhung der Fließgeschwindigkeit in turbulente Strömung umschlagen.

Turbulente Strömung

Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten kommt es zu Verwirbelungen der Strömung. Dies bedeutet eine Durchmischung der Strömungen.

Allgemeines

Auswirkungen des Windes auf die Pflanze

Wind kann positive und negative Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen haben. Er bewirkt eine schnellere Abtrocknung der Böden im Frühjahr und somit eine schnellere Befahrbarkeit der Äcker. Auch die Heutrocknung und die Abreife unserer Getreidearten werden durch den Wind beschleunigt. Negative Auswirkungen können sich durch erhöhte Verdunstungsraten in Trockengebieten mit Bewässerung bemerkbar machen. Direkte Schäden an Kulturpflanzen können durch die mit dem Wind mittransportierten Partikel und Staubteilchen entstehen (Winderosion). Auch die Ablagerung von größeren Mengen Sand kann die Pflanzen zu decken und abtöten. Bei Getreide besteht noch dazu die Gefahr des Lagers, das heißt, dass die Pflanzen geknickt werden und somit der Saftfluss gestört wird. Bodenwinderosion kann die Fruchtbarkeit der Böden nachhaltig negativ beeinflussen, vor allem wenn größere Mengen an fruchtbarem Oberboden erodieren. Die Verbreitung von Pilzsporen und Schädlingen kann in beträchtlichem Ausmaß erfolgen.

2.2.6 Niederschlag

Wasserkreislauf

Durch Evaporation an freien Wasseroberflächen beziehungsweise Sümpfen und Böden und Transpiration der Vegetation wird der Atmosphäre Wasserdampf zugeführt. Als Niederschlag erreicht das Wasser wieder die Erdoberfläche. Es kann in Seen und Sümpfen gespeichert werden und wieder verdunsten oder sich den Weg zum Meer suchen.

Wasserbilanzgleichung :

$$N = E + A + \delta S_w + K - D \quad \text{(Gleichung 3)}$$

N	Niederschlag
E	Verdunstung
A	Abfluss
δS_w	Speicherung
K	Kapillarer Aufstieg
D	Drainage

Allgemeines

Niederschlag

Niederschlag entsteht durch Kondensation der feuchten Luft.

Nieselregen

Nieseltröpfchen entstehen durch Koaleszenz in Stratuswolken oder im Nebel; Aufwinde oder Turbulenz sind hier nicht so kräftig, dass sich größere Tropfen schwebend erhalten können (Cehak, 1994).

Nieseltröpfchen haben einen Radius zwischen 50 und 250 μm , dadurch ist auch eine geringe Fallgeschwindigkeit bedingt durch Turbulenzen vorgegeben.

Regen und Regenschauer

Hier ist der Tropfenradius größer, er reicht von 0,25mm bis 2,5mm, in Extremfällen kann er noch größer sein. Die Fallgeschwindigkeit ist hier deutlich höher, bedingt dadurch, dass die Tropfen nicht so stark an den turbulenten Bewegungen der Luft teilnehmen.

Schnee

Schnee entsteht meist durch Gefrieren unterkühlter Wolken- und Nebeltröpfchen besonders bei Temperaturen unter 0°C in Anwesenheit von Gefrierkernen (Brockhaus, 1973).

Hagel

Hagel entsteht wenn vom Boden warme, mit Wasserdampf gesättigte Luftschichten aufsteigen und auf kalte Luftschichten treffen. Sobald der Taupunkt unterschritten wird, kondensiert ein Teil des Wasserdampfes. In den unterkühlten Wolken bilden sich Eiskristalle, an denen sich Wassertröpfchen anlagern. Dadurch wachsen die Eiskristalle und bilden Hagelkörner in der Größe von 5 bis 50 mm Durchmesser. Hagelkörner mit einem Durchmesser von 10cm wurden regional beobachtet.

Wichtigste Niederschlagsmessgeräte

Niederschlagsombrometer: Dies sind einfache Kübel mit einer definierten Auffangfläche.

Allgemeines

Registrierender Regenmesser: Wippenombrograph

Dieser Ombrograph muss immer waagrecht stehen. Über die Auffangfläche, die durch ein Sieb geschützt ist, gelangt der Niederschlag auf eine Wippe, die aus zwei Wippenschalen besteht. Diese Wippenschalen werden dann abwechselnd befüllt, wobei jeder Wippenschlag eine bestimmte Regenmenge angibt, die elektronisch gemessen wird. Daneben gibt es noch verschiedene andere Bauarten und Methoden der Niederschlagsmessung.

3 Verdunstung

3.1 Evaporation

Die Evaporation ist die Verdunstung von Oberflächen ohne die Transpiration der lebenden Organismen (Pflanzen). Biotische Vorgänge (zum Beispiel Transpiration) werden ausgeschlossen (Zenker, 2003).

Damit ist z.B. Bodenverdunstung, Schneeverdunstung und Eisverdunstung gemeint. Für die Verdunstung wird Energie benötigt, um Wasser von der flüssigen/festen in die gasförmige Phase umzuwandeln, ohne die Temperatur des Siedepunktes zu erreichen (2,45MJ/kg bei 20°C). Die direkte Sonnenstrahlung und zu einem geringen Anteil auch die Umgebungstemperatur stellen diese Energie bereit. Die Verdunstung muss nicht immer negativ gesehen werden, da sie im Frühjahr in feuchteren Gebieten die Abtrocknung der Böden bedingt und somit die Befahrbarkeit und Bearbeitung der Böden ermöglicht.

In Gebieten mit Trockenlandwirtschaft führt sie zu großen Wasserverlusten, so dass dort z.B. jedes zweite Jahr ein Schwarzbrachejahr geführt wird, um den Niederschlag dieses Jahres für die Bodenwasserspeicherung zu nutzen.

Durch die Zunahme der Blattfläche bei bewachsenen Oberflächen nimmt der Evaporationsanteil an der Gesamtverdunstung ab. Sie kann auch durch sogenannte Wasserdampfsperren verringert werden. Solche Dampfsperren können Mulchdecken, Folien und sonstige Bodenabdeckungen sein.

3.2 Transpiration

Die Transpiration beschreibt die Verdunstung von lebenden Organismen. Solange die Pflanze dem Boden Wasser entziehen kann, transpiriert sie. Hier ist ebenfalls Energie notwendig, die durch direkte Sonnenstrahlung und Umgebungstemperatur bereitgestellt wird. In trockenen Gebieten bedeutet sie oft signifikanten Wasserverlust, bis Trockenstress eintritt. Die Transpiration bewirkt eine Kühlung der Blätter der Pflanzen. Die Transpiration ist nur möglich, wenn die Luft nicht mit Wasserdampf gesättigt ist (J. Oehmichen, 1983). Trockene Luft und Luftbewegungen erhöhen die Transpiration zusätzlich (J. Oehmichen, 1983). Sollte aufgrund von Trockenheit kein Wasser nachgeliefert werden, kann die Pflanze mit Hilfe der Stomata den Dampffluss reduzieren. Dadurch wird auch die CO₂-Assimilation verrin-

Verdunstung

gert. Weiters können Blatthärchen und Wachsschichten auf den Blättern die Transpiration durch die Cuticula verringern. Genetisch bedingt, können kleinere und dickere Blätter die Transpiration senken.

3.3 Interzeption

Die Interzeption beschreibt die Verdunstung eines Niederschlages auf den Pflanzen. Sie wird vor allem durch die Bestandesdichte beeinflusst. Bestände mit einem hohen Blattflächenindex lassen weniger Wasser in den Bereich des Bodens kommen, sie verdunsten eine große Menge an Wasser direkt an den Blättern.

Die Interzeption wird selten gesondert erfasst (Ehlers, 1996), obwohl sie bei vollentwickelten Kulturpflanzenbeständen 15-20 % ausmachen kann. Sie ist ein Teil der Evaporation.

3.4 Evapotranspiration

Sonnenstrahlung ist die treibende Kraft für Transpiration und Evaporation. Häufig werden die Evaporation und die Transpiration zusammengefasst zur Evapotranspiration, weil die Einzelgrößen bei bewachsenen Oberflächen messtechnisch schwierig zu trennen sind (Ehlers 1996).

Bei der Evapotranspiration muss man zwischen potentieller und aktueller unterscheiden.

Potentielle Evapotranspiration:

Die potentielle Evapotranspiration ist die maximal mögliche Verdunstung von Einzelpflanzen und Pflanzenbeständen (Ehlers, 1996). Sie ist eine Rechengröße und wird mit meteorologischen Größen und unter der Annahme von unbegrenzt verfügbarem Wasser berechnet.

Aktuelle Evapotranspiration

Die aktuelle Evapotranspiration formuliert die tatsächliche Verdunstung über einem Pflanzenbestand unter Berücksichtigung des verfügbaren Wasservorrates im Boden.

3.5 Guttation

Unter hohen Wasserpotentialen der Pflanze kann mitunter das Wasser im flüssigen Aggregatzustand von den Blättern ausgeschieden werden. Eine derartige „Guttation“ kommt insbesondere dann zustande, wenn in den frühen Morgenstunden die Atmosphäre weitgehend wasserdampfgesättigt ist, das pflanzeninterne Wasserpotential aber auch seinen höchsten Wert erreicht hat (Lösch, 2003).

3.6 Wasser und Pflanze

Wasseraufnahme über die Wurzel

Schon im Embryo des Samens ist die Anlage der Wurzel zu erkennen (Ehlers, 1996). Die Pflanzen bilden verschiedene Wurzeltypen aus. Bei vielen Gräsern sind es in der Regel drei bis fünf.

Die Wurzeln wachsen in den Boden und dienen neben der Verankerung vor allem der Wasser- und Nährstoffaufnahme. Die Wurzelhaare bewirken eine Vergrößerung der Oberfläche und erhöhen die Aufnahmekapazität wesentlich. Die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen erfolgt hauptsächlich an den Wurzelhaaren an den Wurzelspitzen. Die Wurzelhaare sterben in der Regel nach wenigen Tagen und werden ständig durch das Wurzelwachstum an den Wurzelspitzen neu gebildet. Nach der Blüte geht bei den einjährigen Kulturpflanzen das Wurzelwachstum stark zurück, bis schließlich bei der Abreife jegliche Nährstoff- und Wasseraufnahme aufhört.

Wachstumsfaktoren der Wurzel

Das Wurzelwachstum ist von Bodenart und Bodenzustand abhängig. Bei abnehmender Bodendurchfeuchtung nimmt die Wurzeltiefe ab und die seitliche Ausbreitung von Faserwurzeln nimmt zu (J.Oehmichen, 1983). Optimales Längenwachstum zeigen die Wurzeln bei Bodenwassergehalten zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt. Bei extremer Trockenheit werden weniger Faserwurzeln, das sind solche, die auf die Seite wachsen, gebildet. Damit schützt sich die Pflanze vor Wasserentzug durch erhöhte Saugspannungskräfte des Bodens. Aufgrund von stauender Nässe und schlechter Sauerstoffversorgung kommt es zu

einem verschlechterten Wurzelwachstum. Pflugsohlenbildung schränkt das Wurzelwachstum in tiefere Bodenschichten ebenfalls ein.

„Phreatophyten“ sind Pflanzen, welche an ariden Standorten wachsen und mit ihren Wurzeln Grundwasserhorizonte in mehreren Metern Bodentiefe erreichen (Lösch, 2003)

Während die Wurzel den Spross mit Nährstoffen und Wasser versorgt, trägt dieser für die Versorgung der Wurzel mit Assimilaten Rechnung (Ehlers, 1996). Nur ein geringer Teil der Assimilate wird zur Wurzel transportiert, da der Spross weitaus mehr für die eigene Bildung benötigt. Spross- und Wurzelwachstum stehen in einem funktionellen Zusammenhang.

Die Stärke der Wurzel Ausbildung ist zu einem gewissen Grad genetisch fixiert, was für die Züchtung ein Auslesefaktor sein kann. Von Vorteil kann es auch sein, wenn sich die Wurzel Ausbildung am Anfang der Wachstumsperiode zaghaft entwickelt, um vorzeitigen höheren Wasserverbrauch zu vermeiden. Andererseits schützt ein gut ausgeprägtes Wurzelsystem vor Trockenstress (z.B. Mais entwickelt unter Trockenheit im Jugendstadium ein stärkeres Wurzelsystem).

3.7 Wasser und Boden

Die Adsorption des Wassers durch Oberflächenkräfte in der Bodenmatrix beschreibt das Matrixpotential. Je weniger Porenwasser im Boden vorhanden ist, desto negativer ist das Matrixpotential.

Die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser wird durch die Feldkapazität (FK) und den permanenten Welkepunkt (PWP) festgelegt (Ehlers, 1996).

Der pF-Wert ist eine Kennzahl, die die Saugspannung von Böden auf das Bodenwasser infolge ihrer Absorptions- und Kapillarkräfte in Logarithmus/cm Wassersäule ausdrückt (Brockhaus, 1972). Je höher der pF-Wert ist, umso fester ist das Wasser im Boden gebunden (Hanke, 1991).

Beim permanenten Welkepunkt ist das Wasser durch Adhäsionskräfte an die Tonminerale bzw. in Feinporen durch Kapillarkräfte gebunden, dass es von den Pflanzen nicht mehr aufgenommen werden kann. Der permanente Welkepunkt weist einen pF- Wert von 4,2 auf.

Die Feldkapazität gibt an, wie viel Wasser ein Boden aufnehmen und entgegen der Schwerkraft nach einem Überschussregen halten kann. Sie wird meistens erst

Verdunstung

ein bis zwei Tage nach dem Niederschlag gemessen, um Verfälschungen durch Gravitationswasser zu verhindern. Der pF- Wert für die Feldkapazität liegt zwischen 1,8 und 2,0, je nach Definition.

Die nutzbare Feldkapazität gibt die Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt an.

Die pF- Kurve gibt die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung der einzelnen Bodenarten an.

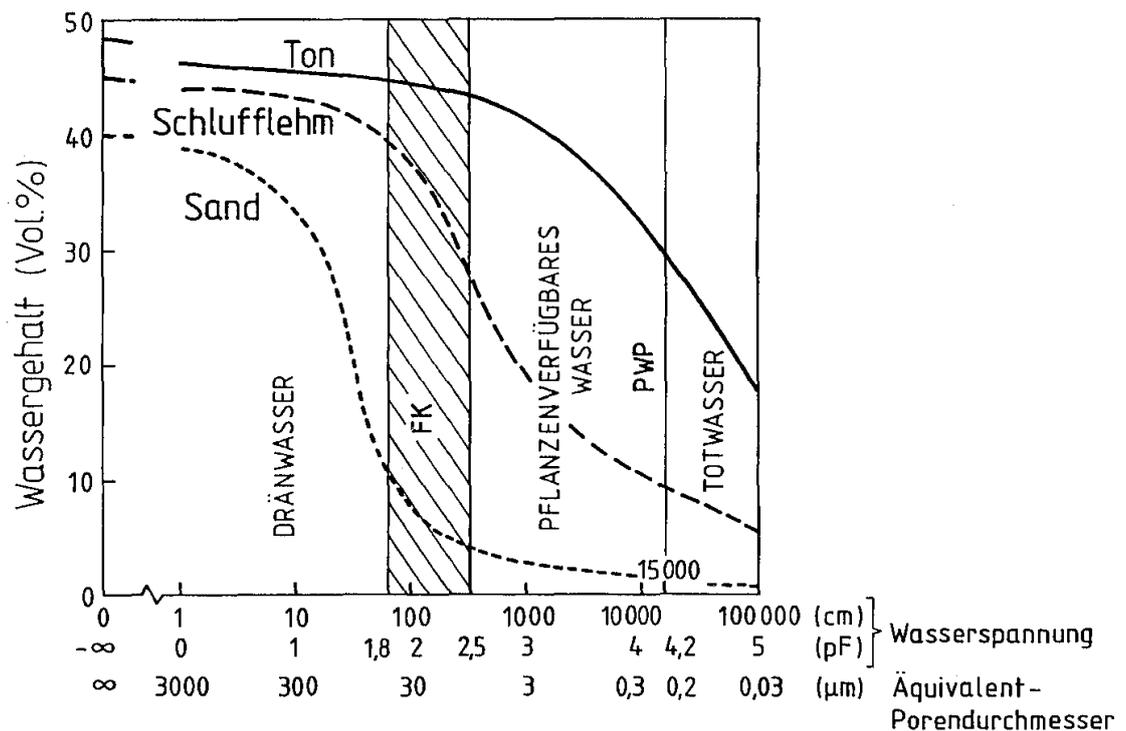


Abbildung 3: Die pF-Kurve (aus Ehlers, 1996)

Die Grenzflächen des Wasserübertritts vom Boden in die Pflanze sind die nicht-kutinisierten Wurzelspitzen und Wurzelhaare (Lösch, 2003). Wasser wird als Massenfluss an die Wurzel herangeleitet, solange zwischen Wurzeloberfläche und Boden eine Differenz im Gesamtwasserpotential besteht (Ehlers, 1996). Durch die Wasseraufnahme werden zwangsläufig in ihm gelöste Nährstoffe mitaufgenommen.

3.8 Ertragsbildung bei Wassermangel

Wassermangel zeigen die Pflanzen häufig bereits während heißer Mittagsstunden. Bei der Zuckerrübe ist dies oft nach Reihenschluss zu erkennen, wenn die Pflanzen in den Mittagsstunden ihre Blätter hängen lassen. Für Pflanzen ist Wassermangel ein Stressfaktor. Diesen Wasserstress kann man mit Hilfe von Wasserpotentialmessungen an den Blättern (z.B. mit der Scholanderbombe) quantifizieren. Sehr empfindlich reagieren Pflanzen auf Wasserstress bei der Vergrößerung ihrer Zellen: Die Zellvergrößerung wird bereits bei relativ hohen Wasserpotentialen eingeschränkt (Ehlers, 1996). Der Prozess der Zellteilung scheint dagegen etwas weniger stressempfindlich zu sein (Kramer, 1983)(in Ehlers). Die Umverteilung der Assimilate bei Getreide reagiert sehr empfindlich auf Wasserstress, was sich z.B. durch eine verringerte Kornfüllung zeigt (Schrumpfkorn). Aufgrund der Stomatakontrolle entfällt für die Pflanze der Kühlungseffekt durch die Verdunstung. Aufgrund der übermäßigen Erwärmung der Pflanzenblätter kann zunächst die Atmung zunehmen bzw. können Hitzeschäden (Enzymschäden) auftreten; hält der Wasserstress weiter an, sinkt die Atmungsrate, da Gewebe bereits abstirbt. Hält der Wasserstress über mehrere Tage an, kommt es zu einer vorzeitigen Seneszenz, weil alle physiologischen Prozesse stark gedrosselt werden. Schließlich führt er zum Tod der Pflanze bzw. zur Notreife.

Mäßiger Wasserstress fördert auch die Umlagerung von Assimilaten aus dem Spross in die Wurzel (Ehlers, 1996), vor allem im Jugendstadium. Als Reaktion auf Wassermangel schränkt die Pflanze zunächst den Neuaustrieb von Sprossknospen und das Wachstum der bereits gebildeten Blätter ein. Ehlers (1996) beschreibt, dass das Verhältnis Kornertrag zu Strohertrag nahezu proportional ist. Aus diesem Grund gibt es auch eine lineare Beziehung zwischen Strohertrag und Kornertrag.

Einzelne Abweichungen machen aber deutlich, dass es entscheidend ist, in welcher phänologischen Phase der Wasserstress eintritt.

Wassermangel in phänologischen Phasen

In welchem Ausmaß der ökonomische Ertrag durch Wassermangel beeinflusst wird, hängt ab von der Dauer und der Intensität des Wassermangels und in welcher Entwicklungsphase er eintritt.

Verdunstung

Körnerleguminosen besitzen ein nicht determiniertes Wachstum. Bei diesen Pflanzen läuft die vegetative und generative Phase bei günstigen Bedingungen zum Teil parallel ab. Bei solchen Pflanzen ist die Zeit der Blüte nicht nur auf wenige Tage komprimiert, sondern kann über mehrere Wochen erfolgen.

Bei Pflanzen mit determiniertem Wachstum verläuft die Entwicklung anders. Dies betrifft den Mais und unsere Getreidearten. Erst nach Erscheinen des letzten Blattes, des Fahnenblattes, wird die Ähre geschoben (Ehlers, 1996). Die Befruchtung findet dann in wenigen Tagen statt. Dann beginnt die Einlagerung und Umlagerung der Assimilate von den Blättern in das Korn. Schließlich fungieren vor allem das Fahnenblatt, aber auch noch Spelzen und Grannen als Assimilatquellen, die während der Kornfüllungsphase die Lichtenergie zur Photosynthese nutzen können (Ehlers, 1996). Mais reagiert sehr empfindlich auf Wassermangel während der Blüte und des Narbenfädenschiebens, Getreide ist sehr empfindlich während der Kornfüllungsphase. Wassermangel in der vegetativen Phase und in der Reife-phase wirkt sich dagegen nicht so dramatisch aus.

Wasserstress bei der Gerste bis zum Ährenschieben kann den Austrieb von Seitentrieben (Zwiewuchs) bewirken. Diese Seitentriebe verschlechtern nur die Qualität des Erntegutes, vor allem wird die Erntefeuchte negativ beeinflusst.

Wasserstress der Pflanzen

Geraten Pflanzen in Wassermangelsituationen, so kann der sich einstellende Zustand der Anspannung im Wasserhaushalt der Pflanzen messend verfolgt werden, wenn er nicht einfach anhand von Schätzungen des Welkezustandes der Blätter bonitiert werden soll (Ehlers, 1996). Sichtbare Veränderungen am Blatt können zum Beispiel das Einrollen oder das Blattfalten bei Gräsern (Gramineen) oder das Welken bei der Zuckerrübe sein. Durch das Einrollen der Blätter werden die Strahlungsabsorption und somit auch die Transpiration stark verringert.

Das Gesamtwasserpotential ist entscheidend für die Wasserbewegungen zwischen Boden und Pflanze.

Den größten Wasserstress erfahren die Pflanzen in den heißen Mittagsstunden, wo daher ein guter Zeitpunkt zur Messung des Gesamtwasserpotentials zur Stressdedektion liegt.

Auch der Wassergehalt der Pflanzen kann gemessen werden; dies geschieht aber nur im Labor. Liegt der relative Wassergehalt der Pflanzen in den Mittagsstunden

Verdunstung

über 0,88, so kann von einer ausreichenden Wasserversorgung ausgegangen werden.

Liegt der Wassergehalt unter 0,72, treten Welkerscheinungen auf und die Photosynthese wird weitgehend unterbunden.

Bei Werten von 0,5 bis 0,6 sterben die Pflanzen, auch wenn die Austrocknung nur wenige Stunden anhält (Hsiao 1990) (in Ehlers, 1996).

Wasserstress kann auch indirekt über die Blattemperatur gemessen werden (Tanner, 1963) (in Ehlers, 1996). Wenn Pflanzen transpirieren, liegt die Blattemperatur unter der Lufttemperatur. Dies wird durch den Kühlungseffekt der Verdunstung erreicht. Wenn Wassermangel vorherrscht, verringert sich dieser Temperaturunterschied. Durch Aufsummierung der täglichen (kurz nach Mittag gemessenen) Temperaturdifferenz in bestimmten Entwicklungsphasen wurde ein Parameter für den Wasserstress der Pflanzen abgeleitet (Idso et al. 1977), der in Beziehung zum Ertragsvermögen unter Wassermangel steht: Je größer der Wassermangel ist, desto weniger negativ ist die tägliche Temperaturdifferenz zwischen Luft und Blatt, umso größer ist der Stress- Temperatur- Parameter und umso geringer ist der Ertrag (Ehlers, 1996). Bei starkem Wasserstress kann jedoch die Blattemperatur auch wesentlich über die Lufttemperatur steigen, was in dieser Beziehung zu berücksichtigen wäre.

Der Transpirationskoeffizient ist der relative Wasserverbrauch zum Aufbau von 1kg Trockensubstanz. Im gemäßigten Klima beträgt er für Kulturpflanzen 200 bis 500l Wasser. Die Höhe des Wasserverbrauchs je kg Trockenmasse ist hauptsächlich witterungs- und artenabhängig (Hanke, 1991).

Steuerung des Bodenwassergehaltes durch ackerbauliche Maßnahmen

Infiltration

Das Geheimnis hoher Infiltrabilitäten liegt in der „Offenheit und Lockerheit“ des Ackerbodens (Ehlers, 1996). Dies bezieht sich in erster Linie auf die Ackerkrume. Ein ausreichendes Vorhandensein von Grobporen und eine entsprechend lockere Lagerung der Aggregate ermöglicht eine hohe Regenverdaulichkeit.

Sandböden weisen in der Regel gute Infiltrabilitäten aber geringe Wasserspeicherfähigkeit auf. Auf Lehm- und Schluffböden kann die Infiltrabilität nach einer

Verdunstung

Bodenbearbeitung anfangs hoch sein, aber durch Verschlämmung in späterer Folge stark reduziert werden. Verschlammungsschichten reduzieren die Infiltrabilität drastisch (Ehlers, 1996). Um diesen Aggregatzerfall zu minimieren, kann durch Kalkung oder durch Zuführung von organischen Düngern oder Ernteresten Abhilfe geschaffen werden. Besonders wichtig für eine optimale Infiltrabilität ist sog. Lebendverbauung, wobei Regenwürmer und deren Röhren eine besondere Rolle spielen.

Durch Bodenbearbeitung wird der Porenanteil erhöht und die Porengrößenverteilung optimiert, wenn sie zum richtigen Zeitpunkt durchgeführt wird. Der Boden sollte dabei nicht zu trocken und nicht zu nass sein. Dies hängt auch von der Bodenart ab.

Evaporation

Lockerungsmaßnahmen nach der oberflächennahen Abtrocknung können die Evaporation verringern. Eine Stoppelbearbeitung sofort nach der Ernte unterbricht die Nachlieferung des tiefer liegenden Wassers, den sogenannten kapillaren Aufstieg, und verringert somit die Evaporation. Unnötige Bearbeitungen sollen vermieden werden, denn sie kosten je nach Witterung und Tiefe der Bearbeitung zwischen 3 und 10l/m² Wasser.

Der innige Kontakt von Boden und Wurzel bewirkt eine starke Bildung der Feinwurzeln. Deshalb kann es von Vorteil sein, in Trockengebieten nach der Ansaat zu walzen. Dies bewirkt einerseits die Nachlieferung von Feuchtigkeit aus tiefer liegenden Schichten durch den kapillaren Aufstieg und andererseits eine festere Verbindung zu den keimenden Wurzeln. Eine weitere Möglichkeit, die Evaporation zu verringern, bietet eine Mulchdecke, die als Dampfsperre fungiert.

Fruchtfolge

Unter Fruchtfolge versteht der Landwirt die geplante zeitliche Aufeinanderfolge von Kulturpflanzen (zumeist in Reinsaat) auf einem Feldstück (Ehlers, 1996).

Grundsätzlich wird man versuchen, die Bodenfruchtbarkeit durch die Wahl geeigneter Vor-, Zwischen- und Nachfrüchte beizubehalten bzw. zu steigern. Mais, Luzerne und die Zuckerrübe haben eine lange Vegetationsperiode und können den Wasservorrat stark erschöpfen. Vor allem im Zwischenfruchtanbau sollte bei Wasserknappheit auf wasserzehrende Pflanzen, wie Senf, verzichtet werden. Pflanzen

Verdunstung

mit einem ausgeprägten Wurzelwachstum können Gänge bilden, in denen dann die Folgefrucht leichter wachsen kann. Der Aufbau besserer Krümelstrukturen kann dann bei Niederschlägen positiv wirken, indem mehr Wasser gespeichert werden kann und der Boden nicht so stark zur Verschlämmung neigt. Der Anbau von Senf kann für die Folgefrucht im Frühjahr Probleme bereiten. Auch der Anbau von Luzerne in Trockengebieten ist mit Vorsicht zu genießen. Aufgrund der tiefen Durchwurzelung wird der Wasservorrat auch in den tieferen Schichten aufgebraucht. Beim Anbau einer seichter wurzelnden Kultur kann dann kein Wasser aus tieferen Schichten bezogen werden.

Die Bekämpfung von Ackerunkräutern kann durchaus eine Wassersparmaßnahme darstellen. Dadurch wird die Transpiration und Interzeption verringert, die Evaporation kann steigen, wenn der Boden lange unbedeckt bleibt.

Bestandesdichte

Durch Reduktion der Bestandesdichte kann niedrigem Wasserangebot entgegen gewirkt werden. Hierbei wird das Wasserangebot für jede einzelne Pflanze erhöht. Probleme kann es hierbei mit der Evaporation geben, sodass viel Wasser unproduktiv verdunstet, solange die Pflanzen den Boden nicht bedecken. Ein tiefer abgelegtes Saatgut kann bei Trockenheit verhindern, dass bereits gekeimte Samen austrocknen.

Im Maisanbau wird von den Saatgutfirmen eine Bestandesdichte im Trockengebiet von 70 000 bis 75 000 Korn/ha empfohlen, während im Feuchtgebiet durchaus eine Bestandesdichte bis 95 000 Korn/ha angestrebt werden kann.

Resistenz gegen Wassermangel

Die Resistenz ist eine genetisch bedingte Fähigkeit, störende und schädigende Einflüsse zu verhindern oder zu begrenzen.

Homoiohydre Pflanzen, hierher gehören die meisten Kormophyten, haben den Vorteil einer langfristig möglichen Stoffwechsel- und Wachstumsaktivität verbunden mit einem hohen Wasserverbrauch. Solche Pflanzen sind extrem dürreempfindlich.

Poikilohydre Pflanzen überdauern Trockenheiten in einer inaktiven Form. Sie können den Stoffwechsel stark drosseln und überdauern die Trockenheit in Anabiose. Diese Überlebensstrategie ist auch im Tierreich bekannt.

Verdunstung

Wassermangel und Phytohormone

Phytohormone sind Hormone der Pflanzen, die als Signal- und Übertragungssubstanzen fungieren. Es sind pflanzeneigene organische Verbindungen, die Entwicklung, Wachstum und Stoffumsätze der Pflanzen regulieren. Vermutlich haben sie Einfluss auf die Pflanzen bei Wassermangel, da sich die Konzentration aufgrund des herabgesetzten Wassergehaltes in der Pflanze erhöht.

Die gesteigerte Atmung unter Wasserstress kann durch Cytokinenen abgeschwächt werden. Weiters kann die abgeschwächte Photosynthese durch Cytokinenen gesteigert werden.

Bei der Abscisinsäure ist man sich nicht sicher, ob die Atmung beeinflusst wird, man weiß jedoch, dass die abgeschwächte Photosynthese unter Wassermangel noch weiter verringert wird.

4. Trockenschadenserhebungsmodelle in Österreich

4.1 Erhebungsmethode der Österreichischen Hagelversicherung

Die derzeitige Trockenschadenserhebung erfolgt durch eigens geschulte Sachverständige der Österreichischen Hagelversicherung. Die Methode wurde 1999 in Zusammenarbeit mit der Universität für Bodenkultur und dem Institut für Agrar- und Ernährungssicherheit (AGES) entwickelt.

Man wollte eine für die Praxis einfache, schnelle und genaue Methode, um Trockenschäden an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen feststellen zu können.

Ein Problem stellte die Ertragsfeststellung ab der Teigreife dar, doch sie ist notwendig, um im Schadensfall die Schäden zeitgerecht vor der Ernte zu erheben. In den Bedingungen ist festgelegt, dass die Schäden vor der Ernte begutachtet werden müssen.

Direkt lässt sich der Ertrag nur über den Drusch zum Erntezeitpunkt bestimmen (Kößler, 1998).

Der Ertrag ist von drei Größen abhängig:

Anzahl der Ähren je Flächeneinheit

Mittlere Kornzahl je Ähre

Mittleres Korngewicht

Die Anzahl der Ähren lässt sich problemlos durch Auszählen ermitteln. Die mittlere Kornzahl ist viel schwieriger und vor allem zeitaufwendiger festzustellen. Das mittlere Korngewicht lässt sich ohne Drusch überhaupt nicht feststellen.

Somit war es notwendig, eine Variante zu finden, die Kornmasse der Einzelähren über das Ährengewicht zu definieren. Das Ährengewicht setzt sich in Abhängigkeit vom Wassergehalt, aus der Kornmasse, der Spindel, den Spelzen und der Grannen zusammen. Daher war es notwendig, die Kornmasse und die Spreu in ein Verhältnis zu setzen. Der Kornertrag zu Ährengewicht erwies sich als stabil und kann mit 77% festgelegt werden (Taferner und Oberforster, 1999).

Trockenschadenserhebungsmodelle in Österreich

Die Ertragsfeststellung in der Praxis erfolgt folgendermaßen:

Es wird eine repräsentative Stichprobe eines Feldstückes von 1m² ausgewählt und von diesem die Ähren abgeschnitten. Bei großen Schlägen können natürlich mehrere Stichproben genommen werden. Anschließend wird die Probe auf Gramm genau gewogen. Nach der Feuchtebestimmung kann dann die Ertragsfeststellung erfolgen.

Wenn Trockenschäden eindeutig sind, meistens sind einzelne Riede betroffen, kann auf die Auswiegung jedes Feldstückes verzichtet werden. Hier kann man sich auf die Erfahrung der Sachverständigen verlassen. Jedoch sollte in regelmäßigen Abständen eine Kontrollwiegung durchgeführt werden.

Berechnung:

Ähren- gewicht	Kornge- wicht	Gewichtsverlust bei 25% Kornfeuchte	Korrekturfaktor	Umrechnung in kg/ha	Ertrag
[g/m ²]	[]	[%]	[]	[]	[kg/ha]
380g/m ² *	0,77 -	12,79% *	0,9 *	10 =	2296kg/ha

Gewichtskorrektur durch Kornfeuchte

Kornfeuchte [%] Gewichtsverlust [%]

15	1,16
16	2,33
17	3,49
18	4,65
19	5,82
20	6,98
21	8,14
22	9,30
23	10,46
24	11,62
25	12,79
26	13,95
27	15,12
28	16,28

Trockenschadenserhebungsmodelle in Österreich

29	17,44
30	18,60
31	19,76
32	20,93
33	22,09
34	23,25
35	24,42
36	25,58
37	26,74
38	27,91
39	29,07

		Kornfeuchte in %																												
		40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14		
Ä h r e n g e w i c h t	620																													
	610																													
	600																													
	590																													
	580																													
	570																													
	560																													
	550																													
	540																													
	530																													
	520																													
	510																													
	500																													
	2 m	490																												
480																														
470																														
460																														
450																														
440																														
430																														

Abbildung 4: Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Winterweizen, Wintergerste und Triticale für konventionelle Betriebe. (Hagelversicherung, 2004)

Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Getreide																														
<i>W-Weizen, W-Gerste, Triticale</i>																														
BIOLOGISCH																														
Kornertrag < 2.250 kg/ha																														
Kornfeuchte in %																														
	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14			
Ähr e n g e w i c h t	470	■																												
	460	■																												
	450	■	■	■																										
	440	■	■	■	■																									
	430	■	■	■	■	■																								
	420	■	■	■	■	■	■																							
	410	■	■	■	■	■	■	■																						
	400	■	■	■	■	■	■	■	■																					
	390	■	■	■	■	■	■	■	■	■																				
	380	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																			
	370	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																		
	360	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																	
	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																
	340	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■															
	330	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■														
	320	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Abbildung 5: Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Winterweizen Wintergerste und Triticale für Biobetriebe. (Hagelversicherung, 2004)

Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Getreide																													
<i>S-Weizen, S-Gerste</i>																													
Kornertrag < 2.400 kg/ha																													
Kornfeuchte in %																													
	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14		
Ähr e n g e w i c h t	500	■																											
	490	■	■																										
	480	■	■	■																									
	470	■	■	■	■																								
	460	■	■	■	■	■																							
	450	■	■	■	■	■	■																						
	440	■	■	■	■	■	■	■																					
	430	■	■	■	■	■	■	■	■																				
	420	■	■	■	■	■	■	■	■	■																			
	410	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																		
	400	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																	
	390	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																
	380	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■															
	370	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■														
	360	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■													
	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■												
340	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Abbildung 6: Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Sommerweizen und Sommergerste für konventionelle Betriebe. (Hagelversicherung, 2004)

Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Getreide																													
S-Weizen, S-Gerste																													
BIOLOGISCH																													
Kornertrag < 1.800 kg/ha																													
Kornfeuchte in %																													
	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14		
Ä h r e n g e w i c h t 2 m	380																												
	370																												
	360																												
	350																												
	340																												
	330																												
	320																												
	310																												
	300																												
	290																												
	280																												
	270																												
	260																												
	250																												

Abbildung 7: Erhebungsblatt für Trockenschäden bei Sommerweizen und Sommergerste für Biobetriebe. (Hagelversicherung, 2004)

4.2 Das FAO - Wasserbilanz Modell

Im nachfolgenden Text wird sich an das „FAO Irrigation and drainage paper 56“ von Allen et al. (1998) gehalten. Dieses Modell wurde bereits mehrfach erfolgreich getestet (Soja et al., 2005) und auch in einem Trockenschadensmodell für das österreichische Grünland implementiert (Eitzinger und Trnka, 2006). In dieser Arbeit wird es daher im Vergleich zu den anderen hier beschriebenen Methoden behandelt.

4.2.1 Verdunstungsansatz nach Penman-Monteith

Im Kombinationsverfahren nach Penman (1948) werden das Energiehaushaltsverfahren und das aerodynamische Verfahren zur Berechnung der Verdunstung miteinander verknüpft. Dieser Ansatz beruht auf der Verdunstung einer freien Wasseroberfläche und gilt abgeleitet auch für eine gut mit Wasser versorgte Grasde-

cke (Referenzverdunstung). Dieser Ansatz bietet für viele weitere Ansätze die Grundlage. Monteith (1965) modifizierte den Ansatz von Penman. Dieser dient heute zur Berechnung der realen Evapotranspiration des Systems Boden-Pflanze-Atmosphäre. Es werden gute Ergebnisse zur Berechnung der Verdunstung über Pflanzenbeständen erreicht (Eitzinger et al. 2002). Die Ergebnisse werden durch Vergleiche mit der realen Evapotranspiration durch Lysimeterversuche bestätigt. Dieser Ansatz wird im FAO-Modell als Grundlage für die Gras-Referenzverdunstung herangezogen.

Es werden durch Monteith (1965) zwei vegetationsspezifische Widerstände eingeführt. Zum einen ist dies der von der Bestandesoberfläche abhängige aerodynamische Widerstand r_a und zum anderen der Stomatawiderstand r_s bzw. der Bestandeswiderstand r_c . Der Bestandeswiderstand repräsentiert die Verdunstung des Pflanzenbestandes inklusive der des Bodens, weil die Transpiration und Evaporation in der Realität schwierig getrennt zu erfassen sind.

Der Ansatz von Penman-Monteith lautet:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + p_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad \text{(Gleichung 4)}$$

λET	Evapotranspiration
R_n	Nettostrahlung
$(e_s - e_a)$	Dampfdruckdefizit
p_a	Dichte der Luft bei konstantem Druck
c_p	Spezifische Lufttemperatur
Δ	Verhältnis zwischen Sättigungsdampfdruck und Temperatur
γ	Psychrometerkonstante
r_s	stomatärer Widerstand
r_a	aerodynamischer Widerstand

Im Gegensatz zum Penman-Ansatz nähert man sich mit der Einführung der Verdunstungswiderstände der realen Verdunstung von Pflanzenbeständen, weil durch die Widerstände die potentielle Verdunstung eingeschränkt wird.

Grasreferenzverdunstung

Die Grasreferenzverdunstung nach Penman-Monteith wurde von der Food and Agriculture Organization der Vereinten Nationen (FAO) als Referenz ausgewählt. Diese Methode gilt als internationaler Standard zur Berechnung der Verdunstung von Pflanzenbeständen.

Die Referenzverdunstung beschreibt die potentielle Evaporation und Transpiration einer Referenzvegetation.

Als Referenzvegetation wird hier eine kurze dichte Grasdecke mit einer Wuchshöhe von 0,12m, einer Albedo von 0,23 und einer ausreichenden Wasserversorgung definiert.

Durch die ausreichende Wasserversorgung wird sichergestellt, dass es zu keiner Einschränkung der Verdunstung kommt. Der Bestandeswiderstand wird mit einem Wert von $r_c = 70\text{s/m}$ festgelegt.

Dieser Referenzverdunstungswert kann durch die reale Verdunstung von Pflanzenbeständen sowohl unterschritten als auch überschritten werden.

Formel für die täglichen Referenz-Verdunstungswerte nach FAO-Penman-Monteith

$$ET_r = \frac{0,408\Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{(Gleichung 5)}$$

ET_r	Referenzevapotranspiration über Gras [mm/Tag]
R_n	Nettostrahlung [MJ/m ² Tag]
G	Bodenwärmestrom [MJ/m ² Tag]
T	tägliche durchschnittliche Lufttemperatur [°C]
u_2	Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s]
e_s	Sättigungsdampfdruck [kPa]
e_a	aktueller Dampfdruck [kPa]
$e_s - e_a$	Sättigungsdampfdruckdefizit [kPa]
Δ	Steigung der Dampfdruckkurve [kPa/°C]
γ	Psychrometerkonstante

Verdunstung der Pflanzen unter Standardbedingungen

Die Standardbedingungen setzen voraus, dass die Pflanzen in großen Feldern, unter besten pflanzenbaulichen Bedingungen wachsen und über genügend Bodenwasser verfügen. Die Verdunstung über einem Pflanzenbestand differiert merklich von der Referenzverdunstung. Vor allem sind die Abdeckung des Bodens und der aerodynamische Widerstand der Pflanzen unterschiedlich zum Grasbestand.

Diese Abweichungen werden mit den K_c -Faktoren beschrieben. Der K_c -Faktor besteht aus dem Transpirationskoeffizienten K_{cb} und dem Evaporationskoeffizienten K_e . Um die Verdunstung für einen bestimmten Pflanzenbestand zu berechnen, muss man die Referenzverdunstung mit dem pflanzenspezifischen Koeffizienten K_c multiplizieren.

$$ET_c = K_c ET_r \quad \text{(Gleichung 6)}$$

ET_c	Evapotranspiration einer Kultur (potentiell)
K_c	Koeffizient einer Kulturpflanze
ET_r	Referenzverdunstung

ET_r beinhaltet die meteorologischen Bedingungen über die Referenzfläche und der K_c -Faktor die Kulturarten spezifischen Bedingungen.

Kulturartenspezifische Charakteristika im Vergleich zur Grasoberfläche

Die Pflanzenhöhe beeinflusst den aerodynamischen Widerstand und somit auch die turbulente Strömung des Wasserdampfes.

Die Albedo des Bodens und der Pflanzen haben Einfluss auf die Verdunstung. Vor allem wenn der Boden nass ist weist er andere Albedowerte als im trockenen Zustand auf.

Anzahl der Stomata, Alter der Blätter und die Fähigkeit der Stomata, die Verdunstung zu regulieren, beeinflussen die Verdunstung.

Die Evaporation des Bodens wird vor allem durch die Pflanzenbedeckung beeinflusst.

Faktoren die den K_c -Faktor beeinflussen

Pflanzenart

Die Pflanzenarten differenzieren sich in der Wuchshöhe, im aerodynamischen Widerstand, im Stomataverhalten und in der Albedo.

Der K_c -Faktor (bezogen auf die oben definierte Grasoberfläche) liegt grundsätzlich im Bereich zwischen 1,05 und 1,44; natürlich können die Werte auch unter eins liegen. Zum Beispiel hat die Ananas einen sehr kleinen K_c -Faktor, weil sie tagsüber die Stomata schließt.

Klima

Hier werden ebenfalls standardisierte Bedingungen angenommen. Es wird eine relative Luftfeuchte von 45% und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen.

Vor allem höhere Windgeschwindigkeiten beeinflussen den aerodynamischen Widerstand und erhöhen den K_c -Faktor. Die Windgeschwindigkeit beeinflusst besonders dann den K_c -Faktor, wenn der Pflanzenbestand höher als die Referenzgrasoberfläche ist.

Phänologische Phasen

Während der gesamten phänologischen Phasen ändern sich der Grad der Bodenbedeckung, die Pflanzenhöhe, der Blattflächenindex und somit auch die Evapotranspiration. Deshalb variieren die K_c -Faktoren während der gesamten Wachstumsperiode. Zur Vereinfachung wird er in vier Abschnitte gegliedert:

Initialstadium

Dieses reicht vom Datum des Anbaus bis zur 10%-igen Bodenbedeckung. Die Dauer dieses Stadiums hängt von der Kulturart, vom Anbaudatum und jeweiligen Klima ab. Bei Dauerkulturen wird als Anbaudatum der Austrieb der neuen Blätter definiert.

Die Größe des K_c -Faktors während der Initialphase ($K_{c\ ini}$) wird stark von der Bodenfeuchte abhängen, da hauptsächlich die Evaporation zur Verdunstung beiträgt.

Bestockungsphase

Dieses Stadium reicht bei unseren Getreidearten bis zum Beginn des Schossens (EC31). Eine andere Definition besagt, dass die vollständige Pflanzenbedeckung bei einem Blattflächenindex von drei erreicht ist. In diesem Stadium gewinnt die Transpiration immer mehr an Bedeutung und stellt den Hauptteil der Verdunstung dar.

Mittlere Entwicklungsphase

Diese Phase reicht von der vollen Bodenbedeckung bis zum Beginn der Blüte. Diese Phase dauert bei den mehrjährigen Kulturen und bei manchen einjährigen am längsten und bei vielen Gemüsearten am kürzesten, weil sie meistens im grünen Zustand geerntet werden.

In dieser Phase erreicht der K_c -Faktor seinen Maximumwert. Der $K_{c\ mid}$ ist grundsätzlich konstant. Abweichungen sind kulturartenspezifisch.

Späte Phase

Sie reicht vom Beginn der Reife bis zur Ernte. In Gebieten ohne Frost und somit mit ständigem Wachstum reicht diese Phase bis zum Anbaudatum des nächsten Jahres. Bei unseren Getreidearten ist der $K_{c\ end}$ Faktor klein. Dies ist auf die Austrocknung der Pflanze zurückzuführen.

Evapotranspiration über Pflanzenbeständen

Sie wird berechnet, indem man die Referenzverdunstung mit dem pflanzenspezifischen K_c -Faktor multipliziert.

Die Berechnung ist nach zwei Varianten möglich.

1. Mit dem einzelnen K_c -Faktor oder
2. Mit den K_{cb} - und K_e -Faktor

Der Unterschied liegt darin, dass mit dem 2. Ansatz die Evaporation und Transpiration getrennt voneinander berechnet werden. Die getrennte Messung der Evaporation und der Transpiration ist jedoch schwierig.

In der Koeffizientenkurve werden die einzelnen Längen für die einzelnen Entwicklungsphasen dargestellt. Der K_c -Faktor wird nach dem Anbau je nachdem, ob der Boden feucht ist, sehr gering sein. Er wird im Bereich des Schossens bzw. der Blüte sein Maximum erreichen und während der Reife wieder abfallen.

Für die Berechnung von einjährigen Kulturen sind nur drei K_c -Faktoren notwendig. Dies sind der $K_{c\text{ ini}}$ - der $K_{c\text{ mid}}$ - und der $K_{c\text{ end}}$ -Faktor.

Zuerst müssen die Längen der K_c -Faktoren auf die jeweiligen phänologischen Phasen abgestimmt werden.

Dann müssen sie den klimatischen Bedingungen angepasst werden.

Berechnung des $K_{c\text{ ini}}$

Pflanzenart	$K_{c\text{ ini}}$	$K_{c\text{ mid}}$	$K_{c\text{ end}}$	Wuchshöhe [m]
Winterweizen	0,4	1,15	0,25	1
Sommergerste	0,3	1,15	0,25	1

Tabelle 1: $K_{c\text{ ini}}$: Doorenbos und Kassam 1979

$K_{c\text{ mid}}$ und $K_{c\text{ end}}$: Doorenbos und Pruitt 1977, Pruitt 1986, Wright 1981, 1982 Snyder et al. 1989 (in Allen, 2005)

Diese Werte gelten für ein subhumides Klima bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45% und einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 2 m/s. Diese Werte beziehen sich auf keine durch Trockenheit gestressten Pflanzen. Wassergehalte werden als optimal angenommen. Bei Abweichungen von den Standardbedingungen können diese Werte noch modifiziert werden.

Die $K_{c\text{ ini}}$ -Werte können stark schwanken. Sie hängen von der Niederschlagsfrequenz, Niederschlagshöhe und von der Stärke der Evaporation durch die Atmosphäre ab. Aus diesem Grund können die Werte zwischen 0,1 und 1,15 variieren. Um die durchschnittliche Niederschlagshöhe zu bekommen, müssen alle Niederschläge in der Initialphase ab einer gewissen Höhe addiert und anschließend durch die Anzahl der Tage mit Niederschlag dividiert werden. Auch das Intervall von Regentagen kann somit festgestellt werden.

Berechnung des $K_{c\text{ mid}}$

Die Werte aus der obigen Tabelle1 können, wenn das Klima stärker arid ist, erhöht werden und wenn es mehr humid ist und weniger Wind vorherrscht, verringert werden.

Formel zur Anpassung an ein anderes Klima bzw. zur Selbstberechnung :

$$K_{c\text{mid}} = K_{c\text{mid}(\text{Tab})} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{\text{min}} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (\text{Gleichung 7})$$

$K_{c\text{mid}(\text{Tab})}$	$K_{c\text{mid}}$ - Werte aus Tabelle
u_2	Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s]
RH_{min}	durchschnittliche minimale relative Luftfeuchtigkeit [%]
h	Pflanzenhöhe [m]

$K_{c\text{mid}}$ wird weniger durch Niederschlagshäufigkeit als $K_{c\text{ini}}$ beeinflusst.

Berechnung des $K_{c\text{end}}$

Mit dieser Formel können die $K_{c\text{end}}$ -Faktoren modifiziert werden

$$K_{c\text{end}} = K_{c\text{end}(\text{Tab})} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{\text{min}} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (\text{Gleichung 8})$$

$K_{c\text{end}(\text{Tab})}$	$K_{c\text{end}}$ -Werte aus Tabelle..
u_2	Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s]
RH_{min}	durchschnittliche minimale relative Luftfeuchtigkeit [%]
h	Pflanzenhöhe [m]

$K_{c\text{end}}$ muss nicht abgestimmt werden wenn die Pflanzen am Feld abreifen können, da die relative Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit in diesem Stadium keinen so großen Einfluss haben.

K_c -Kurve von einjährigen Kulturen

Zuerst muss die Entwicklungsperiode in 4 Phasen eingeteilt und diesen Phasen eine bestimmte Länge zugeordnet werden.

Dann müssen die K_c -Faktoren den einzelnen Klimafaktoren angepasst werden.

Die Berechnung der Evapotranspiration kann auch getrennt erfolgen, indem man den K_c -Faktor in K_{cb} , das heißt in Transpiration, und K_e , das heißt in Evaporation splittet.

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (\text{Gleichung 9})$$

Die nachfolgende Formel dient zur Verfeinerung der klimatischen Rahmenbedingungen des Transpirationskoeffizienten. Die K_{cb} -Faktoren können aus einer Tabelle abgelesen und anschließend modifiziert werden.

$$K_{cb} = K_{cb(Tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (\text{Gleichung 10})$$

$K_{cb(Tab)}$	K_{cb} -Werte aus Tabelle..
u_2	Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s]
RH_{min}	durchschnittliche minimale relative Luftfeuchtigkeit [%]
h	Pflanzenhöhe [m]

Der Evaporationskoeffizient beschreibt die Verdunstung des Bodens und ist ein Teil des K_c -Faktors. Dieser ist abhängig von den Bodenfeuchtigkeitsverhältnissen. Unter trockenen Bedingungen ist der Faktor niedrig und unter feuchten Bedingungen hoch.

$$K_e = K_r (K_{c\max} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c\max} \quad (\text{Gleichung 11})$$

K_e	Evaporationskoeffizient
K_{cb}	Transpirationskoeffizient
$K_{c\max}$	größter K_c -Faktor
K_r	dimensionsloser Reduktionskoeffizient der Evaporation
f_{ew}	wetterexponierte Bodenoberfläche

Nach einem Niederschlagsereignis beträgt der K_r -Faktor 1, wenn der Wassergehalt im Boden schrumpft, sinkt dieser Faktor in Richtung 0.

Maximal verfügbares Wasser zur Evaporation

$$TEW = 1000 (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e \quad (\text{Gleichung 12})$$

θ_{FC}	Bodenwassergehalt bei Feldkapazität [m^3/m^3]
θ_{WP}	Bodenwassergehalt beim Welkepunkt [m^3/m^3]
Z_e	Bodentiefe, bei der evaporiert wird [0.10-0.15m]

Berechnung der aktuellen Verdunstung

Zur Berechnung der aktuellen Verdunstung eines Pflanzenbestandes wird schließlich ein zusätzlicher Faktor (K_s) eingeführt, der den verfügbaren Bodenwassergehalt berücksichtigt.

Wasserstress

Wenn der Bodenwassergehalt den permanenten Welkepunkt erreicht, wird das Wasser so stark vom Boden gehalten, dass es nicht von den Pflanzen aufgenommen werden kann. Die Pflanzen erleiden ab einem bestimmten Bodenwassergehalt, der zwischen Feldkapazität und Welkepunkt liegt, einen zunehmenden Wasserstress, der durch den K_s -Faktor ausgedrückt wird.

$$ET_{c\ adj} = K_s K_c ET_0 \quad \text{(Gleichung 13)}$$

K_s Wasserstressfaktor

Bei geringen Bodenwassergehalten $K_s < 1$

Bei ausreichendem Bodenwassergehalt $K_s = 1$

Die Ergebnisse sind nur dann angemessen, wenn bei der Verdunstung die Evaporation einen kleinen Beitrag dazu leistet.

Bodenwasserverfügbarkeit

Verfügbares Gesamtwasser (TAW)

Für die Pflanzen verfügbares Wasser reicht von der Feldkapazität bis zum permanenten Welkepunkt. Ist der Boden auf Feldkapazität, enthält er jene Wassermenge, die entgegen der Schwerkraft gehalten werden kann.

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad \text{(Gleichung 14)}$$

TAW Verfügbares Bodenwasser in der Wurzelzone[mm]

θ_{FC} Wassergehalt bei Feldkapazität [m^3/m^3]

θ_{WP} Wassergehalt beim Welkepunkt [m^3/m^3]

Z_r Durchwurzelungstiefe [m]

Leicht verfügbares Wasser (RAW)

Wenn der Wassergehalt im Boden sinkt, ist der verbleibende Wasseranteil immer stärker in Feinkapillaren und an Tonmineralen gebunden, wodurch die Aufnahme für die Pflanzen immer schwieriger wird. Wenn der Wassergehalt einen gewissen Schwellenwert erreicht, erleidet die Pflanze Stress. Der Bereich, in dem die Pflanzen keinen Stress, erleiden wird leicht verfügbares Wasser genannt.

$$RAW = p \cdot TAW \quad \text{(Gleichung 15)}$$

RAW	leichtverfügbares Bodenwasser[mm]
P	durchschnittlicher Anteil an leichtverfügbarem Wasser
TAW	Verfügbares Bodenwasser in der Wurzelzone[mm]

Pflanzenart	Durchwurzelungstiefe [m]	P bei 5mm ET
Sommergerste	1,0-1,5	0,55
Winterweizen	1,5-1,8	0,55

Tabelle 2: leicht verfügbares Wasser (Allen, 2005)

4.2.2 Berechnung der Wasserbilanz

Als erstes werden die einzelnen Komponenten der Penman-Monteith Gleichung berechnet:

Gesättigter Dampfdruck nach Magnus

$$e_s = 6,11 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot t}{243,1 + t}} \quad \text{(Gleichung 16)}$$

e_s	Sättigungsdampfdruck [hPa]
t	Durchschnittstemperatur [°C]

Aktueller Dampfdruck

$$e_a = \left(6,11 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot t}{243,1 + t}}\right) \cdot \left(\frac{r_f}{100}\right) \quad \text{(Gleichung 17)}$$

e_a	Aktueller Dampfdruck [hPa]
e_s	Sättigungsdampfdruck [hPa]
t	Durchschnittstemperatur [°C]
r_f	Relative Luftfeuchtigkeit [%]

Sättigungsdefizit

$$\Delta e = es - ea \quad \text{(Gleichung 18)}$$

- Δe Sättigungsdefizit [hPa]
- es Sättigungsdampfdruck [hPa]
- ea Aktueller Dampfdruck [hPa]

Taupunkttemperatur

$$T_{dew} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{ea}{6,1078}\right)}{17,27 - \ln\left(\frac{ea}{6,1078}\right)} \quad \text{(Gleichung 19)}$$

- T_{dew} Taupunkttemperatur [°C]
- ea Aktueller Dampfdruck [hPa]

Strahlungsbilanz

$$R_n = (R_s + R_d) \cdot 0,525 \quad \text{(Gleichung 20)}$$

- R_n Strahlungsbilanz [MJ/m²]
- R_s Direkte Sonnenstrahlung [MJ/m²]
- R_d Diffuse Sonnenstrahlung [MJ/m²]

Wobei 0,525 ein ermittelter empirischer Faktor auf ebener Fläche für den Osten Österreichs ist.

Neigung der Sättigungsdampfdruckkurve

$$\Delta = \frac{2503}{(t + 237,3)^2} \cdot e^{\frac{17,27 \cdot t}{237,3 + t}} \quad \text{(Gleichung 21)}$$

- Δ Neigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa/°C]
- t Durchschnittstemperatur [°C]

Latente Wärme

$$L = 2501 - 2,3601 \cdot t \quad \text{(Gleichung 22)}$$

- L latente Wärme [kJ/kg]
- T Durchschnittstemperatur

Psychrometerkonstante

$$\gamma = \frac{1,01 \cdot 93}{0,622 \cdot L} \quad \text{(Gleichung 23)}$$

γ Psychrometerkonstante [kPa/°C]

L latente Wärme [kJ/kg]

Dampfdruckdefizit

$$vpd = \frac{es - ea}{10} \quad \text{(Gleichung 24)}$$

vpd Dampfdruckdefizit [kPa]

es Sättigungsdampfdruck [hPa]

ea Aktueller Dampfdruck [hPa]

Windfunktion

$$fu = 2,7 \cdot (1 + (0,01 \cdot (u_2 \cdot 1))) \quad \text{(Gleichung 25)}$$

fu Windfunktion

u_2 Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [km/h]

FAO-24 Penman (potentielle Evapotranspiration)

$$= 1 \cdot \left(\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot Rn \right) + \left(\left(\frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \right) \cdot fu \cdot vpd \right)$$

Δ Neigung der Sättigungsdampfdruckkurve [kPa/°C]

γ Psychrometerkonstante [kPa/°C]

Rn Strahlungsbilanz [MJ/m²]

fu Windfunktion [km/h]

vpd Dampfdruckdefizit [kPa]

Schließlich kann die Penman-Monteith Gleichung für eine Grasreferenzfläche abgeleitet werden (siehe Gleichung 4).

4.2.3 Ergebnisse bei Winterweizen der Gemeinde Großkadolz

Als Versuchsstandort diente der Standort Seefeld Großkadolz. Die meteorologischen Daten stammen von der ZAMG. Das Jahr 2003, das als sehr trockenes

Jahr angesehen werden kann, zeigte beim FAO-Modell große Verdunstungsunterschiede zwischen potentieller und tatsächlicher Verdunstung (Abb. 8). Verdunstungsunterschiede zwischen potentieller und tatsächlicher Verdunstung von mehr als 3mm/Tag gemittelt auf den jeweiligen Monat wurden erreicht. Auch eine starke Abnahme der Bodenwassergehalte ist schon ab März zu beobachten (Abb.9). Die Verdunstungswerte in den Monaten Oktober bis Februar sind zu vernachlässigen, weil das Modell für die Winterruhe der Pflanzen nicht gültig ist.

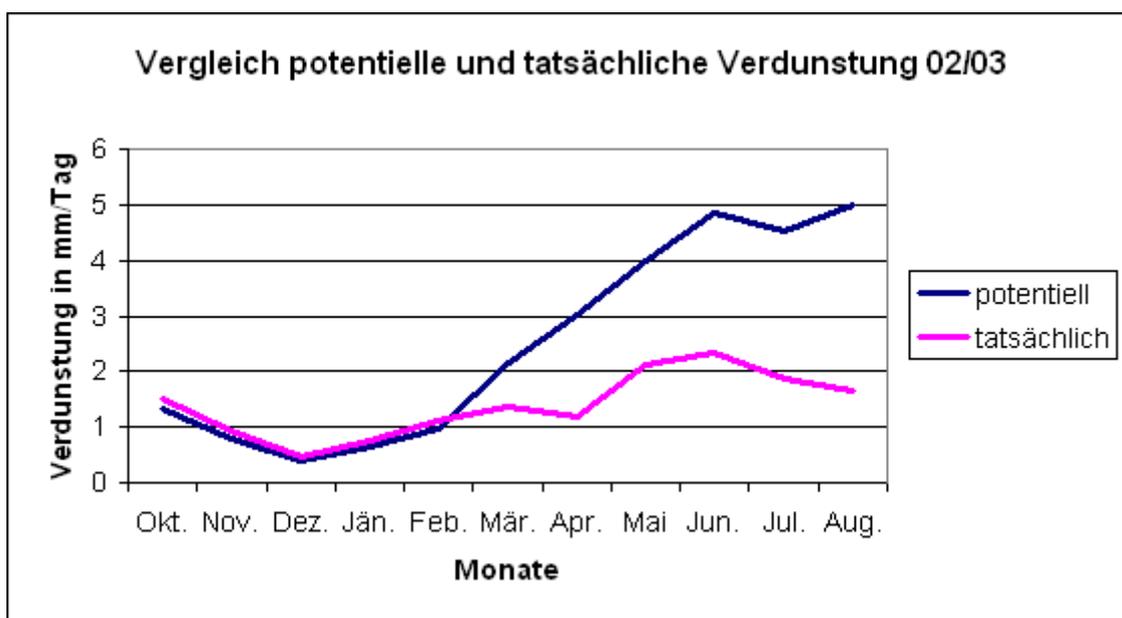


Abbildung 8: Vergleich der tatsächlichen Verdunstung (Winterweizen) mit der potentiellen Verdunstung für das Erntejahr 2003.

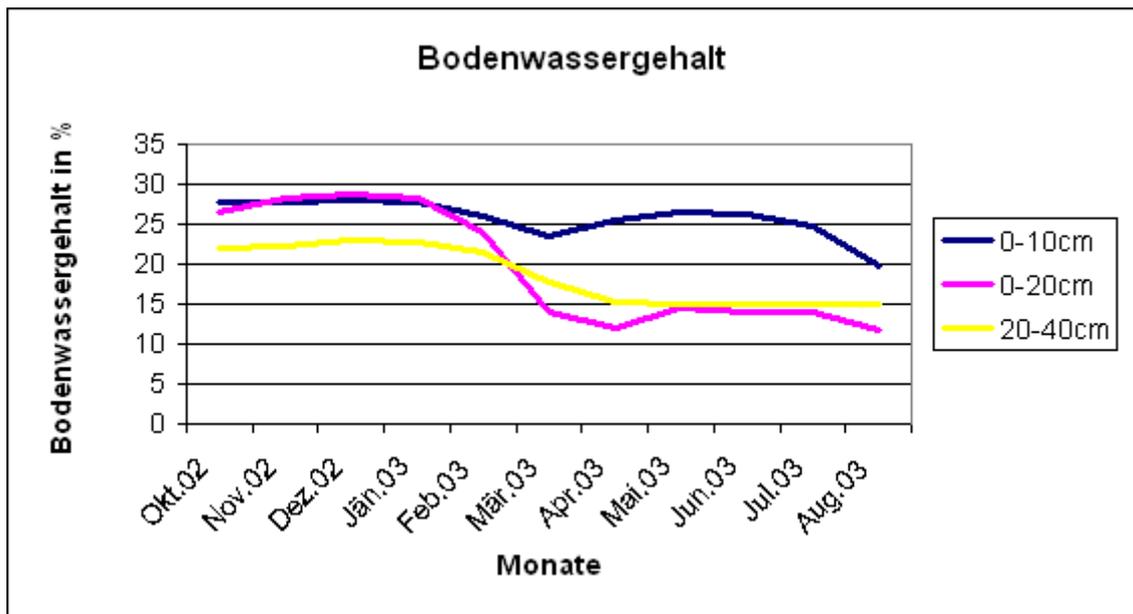


Abbildung 9: Bodenwassergehalt bei Winterweizen für das Erntejahr 2003

Im relativ niederschlagsreichen Jahr 2005 sehen dieselben Kennwerte wesentlich anders aus (Abb.10-11). Verdunstungsunterschiede von 2mm/Tag gemittelt auf den Monat sind nur in den Monaten Mai und Juni gegeben. Natürlich kann man davon ausgehen, dass hier auch eine gewisse Stresssituation vorliegt, die aber nicht so massiv ist wie im Vergleichsjahr 2003.

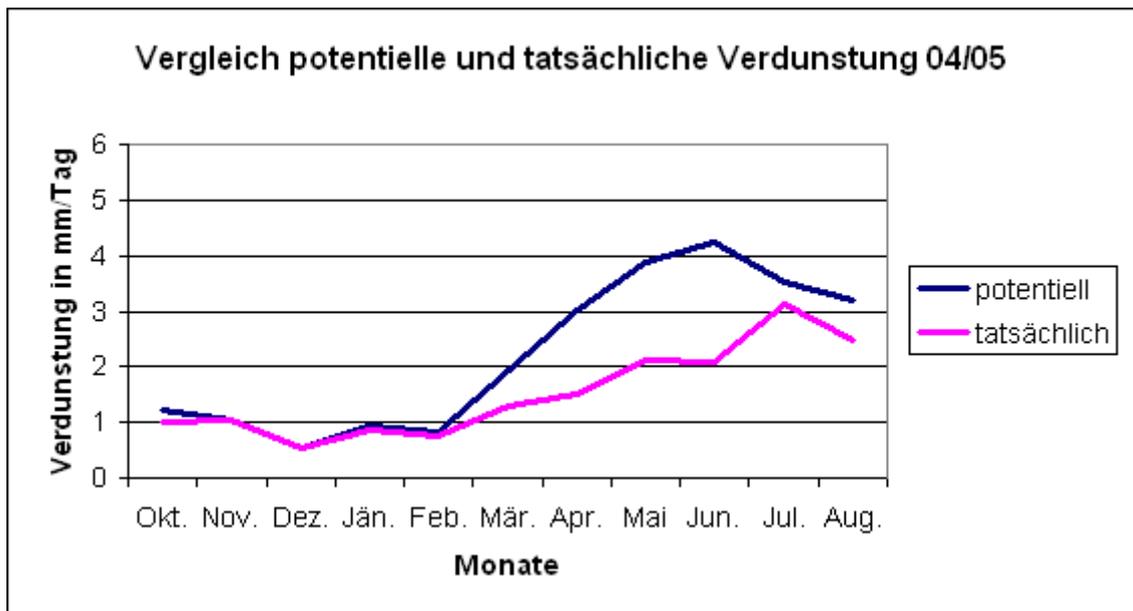


Abbildung 10: Vergleich der tatsächlichen Verdunstung mit der potentiellen Verdunstung für das Erntejahr 2005.

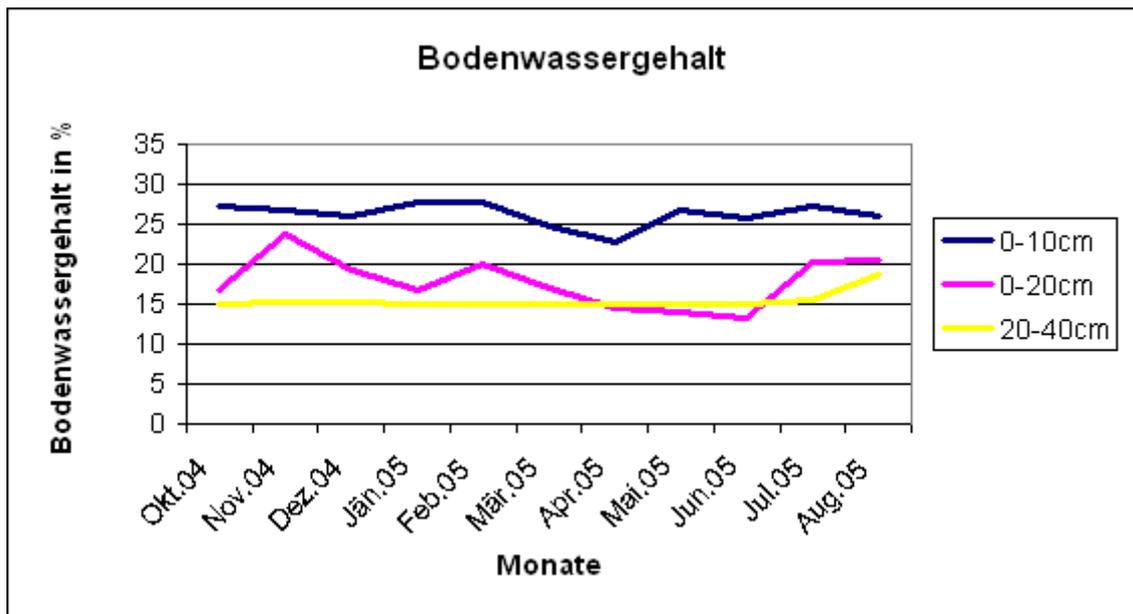


Abbildung 11: Bodenwassergehalt für das Erntejahr 2005

4.2.4 Sensitivitätsanalyse

Zur Überprüfung der Bedeutung der einzelnen meteorologischen Parameter wurde eine Sensitivitätsanalyse des Modells durchgeführt (Liebersbach, 2002). Hierbei werden jeweils die einzelnen Faktoren geändert, wobei alle anderen Faktoren konstant bzw. real bleiben. Konkret wurden die Eingangsparameter Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit untersucht. Mit dieser Methode lassen sich die Auswirkungen der einzelnen klimatischen Faktoren gut beobachten. Vor allem die Intensität der Auswirkungen kann beobachtet werden. Auch eine Abschätzung der Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen kann in Zeiten der globalen Erwärmung für die Zukunft besser beurteilt werden. Die folgenden Analysen beruhen auf Monatsmittelwerten über die Jahre 2003, 2004 und 2005. Die Änderungen der Verdunstung sind in % zur tatsächlichen Verdunstung ausgedrückt. Wie schon oben erwähnt, sind auch hier die Monate September bis Februar zu vernachlässigen. Sie sind hier aufgrund der Vollständigkeit aber enthalten.

Bei der Temperatur (Abb.12) wurden folgende Szenarien dargestellt: Die Temperatur wurde um 10% erhöht und um 10% verringert, was in den Sommermonaten max. 2°C entspricht. Man kann sehen, dass dadurch die Auswirkungen auf die aktuelle Verdunstung eher gering sind. Eine Erhöhung der Verdunstung von 2%

bei einer Temperaturerhöhung um 10% ist nicht sehr groß, wobei allerdings die Wasserverfügbarkeit des Bodens eine wichtige Rolle spielt, wie sich dies im Vergleich zur größeren Sensitivität zur potentiellen Verdunstung mit maximal ca. 6% Verdunstungsänderung deutlich zeigt (Abb.13). Warum die Verdunstung in Abb.12 bei einer Verringerung der Temperatur um 10% trotzdem steigt, kann daran liegen, dass anfangs weniger Wasser verdunstet und somit in den Monaten Dezember bis Februar mehr Wasser zur Verfügung steht. Ein weiterer Grund könnte sein, dass das Modell über die Wintermonate nicht gültig ist. Einen Fehler im Modell würde ich ausschließen, da das Szenario bei ausreichender Wasserversorgung in der Abb.13 normal verläuft. Es zeigt auch, dass an diesem Standort der Bodenwassergehalt ein deutlich limitierender Faktor war. Hohe Temperaturen können die Pflanzen schädigen und somit zu Ertragseinbußen führen (Soja et al.)

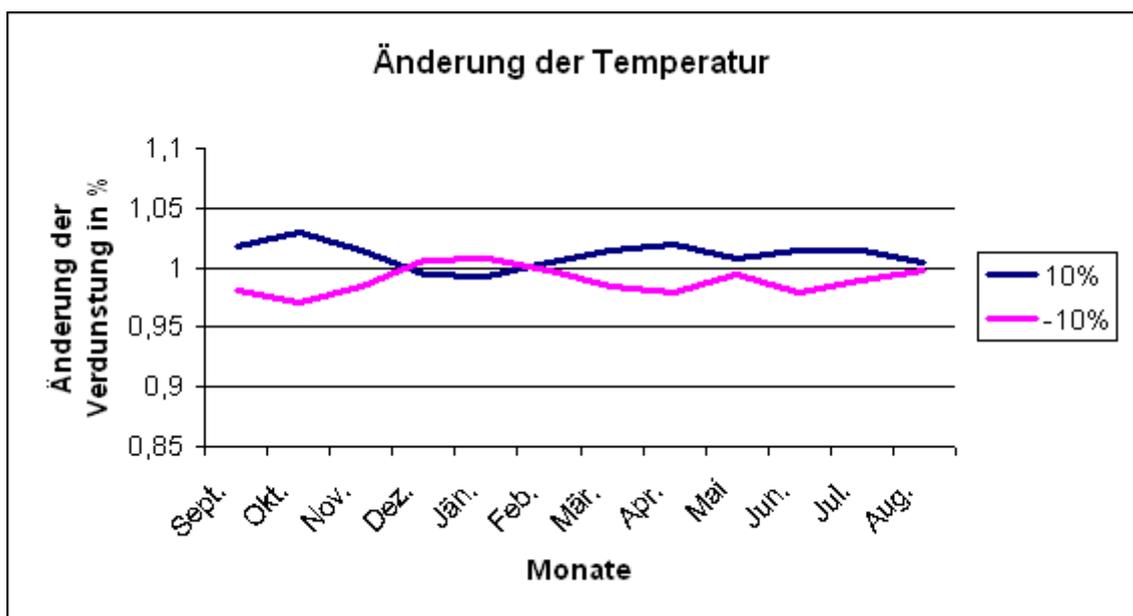


Abbildung 12: Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Temperatur

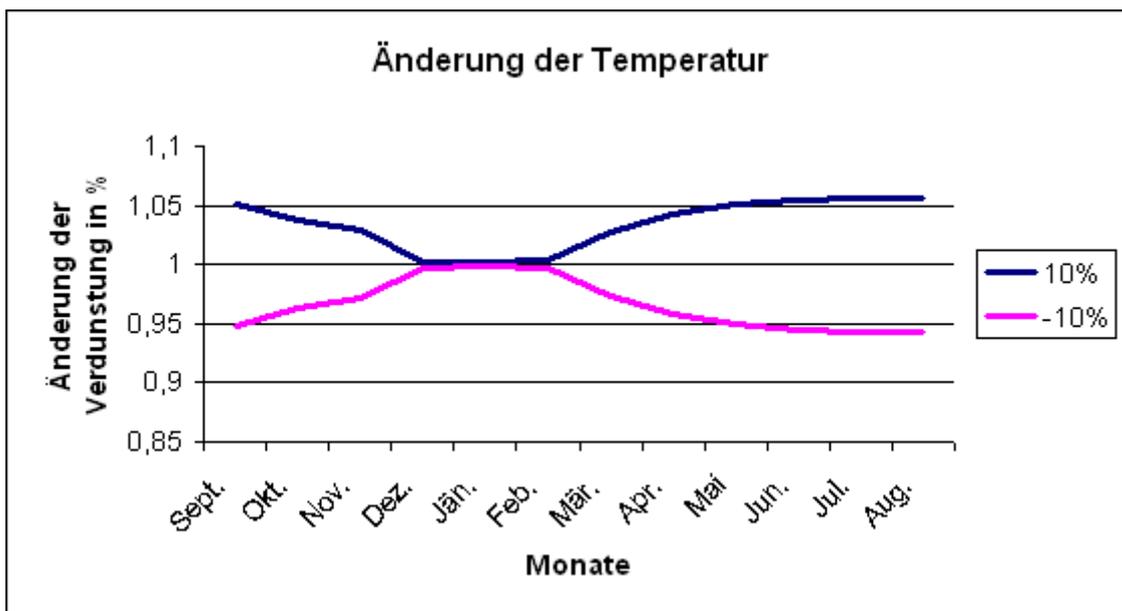


Abbildung 13: Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors Temperatur

Die relative Luftfeuchtigkeit wurde ebenfalls um 10% erhöht und verringert (Abb.14-15). Auch hier sind die Verdunstungsänderungen in einem Bereich unter 5%, in der Vegetationsperiode unserer Kulturpflanzen.

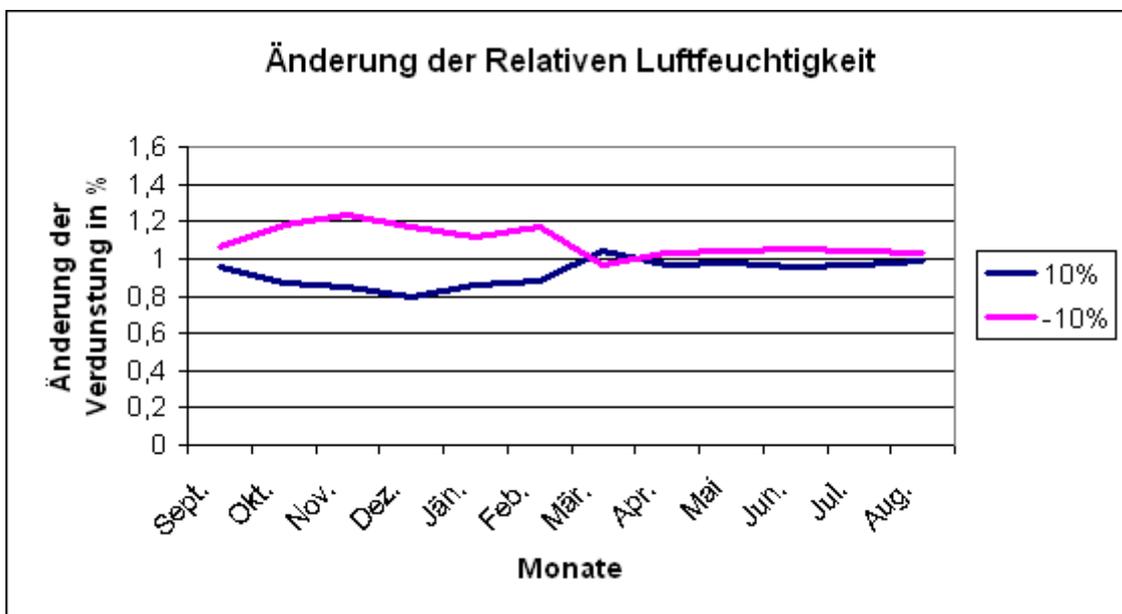


Abbildung 14: Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors relative Luftfeuchtigkeit

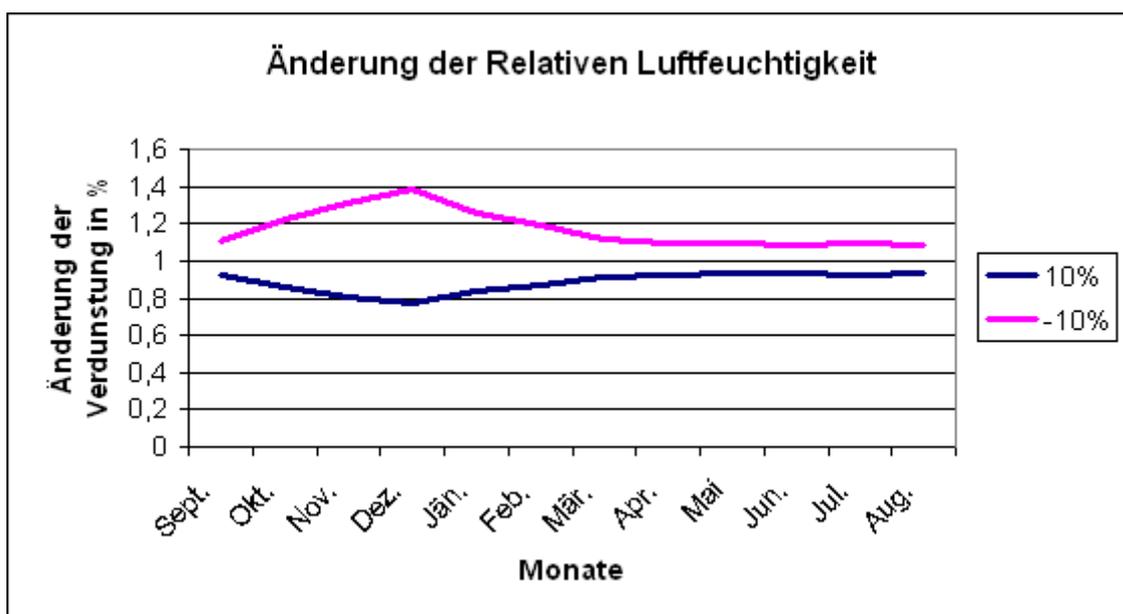


Abbildung 15: Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors relative Luftfeuchtigkeit

Die Windstärke wurde um 10% erhöht und in demselben Abstand verringert (Abb.16-17). Gerade der Wind, der von vielen als der Verdunstungsförderer angesehen wird, zeigt nur Veränderungen der Verdunstung im Bereich von 1%. Auch im Monat Juni, wo oft behauptet wird, dass das Getreide zur Nотреife gelangt, steigt die Verdunstung nur marginal.

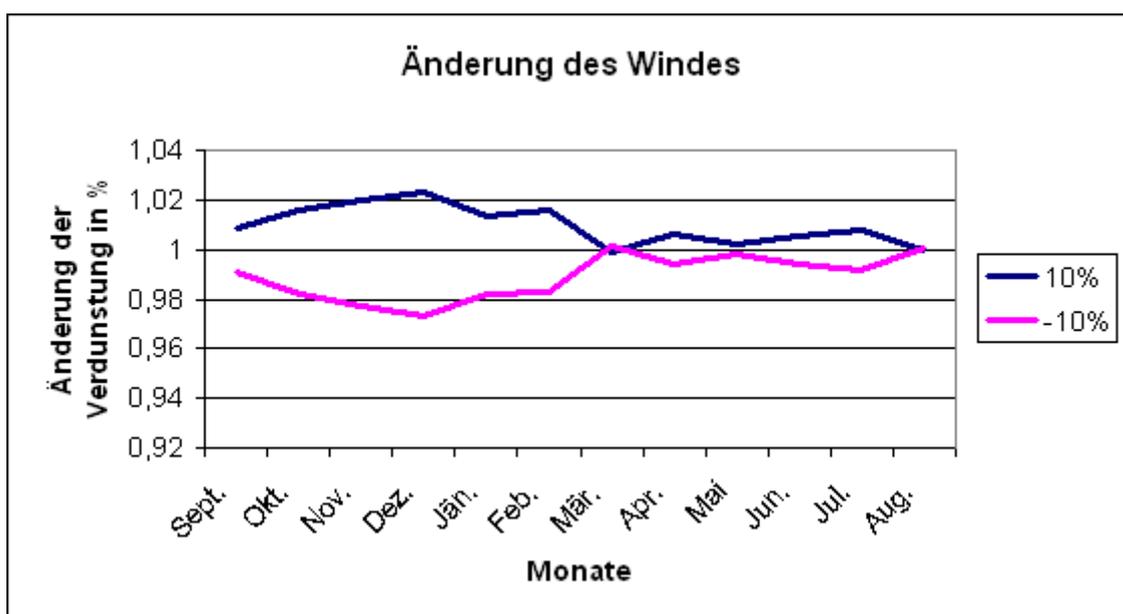


Abbildung 16: Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Wind

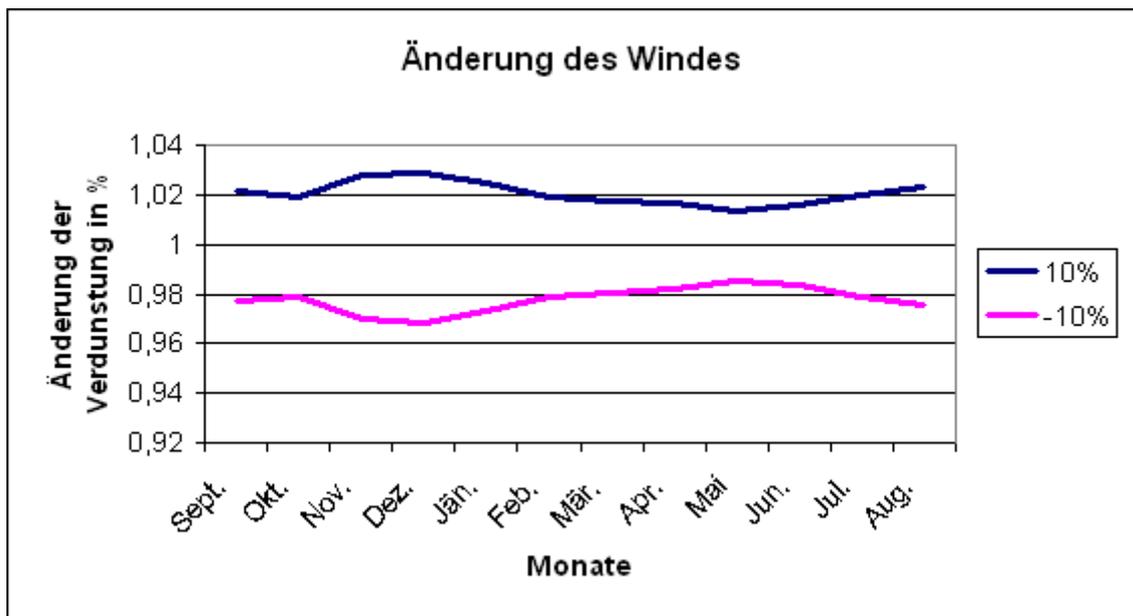


Abbildung 17: Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors Wind

Beim Niederschlag (Abb. 18-19) wurden die Ausgangswerte um 10% erhöht, aber nur an Tagen, wo es geregnet hat, und in denselben Schritt wurden sie verringert. Hier haben wir wie vermutet die größten Auswirkungen. Eine Erhöhung des Niederschlags um 10% kann die Verdunstung um knapp 10% anheben, dasselbe gilt für die Verringerung. Deshalb ist es auch sehr wichtig, für solche Verdunstungsberechnungen exakte Niederschlagswerte zu haben, besonders in niederschlagsarmen Gebieten, wo das Bodenwasser als verdunstungslimitierender Faktor deutlich in Erscheinung tritt.

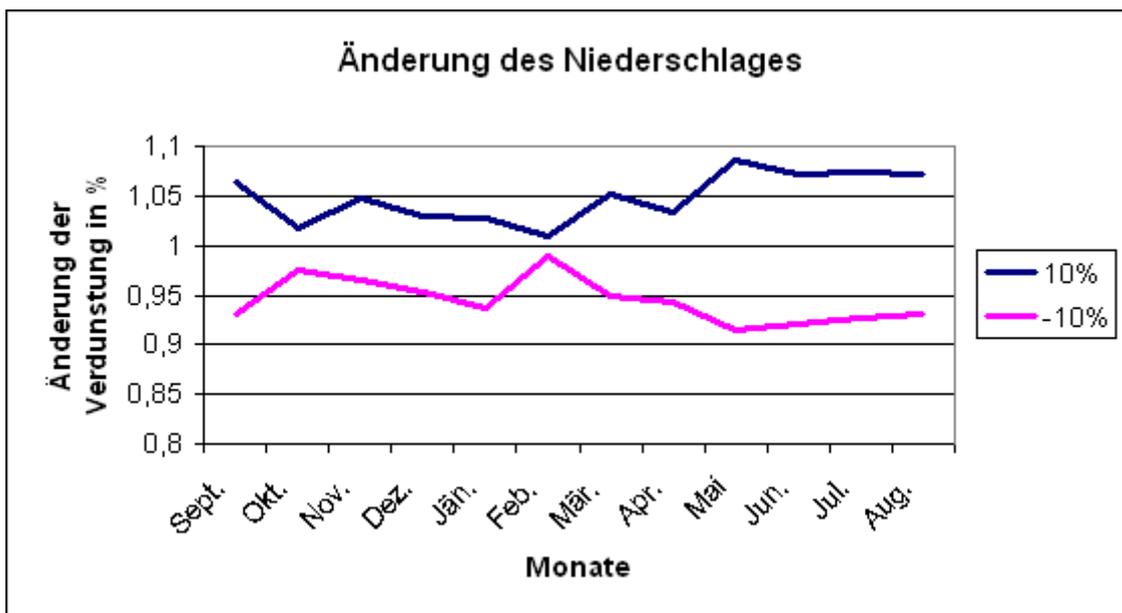


Abbildung 18: Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Niederschlag

Bei der Globalstrahlung (Abb. 19-20) wurden die Werte um 10% erhöht und verringert. Hier sind Verdunstungsänderungen im Bereich von 3% zu verzeichnen.

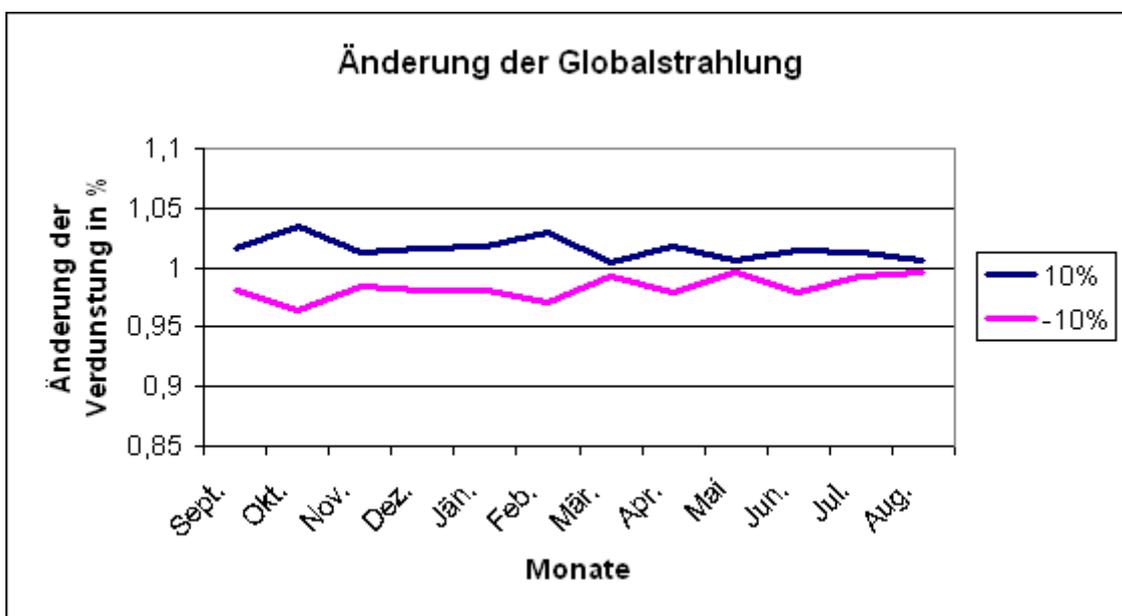


Abbildung 19: Sensitivitätsstudie der tatsächlichen Verdunstung bezüglich des Faktors Globalstrahlung

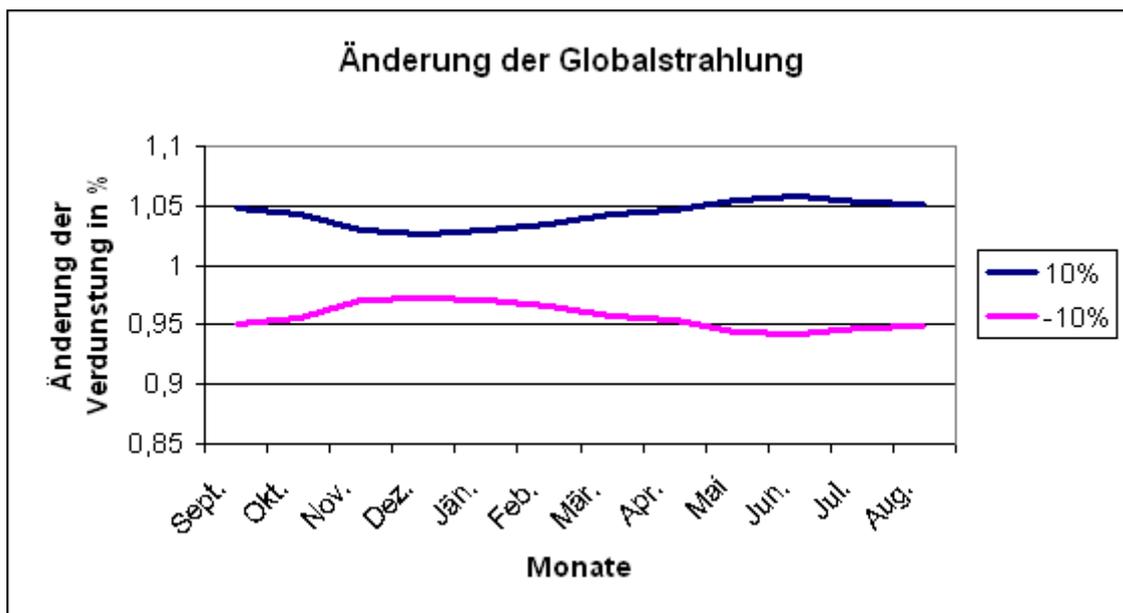


Abbildung 20: Sensitivitätsstudie der potentiellen Verdunstung bezüglich des Faktors Globalstrahlung

Diese Sensitivitätsstudie zeigt, dass an diesem trockenen Standort vor allem der Faktor Niederschlag die größten Abweichungen in der aktuellen Verdunstung bringt. Die anderen Faktoren zeigen Abweichungen, die in einem Bereich von 1% bis 5% liegen, während der Niederschlag Änderungen von bis zu 10% bewirken kann. Da die Temperatur einen signifikanten Einfluss auf die potentielle Verdunstung hat, dürften in den aktuellen Klimaszenarien mit einer Temperaturerhöhung von ca. 3-5 °C in den kommenden 80 Jahren, Trockenstresssituationen deutlich zunehmen.

Die Weizenerträge wurden im Jahr 2003 vor allem im Gebiet um Eisenstadt und Mödling besonders beeinträchtigt. Auch lagen die Erträge in den Bezirken Neusiedl/See, Güssing, Oberwart, Baden, Bruck/Leitha, Gänserndorf, Krems Land, Mistelbach, Waidhofen/Thaya, Braunau, Rohrbach und Leibnitz um 20 bis 25% unter dem Durchschnitt der Jahre 1997 bis 2002. (Soja et al.).

Die Korrelation zwischen Trockenheit und Ertrag erwies sich auf Bezirksebene im Jahr 2003 als sehr unterschiedlich. Es zeigte sich eine positive Korrelation zwischen der gesamten Niederschlagsmenge der Vegetationsperiode und dem Ertrag

im Osten, jedoch das Gegenteil im Süden und Westen, wo auch für Weizen ein Niederschlagsdefizit seltener ertragslimitierend war (Soja et al.).

4.3 SPI (Standardized Precipitation Index)

McKee et al. (1993) entwickelte den Standardized Precipitation Index (SPI), um Trockenheiten zu identifizieren, definiert als Niederschlagsabweichung eines Standortes im Vergleich zum langjährigen Mittel des Standortes

Ein länger andauerndes Niederschlagsdefizit bewirkt Wasserstandsänderungen beim Grundwasser, in Wasserreservoirs, bei der Bodenfeuchtigkeit und bei Fließgewässern. Mit dem SPI können Niederschlagsdefizite für verschiedene Zeitabschnitte berechnet werden. Der SPI kann je nachdem, wofür er gebraucht wird, in 3-, 6-, 12-, 24- und 48- monatigen Zeitintervallen berechnet werden.

Um genaue Ergebnisse zu bekommen, braucht man genaue Niederschlagswerte. Sie sollten auch für einen langen Zeitraum zur Verfügung stehen. Werte von 30 Jahren liefern schon sehr gute Ergebnisse. Je länger die Datenreihe ist, desto besser sind die errechneten Werte.

SPI- Werte zwischen $-0,99$ und $+0,99$ bedeuten eine normale Niederschlagsverteilung für ein bestimmtes Gebiet. Sind die SPI- Werte größer als $+1$, weist dies auf eine erhöhte Niederschlagshäufigkeit hin. Liegen die Werte unter -1 , herrscht ein Niederschlagsdefizit.

Trockenheit tritt also dann ein, wenn der SPI- Wert längere Zeit unter $-1,0$ fällt. Das Ereignis wird erst dann beendet, wenn der Wert wieder positiv wird. Extreme Trockenheiten treten erst ab Werten unter -2 auf.

Die Vorteile des SPI liegen darin, dass er für verschiedene Zeitabschnitte berechnet werden kann. Weiters kann er schon frühzeitig vor Trockenheit warnen und ist relativ leicht zu berechnen.

4.3.1 Definition des SPI

Mittelwert des Niederschlages

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

(Gleichung 26)

\bar{X} Durchschnittlicher Niederschlag

$\sum X$ Summe der Niederschläge

N Anzahl der Tage

Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N}} \quad (\text{Gleichung 27})$$

s Standardabweichung

\bar{X} Durchschnittlicher Niederschlag

X Summe der Niederschläge

N Anzahl der Tage

Gammaverteilung

$$g(X) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot X^{\alpha-1} e^{-\frac{X}{\beta}} \quad (\text{Gleichung 28})$$

$\alpha > 0$ α ist ein festgelegter Parameter

$\beta > 0$ β ist ein skaliertes Parameter

$$shape = \hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (\text{Gleichung 29})$$

$$scale = \hat{\beta} = \frac{\bar{X}}{\hat{\alpha}} \quad (\text{Gleichung 30})$$

$$A = \ln(\bar{X}) - \frac{\sum \ln(X)}{n} \quad (\text{Gleichung 31})$$

Kumulierte Wahrscheinlichkeit

$$G(X) = \int_0^X g(X) dX = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^X X^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{X}{\hat{\beta}}} dX \quad (\text{Gleichung 32})$$

Skew-Faktor

$$skew = \frac{N}{(N-1) \cdot (N-2)} \sum \left[\frac{X - \bar{X}}{s} \right]^2 \quad (\text{Gleichung 33})$$

4.3.2 Berechnung des SPI

Der SPI wurde hier auf die Daten von 1971 bis 2004 bezogen und für die Entwicklungsstadien der Jahre 2000, 2001, 2002, 2003 und 2004 österreichweit berechnet. Die Schossphase des Winterweizens dauerte im Jahr 2000 von 20. April bis 22. Juni, im Jahr 2001 von 22. April bis 23. Juni, im Jahr 2002 von 18. April bis 23. Juni, im Jahr 2003 von 29. April bis 26. Juni und im darauf folgenden Jahr von 27. April bis einschließlich 1. Juli. Die Gelbreife des Winterweizens dauerte im Jahr 2000 von 2. Juni bis 24. Juli, im Jahr 2001 von 4. Juni bis 28. Juli, im Jahr 2002 von 4. Juni bis 24. Juli, im Jahr 2003 von 7. Juni bis 22. Juli und im Jahr 2004 von 12. Juni bis 31. Juli. In den Abb. 21-25 werden die Dauer der einzelnen Entwicklungsstadien, bezogen auf bestimmte Regionen in Österreich, noch genauer beschrieben.

Bei den Entwicklungsstadien wurden die trockenstressempfindliche Schossphase und die Gelbreife (Kornfüllungsphase) als Vergleichsbasis herangezogen.

Die phänologischen Phasen für die Jahre 2000 bis 2004 wurden auf Grund von mehreren Versuchsstandorten der AGES rekonstruiert. Ab dem Jahr 2005 werden die Entwicklungsstadien der einzelnen Kulturen auf Gemeindeebene durch die Mitarbeiter der Österreichischen Hagelversicherung erhoben und in einer Datenbank gespeichert. Dies bietet natürlich eine viel genauere Grundlage für die Berechnung.

Probleme bei der Berechnung gab es bei der Vollständigkeit der Niederschlagsdaten über diesen langen Zeitraum. So mussten viele Stationen, deren Datenreihe unvollständig war, herausgenommen werden, um einer Verfälschung vorzubeugen. Zur Berechnung standen somit 366 Stationen für ganz Österreich zur Verfügung. Während die Stationsdichte im Burgenland, in Niederösterreich, Wien, Oberösterreich, der Steiermark und Vorarlberg zufriedenstellend bzw. ausreichend war, konnte in Kärnten, Tirol und Salzburg dies nicht erfüllt werden. Daher sind die Berechnungen für diese Bundesländer eher mit Vorsicht zu genießen und können keine genaue Aussage liefern. Für die anderen Bundesländer sind die Werte aussagekräftig.

Die berechneten Werte wurden dann auf die Österreichkarte übertragen.

Die Stationswerte wurden nach dem Kriging- Verfahren interpoliert. Sie sind im nachfolgenden mit den einzelnen zur Verfügung gestandenen Stationen abgebildet.

4.3.3 Ergebnisse aus Österreich

Der Weichweizenanbau hat vor allem im Osten Österreichs und im oberösterreichischen Zentralraum große Bedeutung. Im Jahr 2003 wurden etwa 810 000 ha Weichweizen in Österreich angebaut (Grüner Bericht, 2004).

Die nachfolgenden Abbildungen 21-25 zeigen, wo es 2000-2004 während der Schossphase und der Gelbreife des Winterweichweizens feuchter bzw. trockener als üblich war. Weiters wird die räumliche und zeitliche Verteilung der Entwicklungsstadien dargestellt.

Jahr 2000

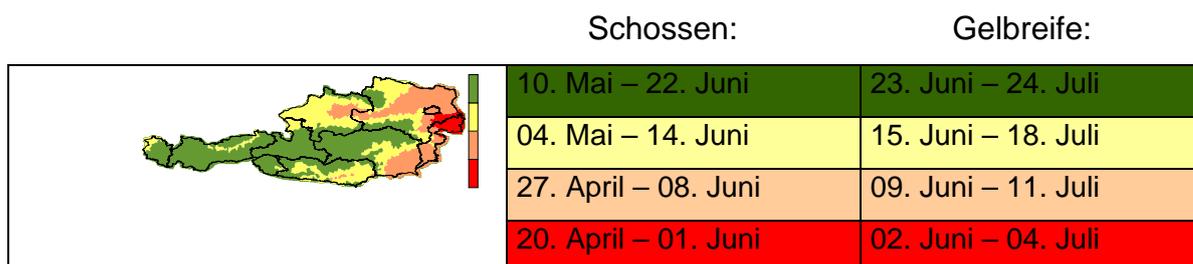
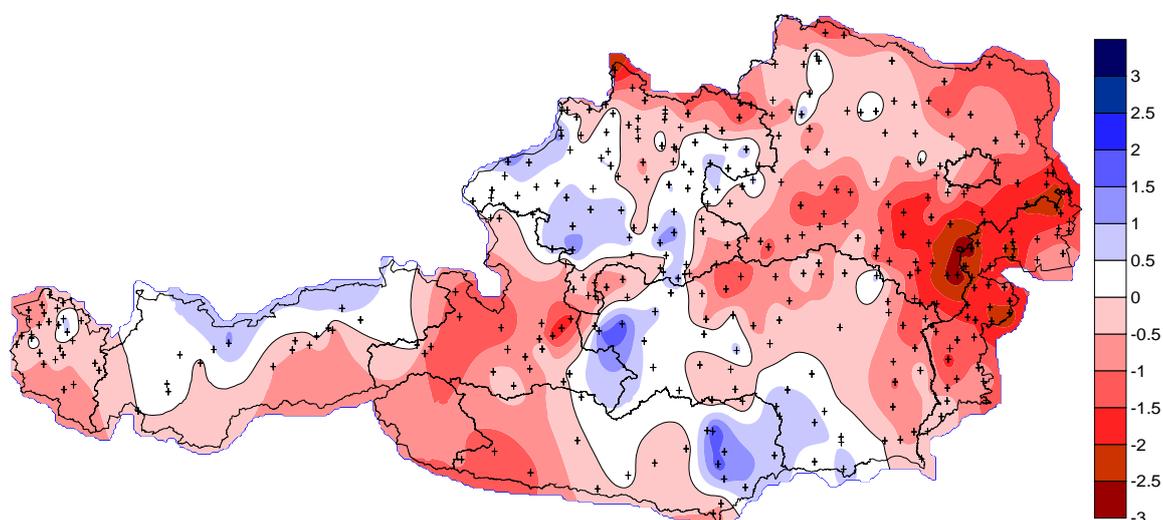
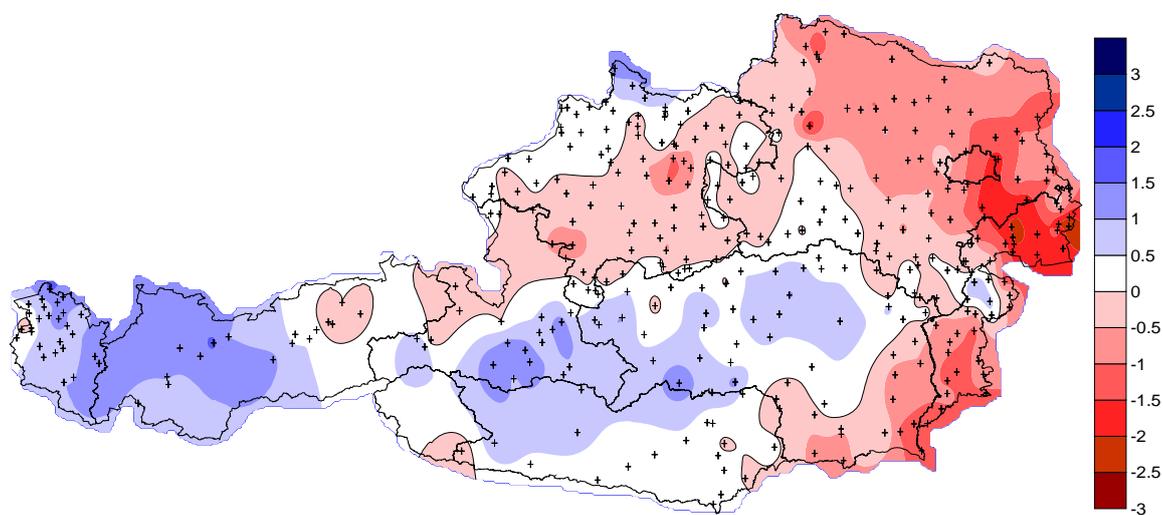


Abbildung 21: SPI- Werte in der Schossphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2000.

SPI beim Schossen



SPI bei Gelbreife



Jahr 2001

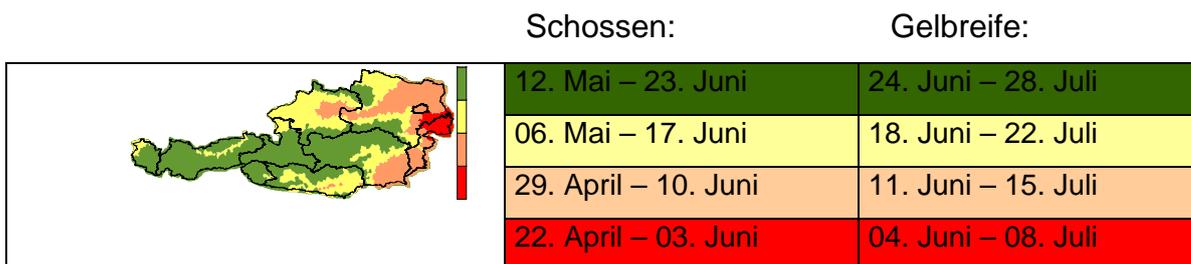
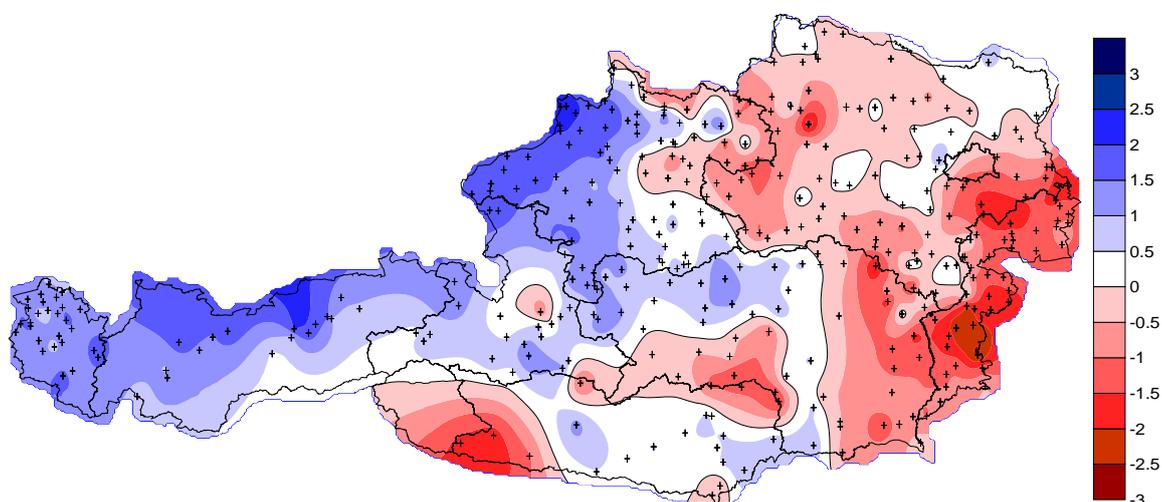
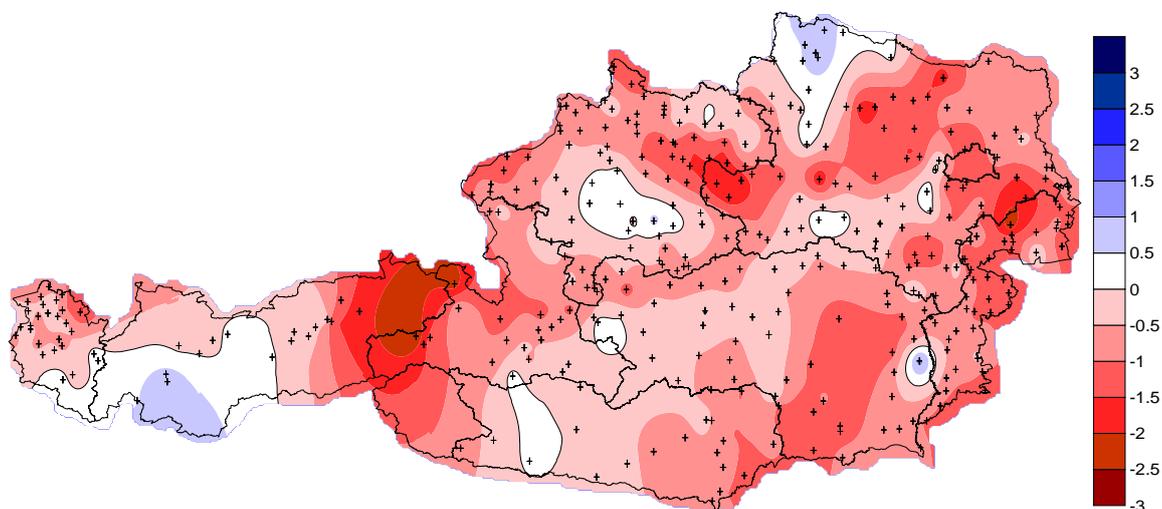


Abbildung 22: SPI- Werte in der Schossphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2001.

SPI beim Schossen



SPI bei Gelbreife



Jahr 2002

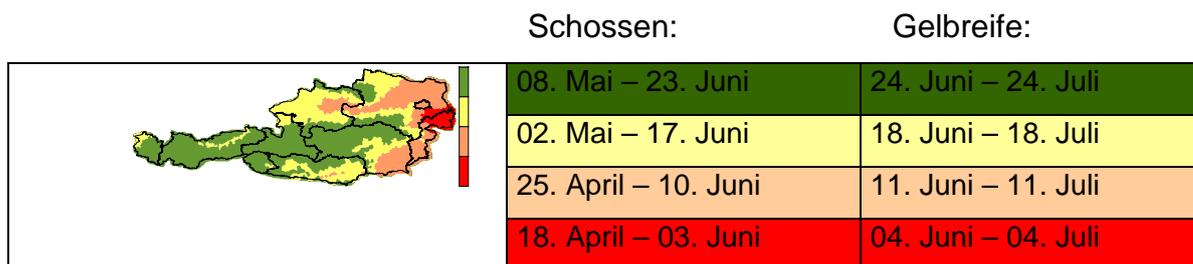
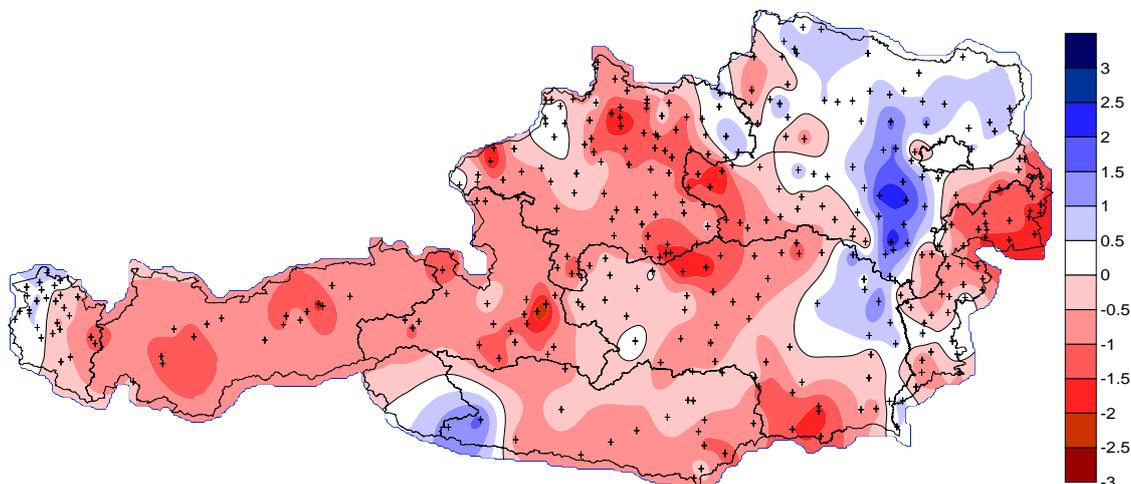
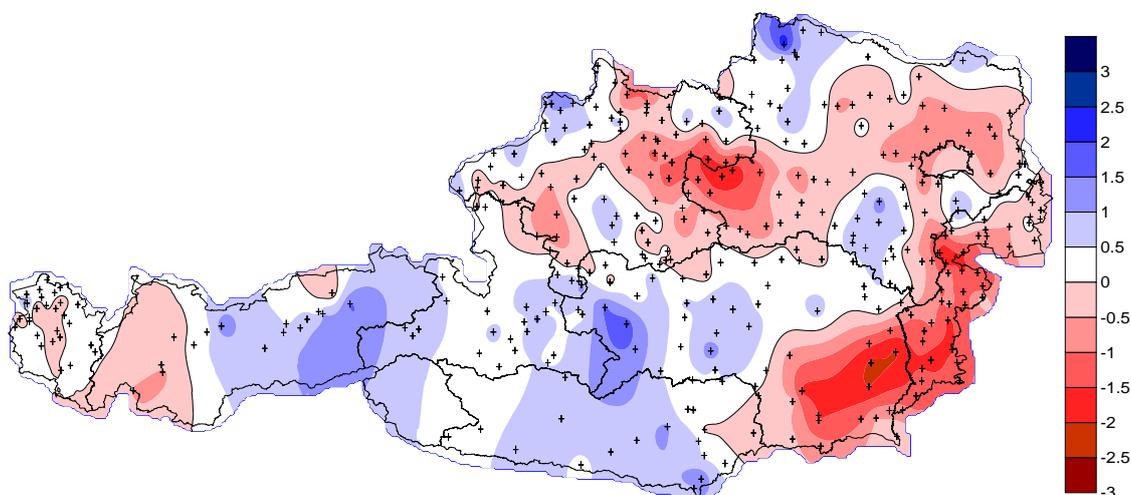


Abbildung 23: SPI- Werte in der Schossphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2002.

SPI beim Schossen



SPI bei Gelbreife



Jahr 2003

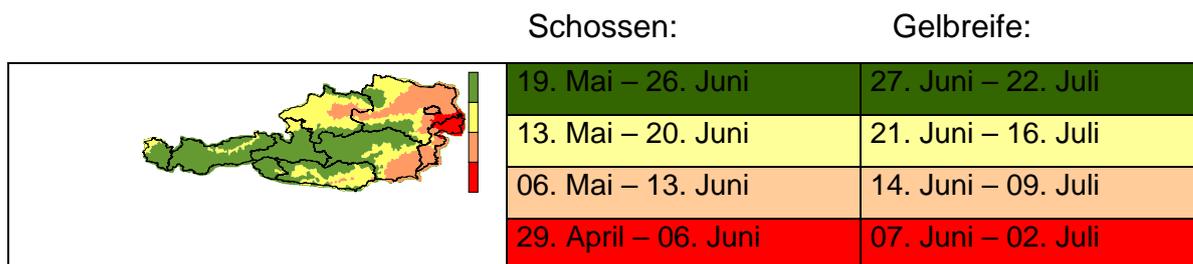
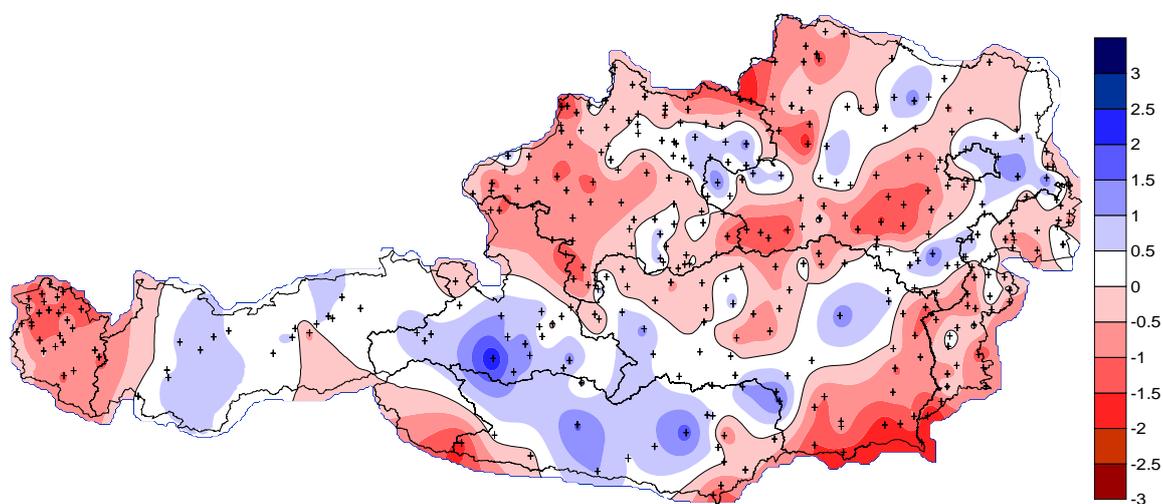
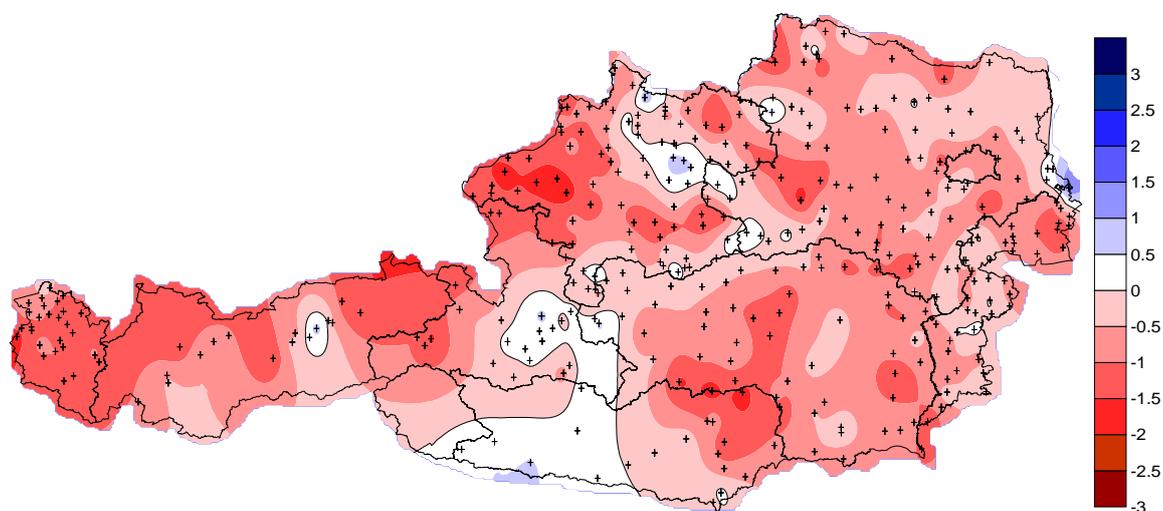


Abbildung 24: SPI- Werte in der Schossphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2003.

SPI beim Schossen



SPI bei Gelbreife



Jahr 2004

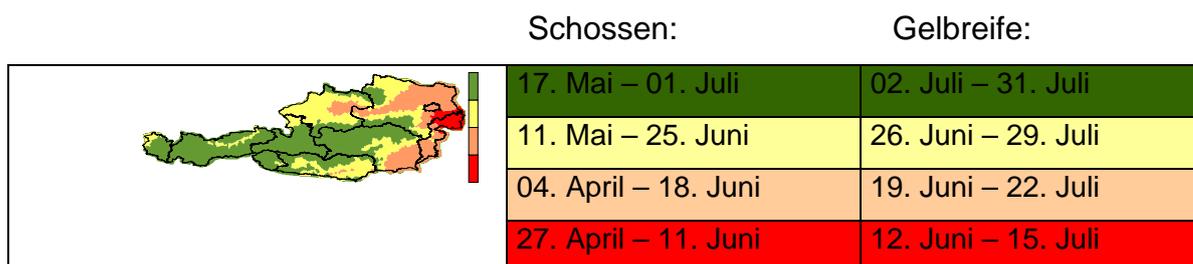
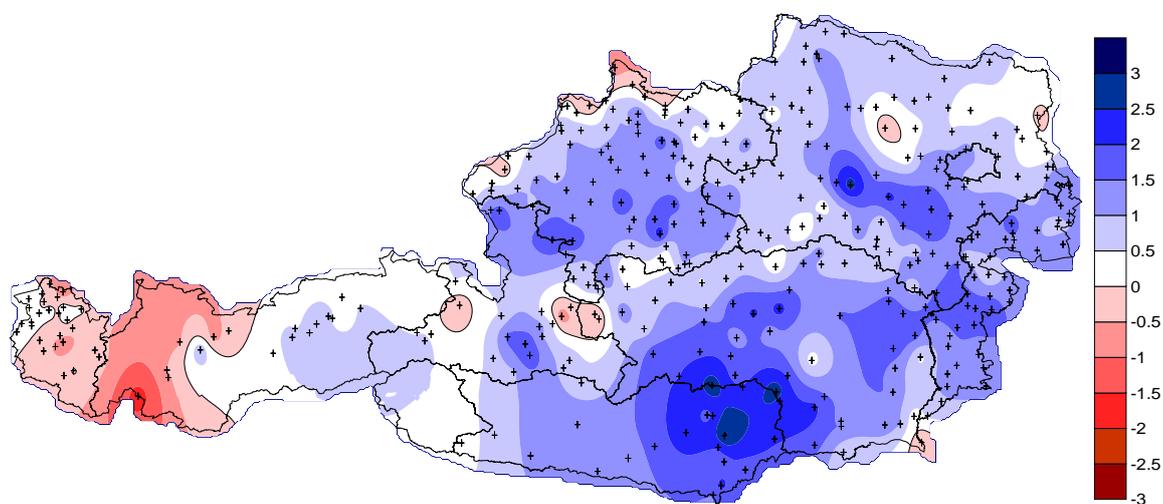
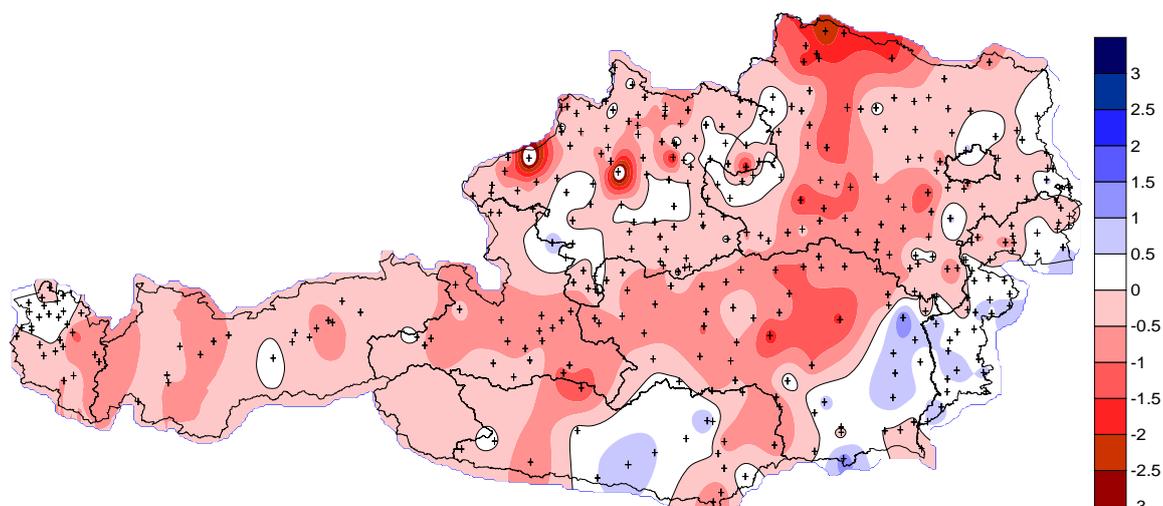


Abbildung 25: SPI- Werte in der Schossphase und in der Gelbreife bezogen auf die Entwicklungsstadien der einzelnen Regionen für das Jahr 2004.

SPI beim Schossen



SPI bei Gelbreife



Für die Berechnung des SPI wurden Wetterdaten von den Hydrologischen Ämtern und der ZAMG verwendet.

Die extrem niedrige Niederschlagshäufigkeit im Jahr 2000 im Bereich Niederösterreich und Burgenland ist hier besonders in der Phase des Schossens zu sehen. In der Phase der Gelbreife verbesserte sich zwar die Situation, doch reichte sie nicht aus, um die Erträge zu verbessern.

Im Jahr 2001 bot sich ein ähnliches Bild, jedoch war es in der Phase der Gelbreife trockener als in der Phase des Schossens (Abb.22). Hinzu kam noch, dass nur geringe Winterniederschläge die Situation verschlechterten. Die Hagelversicherung musste rund die Hälfte der Schäden im Vergleich zum Vorjahr entschädigen.

Das Jahr 2002 war ein niederschlagsreicheres Jahr. Trockenschäden traten nur regional auf, dort aber stark. Betroffen waren hier vor allem das gesamte Burgenland und Teile von Niederösterreich, wobei es hier auf Gemeindeebene stärkere Schwankungen gab. Stärker betroffen waren auch Teile der Südoststeiermark und Teile des südlichen Burgenlandes. Details können aus (Abb.23) entnommen werden.

Das Jahr 2003, siehe dazu (Abb.24), war ein extrem trockenes Jahr, in dem nicht nur die Trockenheit zu großen Ertragseinbußen führte, sondern auch die extrem hohen Temperaturen. Vor allem die Anzahl der Tage mit über 30° C verursachten große Hitzeschäden beim Getreide. Im Jahr 2003 wurde an der Mehrzahl der Stationen die längste Hitzeperiode gemessen (Soja et al). Die geringsten Niederschläge in dieser Periode verzeichneten die Stationen der Südsteiermark.

Das Jahr 2004 zeigte in der Phase des Schossens ausreichend Niederschläge im gesamten Bundesgebiet (Abb.25). In der Phase der Gelbreife kam es vereinzelt zu Niederschlagsdefiziten; betroffen hierbei war das Gebiet nördliches Niederösterreich, Bezirk Waidhofen und Umgebung, jedoch wurde der Ertrag in diesen Gebieten kaum beeinflusst. Extremschäden wie im Jahr davor konnten nicht festgestellt werden. Es kam zu keinen Auszahlungen von Schäden in diesem Jahr.

Grundsätzlich kann man behaupten dass in den Gebieten Österreichs mit niedrigen Seehöhen die Zahl der Trockenperioden steigt (nach Soja et al).

Die gefährdeten Gebiete, wie Niederösterreich, Burgenland und Kärnten, sind häufiger und in einem stärkeren Ausmaß von Trockenschäden betroffen.

4.4 Trockenschadensmodell der Österreichischen Hagelversicherung

Es gibt kein Trockenjahr, das in ganz Österreich alle Arten in gleicher Weise schädigt (Soja et al., 2005). Je nach Kulturart ist der Zeitpunkt des Niederschlagsdefizits von großer Bedeutung. Bei Weizen wirkt sich ein Niederschlagsdefizit im Frühjahr stärker als im Sommer aus (nach Soja et al., 2005).

4.4.1 Beschreibung der Methode

Beim Trockenschadensmodell der Österreichischen Hagelversicherung (Abb.33) werden Niederschlag und Verdunstung während der Vegetationszeit gegenübergestellt. Diese Wasserbilanz wird täglich vom Anbau bis zur Reife der jeweiligen Kultur aufsummiert. Bei der Aufsummierung dürfen 60 mm Niederschlag nicht überschritten werden. (60 mm Niederschlag wird als nutzbare Feldkapazität eines durchschnittlichen österreichischen Bodens angenommen.) Nach Empfehlung der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) wird zur Berechnung der Referenzverdunstung (ET_0) die Penman-Monteith Gleichung (Allen, 1998) verwendet. Für jede Kultur gibt es einen eigenen Kc-Faktor für die Phasen Bestockung, Schossen und Blüte und Kornbildung. Die Berechnung der Kc-Faktoren für die einzelnen Kulturen erfolgte mittels Klimadaten der letzten 35 Jahre (Riedl und Oitzl, 2006).

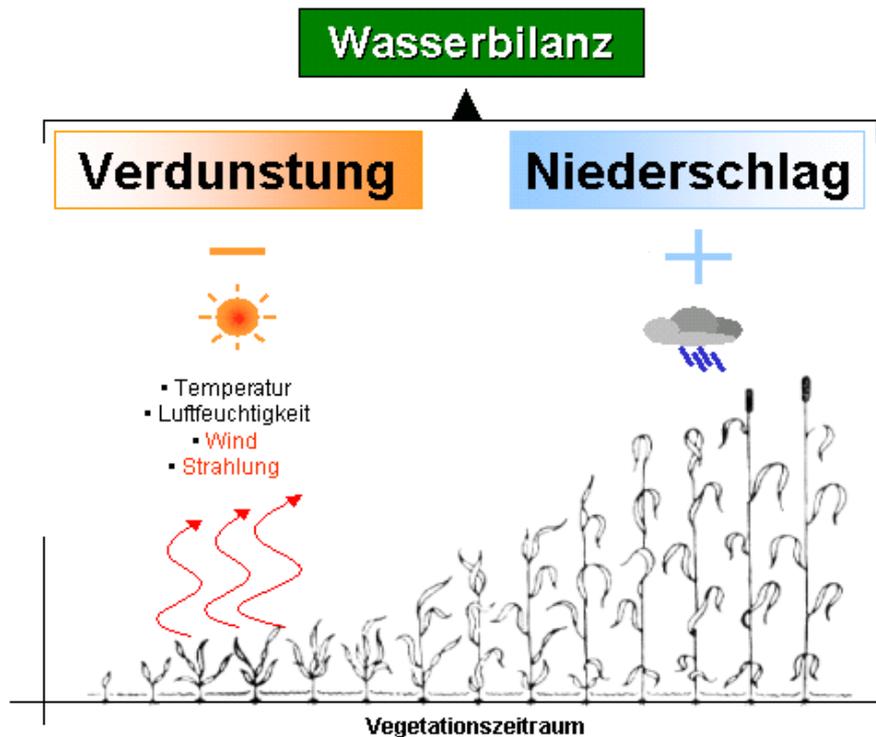


Abbildung 26: Funktion des Wasserbilanzmodells. Verdunstung und Niederschlag werden während des Vegetationszeitraumes gegenübergestellt. (© Österreichische Hagelversicherung).

Sollte in einer der Entwicklungsphasen ein Wasserbilanzdefizit entstehen, wird diese in der Gesamtabweichung berücksichtigt. Es entsteht somit keine positive Bilanz mehr. Positive Gesamtbilanzen können nur entstehen, wenn alle 3 Entwicklungsphasen positiv bilanziert haben. Zwischen den Entwicklungsphasen können positive Bilanzen bis maximal 60 mm Niederschlag auch für die nächste Phase herangezogen werden. 60 mm wird als nutzbare Feldkapazität eines durchschnittlichen österreichischen Boden angenommen. Die Bilanz wird in % ausgedrückt und wird von der gesamten verdunsteten Wassermenge berechnet.

Die Österreichische Hagelversicherung arbeitet seit 2005 an einem Trockenschadensmodell, das in Zukunft ein ständiges Monitoring im Bereich von Ackerkulturen ermöglichen soll. Bereits 2005 konnten Ergebnisse aus dem Modell mit Erträgen und Schadensmeldungen verglichen werden. Im Jahr 2006 wird das Monitoring mit hoch aufgelösten meteorologischen Daten von der ZAMG fortgesetzt. Das Modell bilanziert den Niederschlag und die aktuelle Verdunstung während der Ve-

getationszeit, wobei die einzelnen Entwicklungsstadien der verschiedenen Kulturen gesondert betrachtet werden. Dazu werden seit 2005 phänologische Daten von den Sachverständigen der Österreichischen Hagelversicherung erhoben. Unterschiedliche Bodenverhältnisse, Bewirtschaftungsweise und Sorten werden in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Das Trockenschadensmodell soll in Zukunft dafür verwendet werden, den Grad der Trockenheit bei jedem einzelnen Schadensfall zu definieren. Ziel ist es, den Schadensfall mit einer möglichst einfachen und für den Anwender verständlichen Methode zu bewerten. Das heißt, dass schwer zu erhebende Basisdaten wie z.B. der Boden und die Bewirtschaftungsweise, als eine Einheit bewertet sind. Außerdem soll das Modell bei großflächiger und schwerer Trockenheit eine raschere Erhebung ermöglichen, indem bei einem Wasserbilanzdefizit über 55% eine automatisierte Anerkennung erfolgt. Bei einem Wasserbilanzdefizit zwischen 15% und 55% soll die Erhebung wie bisher durch Sachverständige der Österreichischen Hagelversicherung erfolgen. Bei einem Wasserbilanzdefizit von weniger als 15% werden in Zukunft keine Schäden erhoben bzw. ausbezahlt.

Datengrundlage

Die meteorologischen Daten (INCA-Daten = Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) stammen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien (Haiden et al., 2006). INCA kombiniert Stationsbeobachtungen, Radardaten, Satellitendaten und Modellprognosen zu einem einheitlichen Endprodukt. Die INCA-Daten haben eine Auflösung von 1 km * 1 km und decken eine Fläche von 600 km * 350 km ab.

Die Österreichische Hagelversicherung verwendet für ihr Trockenschadensmodell 24-stündige Summenwerte. Dazu werden neben den 140 teilautomatischen Wetterstationen (TAWES) der ZAMG, sowie das Niederschlagsradar der Austrocontrol und die Niederschlagsdaten der Hydrographischen Dienste Österreichs (~600 Stationen) integriert (Riedl und Oitzl, 2006).

Trockenschadenserhebungsmodelle in Österreich

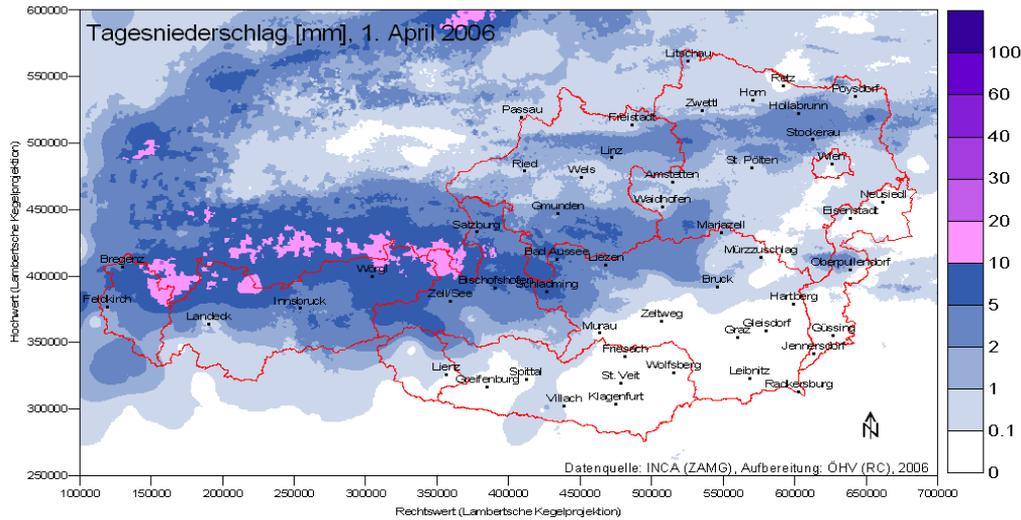


Abbildung 27: Beispiel für eine Niederschlagsanalyse vom 1. April (© Österreichische Hagelversicherung).

Neben den Niederschlagsanalysen stehen noch die Lufttemperatur, die Globalstrahlung, die Luftfeuchte und der Wind (Abb. 28-31) für die Berechnung der Verdunstung zur Verfügung:

Tagesmitteltemperatur

Sie wird aus den Werten von 7:00, 14:00, 19:00 Uhr MEZ berechnet.

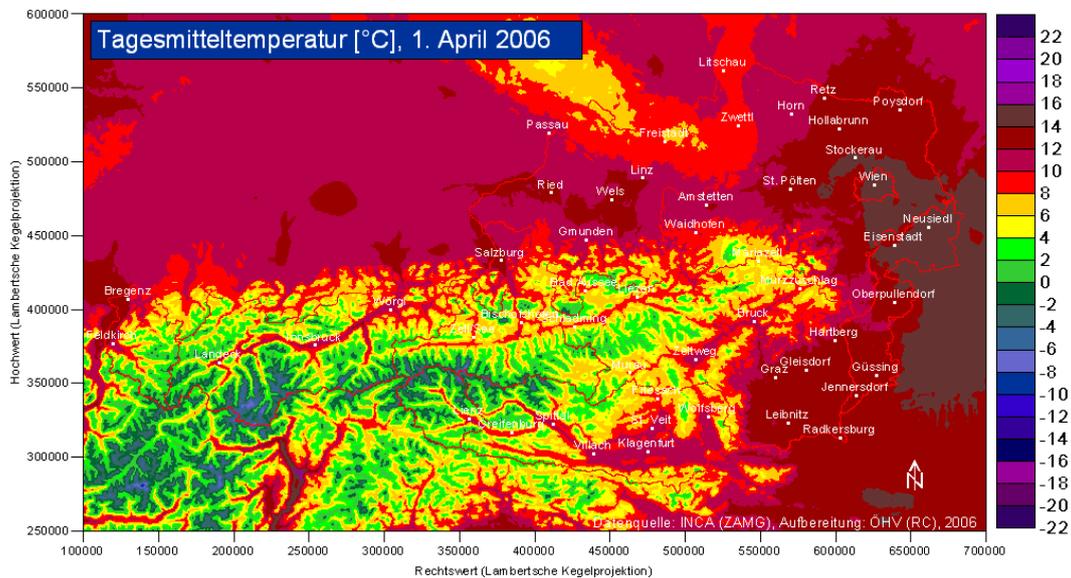


Abbildung 28: Tagesmitteltemperatur 1. April 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).

Mittlere Windgeschwindigkeit

Sie wird aus den Werten von 7:00, 14:00, 19:00 Uhr MEZ berechnet.

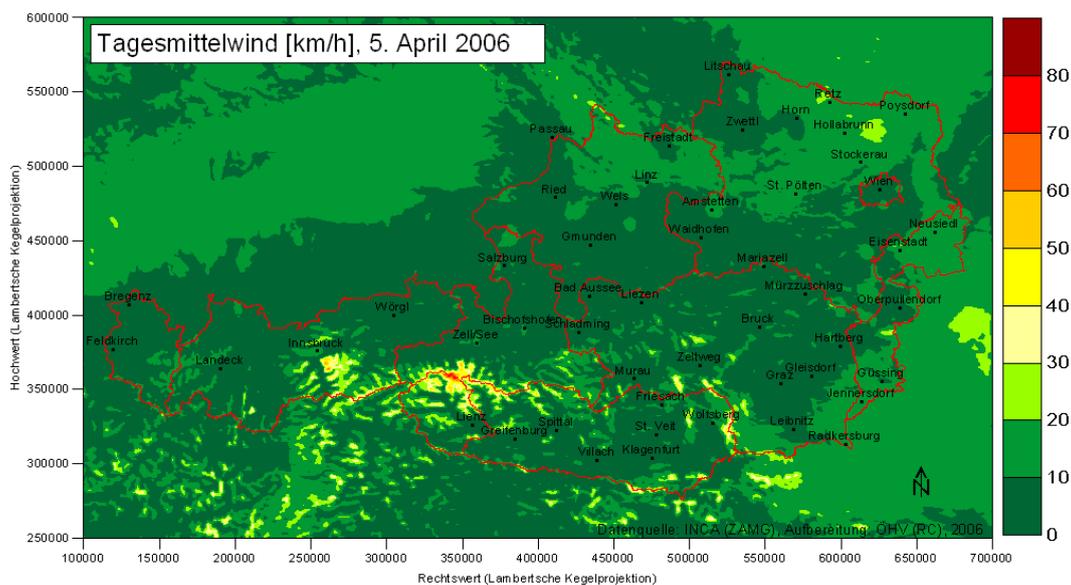


Abbildung 31: Mittlere Windgeschwindigkeit 5. April 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).

4.4.2 Phänologische Daten

Neben den meteorologischen Daten spielen wie erwähnt auch die Entwicklungsstadien der landwirtschaftlichen Kulturen im Trockenschadensmodell eine wichtige Rolle. Dafür werden seit 2005 von den Sachverständigen der Österreichischen Hagelversicherung für folgende Kulturen die Entwicklungsstadien erhoben:

- Winterweizen
- Wintergerste
- Sommerweizen
- Sommergerste
- Triticale
- Roggen
- Hafer
- Erbse
- Soja
- Mais
- Sonnenblume

Trockenschadenserhebungsmodelle in Österreich

- Kartoffel
- Kürbis

Aufgezeichnet werden bei Getreide 1-Knoten Stadium (EC31) bis Vollblüte (EC65) und Vollblüte (EC65) bis einschließlich Gelbreife (EC87). Die Beobachtungen erfolgten im Jahr 2005 auf Gemeindeebene, sie wurden aber aufgrund des enormen Zeitaufwandes im Jahr 2006 auf wichtige Regionen beschränkt. Damit eine flächenhafte Erfassung der Entwicklungsstadien gewährleistet werden kann, wurde zusätzlich ein phänologisches Modell auf Basis von Temperatursummen und Tageslichtlänge eingesetzt.

Dabei stellen die Basistemperatur und die Summe der für die Reife benötigten photometrischen Einheiten pflanzenspezifische Kenngrößen dar, die als konstante Pflanzenfaktoren vorgegeben bzw. von diesen abgeleitet werden (Stenitzer, 1988).

$$PTU = (Temp - Bastemp) * Daylgt.$$

(Gleichung 34)

PTU	photometrische Einheit
Temp	Tagesmitteltemperatur (°C)
Bastemp	Basistemperatur = 5°C
Daylgt.	Tageslichtlänge (h)

Ein Beispiel für eine PTU-Analyse ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

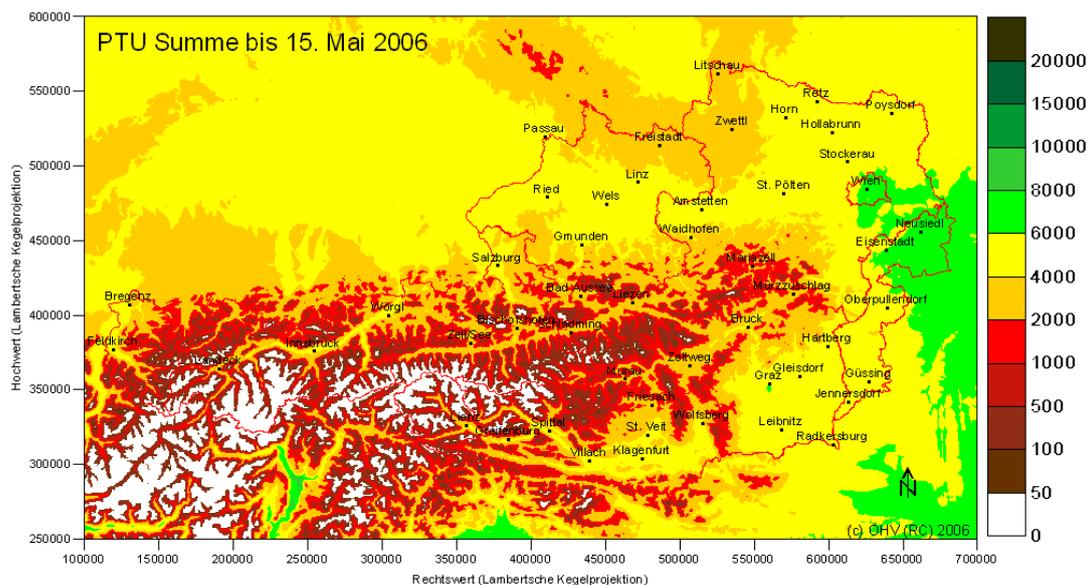


Abbildung 32: PTU-Summen (© Österreichische Hagelversicherung).

Mit Hilfe der PTU-Summen können die beobachteten Daten in einem weiteren Schritt in den Raum interpoliert werden.

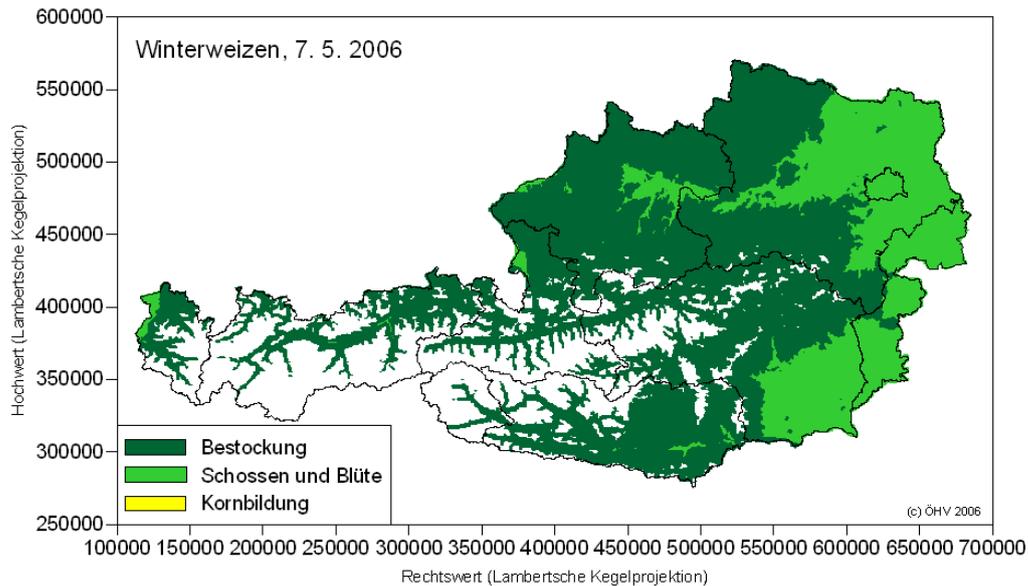


Abbildung 33: Beispiel für die Darstellung der Entwicklungsstadien anhand von Winterweizen 2006 (© Österreichische Hagelversicherung).

4.4.3 Ergebnisse

Die nachfolgenden Bilanzierungsergebnisse (Abbildung 34-36) beziehen sich auf die Gemeinde Großkadolz. Untersucht wurde hier das Wasserbilanzdefizit bei Winterweizen in den Jahren 2003-2005.

Entschädigungsberechnung aufgrund von Trockenheit

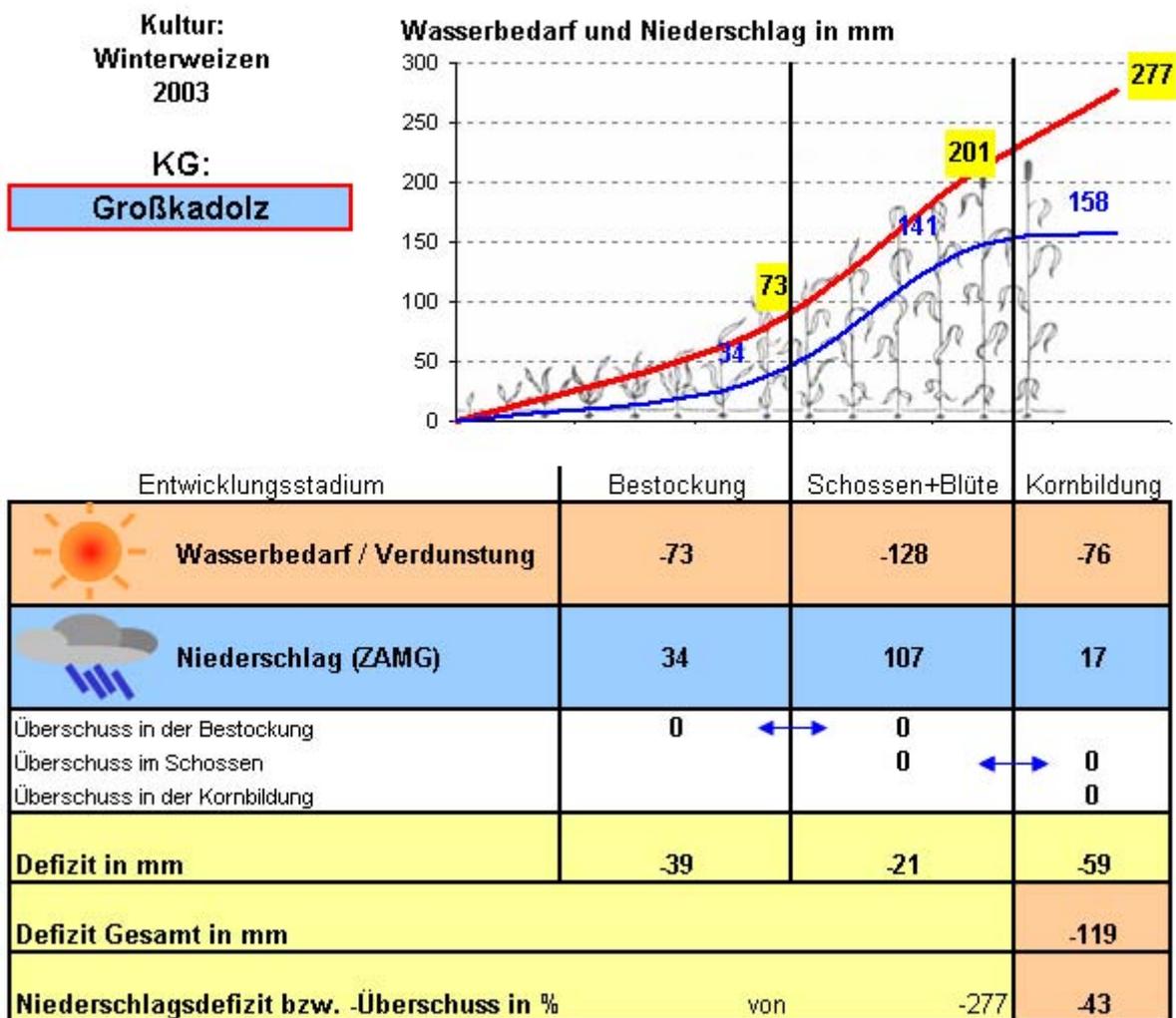


Abbildung 34: Entschädigungsberechnung bei Winterweizen 2003 (© Österreichische Hagelversicherung).

Die Abbildung 34 zeigt hier ein Gesamtdefizit von 43%, was bedeuten würde, dass hier der Trockenschaden nicht automatisch gewährt wird. Hier würde durch die Sachverständigen der Österreichischen Hagelversicherung eine zusätzliche Begutachtung erfolgen.

Entschädigungsberechnung aufgrund von Trockenheit

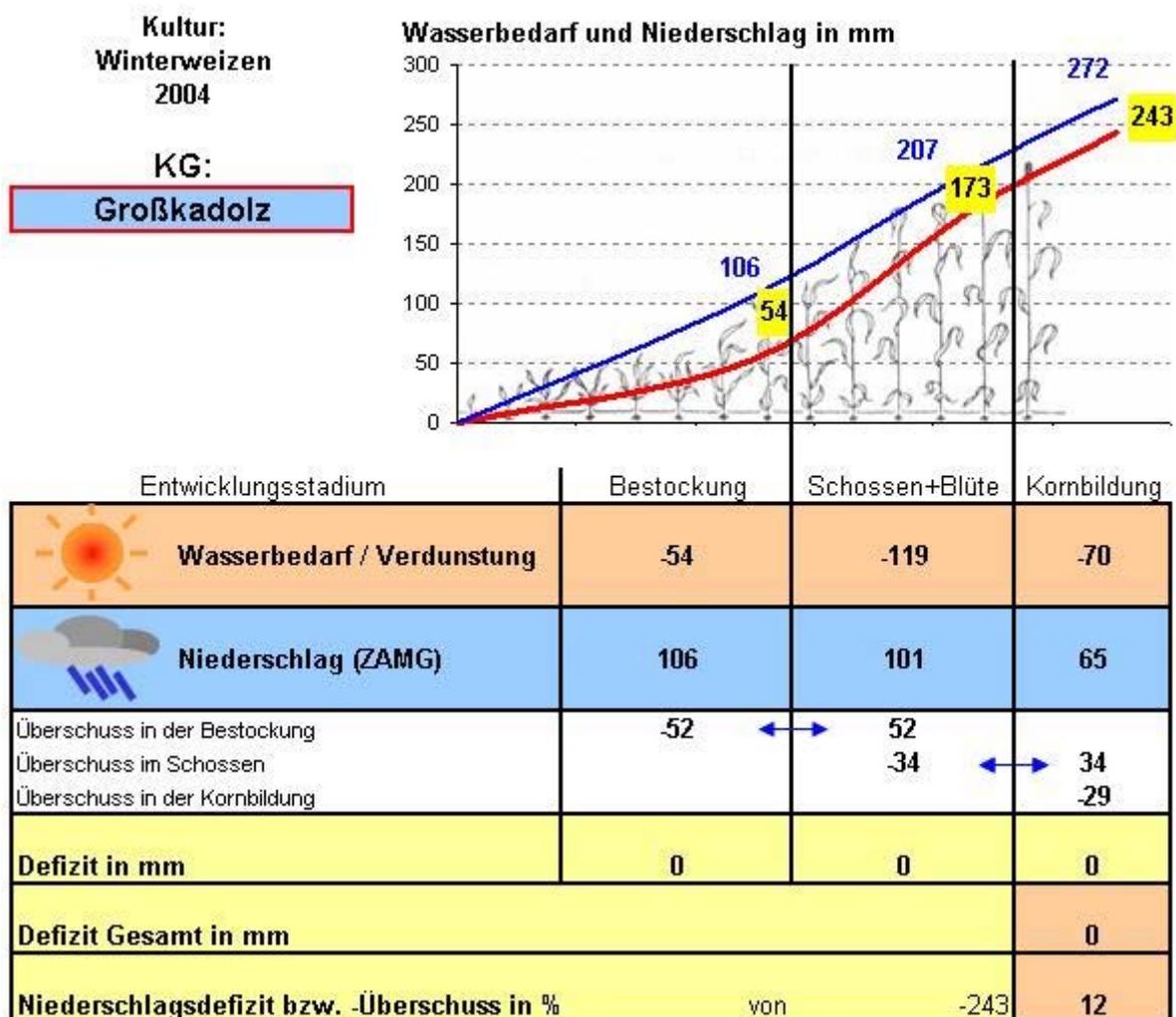


Abbildung 35: Entschädigungsberechnung bei Winterweizen 2004 (© Österreichische Hagelversicherung).

In Abbildung 35 kann man sehen, dass im Jahr 2004 ein Überschuss an Niederschlag im Ausmaß von 12% vorliegt. Das geringe Defizit in der Phase Schossen und Blüte wird durch den Überschuss von 52 l/m² in der Bestockungsphase kompensiert.

Entschädigungsberechnung aufgrund von Trockenheit

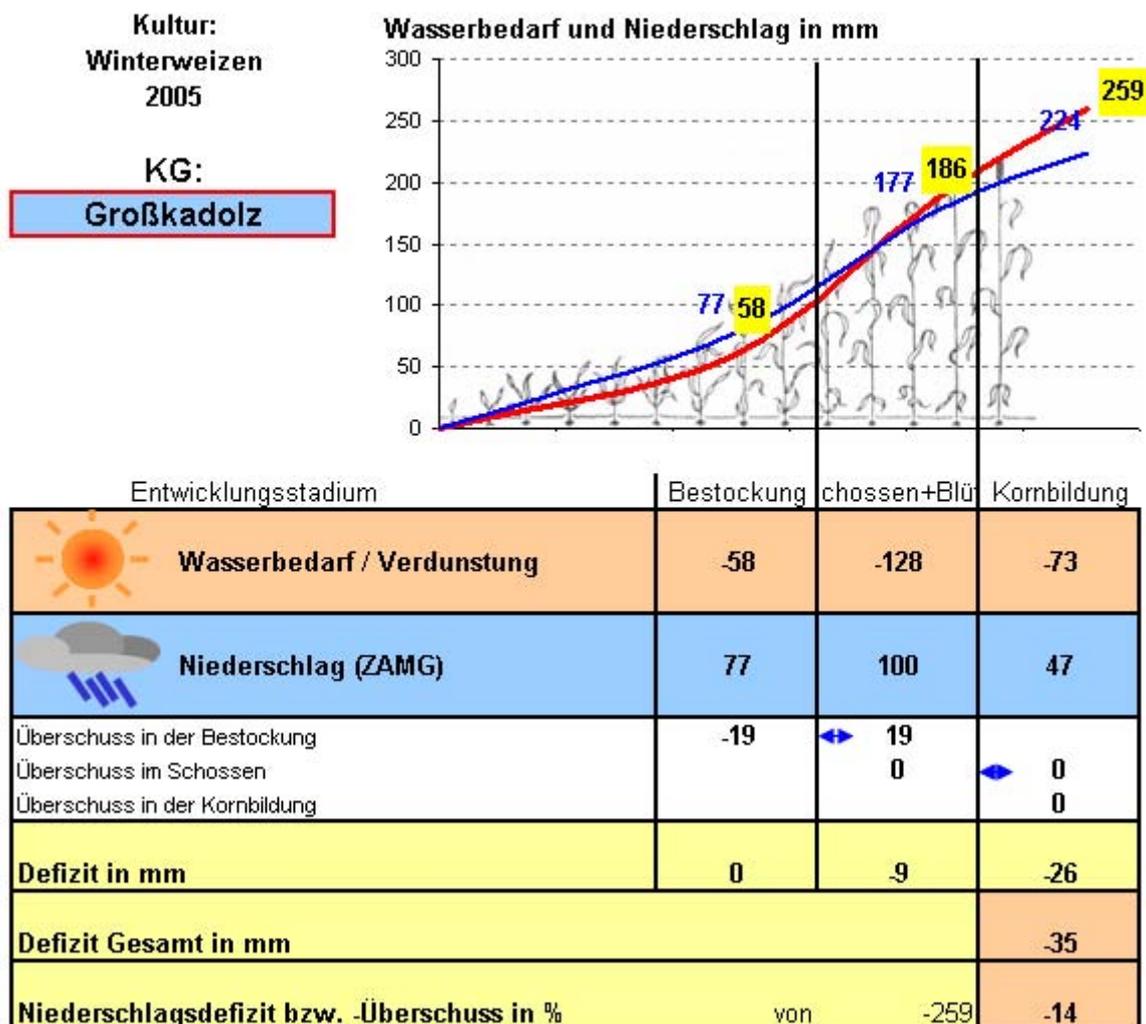


Abbildung 36: Entschädigungsberechnung bei Winterweizen 2005 (© Österreichische Hagelversicherung).

Auch im Jahr 2005 wäre es zu keiner Auszahlung gekommen, da nur ein Wasserbilanzdefizit von 14% erreicht wird.

Ergebnisse aus der Trockenschadenmodellierung 2007

Das Jahr 2007 war wieder ein Jahr mit enormen Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen. Die Erhebung der Trockenschäden erfolgte durch Sachverständige, die zusätzlich Wasserbilanzen der jeweiligen Kulturen zur Verfügung hatten. Somit

konnten die berechneten Daten mit den tatsächlichen Ertragseinbußen verglichen werden.

Probleme bereitete das Modell vor allem an schlechten Standorten, wo das Wasserhaltevermögen des Bodens sehr gering war. Auf sehr sandigen beziehungsweise schottrigen Böden konnte das Modell keine eindeutigen Ergebnisse liefern. Hier konnte man sehen, dass die Berücksichtigung des Bodens von Vorteil wäre. Auf besseren Standorten trafen die Bilanzierungsergebnisse die Erwartungen der Sachverständigen.

5 Zusammenfassung und Diskussion

Aufgrund von massiven Trockenschäden an landwirtschaftlichen Kulturen in den Jahren 2002 und 2003 ist die Österreichische Hagelversicherung bemüht, die Trockenschäden noch rascher und präziser festzustellen. Grundlage hierfür soll ein Modell zur Feststellung des Grades der Trockenheit an landwirtschaftlichen Kulturen bilden. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Modelle auf ihre potentielle Eignung untersucht, wobei zur Berechnung das von der FAO empfohlene Referenzverdunstungsmodell nach Penman-Monteith (Allen, 1998) auch im Modell der Österreichischen Hagelversicherung übernommen wird.

Das FAO-Modell beruht auf einer Grasreferenzverdunstung, wo neben den meteorologischen Faktoren auch der Boden in der Verdunstungsberechnung berücksichtigt wird. Diese Referenzverdunstung wird mit einem pflanzenspezifischen K_c -Faktor multipliziert, um die Evapotranspiration über einem bestimmten Pflanzenbestand zu erhalten.

Der SPI (Standardized Precipitation Index) konnte aufgrund der zu geringen vollständigen Datenreihen über einen Zeitraum von 20 Jahren und mehr nicht als mögliches Erhebungsmodell in Betracht gezogen werden. Dieses Modell basiert rein auf Niederschlagsdaten. Hier wird berechnet, wie viel es im Verhältnis zu den letzten 20 Jahren in einem bestimmten Jahr geregnet hat. Trotz der geringen Stationsdichte konnte man die österreichischen Problembereiche aufzeigen, jedoch nicht in einem Rahmen auf Feldebene.

Das Bilanzmodell der Österreichischen Hagelversicherung basiert auf einem Vergleich von aktueller Verdunstung und Niederschlag. Die Verdunstung wird nach dem FAO-Modell (Grasreferenzverdunstung) berechnet, wobei der Faktor Boden durch einen mittleren Wert ersetzt wird.

Problembeschreibung

Die Computer unterstützte Erfassung der Trockenschäden steht eigentlich am Beginn der Entwicklung und kann in Zukunft den einzelnen Gegebenheiten ange-

passt werden. Es können Kulturführungsfehler, wie zum Beispiel das Pflügen im Frühjahr oder die Bearbeitung des Bodens im feuchten Zustand, nicht berücksichtigt werden. Für diese Einflüsse wird es großräumig vermutlich keine geeignete vereinfachte Methode zur Erhebung der Trockenschäden geben. Verfeinerungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel die Berücksichtigung des Bodens (zum Beispiel Einteilung in Bodenklassen), im Modell könnten überdacht werden, um noch exaktere Ergebnisse ohne wesentlichen Mehraufwand zu erhalten. Extremstandorte, das heißt Standorte mit schlechten Böden, werden in der Trockenschadenserhebung natürlich immer ein Konfliktpotential bereiten, trotzdem muss hier berücksichtigt werden, dass das Ertragsniveau in einem durchschnittlichen Jahr auch nicht mit den Erträgen günstiger Lagen verglichen werden kann. Vielleicht wäre es sinnvoll, die Ertragsgrenzen auf Gemeindeebene oder an Bodenwertklassen anzupassen, um somit eine bessere Zufriedenheit bei den Kunden zu erreichen. Auch die Verfeinerung in Bezug auf die Niederschlagsverteilung könnte in Zukunft aufgrund der technischen Möglichkeiten verbessert werden. Hier ist vor allem auf Extremniederschläge, wie zum Beispiel über 60l/m² Regen in 60 Minuten, besonderes Augenmerk zu legen. Eine Berücksichtigung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag in einem Vegetationsabschnitt könnte die Ergebnisse der Modellrechnung verfeinern. Alle oben angeführten Ereignisse können die Berechnung stark beeinträchtigen und somit zu veränderten Ergebnissen in der Modellrechnung führen.

6 Summary

Austrian agriculture experienced severe damages due to extreme weather conditions in 2002 and 2003. The Austrian hail insurance aims at discovering damages faster and more precisely. Basis therefore should be a model to assess the degree of drought on agricultural crops. This thesis tests three difficult models. All calculations are based on the FAO reference evapotranspiration model by Penman-Monteith (Allen, 1998).

The FAO-model utilizes the reference crop evapotranspiration as its base. It incorporates both meteorological factors and soil conditions. Results of the reference crop evapotranspiration are multiplied by a specific crop coefficient to get the evapotranspiration for a certain crop.

The SPI (Standard Precipitation Index) for the Austrian hail insurance, could not be considered as a possible model because meteorological data are missing. It is based on precipitation data and should calculate how much rain has fallen within a specific year compared to precipitation during the last 20 years. However although there are limitations due to missing reference data, the model is capable of detecting Austrian problem zones.

The balance model of the Austrian hail insurance compares current evapotranspiration and rainfall. Evapotranspiration is calculated according to the FAO-model. Soil quality is incorporated with average soil value.

Computer aided registration of drought damages is just being developed and will be adjusted to incorporate all possible influence factors. Still some factors are too complicated to get on a detailed base (e. g. culture leading faults, conditioning wet soil). For these factors there will be no simple spacious method for investigation of damage caused by drought. Possibilities of improvement as for example considering soil conditions (e.g. gradation according to soil conditions) could be examined in the model to get ever more precise results without taking any more trouble. Assessing damage due to drought in extreme areas, meaning areas with bad soils will always cause conflict. In spite of this it must be considered that the level of

Summary

fertility in such extreme areas in an average year cannot be compared to the production in better situated areas. It might make sense to adapt limits for profits in certain districts or types of soil in order to reach higher satisfaction among customers. An improvement concerning the distribution of rainfall could also be reached due to better technological possibilities. Here some special attention should be paid to extreme rainfalls as for example more than 60l of rain per square meter within 60 minutes. Considering the number of days without any rainfall in a vegetation period could improve the results of the model calculation. All the factors mentioned above can strongly influence the calculation and can therefore lead to different results.

7 Literatur

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm> Zugriff: Aug. 2005

Brockhaus Enzyklopädie (1972): Vierzehnter Band OST-POQ, siebzehnte völlig neu überarbeitete Auflage; Deutschland

Brockhaus Enzyklopädie (1973): Sechzehnter Band RIT-SCHO, siebzehnte völlig neu überarbeitete Auflage; Deutschland

Brockhaus Enzyklopädie (1973): Achtzehnter Band STAM-TRIE, siebzehnte völlig neu überarbeitete Auflage; Deutschland

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2004): Grüner Bericht 2004. Selbstverlag; Wien

Cehak K. (1994): Allgemeine Meteorologie. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage; 3. Nachdruck. Verlag Vieweg & Sohn; Braunschweig/ Wiesbaden

Ehlers W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Verlag Eugen Ulmer GmbH&Co; Stuttgart (Hohenheim)

Eitzinger, J., Marinkovic, D., Hösch, J., 2002. Sensitivity of different evapotranspiration calculation methods in different crop-weather models. In : Integrated Assessment and Decision Support proceedings of the 1st biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society (ed. Rizzoli, A.E. and Jakeman, A.J), IEMSS 2002, 24-27 June 2002, Lugano, Switzerland, Vol. 2, 395-400 (ISBN :88-900787-0-7).

Eitzinger, J., Trnka, M., 2006. Ein Trockenschadenmodell für das österreichische Grünland. Bericht, 2. Klimaseminar "Klimaforschung für die Grünlandwirtschaft"

Literatur

der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Gumpenstein, 19. Jan. 2006, 29-33. ISBN 3-901980-87-3.

Haiden T., Kann A., Pistotnik G., Stadlbacher K., Steinheimer M., Wimmer F., and Wittmann C., 2006. Integrated Newcasting through Comprehensive Analysis (INCA): System overview. Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria

Hanke Bernhard (1991): Wasser für die Pflanze. 1. Auflage; Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin GmbH

Kößler C. (1998): Erhebung des Ausmaßes von Trockenschäden bei Getreide. Forschungsprojekt

Liebersbach Horst (2002): Wassergehalt des Bodens und Nährstoffaufnahme von Pflanzen. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen

Lösch R. (2003): Wasserhaushalt der Pflanzen. 2. unveränderte Auflage. Quelle & Meyer Verlag; Wiebelsheim

Oehmichen J. (1983): Pflanzenproduktion. Band 1. Verlag Paul Parey; Berlin und Hamburg

Riedl Claudia und Oitzl Stefan (2006): An insurance drought model. (publiziert in Proceedings of the International Symposium SOPHYWA, September 2006 Vienna Austria)

Seliger A. (2002): Methoden zur Erfassung des regionalen Wasserhaushalts im niedersächsischen Küstengebiet am Beispiel der Insel Langeoog. Diplomarbeit, Technische Universität, Braunschweig

Soja, G., Soja, A., Eitzinger, J., Gruszczynski, G., Trnka, M., Kubu, G., Formayer, H., Schneider, W., Suppan, F., Koukal, T., 2005 Analyse der Auswirkungen der Trockenheit 2003 in der Landwirtschaft Österreichs

Literatur

- Vergleich verschiedener Methoden. Endbericht von StartClim2004.C; in StartClim2004: Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich

Stenitzer E., 1988. Simwasser: Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Wasserhaushalt, Nummer 31, Petzenkirchen.

Endbericht, Auftraggeber: BMLFUW, BMBWK, BMWA, Österreichische Hagelversicherung, Österreichische Nationalbank, Umweltbundesamt, Verbund AHP

Taferner J. und Oberforster M. (1999): Einsatz einer praxisgerechten Methode zur Ertragsschätzung in Getreide. Kurzbericht

Zenker T. (2003): Verdunstungswiderstände und Grasreferenzverdunstung. Dissertation, Technische Universität, Berlin