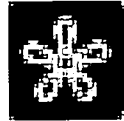




Universität für
Bodenkultur,
Wien



Department für
integrative Biologie und
Biodiversitätsforschung



Einfluss des Aquapol- Geräte- Wirkfeldes auf Pflanzen

Diplomarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

Eingereicht von : Gerhard Spatzier

Matr. Nr.: 9540329

Wien, März 2007

Vorwort und Dank

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Zeitraum April 2000 bis Mai 2007 am Institut für Botanik an der Universität für Bodenkultur Wien unter der Leitung von Herrn Ao.Univ.Prof. Dr. Winfried Kronberger verfasst. Für seine Geduld und seine guten Ideen möchte ich ihm herzlich danken.

An dieser Stelle möchte ich auch allen herzlich danken, die mir zur Erarbeitung des Themas hilfreich zur Seite standen. Im Besonderen Herrn O.Univ.Prof. Dr.phil Hanno Richter, welcher mir freundlicherweise ein Thermoelementpsychrometer zu Verfügung stellte und auch erklärte damit umzugehen. Sowie Frau Ao.Univ.Prof. Dr.phil. Silvia Kikuta, die mir die Handhabung der Scholander Bombe verständlich machte. Weiterer Dank gebührt den Mitarbeitern der Versuchswirtschaft Großenzersdorf für die Hilfe bei der Aufarbeitung von Biomassefraktionen der Feldversuche, und Herrn DI. Dr. Bernhard Wimmer vom Austrian Reserach Center in Seibersdorf für die Sendung von Niederschlagsdaten, sowie Herrn DI. Roland Juznic für das Korrekturlesen.

Weiterer Dank gebührt den Mitarbeitern des Instituts für Bodenforschung, besonders Herrn Ass.Prof. DI. Dr.nat.techn. Axel Mentler und Herrn Ao.Univ.Prof. DI. Dr.nat.techn. Nicola Rampazzo für die Hilfe bei den Bodenuntersuchungen.

Danksagung an Ing. Wilhelm Mohorn und der Firma Aquapol für die Bereitstellung von Geräten und hilfreicher Informationen zu ihrem Produkt.

Ganz herzlich danke ich meinen Eltern, die mich während meiner Ausbildung stets unterstützt und mir dieses Studium ermöglicht haben.

Lieben Dank an meine Lebenspartnerin Annemarie Papp, die mir mit ihrem Sanftmut in manchen schweren Studiumszeiten zur Seite stand und mich tatkräftig unterstützte.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Das Unternehmen Aquapol.....	1
Beschreibung des Mauertrockenlegungsgeräts.....	2
Auszug aus der Patentschrift.....	4
Wasserhaushalt von Pflanzen	8
Versuchsaufbau allgemein.....	22
Laborversuche	22
Thermoelementpsychrometer	22
Keimversuche	26
Beobachtung des Pflanzenwachstums	27
Feldversuche	29
Beobachtung des Pflanzenwachstums, 2000	33
<i>Druckbombenmethode nach Scholander</i>	37
Ernte einer Pflanzenstichprobe, 2000	40
Kontrollversuch mit Weizen, 2001	41
Kontrollversuch mit Sonnenblumen, 2005	43
Bodenproben.....	44
<i>Grundvorgänge der Bodenbildung und Bodenbestandteile</i>	44
<i>Bodenluft und Bodenwasserhaushalt</i>	45
<i>Gewinnung von Bodenstichproben</i>	51
Ergebnisse der Laborversuche	56
Thermoelementpsychrometer	56
Keimversuche	56
Beobachtung des Pflanzenwachstums	56
Ergebnisse der Feldversuche	60
Beobachtung des Pflanzenwachstums, 2000	60
<i>Druckbombenmethode nach Scholander</i>	63
Ergebnisse der Pflanzenstichprobe, 2000	66
Kontrollversuch mit Weizen, 2001	72
Kontrollversuch mit Sonnenblumen, 2005	75
Ergebnisse der Bodenuntersuchung.....	77

<i>Bodenwassergehalt</i>	77
<i>Kornverteilungsanalyse</i>	83
<i>Karbonatgehalt</i>	85
<i>C/N Verhältnis</i>	86
Diskussion der Ergebnisse	88
Zusammenfassung.....	88
<i>Laborversuche</i>	88
<i>Feldversuche</i>	88
Interpretation der Ergebnisse	89
<i>Fazit</i>	94
Empfehlung für weitere Untersuchungen	95
Feldversuche	95
Laborversuche.....	96
Abbildungsverzeichnis	98
Tabellenverzeichnis	103
Literaturverzeichnis	104

Einleitung

Das Thema wurde von der Firma Aquapol, die sich in erster Linie mit Gebäudetrockenlegung beschäftigt, an der Universität für Bodenkultur ausgeschrieben. Da diese Firma ein durchaus innovatives Produkt vertreibt, das ohne bisher bekannte Energiequellen auskommt, trat ich mit Herrn Ing. Mohorn, dem Erfinder dieses Mauertrockenlegungsgeräts und Gründer der Firma Aquapol in Kontakt. Herr Ing. Mohorn wollte in Erfahrung bringen, ob seine Erfindung ganz allgemein einen Einfluss auf lebende Pflanzen hat und, falls ja, wie sich diese äußert. Ferner wurde von Herrn Ing. Mohorn ein Prototyp eines Gerätes hergestellt, welches keinen entfeuchtenden sondern einen befeuchtenden Effekt aufweist. Mit diesem Prototyp sollte ein befeuchtender Effekt auf landwirtschaftlich genützten Flächen untersucht werden. Zur Klärung dieser Fragen wurde mit Laborversuchen und unterschiedlichen Methoden begonnen. Später erschien auch die Durchführung von Feldversuchen notwendig.

Da es sich bei vorliegender Arbeit um ein Erstlingswerk innerhalb der zu untersuchenden Materie handelt war es nur möglich einen Abriss an Untersuchungsmöglichkeiten darzustellen und eine Richtung für spätere Untersuchungen zu finden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich zuerst mit der Erklärung der Funktion dieser Aquapol- Geräte und dem Wasserhaushalt von Pflanzen. Später, bei den Freilandversuchen, wird auch auf die Wechselwirkung zwischen Boden und Wasser eingegangen. Basierend auf diese Erläuterungen werden die durchgeführten Versuche beschrieben und deren Ergebnisse bewertet.

Das Unternehmen Aquapol

Der Erfinder und Naturforscher, Ing. Wilhelm Mohorn gründete Aquapol im Jahr 1985. 1991 wurden Teile des Parlaments in Budapest trockengelegt und die 10.000-ste Aquapol- Anlage installiert. 1995 wurde die Kaplan-Medaille an Ing. W. Mohorn für die zugehörige Grundlagenforschung zum Aquapolsystem verliehen. 2001 Verleihung der Goldmedaille auf der IENA für die innovative Raumernergietechnologie zur Gebäudetrockenlegung. Im Jahr 2004 sind bereits über 30.000 Aquapolgeräte in Verwendung. Weitere bekannte Gebäude wurden erfolgreich trocken gelegt, darunter das Haydn-Museum im Burgenland, die Vinothek im Stift Klosterneuburg und Schloss Reitenau in der Steiermark.

Das handelsübliche Aquapolgerät wurde in Köln einer TÜV-EMV Prüfung unterzogen, dem der Prüfbericht mit der Nr.: P9892097E01 hervorgegangen ist. Der Erfolgsnachweis für die Mauertrockenlegung wird nach den Kriterien der ÖNORM B 3355 „Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk“ mit der Darr- Methode erbracht. Für Feuchtemessungen im Mauerwerk während der Trockenlegung wird ebenfalls die ÖNORM B 3355 befolgt.

Im Falle einer ungenügenden Kundenzufriedenheit im Sinne der ganzheitlichen Dienstleistung wie z.B. Beratung, Service, ect. inklusive eingeschränkten Trockenlegungserfolgs bei aufsteigender Mauerfeuchte, erhält der Kunde seine monetäre Investition, sein Geld, zurück. Das ist laut Ing. Mohorn bei knapp 1% aller Kunden der Fall. Die Rücklaufquote von technisch nicht einwandfreien Geräten liegt bei weniger als 0,4% von allen ausgelieferten Geräten pro Jahr (Mohorn, 2007). Die Firma vergibt eine Funktionsgarantie ihrer Geräte für den Zeitraum von mindestens 20 Jahren (Aquapol, 2006).

Beschreibung des Mauertrockenlegungsgeräts

Zur Mauerentfeuchtung stehen verschiedene Methoden zu Verfügung. Die meisten erfordern, durch mechanische Abtrennung von Wänden und Fundament, einen massiven Eingriff in die Bausubstanz. Andere, wie elektrische Mauerentfeuchtungssysteme, benötigen eine permanente Stromversorgung. Das bestehende Problem aller Anwendungen, diese von Aquapol mit eingeschlossen, ist, dass horizontal einfließendes Wasser nicht verdrängt oder abgehalten werden kann. Dieses Problem lässt sich nur mit einer aufwendigen Vertikal-drainage lösen.

Im Falle des Aquapol Gerätes ist die Handhabung einfach. Besagtes wird nur von einem Kundenbetreuer der Firma Aquapol, welcher auch als Berater fungiert, mit einem Metaldübel an der Geschossdecke befestigt. In den unten angeführten Darstellungen, welche die praktische Anwendung des entfeuchtenden Gerätes an einer durchfeuchteten Mauer erklären, ist es grün dargestellt. Die Trockenlegung erfolgt in zwei Schritten. Als erstes wird das Wasser im Mauerwerk durch Verdunstung und Verdrängung nach unten entfernt. Danach kommt die Trockenerhaltungsphase, in welcher der neuerliche Wasseraufstieg in das Mauerwerk verhindert wird. Die Funktionsweise, wie sie im Auszug aus der Patentschrift genauer erklärt wird, gliedert sich in erster Linie in zwei Bereiche: Einem relativ großen Wirkbereich, in dem der entfeuchtende Effekt auftritt und einem kleineren Ansaugbereich, direkt unter dem Gerät, der einen befeuchtenden Effekt aufweist.

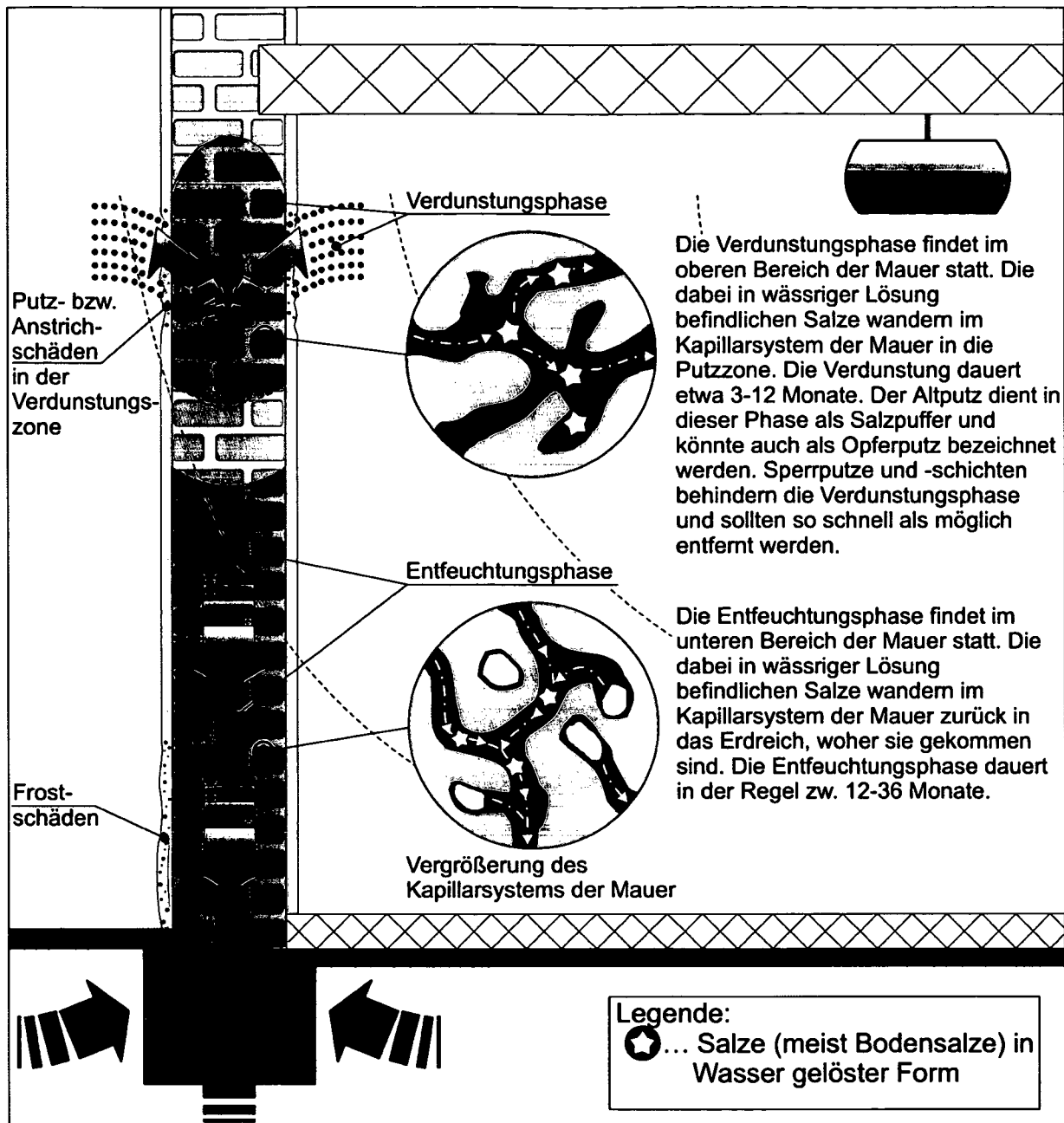


Abb. 1.1 Modellhafte Darstellung der Arbeit des Aquapolgerätes bei der Mauertrockenlegung. Die konzentrisch strichlierten Linien um das grün hervorgehobene Aquapolgerät stellen einen Teil des entfeuchtenden Wirkungsbereichs dar (Baufachmappe, 2001).

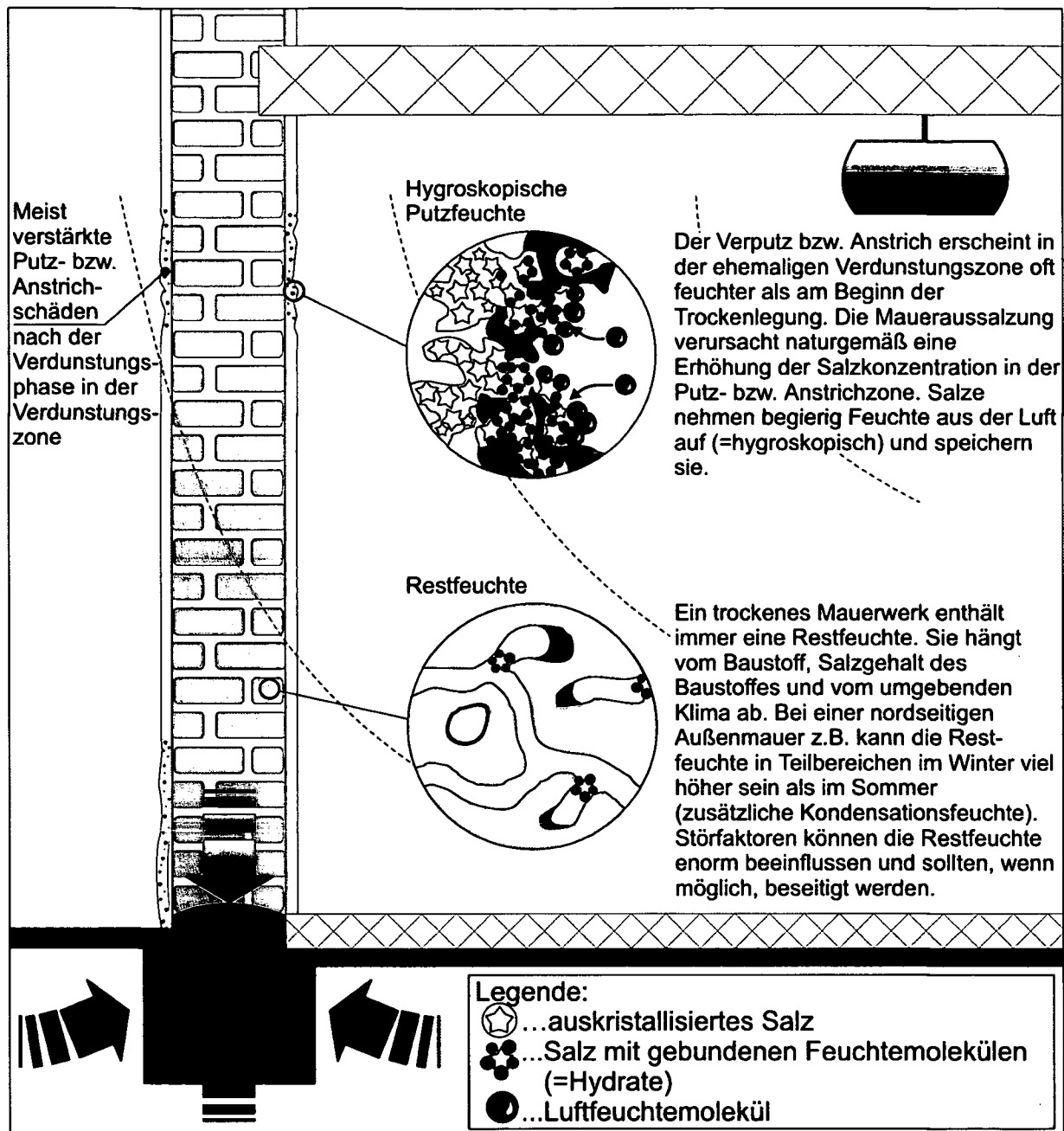


Abb. 1.2 Modellhafte Darstellung der Arbeit des Aquapolgerätes bei der Trockenerhaltung von Mauerwerk. Das erneute Aufsteigen von Wasser wird verhindert, jetzt kann der Putz dauerhaft saniert werden (Baufachmappe, 2001).

Auszug aus der Patentschrift

Das Aquapol System arbeitet nach dem Prinzip der Magnetokinese, indem Wassermoleküle entweder in der Weise polarisiert werden können, dass Feuchtigkeit im Mauerwerk langsam wieder zurück ins Erdreich geleitet (Mauerwerksentfeuchtung) oder zum Aufsteigen gebracht wird (Befeuchtung von Böden) (Lotz, 2003).

Die Erfindung bezieht sich auf ein Gerät zum Transport von Feuchte oder Salzen, wie zur Entfeuchtung von Mauerwerk, mit mindestens einem, in einem Gehäuse angeordneten, zu

einer Spule gewundenen elektrischen Leiter, wobei der Windungsdurchmesser der Spule spiralartig von Ende zu Ende kleiner wird (Europäische Patentschrift, 1996).

Die Funktion dieses Gerätes liegt darin, ohne direkten Kontakt zu den Stoffen, die be- oder entfeuchtet werden sollen und ohne direkten Anschluss an eine Stromquelle eine be- und/oder entfeuchtende Wirkung ausüben. Die Wirkung dieses Gerätes liegt darin, dass durch bestimmte elektromagnetische Felder bestimmter Frequenz im hochfrequenten Mikrowellenbereich in porösen, kapillarartigen Stoffsystemen, z.B. Baustoffen oder Erdreich, die Adhäsionskräfte zwischen Feuchtmolekülen und Stoffmolekülen gestört werden. Dies führt zu einer Absenkung des Feuchtespiegels.

Geräte, die im unteren Hochfrequenzbereich, z.B. bei Fremderregung durch entsprechend vorhandene Kurzwellen im Kurzwellenbereich Resonanzfrequenzen aufweisen, können genau das Gegenteil verursachen, indem sie z.B. durch den Diodeneffekt der Mauer eine Erhöhung des Mauerpotentials hervorrufen und dadurch ein Ansteigen der Mauerfeuchte bewirken.

Die meisten dieser Geräte sind in drei Resonanzspektren mehr oder weniger resonanzfähig, nämlich dem mechanischen Spektrum, dem elektromagnetischen Spektrum und einem dritten, erst relativ neu entdeckten Spektrum, nämlich dem gravomagnetischen Spektrum.

Eine gravomagnetische Welle besteht, soweit nachweisbar, aus einer linear, elliptisch oder zirkular polarisierten magnetischen Wellenkomponente und einer um die magnetische Welle zirkular polarisiert rotierenden gravitatorischen Wellenkomponente. Auf eine ganze Wellenschwingung der magnetischen Komponente entfallen meist mehrere Wellenschwingungen der gravitatorischen Komponente (Mohorn, 1996).

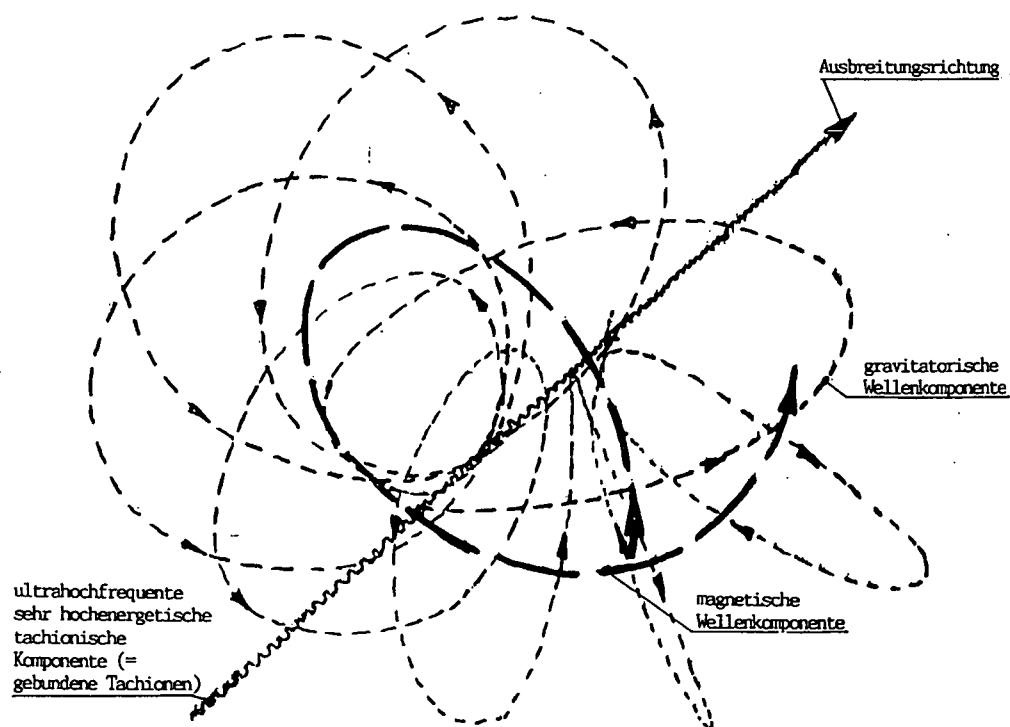


Abb. 1.3 Sinnbildliche Darstellung einer gravomagnetischen Welle. Die breite strichlierte Kurve stellt die magnetische Wellenkomponente dar, um welche die gravitatorische Wellenkomponente zirkular rotiert (Mohorn, 1996).

Wurden diese Geräte im elektromagnetischen Spektrum durch Umweltstrahlung in Resonanz versetzt, so hatten sie die oben erwähnten Wirkungen. In den meisten Fällen waren diese Wirkungen jedoch unvollkommen bzw. waren sie sehr oft von nicht vorhersehbaren Einflüssen abhängig. Beim Aquapolgerät ließ sich die Wirksamkeit erhöhen. Erreicht wird

dies dadurch, dass der Abstand der Windungen einer spiraligen oder kegelig spiraligen Spule von der Spulenachse nach innen zu bei jeder vollen Umdrehung um 40% bis 60% kleiner ist als der vorhergehende Abstand.

Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung. In den Zeichnungen sind Ausführungsbeispiele dargestellt, auf welche die Erfindung jedoch nicht beschränkt ist. Dabei zeigen: Fig. 3 im Grundriss drei gegeneinander gleichmäßig versetzte Spiralspulen; Fig. 4 ebenfalls im Grundriss zwei Spiralspulen mit gleicher Achse jedoch entgegengesetztem Windungssinn; Fig. 5 im Aufriss in der linken Hälfte eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Gerätes wie es in dieser Arbeit verwendet wurde. In der rechten Hälfte ist eine durch eine weitere Spiralspule ergänzte Ausführungsform der Erfindung dargestellt. Durch das Leiterstück 3 sind die Spiralspulen 1 (entspricht Fig. 4 im Aufriss) und 2 (entspricht Fig. 3 im Aufriss) leitend miteinander verbunden. Die Teile 6 und 7 bilden das obere Gehäuse und den Gerätedeckel.

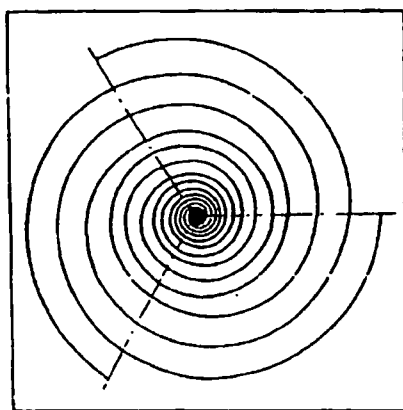


FIG. 3

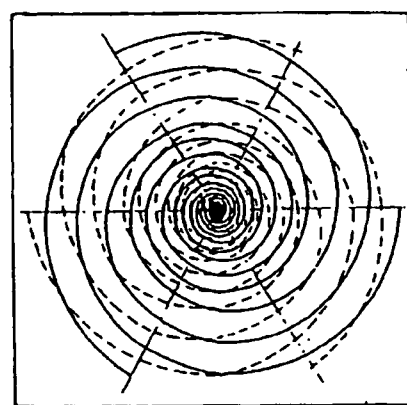


FIG. 4

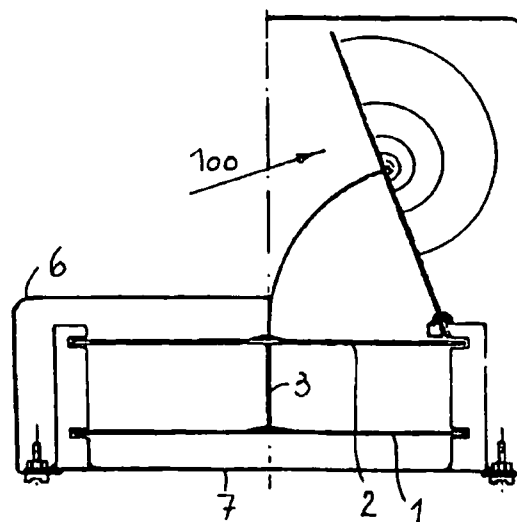


FIG. 5

Abb. 1.4 Auszug der Bauformen des Aquapolgerätes. Sendeeinheit Fig. 3 und Empfangsteil Fig. 4 bilden das Kernstück des Gerätes. Fig. 5 zeigt zwei jeweils zu Hälfte dargestellte handelsübliche Beispiele für das Trockenlegungsgerät (Europäische Patentschrift, 1996).

Wie in Fig. 5 dargestellt kommt es zu einer Funktionstrennung der Spulen: die Mehrfachspiralspule 1 (entspricht Fig. 4 im Aufriss) stellt einen reinen Empfangsteil des gravomagnetischen Wasserstofffeldes der Erde dar und die Mehrfachspiralspule 2 (entspricht Fig. 3 im Aufriss) ist die polarisierende Einheit, welche die Energie in polarisiertem Zustand abgibt. Beide Mehrfachspiralspulen bilden zusammen den Generator.

Ein derart ausgebildetes Gerät ist für alle vorkommenden gravomagnetischen Feldpolaritäten geeignet und kann somit universell an jedem Ort der Erde eingesetzt werden. Durch die Umlenkspulen 100 wird das Feld mehr nach unten gerichtet. Der Windungssinn der Zylinderspulen richtet sich dabei nach dem Zweck der erfindungsgemäßen Vorrichtung: Rechtsgängig sollte die Spule für entfeuchtende Zwecke und linksgängig für befeuchtende Zwecke gewickelt sein.

Diese Spulengebilde empfangen vom Boden gravomagnetische Erdfelder mit der Frequenz des Wasserstoffes. Von oben, in unterer Darstellung mit 1 gezeigt, wird freie kosmische Energie empfangen und in gravomagnetische Energie mit der Frequenz des Wasserstoffes umgewandelt. Die Polarität des abgegebenen Feldes ist je nach Spulenbau entweder links- oder rechtspolarisiert. Die abgegebene Intensität des Feldes ist weitaus stärker als die vorhandene Intensität des gravomagnetischen Feldes der Erde, was in der Darstellung mit 2 gekennzeichnet ist. Dadurch erzeugt das System ein Potential, z.B. im Mauerwerk, wodurch die Wassermoleküle nach unten (bei Rechtspolarisation) oder nach oben (bei Linkspolarisation) wandern (Baufachmappe, 2001). Der Wirkbereich 2, eines Aquapolgerätes beträgt bei einer Aufstellungshöhe von 2,5m mehr als 80m. Im Empfangsbereich der gravomagnetischen Erdfelder, direkt unter dem Gerät und hellgrau dargestellt, stellt sich bei einem entfeuchtenden Aquapolgerät ein befeuchtender Bereich ein, bei einem befeuchtenden Gerät ist es umgekehrt. Dieser Bereich bei einer Aufstellungshöhe von 2,5m hat am Boden einen Durchmesser von etwa 3m (Mohorn, 2000).

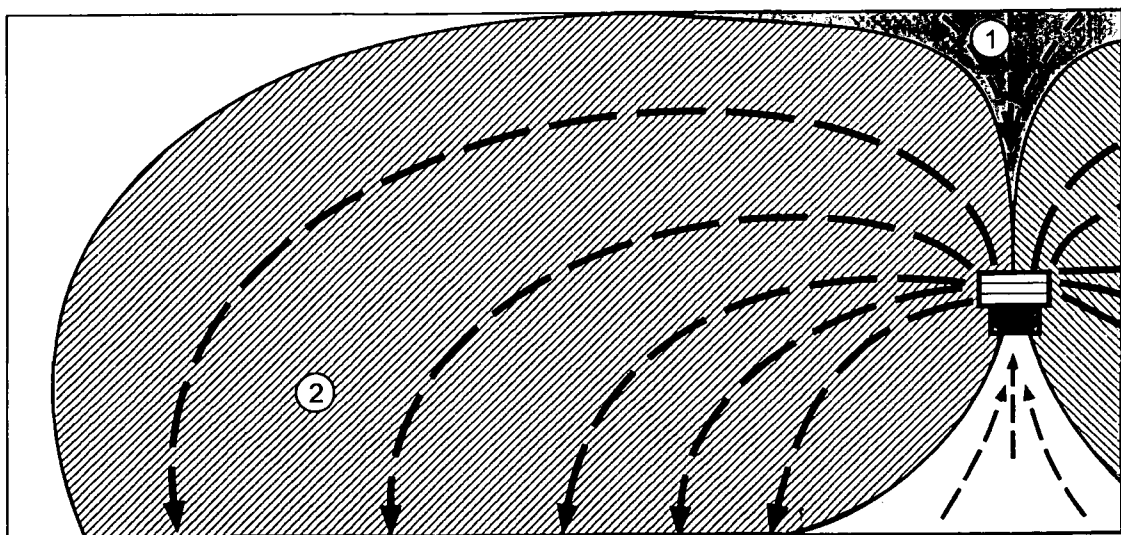


Abb. 1.5 Darstellung der Wirkbereiche des Aquapolgerätes. Die nach unten gerichteten Pfeile stellen im Bereich 2 das entfeuchtende Wirkungsfeld, im Bereich 1 von oben einfließende Energie in das Gerät dar. Die strichlierten, nach oben zeigenden Pfeile beschreiben den befeuchtenden Ansaugbereich des Gerätes (Baufachmappe, 2001).

„Bisher konnte die Wirksamkeit des Aquapol Systems bereits im feuchten Mauerwerk durch Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und über Hochfrequenzmessungen nachgewiesen werden. Weiterhin konnte über geologisch gestörten Bereichen festgestellt werden, dass bei Einsatz des Aquapol Systems und Messungen des Körperwiderstandes am Menschen

(Georhythmogramm nach Dr. med. E. Hartmann, neuerdings „Geo- Bio- Test“ genannt) eine Störfelddämpfung eintritt: Vergleich des Geo- Bio- Tests von ungestörtem zu gestörtem Platz in geologischer Hinsicht ohne und mit Aquapol System.

Durch die gleichzeitigen Messungen von negativen und positiven Ionen in der Luft mittels Zweikanal- Ionometer über einem Kontrollbereich, verglichen mit dem Ansaug- und Wirkungsbereich des Aquapol Gerätes konnte rein physikalisch und reproduzierbar die von Herrn Mohorn angegebene Wirksamkeit des Aquapol Gerätes wissenschaftlich untermauert werden.“ (Lotz, 2003)

Wasserhaushalt von Pflanzen

Überblick

Alles Leben ist an Wasser gebunden. Die ersten Pflanzen bildeten sich in den Ozeanen, wo sie zum Teil bis heute in einem weitgehend unveränderlichen Milieu leben, dessen Gehalt an Wassermolekülen sehr hoch ist. In einer Umwelt, in der der Zustand des Wassers, welcher hier ganz von den gelösten Stoffen abhängt, kaum schwankt. Die Zellen dieser Pflanzen benötigen keine abschließenden Schichten nach außen hin und ein Wasserleitsystem ist ebenso überflüssig, weil sie stets auf dem Wasserpotential ihrer Umgebung bleiben. Die ersten Organismen, die an Land stiegen, waren Grünalgen aus der Verwandtschaft der Charales. Sie waren auf Niederschlagswasser angewiesen, ihre Körpergröße war sehr beschränkt und der Lebensraum der so besiedelt werden konnte war ebenfalls klein. Das geschah im Silur, vor etwa 443 Millionen Jahren, wo der größte Teil des Festlandes der Erde noch Wüste war.

Von da an entwickelten die Pflanzen über drei parallele Wege Möglichkeiten, einen gleichmäßigen und für sie günstigen Wasserzustand zu erhalten. Sie haben unter anderem Wasserverluste an die Atmosphäre durch einen recht wasserundurchlässigen Überzug, der Cuticula, auf den oberirdischen unverholzten Teilen der Pflanze, eingeschränkt. Um die Einnahmen an Wasser zu erhöhen wurden die Wasservorräte des Bodens durch ein weitreichendes und tiefgehendes Wurzelsystem erschlossen. Schließlich musste das Wasser dorthin gelangen wo es gerade am dringlichsten benötigt wurde, wozu von den Kormophyten (=Pflanzen die aus Wurzel, Stamm und Blatt bestehen) ein spezielles Fernleitsystem, das Xylem, entwickelt werden konnte (Richter et. al, 1995).

Wasser ist das Milieu, in dem die biochemischen Prozesse ablaufen (Nultsch, 2001). Verliert eine Pflanzenzelle zunehmend Wasser, muss sie nicht unbedingt absterben, aber sie geht in einen latenten Lebenszustand über. Die Pflanzen heute bestehen größtenteils aus Wasser, welches in ihnen unterschiedlich aufgeteilt ist. In weichem Laub finden sich 80 bis 90% Wasser, in reifen Samen jedoch nur 10 bis 15%. Landpflanzen können kurzfristige Schwankungen der Wasserversorgung auf Grund ihrer Entwicklungserfolge ausgleichen. Dabei werden zwei generelle Möglichkeiten unterschieden:

Poikilohydre Pflanzen wie z.B. Flechten und viele Moose gleichen ihren Wasserhaushalt weitgehend dem Feuchtigkeitszustand ihrer Umgebung an. Sie besitzen kleine Zellen ohne Zentralvacuole (=Speicherorgan), die beim Austrocknen sehr gleichmäßig und ohne Verlust der Lebensfähigkeit schrumpfen. Die Lebensfunktionen wie Atmung und Photosynthese erlahmen dabei. Nach Wiederaufquellen nehmen diese Zellen die Stoffwechseltätigkeit erneut auf.

Homoiohydre Pflanzen wie z.B. Blütenpflanzen haben in ihren Zellen eine große Zentralvacuole. Diese dient als Wasservorrat. Durch das innere wässrige Milieu wird das Protoplasma von den wechselhaften Außenbedingungen weniger abhängig.

Erst durch die Abdichtung der Sprossoberfläche mit einer verdunstungsbehindernden Cuticula und die Regulierbarkeit der Transpiration durch Spaltapparate, brachten die Pflanzen ihren Wasserhaushalt unter Kontrolle. Dadurch war die ergiebige Produktionsleistung gewährleistet, die zur Ausbildung einer über weite Flächen geschlossenen Pflanzendecke auf dem Festland führte.

Wie im Großen, die Differenzierung von Wurzel Stamm und Blatt, gibt es auch im Kleinen eine Differenzierung innerhalb der Pflanzenzellen. Aufgaben wie die Herstellung verschiedener Proteine, die genetische Regulation, und viele andere, welche die heutigen hoch entwickelten Pflanzen erfüllen, erfordern in der Zelle eine Arbeitsteilung. Dies erfordert eine gegenseitige Abgrenzung der einzelnen Kompartimente bei gleichzeitig kontrollierter Durchlässigkeit durch Biomembranen. Diese sind unter anderem der Tonoplast zwischen Vacuole und Grundplasma und das Plasmalemma als Grenze zur Zellwand (Lüttge, 2002). So entstehen die Organellen einer Zelle, wie sie unten abgebildet sind und nun kurz beschrieben werden. In den Plastiden läuft unter anderem die Photosynthese ab. Das Endoplasmatische Retikulum kümmert sich um den Transport von Stoffen, Bildung der Kernhülle und, so wie die freien Ribosomen, um die Proteinsynthese. Die Dictyosomen erledigen die Synthese und den Transport von sauren Polysacchariden. Die Vakuolen dienen der Speicherung und der Aufrechterhaltung des Turgordrucks. Mitochondrien ermöglichen die Atmung und den Fettsäureabbau, Zellwände die mechanische Festigkeit, der Zellkern die genetische Regulation, und Microbodies den Glyoxylsäurezyklus.

Das Grundplasma der einzelnen Zellen ist durch Plasmodesmen miteinander verbunden und bildet so den Symplasten. Unter Apoplasten versteht man alle Räume der Zellen und Gewebe außerhalb des Plasmalemmas. Mit diesem knappen Überblick lassen sich die weiteren Kapitel der vorliegenden Arbeit leichter verstehen.

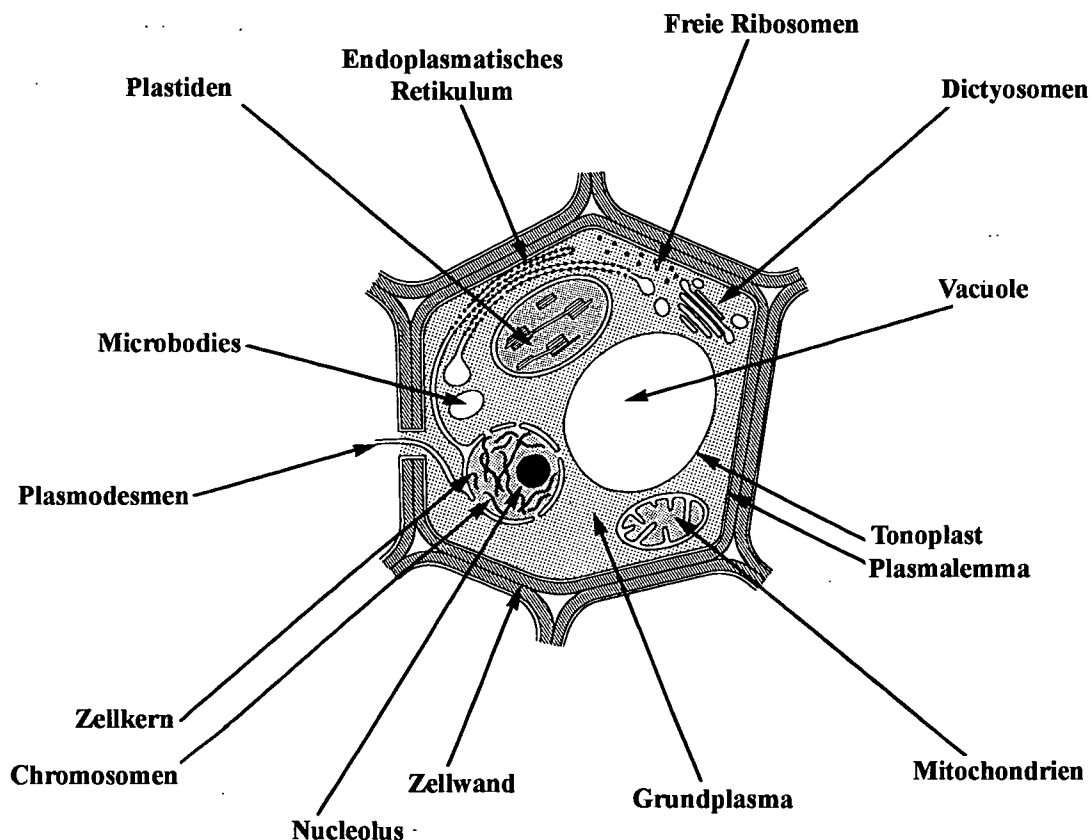


Abb. 1.6 Schematische Darstellung einer Pflanzenzelle im Querschnitt mit ihren kompartimentierten Organen, der Zellwand und Teilen der Zellwände der Nachbarnzellen (Lüttge, 2002)

In der Zelle kommt Wasser folgendermaßen vor (Larcher, 1994).

Konstitutionswasser in chemischer Bindung.

Quellungswasser:

- Hydrationswasser ist an Ionen, gelöste organische Substanzen und Makromoleküle angelagert. Bedingt durch ihren Dipolcharakter heften sich Wassermoleküle aneinander und an geladene Oberflächen. Unmittelbar an der Ionenoberfläche sind die Wassermoleküle durch das elektrostatische Feld des Ions stark gebunden und nahezu unbeweglich. Die Wassermoleküle bauen mehrere übereinander liegende, nach außen hin immer leichter verschiebbliche Schichten strukturierten Wassers auf. Das Hydrationswasser macht nur 5-10% des gesamten Wassers der Zelle aus, doch diese Menge ist unbedingt lebensnotwendig. Schon bei geringer Abnahme des Hydrationswassers kommt es zu schwerwiegenden Strukturstörungen des Protoplasmas.
- Der größere Teil des Quellungswassers ist im Protoplasma und kapillar in der Zellwand gebunden. Pflanzenzellwände ziehen je nach der Dichte der Fibrillennäherung Wasser mit einem Sog von 1,5-15 MPa an sich. Der Druck, mit dem das Wasser an der Oberfläche der Strukturelemente einer Matrix (z. B. Zellwand) haftet, wird Quellungsdruck oder matrikaler Druck genannt.

Depotwasser füllt die Vakuolen aus. Am leichtesten beweglich ist das Wasser in den Kompartimenten der Zelle, die als Lösungsreservoir dienen. In Blättern ist mehr als die Hälfte des vorhandenen Wassers auf diese Weise gespeichert. Auch dieses Wasser ist nicht vollkommen frei verfügbar, es ist osmotisch an gelöste Stoffe wie Zucker, organische Säuren, sekundäre Pflanzenstoffe und Ionen gebunden.

Interstitielles Wasser übernimmt die Transportfunktionen in den Zellwänden, in Zellzwischenräumen und in Leitbahnen des Gefäß- und Siebröhrensystems.

Pflanzen leben nicht isoliert von ihrer Umwelt sondern viel mehr in einem Boden- Pflanzen- Atmosphären- Kontinuum (Hopkins, 2004). Die Pflanze überbrückt das steile Wasserpotentialgefälle zwischen Boden und Luft. Das Sprosssystem der Landpflanzen ragt in den Luftraum, an den es durch Verdunstung ständig Wasser verliert, weil der Spross dem Dampfdruckdefizit der Luft, also einem niedrigen Wasserpotential, ausgesetzt ist. So wird ein Wasserstrom durch die Pflanze in Gang gesetzt, wobei ständig Wasser aus dem Boden nachgeliefert werden muss. Das steilste Potentialgefälle herrscht zwischen der Sprossoberfläche und trockener Luft, dort befindet sich zugleich der größte Übergangswiderstand der Pflanzen. Dieser Übergangswiderstand ergibt sich aus dem großen Energiebedarf für die Wasserverdunstung und dem Durchtrittswiderstand für Wasserdampf durch die Abschlussgewebe. Transpiration, Wasseraufnahme und Wasserleitung von den Wurzeln zu den transpirierenden Flächen sind die untrennbar miteinander gekoppelten Grundvorgänge des Wasserhaushaltes. Das Wasserdampfdruckdefizit der Luft ist dabei die antreibende Kraft für die Verdunstung, das Wasser im Boden die entscheidende Versorgungsgröße. Der Wasserhaushalt wird durch einen ständigen Nachstrom von Wasser aufrechterhalten, seine Gleichgewichtslage ist somit ein Fließgleichgewicht im wörtlichen Sinn (Larcher, 1994).

Für die biochemische Aktivität des Protoplasmas ist nicht die vorhandene Wassermenge, sondern der thermodynamische Zustand des Wassers wichtig. Der thermodynamische Zustand des Wassers in der Zelle kann mit dem chemischen Potential reinen Wassers verglichen und als Arbeitsvermögen ausgedrückt werden. Das relative Wasserpotential Ψ ist die Arbeit, die nötig ist, um gebundenes Wasser auf das Potentialniveau von reinem Wasser zu heben. Relative Wasserpotentiale werden in Energieeinheiten (J/kg) angegeben, die über die Beziehung $1 \text{ J/g} = 1 \text{ MPa}$ in Druckgrößen übertragbar sind. In Lösungen z.B. salziges Wasser ist Wasser osmotisch gebunden, es muss Energie zugeführt werden, um dieses Wasser wieder

salzfrei zu machen. Das osmotische Wasserpotential Ψ_{π} , ist niedriger als jenes des reinen Wassers, es ist daher stets negativ. Das an Kolloide und hydrophile Oberflächen gebundene Quellungswasser besitzt ebenfalls ein negatives Potential (matrikales Wasserpotential Ψ_{τ}). Setzt man Wasser unter Druck, so wird seine Energie erhöht, das Druckpotential Ψ_P ist gegenüber druckfreiem Wasser positiv. Zur Kennzeichnung der Wasserverfügbarkeit wird das Wasserpotential des wässrigen Systems (Zelle, Zellkompartimentinhalt, Außenlösung) bezogen auf das Potential von reinem Wasser angegeben. Die Wasserverfügbarkeit ist umso schlechter, je negativer das Potential des in Betracht gezogenen Systems ist.

Zwischen Orten ungleichen Wasserpotentials besteht eine Potentialdifferenz $\Delta\Psi$. In Analogie zur elektrischen Spannung, die zwischen Orten mit verschiedenen elektrischen Potentialen auftritt, kann man auch hier von einer Spannung sprechen, der Saugspannung. Diese geht vom System mit dem niederen Wasserpotential aus. Jede Potentialdifferenz erzeugt einen Potentialausgleich. Im Wasserhaushalt der Zelle wird dieser durch den Wasser- oder Stofftransport bewerkstelligt. Wenn kein Diffusionshindernis vorliegt, stellt sich innerhalb der Zelle und zwischen den Zellen und ihrer Umgebung sehr bald ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Das hohe Dampfdruckdefizit der Luft oder salzhaltiges Bodenwasser entziehen den Zellen Wasser und erniedrigen das Wasserpotential des Systems. Umgekehrt strömt den Zellen mit stärker negativem Wasserpotential durch Wasserverschiebung aus der Umgebung Wasser zu. Die Gleichgewichtslage für einen gegebenen Wasserzustand errechnet sich aus (Larcher, 1994):

$$\Psi_Z = (-)\Psi_{\pi} + (-)\Psi_{\tau} + (+)\Psi_P$$

Ψ_Z ... Wasserpotential der Zelle
 Ψ_{π} ... osmotisches Wasserpotential
 Ψ_{τ} ... matrikales Potential
 Ψ_P ... Druckpotential

Ein negatives Wasserpotential Ψ_Z besagt, dass die Zelle als Ganzes unter Saugspannung steht. Unter osmotisches Wasserpotential Ψ_{π} versteht man den Effekt von gelösten Stoffen auf das Wasserpotential. Gelöste Stoffe setzen das Wasserpotential durch Verdünnung des Wassers herab. Dieser Effekt hängt primär mit der Entropie zusammen, weil das Vermischen von den Stoffmolekülen mit den Wassermolekülen die Ordnung im System verringert (Taiz, 1998). Es muss Energie zugeführt werden um die vermischten Substanzen wieder zu trennen. Diese Energie steckt im osmotischen Potential.

Das matrikale Potential Ψ_{τ} berücksichtigt die Reduktion der Energie des Wassers, wenn dieses nur als dünne Oberflächenschicht mit einer Dicke von etwa zwei Molekülschichten vorliegt (Quellungswasser, Hydratationswasser). Dies ist der Fall wenn Wasser an Zellwänden oder trockenen Samen absorbiert ist (Taiz, 1998). Das Matrixpotential entspricht jener Energie die erforderlich ist um dieses Hydratationswasser von der Oberfläche, an die es anlagert, zu entfernen. Das matrikale Potential Ψ_{τ} ist in den meisten Fällen vernachlässigbar klein.

Der Term Ψ_P bezeichnet den hydrostatischen Druck der Lösung. Den positiven hydrostatischen Druck innerhalb einer Zelle nennt man Turgordruck. Der hydrostatische Druck kann aber auch negativ sein, dort wo sich eine Saugspannung, beispielsweise im Xylem, entwickelt. Der hydrostatische Druck wird als Abweichung vom Atmosphärendruck gemessen. In einem offenen Becherglas beträgt Ψ_P für Wasser 0Mpa, obwohl der absolute Druck bei etwa 0,1Mpa, einer Atmosphäre, liegt (Taiz, 1998).

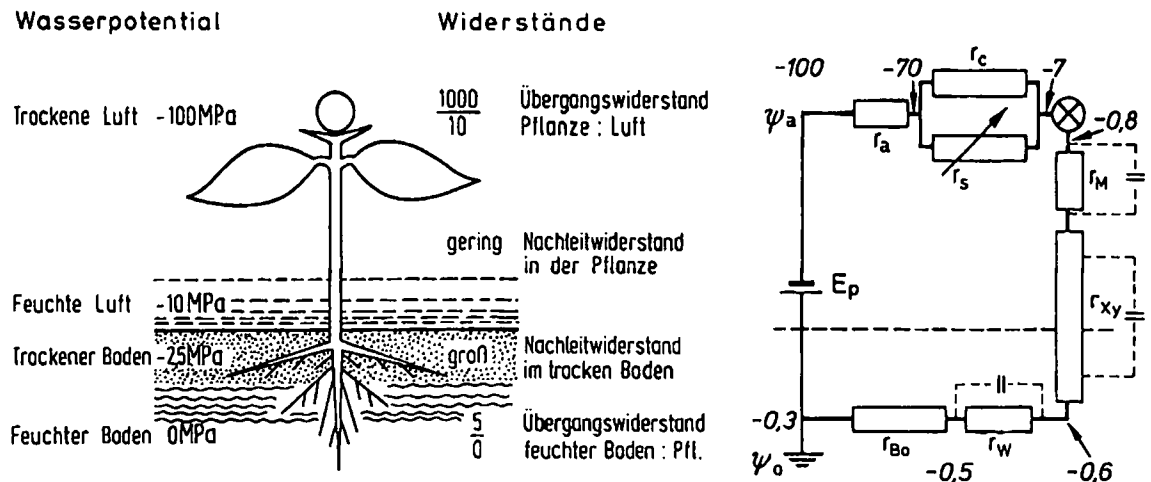
Im wassergesättigten, also turgeszenten, Zustand erreicht der Protoplast sein größtes Volumen und übt auf die Zellwand den stärksten Druck aus. Durch den Binnendruck im Inneren der

Zelle wird die Zellwand maximal gedehnt. Der Gegendruck der Zellwand kompensiert daher die Saugwirkung des Zellsaftes. Die Wasseraufnahme kommt so zum Stehen.

Wasserverlust hat eine Verkleinerung des Vakuolenvolumens und Erhöhung der Zellsaftkonzentration zur Folge. Die Zellwand übt immer weniger Druck auf den Protoplasten aus, bis das Zellvolumen auf einen Grenzwert schrumpft, von dem ab die Zellwand sich nicht mehr weiter zusammenziehen kann (Turgorverlustpunkt). Bei weiterer Austrocknung löst sich der Protoplast von der Zellwand ab. Werden bei extremer Austrocknung die Biomembranen geschädigt, dann bricht das osmotische System und damit das Saugvermögen der Zellen jäh zusammen (Hopkins, 2004).

Im Gewebeverband wird der Wanddruck durch Nachbarzellen verstärkt oder vermindert, es muss daher die Gewebespannung mitberücksichtigt werden. Wenn die Nachbarzellen gleichsinnig mit dem Wanddruck wirken, wird der Zustand der Turgeszenz schon bei niedrigen Wassergehalten (bei einem kleineren Vakuolenvolumen) erreicht. Das ist wichtig für zartwandige Gewebe, die auf diese Weise eine Turgorfestigkeit ohne allzu große Wasserfüllung erlangen. Bei flächig verwachsenen und starren Zellwänden können diese den schrumpfenden Protoplasten nicht ausreichend folgen. Es tritt dann ein negatives Turgorpotential auf. Zwischen aneinandergrenzenden Zellen mit unterschiedlicher Wanddicke und Elastizität kann dadurch bei schlechter Wasserversorgung eine Wasserverschiebung von Zellen mit weicher Wand (z. B. wasserspeichernde Gewebe in sukkulenten Blättern und Sprossen) zu solchen mit weniger elastischer Wand (z. B. Palisadenparenchymzellen) begünstigt werden, wenn ein entsprechender osmotischer Gradient vorhanden ist.

Für den Wasserdurchsatz gelten die Gesetzmäßigkeiten, wie sie für den elektrischen Stromfluss durch das Ohmsche Gesetz beschrieben werden. Es ist daher durchaus sinnvoll, die Verhältnisse im System Boden- Pflanze- Atmosphäre anhand von Analogschaltbildern schematisch darzustellen. Das Potentialgefälle in diesem Kontinuum ist der Motor des Wassertransports durch die Pflanze. Das Wasserpotential Ψ_z an einer bestimmten Stelle in der Pflanze ist um so negativer, je niedriger das Wasserpotential im Boden ist, je mehr die Schwerkraftwirkung (Ψ_g) zur Geltung kommt, je größer die verschiedenen Übergangs- und Nachleitwiderstände zwischen dem Boden und dem Bezugspunkt im Spross sind und je stärker die Pflanze durchströmt wird. Daraus ist abzuleiten, dass ein steiles Potentialgefälle in der Pflanze nur bei großer Transpirationsintensität zu erwarten ist (Larcher, 1994).



E_p ... Evaporation
 Ψ_0 ... Wasserpotential der flüssigen Phase
 Ψ_a ... Wasserpotential der Luft
 r_{Bo} ... Nachleitwiderstände im Boden
 r_w ... Transportwiderstand in Wurzeln
 r_{xy} ... Leitungswiderstand in den Gefäßen

r_m ... Transportwiderstand im Mesophyll
 r_c ... cuticulärer Widerstand
 r_s ... stomatärer Widerstand
 r_a ... Grenzwiderstand der Sprossoberfläche
 $\parallel$... Speicherkapazitäten
 $\otimes$... Phasenübergang flüssig – gasförmig

Abb. 1.7 Veranschaulichung der Wasserpotentiale und Wasserleitungswiderstände vom Boden über die Pflanze in die Atmosphäre, links schematisch und rechts durch ein elektrotechnisches Schaltbild dargestellt (Larcher, 1994).

Die Wasseraufnahme

Die Pflanzen können Wasser über ihre ganze Oberfläche aufnehmen, in bevorzugtem Maß erfolgt die Wasserversorgung der Pflanze jedoch aus dem Boden. Bei den höheren Pflanzen übernimmt diese Aufgabe die Wurzel als spezialisiertes Absorptionsorgan. Niedere Pflanzen sind wurzellos und daher auf direkte Wasseraufnahme durch ihre oberirdischen Teile angewiesen. Durch die Wurzel entnimmt die Pflanze dem Boden nur so lange Wasser, als ihre Feinwurzeln ein niederes Wasserpotential als der Boden in ihrer unmittelbaren Umgebung aufweisen. Die Wasseraufnahme ist um so ergiebiger, je größer die absorbierende Oberfläche des Wurzelsystems ist und je leichter die Wurzeln dem Boden Wasser entziehen können. Dies lässt sich in folgender Formel darstellen (Larcher, 1994).

$$W_a = A \frac{\Psi_B - \Psi_w}{\Sigma r}$$

W_a Wassermenge die aufgenommen wird
 A Austauschfläche
 Ψ_B Wasserpotential des Bodens
 Ψ_w Wasserpotential der Wurzel
 Σr Summe der Transferwiderstände von Boden und Wurzel

Im Laufe der Vegetationsperiode verkorken die älteren Abschnitte des Wurzelsystems, wodurch sich die Diffusionseigenschaften der Wurzel ändern, vor allem aber dehnt sich die Wurzeloberfläche durch das fortwährende Wachstum der Wurzelspitzen aus. Es muss daher die zeitliche Dynamik des Aufnahmevermögens des Wurzelsystems stets berücksichtigt werden.

Die Wurzeln entwickeln meist negative Wasserpotentiale von wenigen Zehnteln MPa, die aber völlig ausreichen, wie folgende Grafik zeigt, um aus den meisten Böden den größten Teil des Haftwassers zu entnehmen. Die Pflanzen werden nach ihrer Fähigkeit Haftwasser aus den Bodenporen zu entnehmen, unterteilt in:

Xerophyten: Pflanzen die sich an extrem trockene Standorte angepasst haben z.B. Kakteen.

Mesophyten: Pflanzen, die an mäßig feuchten Orten vorkommen. Sie nehmen dadurch eine Stellung zwischen Hygrophyten und Xerophyten ein z.B. die Kulturpflanzen unserer Breiten (Ehlers, 1996).

Hygrophyten: Pflanzen die dauernd oder doch meistens im Wasser leben z.B.

Sumpfpflanzen, Süßwassermakrophyten, Planktonalgen, schattenliebende Kräuter der Wälder und andere (Ehlers, 1996).

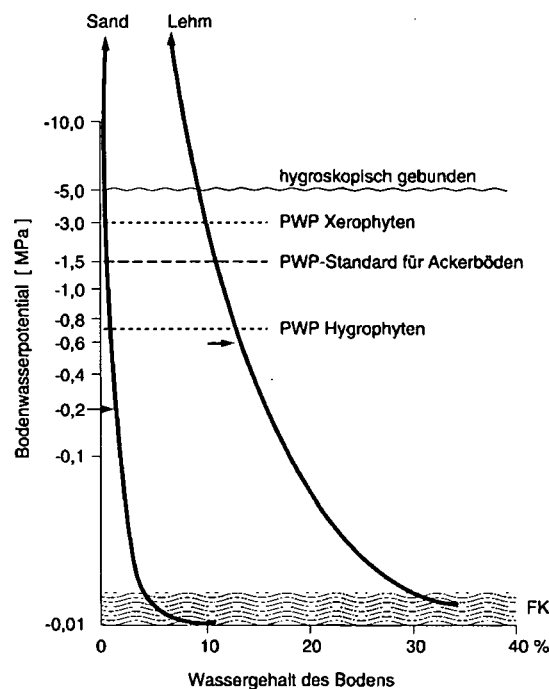


Abb. 1.8 Saugspannungs- Wassergehaltskurven der Bodenarten Sand und Lehm und die unterschiedliche Fähigkeit von Pflanzen dem Boden Wasser zu entziehen. PWP = Permanenter Welkepunkt FK = Feldkapazität (Larcher, 1994).

Durch eine Potentialerniedrigung von nur -0,2 MPa entnehmen die Wurzeln mehr als 2/3 des in einem Sandboden speicherbaren Wassers. Ein Lehmboden, der durch seine Feinporigkeit das Wasser stärker festhält, gibt die Hälfte seines Haftwasservorrats bei einer Saugspannung der Wurzeln von nur -0,6 MPa her. Manche Pflanzen können in begrenztem Ausmaß ihr Wurzelpotential aktiv erniedrigen und so dem Boden etwas mehr Wasser entziehen. Kulturpflanzen humider Gebiete sind imstande, das Wasserpotential ihrer Wurzeln bis auf -1 bis -3 MPa abzusenken. Für Waldbäume gelten Werte von -2 bis -4 MPa als äußerste Grenze (Larcher, 1994). 1 MPa entspricht 10 bar.

Durch die Wasserentnahme im Nahbereich der Wurzeln wird Wasser aus feuchteren Bodenbezirken angezogen. Die Wassernachleitung erfolgt kapillar, langsam und nur über kurze Strecken von einigen Millimetern bis Zentimetern. Mit zunehmender Ausschöpfung des Wassers im Porensystem nimmt der Nachleitwiderstand, vor allem in tonigen Böden, stark zu. In grobporigen Sandböden reißen die Wasserfäden des Kapillarsystems schon bei geringer Spannung ab, so dass die Nachleitung sehr bald zusammenbricht.

Eine vertikale Wasserverlagerung kommt bei Trockenheit auch durch innere Wasserleitung im Wurzelsystem von Pflanzen zustande. In der Nacht wird Wasser, das den tiefen, feuchten Bodenhorizonten entnommen wurde, nicht nur dem Spross, sondern auch den oberflächlichen Wurzeln zugeleitet. Wenn das Wasserpotential der obersten Bodenschichten niedriger ist als jenes der Wurzeln, tritt Wasser in die Umgebung aus. Durch diese Wasserhebung können Arten mit oberflächlicher Bewurzelung in Gemeinschaft mit Tiefwurzlern besser Dürreperioden überdauern.

Das Wurzelsystem der Pflanzen entwickelt entsprechend dem artspezifischen Bauplan nach Maßgabe der örtlichen Möglichkeiten (Bodenstruktur, Tiefgründigkeit) ein oberflächliches, tief greifendes oder stockwerkartiges Wurzelsystem. Zwischen der Ausgestaltung des Wurzelsystems und dem Funktionsverhalten der Pflanze bestehen enge Zusammenhänge. *Intensivwurzler* z. B. Palmen, vergrößern ihre aktive Wurzeloberfläche durch Verdichtung des Wurzelfilzes, *Extensivwurzler* erschließen durch ein weit ausgebreitetes Wurzelwerk große Bodenvolumina oder durch tief greifende Senkwurzeln entfernte feuchte Bodenbereiche z. B. grundwasserschöpfende Pflanzen.

Die Wurzeln sind auf der Suche nach Wasser ständig in Bewegung. Bei fortschreitender Bodenaustrocknung sterben stellenweise Wurzelteile ab, während Wurzeln an anderen Stellen einige Meter weiterwachsen und sich dicht verzweigen. Ununterbrochenes Wurzelwachstum ist eine wichtige Voraussetzung für eine ausgiebige Erschließung des Wasservorrats im Boden.

Flachgründige, verdichtete, vernässte Böden behindern und kalte Böden verzögern das Wachstum sowie die Ausbreitung der Wurzeln. Auf solchen Standorten ist die Wachstumshemmung die Hauptursache einer unzulänglichen Wasserversorgung. Für die Beurteilung der Absorptionsbedingungen genügt daher nicht nur die Kenntnis bodenkundlicher Parameter. Obwohl konventionelle Grenzwerte für die Wasserverfügbarkeit im Boden (z. B. "*nutzbare Feldkapazität*") für landwirtschaftliche Belange als brauchbare Richtwerte weiterhin dienen, sollte für kausalanalytische Fragestellungen, insbesondere im Bereich der Geobotanik, jedenfalls auch der *Wasserzustand der Pflanze* erfasst werden. Hierfür ist besonders das Blattwasserpotential unter Gleichgewichtsbedingungen (z. B. das Basispotential am Ende der Nacht oder bei künstlich unterdrückter Transpiration) aufschlussreich, das annähernd jenem in der Rhizosphäre entspricht. Dieses Potential wurde auch im Zuge dieser Arbeit mit der Scholander Bombe gemessen (Larcher, 1994).

Der Weg des Wassers in der Pflanze

Das Wasser tritt vom Boden durch die Wurzelhaare der Rhizodermis, die sich in den ersten Zentimetern nach der Spitze der Wurzel befinden, in die Pflanze ein. Es können sich aber auch ältere, verkorkte Teile der Wurzel im geringeren Maß an der Wasseraufnahme beteiligen. Danach wandert das Wasser durch die Wurzelrinde, dem Kortex einem parenchymatischen also ausdifferenzierten Gewebe, bis zur Endodermis. Die Wurzelrinde übernimmt die Aufgabe eines Staubeckens, das kurzfristige Zuflussschwankungen aus dem Boden ausgleicht. Die Zellwände der Endodermis sind von einem wasserundurchlässigen Streifen, dem Casparyschen Streifen, umgeben, der den Wassertransport an dieser Stelle nur symplastisch ermöglicht. In der untenstehenden Abbildung wird links der Längsschnitt, rechts der Querschnitt durch eine Wurzelspitze gezeigt um zu verdeutlichen wie der Casparysche Streifen liegt. Dieser muss zwar zur Wasserversorgung überwunden werden, dafür aber bleibt die Wanderung von Wasser und Lösungen durch die Endodermis vollständig unter der Kontrolle des lebenden Protoplasmas der Zellen. Der Pericykel liegt zwischen Kortex und Zentralzylinder und bildet die Mutterschicht für Seitenwurzeln. Ferner wird der Zentralzylinder mit seinem Xylem für den Wassertransport und dem Phloem für den Nährstofftransport zu einem viertel dargestellt (Nobel, 1999). In der linken Hälfte der Darstellung ist

auch die zeitliche Entwicklung der Wurzel ersichtlich. Die teilungsfähige Zone, in welcher immer neue Zellen gebildet werden ist das Apikalmeristem, das von den widerstandsfähigen Zellen der Wurzelspitze geschützt wird. Die neu im Meristem gebildeten Zellen erfahren gleich darauf in der Streckungszone eine Dehnung auf ihre spätere Länge. Bis zu diesem Moment sind alle diese neu gebildeten Zellen gleich und noch nicht für eine bestimmte Funktion ausgerüstet. Erst in der Differenzierungszone werden die Zellen verändert und so gestaltet, damit sie ihre Aufgaben wie z.B. Wasseraufnahme und Transport erfüllen können.

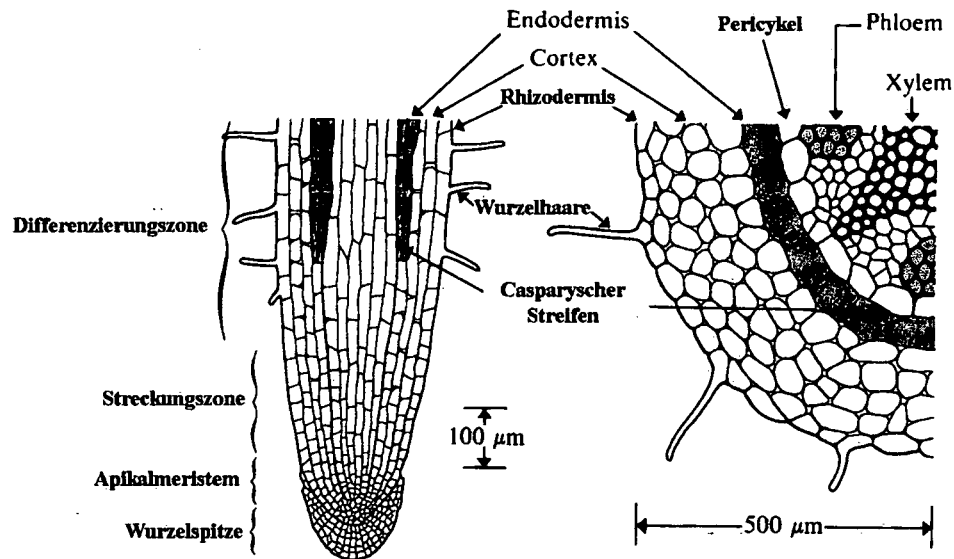


Abb. 1.9 Links Längenschnitt und rechts Querschnitt durch eine Pflanzenwurzel in verschiedenen Maßstäben dargestellt. Auf Grund des Casparyschen Streifens kann Wasser nur symplastisch in die Wasserleitorgane der Pflanze gelangen (Nobel, 1999).

Wasser wird in der Pflanze durch Wasserverschiebung von Zelle zu Zelle (Nahtransport) sowie durch Diffusion und durch Wasserleitung als Massenstrom in Xylembahnen (Ferntransport) entlang dem Wasserpotentialgefälle befördert. Die Wasserverschiebung im Gewebeverband erfolgt entlang dem hydrostatischen Gradienten von Zelle zu Zelle und nach dem Dochtprinzip in den Zellwänden. Mit geeigneten Indikatoren lassen sich der Weg und die Wanderungsgeschwindigkeit des Wassers sowie eventuelle Ausbreitungshindernisse feststellen.

Für den radialen Wassertransport durch den Gewebeverband der Wurzel, gibt es drei Wege die wie folgt beschrieben werden (Richter et. al, 1995):

- 1.) Der Symplastenweg: Unter dem Symplasten versteht man die Gesamtheit des Protoplasmas das durch Plasmodesmen über die Zellgrenzen hinweg verbunden ist. Plasmodesmen sind Plasmastränge welche die Zellwand durchtreten. Das Wasser wird auf diesem Weg zuerst einmal aus den Zellwänden in das Protoplasma der Rhizodermiszellen wandern. Sobald es das Plasmalemma überwunden hat, bleibt es im Protoplasma der Zellen zwischen Plasmalemma und Tonoplast und strömt durch die Plasmodesmen von einer Zelle in die nächste. Die Endodermis kann auf diese Weise ohne Behinderung durch den Casparyschen Streifen gequert werden.
- 2.) Der Vakuolenweg: Hier dringt Wasser aus den Zellwänden in die Vakuolen der Rhizodermiszellen ein, indem es das Plasmalemma und den Tonoplasten durchquert. Dann tritt es auf der anderen Seite wieder aus. Beim Weg von Vakuole zu Vakuole quert jedes Wassermolekül somit zweimal das Protoplasma mit seinem Tonoplasten

und Plasmalemma sowie einmal die Zellwand. So gelangt das Wasser bis in den Zentralzylinder und schließlich in die Gefäße.

- 3.) Der Zellwand- Endodermis- Weg: Das Wasser wandert apoplastisch in den Zellwänden von der Rhizodermis bis zur Endodermis. Die Radialwände der Zellen der Endodermis sind durch Suberineinlagerungen, welche den Casparyschen Streifen bilden, wasserundurchlässig. Hier muss das Wasser durch das Plasmalemma treten und in das Protoplasma eindringen. Nach symplastischem passieren der Endodermis könnte dann wieder der Zellwandweg für den Weitertransport verwendet werden.

Das Wasser erreicht so die Parenchymzellen die um die Gefäße liegen. Hier wandert es in das Xylem, dem Gefäßsystem der Pflanze. Dieses besteht aus zwei verschiedenen Typen von Elementen: Tracheiden und Tracheen. Sie bestehen aus Zellen die im Endstadium ihrer Entwicklung verholzen und absterben. Diese Zellen der Leitelemente des Xylems enthalten keinen lebenden Protoplasten mehr und können daher auch keinen Turgordruck entwickeln. Aus diesem Grund und um den Transpirationssog standhalten zu können sind die Zellen des Xylems mit Lignin verstärkt. Die lignifizierten Zellwände verhindern einen Kollaps der Leitelemente bei starkem Unterdruck. Sie verfügen auch, allerdings in beschränktem Maße, über elastische Eigenschaften, können also dem Unterdruck nachgeben und sich zusammenziehen. Neben ihrer Transportfunktion übernehmen Tracheiden auch die Aufgabe der Stabilisierung der gesamten Leitbündel in der Sprossachse.

Die Tracheiden stellen im Vergleich zu den Tracheen die ursprünglicheren Leitelemente dar. Tracheiden haben noch den Charakter von Einzelzellen. Sie sind prosenchymatisch, also lang gestreckt und erreichen eine Länge von bis zu 10mm bei einem Durchmesser von 30µm. Ihre Zellwände sind vollständig verholzt, jedoch durch zahlreiche Tüpfel in den Querwänden durchbrochen die den Transport in Längsrichtung ermöglichen. Als Tüpfel bezeichnet man generell unverdickte Bereiche der Zellwand, an denen die primäre Zellwand dünn ist und die sekundäre Zellwand fehlt. Diese liegen im Bereich von Plasmodesmen. Dadurch wird der Übertritt vom Xylemsaft von einem Gefäß in ein benachbartes Gefäß, also ein radialer Transport, möglich.

Bei Tracheen sind die Einzelzellen zum Teil nicht mehr zu erkennen. Sie gehen aus mehreren Zellen hervor, deren Querwände im Zuge ihrer Entwicklung teilweise oder vollständig aufgelöst werden. So können die Tracheenglieder im Verbund durchgehende Röhren bis zu einer Länge von einem Meter bei einem Durchmesser von 400µm bilden. Tracheen weisen auch einen geringeren Transportwiderstand als Tracheiden auf und benötigen eine geringere Verstärkung der Zellwände (Munk, 2001).

Im Xylem, welches also aus toten Zellen besteht, findet der Axialtransport des Wassers statt. Das Gefäßsystem ist auf rasche Weiterleitung des Wassers in der ganzen Pflanze spezialisiert. In den Blättern teilen sich die Xylembahnen auf feine Verästelungen auf, an deren Enden das Wasser vom Gefäßbündelparenchym übernommen wird. Von dort aus verteilt es sich auf die Mesophyllzellen in den Blättern der Pflanze. Das Phloem dient zur Weiterleitung der zuckerhaltigen Assimilationsprodukte der Blätter zu den Wurzeln und besteht aus lebenden Zellen, den Siebröhren. Das Kambium ist das teilungsfähige Gewebe bei den Zweikeimblättrigen und den Nadelbäumen wo es das sekundäre Dickenwachstum bewirkt, nicht aber bei den Einkeimblättrigen. Bei jungen Pflanzen und bei den krautigen Pflanzen liegt das Kambium zwischen Xylem und Phloem und heißt daher fasciculäres Kambium (Schubert, 1993). Die folgende Darstellung soll den Axialtransport des Wassers im Zentralzylinder der Pflanze veranschaulichen (Nobel, 1999).

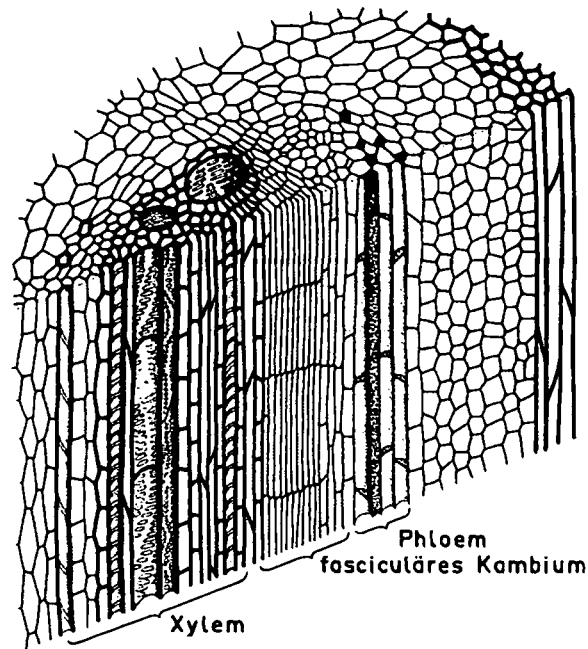


Abb. 1.10 Axialtransport von Wasser im Xylem und Assimilaten im Phloem im auszugsweise dargestellten Zentralzylinder von Pflanzen (Nobel, 1999).

Die Wassermenge, die in der Zeiteinheit durch das Leitungssystem befördert wird, ist abhängig von vielen verschiedenen Faktoren wie Leitfläche und Leitungswiderstände, vom physiologischen Zustand der Pflanze (z.B. dem Spaltöffnungszustand) und von den Umweltbedingungen. Sie lässt sich mit folgender Formel einfach darstellen:

$$J^{\text{Wasser}} = v * A$$

J^{Wasser} ... Wasserdurchsatz
 v ... Geschwindigkeit des Transpirationsstromes
 A ... Leitfläche

Die Leitfläche einer Sprossachse oder eines Blattstiels ist die Summe der Querschnittsflächen aller wasserleitenden Xylemelemente (Larcher, 1994).

Die maximal mögliche Geschwindigkeit des Transpirationsstromes ist je nach Pflanzentyp und Art des Gefäßsystems verschieden. Sie variiert auch zwischen verschiedenen Stellen der Pflanze (Blätter, Stamm, Wurzel). Auch innerhalb des Tagesgangs gibt es Unterschiede in der Strömungsgeschwindigkeit. Solange die Wasseraufnahme nicht behindert ist, nimmt die Geschwindigkeit des Xylemstroms mit der Transpirationsintensität zu. Beispiele für die Geschwindigkeit des Transpirationsstromes bei einigen Pflanzentypen (Lüttge, 2002):

Pflanzentyp	Geschwindigkeit in m/h
Nadelgehölze	1,2
mediterrane Hartlaubgewächse	0,4 bis 1,5
Laubhölzer zerstreutporig	1 bis 6
Laubhölzer ringporig	4 bis 44
krautige Pflanzen	10 bis 60
Lianen	150

Tab. 1.1 Beispiele für die Geschwindigkeit des Transpirationsstromes bei einigen Pflanzentypen (Lüttge, 2002)

Wie in der Tabelle gezeigt, kann in krautigen Pflanzen, wie sie bei dieser Arbeit verwendet wurden, die Strömungsgeschwindigkeit sehr hoch werden.

Für den Wasserhaushalt der Gesamtpflanze ist die Angabe der relativen Leitfläche aussagekräftig. Die relative Leitfläche ist das Verhältnis zwischen der Xylemleitfläche und der Blattoberfläche bzw. der Blattmasse (z.B. Frischgewicht der Blätter). Die relative Leitfläche ist in Pflanzen die sehr viel Wasser verdunsten besonders groß. Sie ist außerdem auf die Größe der Pflanze abgestimmt und passt sich während des Wachstums an die Feuchtigkeitsbedingungen an. Beispiele für die relative Leitfläche werden in folgender Tabelle angeführt (Larcher, 1994).

Pflanzentyp	relative Leitfläche in mm ² /g
Wüstenpflanzen	3 bis 5
Kräuter auf sonnigen Standorten	0,5 bis 2
Bäume der gemäßigten Zone	0,5
Schattenpflanzen	0,2
Wasserpflanzen, Sukkulenten	0,02 bis 0,1

Tab. 1.2 Beispiele für die relative Leitfläche von einigen Pflanzentypen (Larcher, 1994).

Der Xylemsaft besteht nicht aus reinem Wasser sondern auch aus gelösten, zum Teil gasförmigen, Substanzen. Der Xylemsaft ist somit physikalisch instabiler als reines Wasser. Die Wassersäule im Xylem kann daher schon bei wesentlich niedrigeren Zugspannungen oder Druckgradienten abreißen als reines Wasser. Gase zeigen unter geringem Druck die Tendenz aus der Lösung in die gasförmige Phase überzutreten und so Gasblasen im Xylem zu bilden. Diese Gasblasen nennt man Kavitation (Munk, 2001). Aber auch unter erhöhter Anspannung des Wassertransportsystems wie sie bei Nachleitschwierigkeiten aufgrund von Dürre und Bodenfrost auftreten, oder durch mechanische Belastungen wie bei Wind, kann der Wasserfaden in den Gefäßen plötzlich abreißen. Es tritt dann durch den Zusammenbruch des Unterdruckes (Kavitation) Luft in die Gefäße ein, die lokale Unterbrechungen (Embolien) im Xylemstrom verursachen. Solche Unterbrechungen der Wassersäule sind bei Pflanzen nicht ungewöhnlich, können aber zur Dehydration und zum Absterben der Blätter führen, weil die Haupttransportleitungen für das Wasser blockiert werden. Die Auswirkungen der Kavitation werden von der Pflanze wie folgt abgemildert: Als erstes wird die Ausbreitung der Gasblase an den getüpfelten Wänden zwischen überlappenden Tracheiden und Tracheen aufgehalten. Da die Xylemkapillaren miteinander verbunden sind kann jetzt das Wasser an der blockierten Stelle vorbei geleitet werden. In der Nacht, bei niedriger Transpiration, ist das Wasserpotential in den Gefäßen weniger negativ und Wasserdampf sowie gelöste Gase gehen wieder in den flüssigen Zustand über (Taiz, 1998). Pflanzen mit hoher spezifischer Xylemleit-

fähigkeit sind für Embolien anfälliger als solche mit englumigen Leitelementen. Auch in krautigen Pflanzenarten können Embolien auftreten (Larcher, 1994).

Wasserabgabe

Die Pflanze entlässt Wasser in Dampfform bei der Transpiration und gelegentlich auch in flüssiger Form durch Guttation. Die Guttation ist mengenmäßig allerdings sehr gering, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

Die Transpiration der Pflanzen folgt den Gesetzmäßigkeiten der Wasserverdunstung von feuchten Oberflächen. Wasser verdunstet von der gesamten äußeren und von allen inneren Oberflächen der Pflanze, die mit Luft in Berührung kommen. Das sind bei Sprosspflanzen in erster Linie die cutinisierten Epidermisaußenwände und verkorkte Oberflächen des Periderms, wobei diese nur minimal zur Verdunstung beitragen. Im Inneren der Pflanzenorgane verdunstet Wasser von der Oberfläche der Zellen, die an Interzellularen grenzen. Interzellularen sind die mit Luft gefüllten Räume zwischen Zellwänden von benachbarten Zellen. Dort geht das Wasser zunächst von der flüssigen Phase in die Dampfphase über, dann entweicht der Wasserdampf durch die Spaltapparate, die Stomata, ins Freie (Larcher, 1994). Die Gesamtfläche der Spaltöffnungen eines gewöhnlichen Laubblattes macht in der Regel weniger als 2% der Blattoberfläche aus. Trotzdem kann ein Blatt im Extremfall bis zu 70% der Wassermenge durch Transpiration verlieren, die eine gleich große freie Wasseroberfläche durch Evaporation verlieren würde. Bei einer freien Evaporationsfläche können die Wassermoleküle, außer am Rand, nur senkrecht zur Oberfläche in die gasförmige Phase übertreten. In andere Richtungen austretende Wassermoleküle behindern sich beim Phasenübergang gegenseitig. Bei der kleinen Evaporationsfläche einer Spaltöffnung tritt dieser Effekt nur in deren Mitte auf. Am Rand der Öffnung können die Wassermoleküle in alle Richtungen diffundieren, der Übertritt in die gasförmige Phase ist also erleichtert (Munk, 2001). Von der Körperoberfläche der Pflanzen diffundiert der Wasserdampf in die anliegende Luftschicht und in den freien Luftraum. Die Pflanze ist in der Lage ihre Transpiration auf Kosten der Produktion durch das Schließen der Spaltöffnungen zu verringern. Durch die geschlossenen Spaltöffnungen kann kein Kohlendioxyd (CO_2), das für die Photosynthese benötigt wird, aus der Luft aufgenommen werden. Untenstehende Abbildung zeigt den Querschnitt durch ein Blatt wobei die grünen Pfeile den Weg des Wassers durch die Zellen darstellen.

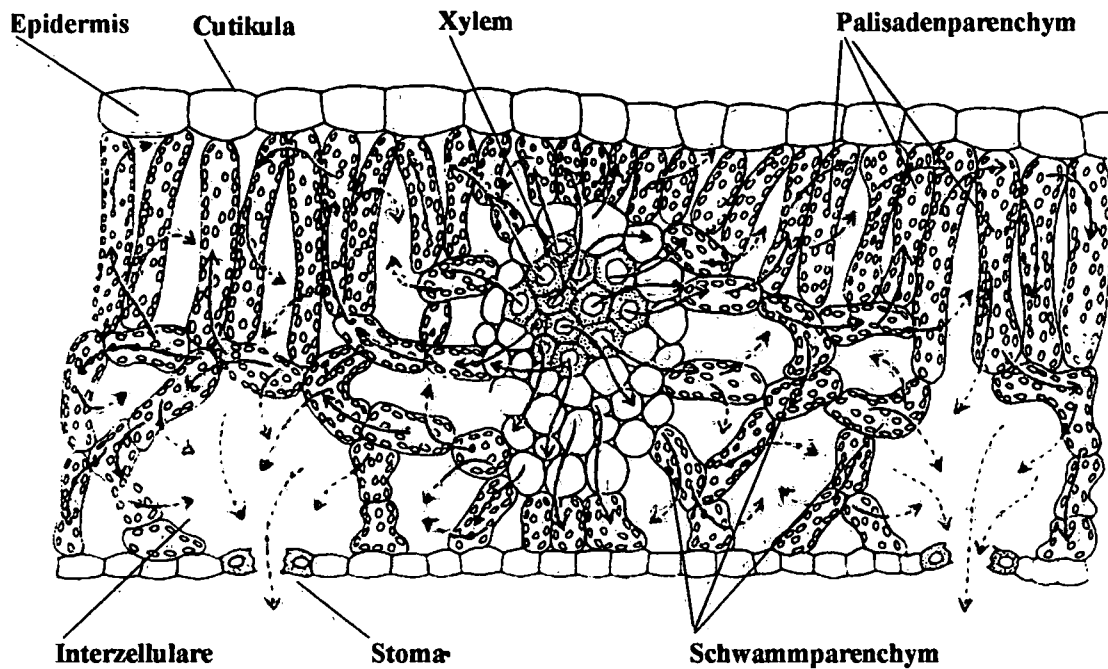


Abb. 1.11 Blattquerschnitt stark vergrößert. Wasserabgabe der Pflanze vom Xylem bis zu den Spaltöffnungen. Ausgezogene grüne Linien zeigen das Wasser in flüssiger, gestrichelte Linien in gasförmiger Phase (Schopfer, 1999).

Außenfaktoren beeinflussen die Transpiration in dem Maße, in dem sie die Steilheit des Wasserpotentialgefälles zwischen Pflanzenoberfläche und umgebender Luft verändern. So steigt die Transpirationsintensität mit zunehmender Lufttrockenheit und Temperatur an. Durch strahlungsbedingte Überwärmung der Blätter kommt eine beachtliche Transpiration auch bei hoher Luftfeuchtigkeit zustande, was in humiden Regionen für den Wasser- und Stofftransport in der Pflanze wichtig ist. Wind trägt die stark überfeuchtete Dampfhaut, die der Epidermis anhaftet, ab und bringt neue, ungesättigte Luft an die verdunstende Oberfläche heran. Der Grenzschichtwiderstand, zwischen Epidermis und turbulent strömender Umgebungsluft, ist bei Windstille für großflächige Blätter dreimal so hoch wie für kleine, zerteilte Blätter. Diese Unterschiede gleichen sich mit zunehmender Windstärke aus: Ab einer Windgeschwindigkeit von etwa 2m/s ist der Grenzschichtwiderstand sehr klein und fällt dann gegenüber dem stomatären Diffusionswiderstand nur wenig ins Gewicht. In geschlossenen Pflanzenbeständen wie dichten Baumkronen oder Feldern ist der Wind weitgehend abgeschwächt und die Transpiration herabgesetzt.

Bei der kutikulären Transpiration diffundieren die Wassermoleküle durch die cutinisierten Schichten der Epidermisaußenwand durch die Cuticula und durch epicuticulare Wachsschichten. Man kann die cuticuläre Transpiration daher als eine Diffusion durch ein hydrophobes Medium auffassen. Die cuticuläre Durchlässigkeit für Wasserdampf ist sehr gering. Als Richtwert für Blätter sei hier 0,007cm/s angegeben. Auf die Ausbildung und Wirksamkeit der Oberflächenabdichtung haben die Wachstumsbedingungen und Umwelteinflüsse großen Einfluss. Bei Luft- und Bodentrockenheit herangewachsene Pflanzen besitzen Blätter mit dickeren Kutikulaschichten und dichteren Wachsauflagen als bei hoher Luftfeuchtigkeit entwickelte Pflanzen. Bei Entquellung und Austrocknung der Epidermisaußenwand rücken die hydrophoben Schichten dichter aneinander, wodurch sich der cuticuläre Diffusionswiderstand verdoppelt. Bei niedrigen Temperaturen sinkt, bei höheren Temperaturen erhöht sich die Durchlässigkeit der cuticularen Schichten als Folge von

Dichteveränderungen und Phasenübergängen. Saure Niederschläge zerstören Wachsschichten und den cuticularen Schutz der Blätter und Nadeln (Larcher, 1994).

Versuchsaufbau allgemein

Zur Klärung der Frage, ob das Aquapolsystem Pflanzen beeinflusst oder nicht, wurden keine Richtlinien oder Vorgaben gestellt. Daher lag es nahe, möglichst einfach zu beginnen und die Untersuchungen dann auszudehnen. Vom üblichen Einsatzgebiet des Aquapolgerätes ausgehend ist mit Versuchen mit Zimmerpflanzen in nicht klimatisierten Räumen begonnen worden. Von der Firma Aquapol wurden die benötigten Mauertrockenlegungsgeräte in der entsprechenden Ausführung und Menge zur Verfügung gestellt und im Labor, später auch auf freiem Feld, montiert.

Als Forschungsraum diente anfangs das Zentrallabor des heutigen Instituts für Botanik innerhalb des Departments für Integrative Biologie und Biodiversitätsforschung im ersten Stock des Gregor Mendel-Hauses. Später wurden aus Platzgründen die Räumlichkeiten des ehemaligen Botanik Institutes im ersten Obergeschoß des Adolf von Guttenberghauses der Universität für Bodenkultur in Wien zur Beherbergung der Versuche herangezogen.

Die Freilandversuche fanden auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche, die im Kapitel Feldversuche eingehend beschrieben wird, statt. Dabei handelt es sich um die Liegenschaft von Frau Leopoldine Püreschitz (Püreschitz, 2006), Grundstücksnummer 27/20, Einlagezahl 5 der Katastralgemeinde 05002, Au am Leithaberge. Der landwirtschaftliche Betrieb der Frau Leopoldine Püreschitz hat die Betriebsnummer 1445618.

Die zu untersuchenden Pflanzen und Bodenproben befanden sich jeweils im Wirkungsbereich und- oder im Ansaugbereich der Aquapolgeräte, wie sie im Kapitel „Beschreibung des Mauertrockenlegungsgeräts“ erklärt werden.

Laborversuche

Thermoelementpsychrometer

Die Psychrometrie, das Präfix „psychro-“ kommt aus dem Griechischen und bedeutet „kühlen“, ist eine häufig verwendete Methode der Wasserpotentialmessung. Zellwachstum, Photosynthese und Ernteertrag von Pflanzen hängen sehr vom Wasserpotential und seiner Komponenten ab. Das Wasserpotential ist ein guter Indikator für den Zustand der Pflanze. Es gibt vier Möglichkeiten Ψ_Z , Ψ_π und Ψ_P zu messen: Psychrometer, Druckkammer, Gefrierpunkt-Osmometer und Drucksonde, wobei die beiden zuerst genannten Methoden auch von mir im Zuge dieser Arbeit verwendet wurden, in der Hoffnung relativ schnell und ohne Zerstörung der Pflanze einen Effekt beobachten zu können.

Eine psychrometrische Technik nutzt einerseits die Tatsache, dass sich in einem geschlossenen Luftraum über einer Pflanzenprobe zwischen den Phasen nach einiger Zeit ein Wasserpotentialgleichgewicht einstellen muss. Das Wasserpotential der Luft lässt sich aus der gemessenen relativen Luftfeuchte berechnen. Durch die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit über der Pflanzenprobe kann man daher auf deren Wasserpotential zurückschließen. Andererseits nutzt diese Technik den Effekt, dass durch die Wasserverdunstung von einer Oberfläche diese Oberfläche auch abkühlt. John Boyer wandte mit seinen Mitarbeitern (Boyer und Knippling, 1965 zitiert von Taiz, 1998) eine Psychrometrische Technik an, um

das Wasserpotential von pflanzlichen Gewebestücken zu untersuchen, die als Psychrometrie bekannt wurde. Zur besseren Verständlichkeit dieser Methode soll hier ein einfacher Versuchsaufbau, in Form eines isopiastischen Psychrometers gezeigt werden (Taiz, 1998).

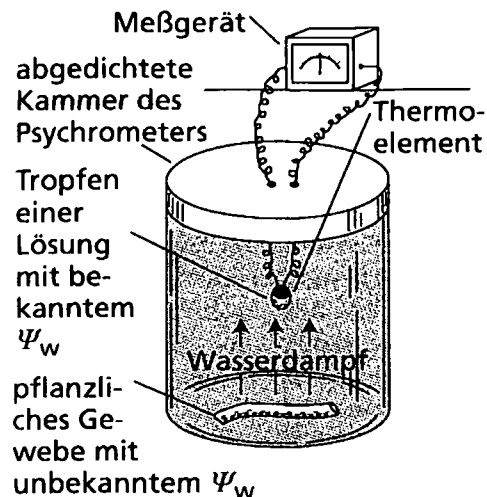


Abb. 2.1 Vereinfachte Darstellung eines Psychrometers zum Messung des Wasserpotentials in Pflanzen. Über die Luftfeuchtigkeit in der Probenkammer kann auf das Wasserpotential des pflanzlichen Gewebestücks rückgerechnet werden. (Taiz, 1998).

Ein Gewebestück wird in eine kleine luftdichte Kammer gelegt, die einen Temperatursensor enthält, der in Kontakt mit einem kleinen Tropfen Wasser steht. Zu Anfang verdunstet Wasser aus dem Gewebestück und auch aus dem Wassertropfen. Die Feuchtigkeit in der Kammer steigt dadurch an. Die Verdunstung hält so lange an bis die Luft in der Kammer mit Wasserdampf gesättigt ist. Wenn das Wasserpotential im Gewebe und im Tropfen gleich ist, hört zu diesem Zeitpunkt die Verdunstung aus dem Tropfen auf und die Temperatur des Tropfens ist mit der Umgebungstemperatur identisch. Falls das Gewebestück ein geringeres Wasserpotential als der Tropfen besitzt, verdunstet Wasser aus dem Tropfen und wird, nach Diffusion durch die Luft, vom Gewebe absorbiert. Diese Verdunstung kühlt den Wassertropfen. Je größer der Potentialunterschied zwischen Tropfen und Gewebestück, desto höher ist die Verdunstungsrate und desto kühler wird der Tropfen.

Mit dem Aspirations-Psychrometer nach Assmann (Herppich et al., 1995) wurde bereits recht früh eine Möglichkeit gefunden die Luftfeuchtigkeit zu bestimmen. In diesem Gerät gibt es zwei Thermometer welche die Lufttemperatur messen. Die Messspitze von einem der beiden Thermometer ist mit Wasser befeuchtet und man misst die Temperaturniedrigung die an diesem Thermometer durch das Verdampfen von Wasser hervorgerufen wird. So kann mit den zwei unterschiedlichen Temperaturen auf die Luftfeuchtigkeit rückgerechnet werden. Die Quecksilberthermometer des Assmann-Psychrometers sind in Geräten zur Wasserpotentialmessung durch sehr feine Thermoelemente ersetzt worden. Ein Thermoelement ist ein Bauteil aus zwei verschiedenen Metallen, ein Sensor, der bei Temperaturänderung eine Spannung im Mikrovoltbereich erzeugt. Thermoelemente basieren auf dem so genannten Seebeck-Effekt, welcher besagt, dass an der Kontaktstelle zwischen zwei verschiedenen, sich berührenden Metallen, eine Kontaktspannung entsteht. Diese Kontaktspannung wird durch die Ladungsverschiebung zwischen den zwei Metallen hervorgerufen und heißt Thermospannung, weil sie direkt von der Temperatur an der Kontaktstelle abhängig ist. Diese Thermospannung kann

unter anderem zur Temperaturmessung genutzt werden. Der Seebeck-Effekt ist im Prinzip die Umkehrung des Peltier-Effektes (IT Wissen, 2006).

Nach der verwendeten Befeuchtungstechnik lassen sich drei Psychrometergrundtypen unterscheiden (Herppich, 1995):

- Beim Psychrometer nach Richards und Ogata (Ogata, 1961 zitiert von Herppich, 1995), wird die Lötstelle des Thermoelementes vor der Messung mit reinem Wasser befeuchtet und dann erst über die Probe gebracht. Dabei wird ein kleiner Wassertropfen durch die Oberflächenspannung in einem feinen Metallring (Silberring) an der Lötstelle gehalten. Ein kleines poröses Keramikkügelchen kann ebenfalls als Wasserreservoir dienen. Die Referenztemperatur wird mit einem zweiten Thermoelement bestimmt. Dieses Verfahren setzt eine optimale Temperaturkonstanz während der gesamten Messung voraus.
- In Abwandlung zum ersten Typ verwendet man bei der zweiten Methode anstelle reinen Wassers eine Zuckerlösung bekannten osmotischen Potentials. Da es sich um eine spezielle Kompensationstechnik handelt, wird dieses System auch als isopiastisches Psychrometer bezeichnet.
- Bei dem so genannten Spanner-Typ, der auch von mir verwendet wurde, wird das Thermoelement in der Messung durch Peltier-Kühlung unter den Taupunkt der Luft abgekühlt, also ohne einen Flüssigkeitstropfen am Thermoelement. Durch die Kondensation von Wasserdampf wird so auf der Lötstelle ein feiner Wasserfilm erzeugt. Nach Ausschalten des Kühlstroms fungiert das Element als Feuchthermometer. Die Thermospannung vor dem Abkühlen liefert die Temperatur für das Trockenthermometer.

Die Peltier-Kühlung ist ein auf thermoelektrischer Basis arbeitendes elektrisches Bauteil, welches Wärme von einer Elektrode zu einer anderen transportiert. Die beiden unterschiedlichen Halbleiter-Elektroden sind über Kupferdrähte miteinander verbunden. Der so genannte Peltier-Effekt, bei dem die eine Elektrode kalt und die andere heiß wird, entsteht bei Anlegen einer Spannung an die Elektroden, wobei die dotierten Halbleiter ihr Energieniveau ändern. Die kalte Elektrode, die Coldplate, nimmt dabei Wärme auf die zur heißen Elektrode, der Hotplate, transportiert und dort abgeführt wird. Die zur Hotplate transportierte Wärme kann durch Kühlkörper und Lüfter an die äußere Umgebung abgeführt werden. Durch diese Abkühlung der Coldplate entsteht am Thermoelement in der Probenkammer ein Hauch von Kondenswasser (IT Wissen, 2006).

Diese Methode ist zwar sehr nützlich, aber stark temperaturabhängig. So entspricht eine Temperaturänderung von nur 0,01°C einer Änderung im Wasserpotential von 0,1 MPa. Deshalb ist es wichtig die Temperatur des Messgerätes konstant zu halten, was am ehesten im Labor möglich ist (Taiz, 1998).

Um den Einfluss von äußeren Temperaturänderungen zu minimieren wird als Abwandlung zur psychrometrischen Messmethode die taupunkthygrometrische Technik angewandt. Hierbei wird ein ideales Thermoelement simuliert, das von jedem Wärmeaustausch mit der Umgebung getrennt ist. Wird auf einem solchen Thermoelement ein Wassertropfen aufgebracht, so wird jede messbare Temperaturänderung nur durch Verdunstung oder Kondensation von Wasser bewirkt. Ein solches ideales Thermoelement ist auf elektronischen Weg realisierbar. Ein entsprechendes Gerät, das diesen Anforderungen entspricht, ist das hier

verwendete HR-33-T-Mikrovoltmeters der Firma Wescor Inc (Wescor, 1998). Der gewünschte Effekt ist erreicht, wenn von einem trockenen Thermoelement durch Peltierkühlung die von der Umgebung einfließende Wärmemenge ausgeglichen wird. Diese erforderliche Kühlung lässt sich über den Kühlungskoeffizienten Π_v erreichen. Π_v ist von der Umgebungstemperatur abhängig und bei jedem Thermoelement verschieden groß.

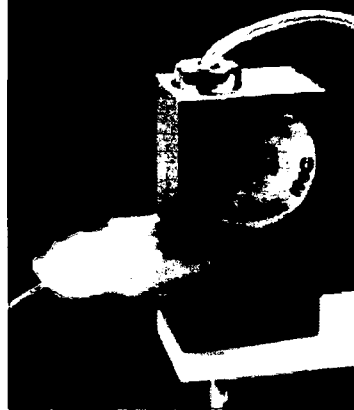
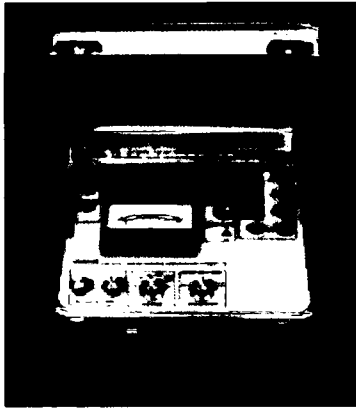


Abb. 2.1.1 Links: Foto vom Mikrovoltmeter HR-33-T. Rechts: Abbildung des Blattkammertaupunkthygrometers L-51 mit eingespanntem Blatt (Wescor, 1998).

Bei der in situ Messung des Blattwasserpotentials wurde hier mit einem Blattkammer-Taupunkthygrometer, dem L-51 (Wescor, 1998), gearbeitet. Bei diesem System befinden sich Mess- und Referenzthermoelement in einem Metallzylinder von 3,1 cm Länge und 1 cm Durchmesser. Die eigentliche Messkammer hat ein Volumen von nur 14 mm³. In einer Blattkammer aus Aluminium geführt, kann dieser Blattsensor mit einer kleinen Menge Vaseline oder Lanolin/Bienenwachs (1:1) vorsichtig gegen ein Blatt abgedichtet und fixiert werden. Um den Einfluss von kurzzeitigen Temperaturschwankungen in der Umgebung des Fühlers auf die Messung zu reduzieren, sollte die Blattkammer zusätzlich thermisch isoliert werden. Dies geschieht am einfachsten durch eine Ummantelung mit Polyurethanschaum, den man aus Gründen des Strahlungsschutzes mit Alufolie beklebt.

Durch das Ansetzen des Fühlers in der Kammer wird auf dem Blatt ein Bereich mit sehr hohem Grenzschichtwiderstand zwischen Epidermis und turbulent strömender Umgebungsluft geschaffen. Dadurch ist die Transpiration hier mehr oder weniger vollständig unterbunden. Die Zellen in diesem Teil des Blattes sind somit von dem für das restliche Blatt gültigen Wasserflussgleichgewicht ausgenommen. Sie sollten deshalb ein positiveres Wasserpotential besitzen als die im Restblatt. Mit einem In-situ-Taupunkthygrometer misst man also kein mittleres, sondern das unter den gegebenen physiologischen Bedingungen positivste Blattwasserpotential.

Bei konstanter Außentemperatur und sorgfältiger Installation kann man mit einem solchen Taupunkthygrometer die Änderung des Blattwasserpotentials des Messobjektes über einen längeren Zeitraum hinweg mit hoher zeitlicher Auflösung dynamisch verfolgen. Da im Normalfall die Änderung des Wasserpotentials in der Pflanze kein momentaner und plötzlicher Vorgang ist, sondern allmählich vor sich geht, stellt sich auch das Wasserdampfgleichgewicht mit sehr geringer Verzögerungszeit ein (Herppich, 1995).

Zur raschen Einstellung des Wasserdampfgleichgewichtes empfiehlt es sich, die Kutikula an der Stelle, auf die der Fühler aufgesetzt wird, ohne Verletzung der Epidermiszellen zu entfernen oder wenigstens teilweise abzutragen. Hierfür eignet sich unter anderem sehr feines Schleifpapier der Körnung 600 oder feiner. Danach muss die Blattspreite mit

demineralisiertem Wasser abgewaschen und sorgsam getrocknet werden. Die für die Abdichtung des Fühlers verwendete Masse soll gut an der Oberfläche haften. Sie muss aber auch plastisch genug sein, um vollständigen Abschluss zu gewährleisten.

Der von mir verwendete Spannertyp war ein L51 in einer Blattkammer aus Aluminium. Noch am Anfang meiner Arbeit stehend, versuchte ich zunächst die Potentialmessung an Zimmerpflanzen z.B. an Ficus, Dracena, und Grүнlilie (*Chlorophytum Comosum*). Die Blattkammer mit dem Thermoelement wurde immer beschattet um die Temperatur möglichst konstant zu halten. Aufzeichnungen von Thermohydrographen und Temperaturmessungen bestätigten dies. Ficus wurde an fünf verschiedenen Blättern einer Pflanze mit insgesamt 62 Messungen in unterschiedlichen Zeitintervallen beprobt. Dracena wurde an sechs verschiedenen Blättern einer Pflanze mit insgesamt 53 Messungen in einem Abstand von zehn Minuten beprobt. Mit der Grүнlilie wurden Versuche im Umfang von 72 Messungen an sieben verschiedenen Blättern einer Pflanze durchgeführt.

Die psychrometrischen Versuche wurden im Zentrallabor des heutigen Instituts für Botanik innerhalb des Departments für Integrative Biologie und Biodiversitätsforschung im ersten Stock des Gregor Mendel-Hauses durchgeführt. Trotz der umfangreichen Erklärungen seitens Dr. Richter und Dr. Kikuta ist eine sehr lange Zeit zur Einarbeitung mit dem Gerät nötig. Allein schon die Entfernung der Kutikula erfordert einiges an Übung und ist schwer reproduzierbar. Auch die Zeit, welche zum Ausgleich zwischen der Luft in der Blattkammer und der Probe erforderlich ist, lässt sich nur schwer empirisch ermitteln und erfordert Erfahrung. Diese Zeitspanne kann von wenigen Minuten, bei Kalibrierung mit Lösungen, bis zu mehreren Stunden, bei Proben von Blättern, betragen (Taiz, 1998). Ferner ist es unbedingt erforderlich, die Randbedingungen möglichst konstant zu halten und den Kühlkoeffizienten Π_v exakt einzustellen um eine Potentialänderung richtig interpretieren zu können.

Keimversuche

Im Zuge von Vorversuchen wurde auch mit Saatgut von Stangenbohnen der Sorten Neckarkönigin und Wachs- Mango im Zentrallabor vom Institut für Botanik gearbeitet. Die Bohnen wurden in das Substrat von TKS1 gesetzt und mit 150 Watt pro Standort beleuchtet. Dabei stellte sich heraus, dass das Saatgut ganz unterschiedliche Keimfähigkeit besaß, die Beleuchtung zu unterschiedliche Intensität hatte und dass die Gefahr besteht, über das Substrat Schädlinge einzuschleppen.

Mit Stangenbohnen der Sorte Kwintus von der Firma Nickerson- Zwaan wurden mehrere Keimversuche in Petrischalen auf Filterpapier mit einer genau dosierten Wassermenge durchgeführt. Die Behälter wurden zuvor mit Alkohol desinfiziert. Danach 40 Stück (Kalra, 1998) in vier Schalen mit jeweils 15 ml Wasser, aufgeteilt auf die beiden Standorte, platziert. Die Versuche liefen immer parallel, es befand sich also immer eine gleichwertige Anordnung im entfeuchtenden Gerätewirkfeld und eine im befeuchtenden Ansaugbereich des rechtspolarisierten Aquapolgerätes. Um eine gleichmäßige Beleuchtung zu gewährleisten wurden die Versuchsstandpunkte in einem quadratischen Raster von 15 cm Seitenlänge gegliedert und mit einem Quantumsmeter, dem LI 1600 von der Firma Wescor, die Lichtintensität überprüft.

Beobachtung des Pflanzenwachstums

Aus den angekeimten Bohnen des zuletzt durchgeführten Keimversuchs wurden am 07.07.2000 24 Stück augenscheinlich gleich gut entwickelte ausgewählt. Diese wurden einzeln in Kunststofftöpfe mit gelochtem Boden, welche mit homogenisierter

Erde (TKS 1) gefüllt waren, gepflanzt. Die Töpfe wurden so unter Ansaug- und Wirkbereich des Aquapolgeräts aufgeteilt, dass jene Keimlinge, welche zuvor im befeuchtenden Ansaugbereich standen, auch jetzt wieder dorthin gestellt wurden. Die jeweils 12 Töpfe standen jeweils in einer Schale, die regelmäßig mit der gleichen Wassermenge an beiden Standorten bewässert wurde. Die gespendete Wassermenge richtete sich nach der augenscheinlichen Trockenheit des Substrates. An diesen Schalen wurde ein Spalier aus Holzleisten und Seilen montiert, an dem die Bohnenranken geordnet, jede einzelne für sich, an einem Seil emporklettern konnten. Der Versuchsaufbau mit dem entfeuchtenden Gerätwirkfeld und befeuchtenden Ansaugbereich war in den Räumlichkeiten des ehemaligen Botanik - Instituts errichtet und ist in folgender Darstellung skizziert.

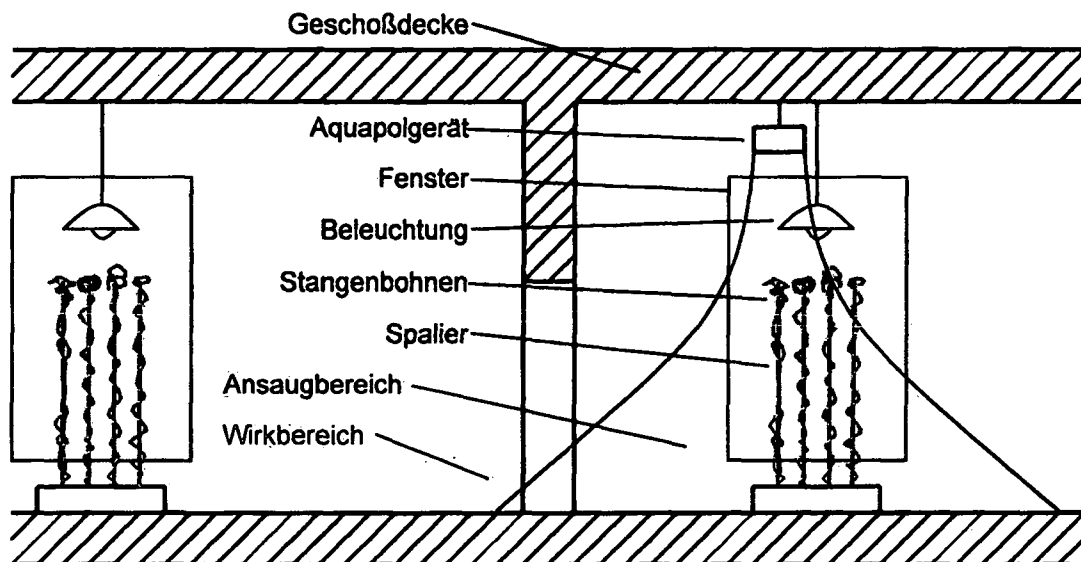


Abb. 2.2 Schematische Darstellung des Pflanzenwachstumsversuchs im Labor. Die Bohnenkeimlinge wurden unter den befeuchtenden Ansaugbereich und den entfeuchtenden Wirkbereich des Aquapolgerätes gestellt, beleuchtet und gegossen.

Die Beleuchtung wurde durch den Einsatz von HQIL Gasentladungslampen von der Firma Osram mit jeweils 400 Watt, die über den Pflanzen montiert und in ihrer Leuchtstärke aufeinander abgestimmt wurden, verbessert. Mit einer Schaltuhr wurden beide Lampen gleichzeitig ein- und ausschaltet. Das Spalier war so konstruiert, dass es an die Wuchshöhe der Pflanzen angepasst werden konnte. Dadurch war es möglich den Abstand zwischen Lampen und Pflanzen immer möglichst gering zu halten, um eine optimale Lichtausbeute zu gewährleisten.

Um der Unsicherheit in Bezug auf die Erfordernis von galvanischer Erdung entgegenzuwirken, wurden jeweils sechs von zwölf Pflanzen pro Versuchsanordnung elektrisch geerdet. Dies geschah durch zwölf verzinkte Stahlplatten, an denen ein Kupferkabel angelötet war. Die Platten wurden in die Töpfe gelegt und das Kupferkabel über die Wasserleitungen geerdet.

Am 10.11.2000 wurden die ausgereiften Bohnen geerntet und der Versuchsaufbau abgebaut. Früchte und Blätter die bis zu diesem Zeitpunkt abgefallen waren wurden gesammelt und bei der Berechnung der Biomassen berücksichtigt. Aufgrund der großen Wuchshöhe der Bohnen trieben die Pflanzen im oberen Bereich ineinander. Um sie zu trennen wurden die Stiele am Übergang zu den Wurzeln gekappt und auf einem kleinen Holzstück aufgerollt, bis jede einzelne Pflanze sicher von den anderen getrennt war.

Feldversuche

Der Vorteil von Feldversuchen liegt in der Möglichkeit, Vorgänge dort beobachten zu können, wo sie wirklich passieren. Ein Labor hingegen stellt nur ein Modell der Wirklichkeit dar. Bei einem solchen Modell besteht die Gefahr, dass wichtige Einflussfaktoren keine Berücksichtigung finden, weil sie übersehen werden oder vielleicht auch noch gar nicht bekannt sind. Natürlich ist es im Freilandversuch auch nicht möglich so konstante Bedingungen hinsichtlich Substrat, Mikroklima und Bodenwasserhaushalt herzustellen wie im Labor.

Aufgrund der Unsicherheit, ob eine kapillare Verbindung zwischen Versuchspflanze und Erdreich zur Funktion des Aquapol Gerätes gegeben sein muss, führten wir neben den Laborversuchen auch Feldversuche durch. Tatsache ist, dass eine feuchte Mauer immer mit dem Erdreich verbunden ist, aus welchen sie durch Kapillaren Wasser an sich bindet und hochsteigen lässt. In so einem Fall funktioniert, laut Firma Aquapol, das Entfeuchtungsgerät. Bei einer Topfpflanze ist so eine Verbindung nicht gegeben und im Labor auch schwer herzustellen. Daher wurde eine augenscheinlich passende landwirtschaftlich genutzte Fläche gesucht und mit deren Besitzer Kontakt aufgenommen.

Dieses Feld liegt in der Nähe von Seibersdorf in Niederösterreich. 200m vom nördlichen Feldrand entfernt fließt die Leitha in östliche Richtung. Dieser Fluss ist heute reguliert und speist ein Kleinkraftwerk, das etwa einen Kilometer stromabwärts vom Feld entfernt liegt. Es ist anzunehmen, dass die Leitha mit ihren früheren Überschwemmungen stark zur Bodenbildung in dieser Region beigetragen hat.

Auch hier stellte uns die Firma Aquapol die erforderlichen Geräte zu Verfügung. Im Besonderen wurden zwei verschiedene Geräte montiert: Ein herkömmliches, welches auch in feuchten Kellern montiert wird und ein zweites, das durch seine spezielle Konstruktion, das Wasser nicht verdrängt, sondern befeuchtend wirkt. Die Anordnung der Geräte und die Probeentnahmestellen sind auf der unteren Abbildung sichtbar. Der Abstand der Geräte zum Feldrand hin betrug etwa 100m. Das Feld war der Länge nach geteilt und mit Sommergerste „Prosa Braugerste“ und Sonnenblumen der Sorte „Natil“ bestellt. Die Geräte wurden auf der Grenze zwischen den beiden Bepflanzungen montiert. Zur Erfassung der Niederschläge wurden drei handelsübliche Regenmesser gesetzt. Einer in der Mitte, bei der Stelle V und jeweils einer in den Randzonen an den Stellen I und IV.

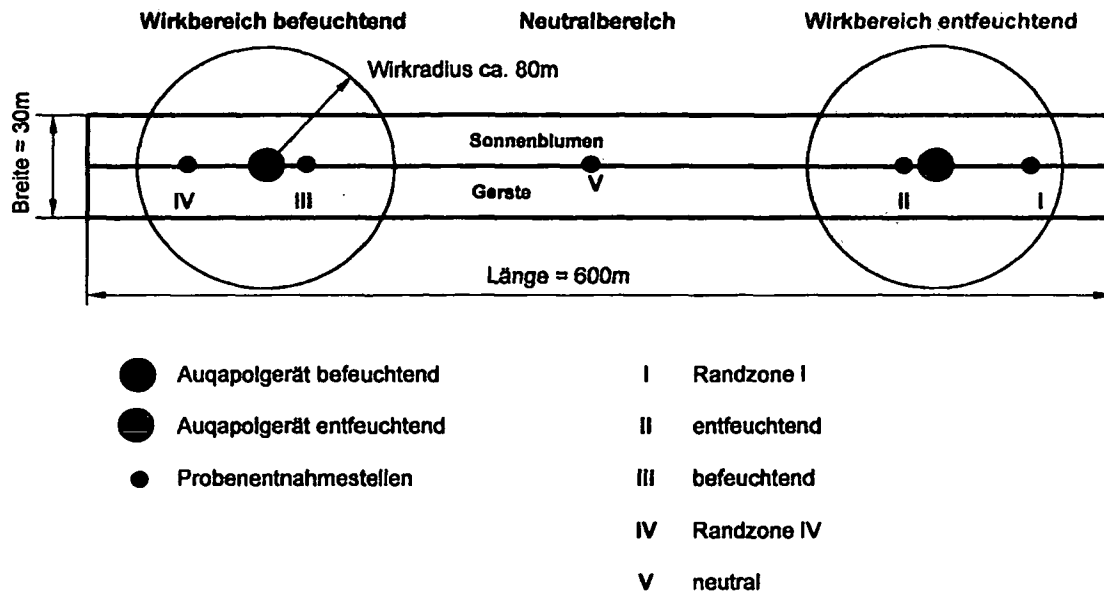


Abb. 3.1 Skizze vom Versuchsaufbau im Freiland im Jahr 2000. Es wurde ein konventionelles, entfeuchtendes Aquapolgerät mit rot dargestelltem Wirkbereich und ein befeuchtendes mit blau dargestelltem Wirkbereich verwendet.

Die folgende Darstellung zeigt das Feld, eingezeichnet in die Bodenkarte 1:25.000 (Bodenkarte, 1986) und seine unterschiedlichen Bodentypen. Die Entnahmestelle der befeuchtenden Zone im Jahr 2000 lag im bläulich dargestellten Bereich mit dem Bodentyp der Nummer 26, die der entfeuchtenden diametral gegenüber mit dem Bodentyp der Nummer 18. In der Mitte des Feldes liegen die Bodentypen mit der Nummer 16 und 20 vor. Die Bodentypen werden in der Legende der Bodenkarte folgendermaßen beschrieben:

- 16: Kalkhaltige Feuchtschwarzerde aus älterem, feinem Schwemmmaterial über Schotter, mittelgründig bis tiefgründig, wechselfeucht mit Überwiegen der feuchten Phase.
- 18: Kalkhaltige Feuchtschwarzerde aus älterem, feinem Schwemmmaterial, tiefgründig, mäßig feucht bis feucht.
- 20: Kalkhaltige Feuchtschwarzerde aus älterem, feinem Schwemmmaterial, tiefgründig, feucht.
- 26: Aggradierte, kalkhaltige Feuchtschwarzerde aus älterem, feinem Schwemmmaterial über Schotter, tiefgründig, mäßig feucht.

Obwohl unterschiedliche Bodentypen vorliegen, handelt es sich überall um kalkhaltige Feuchtschwarzerde mit der Ausnahme des Bodentyps mit der Nummer 5, einem kalkhaltigem grauen Auboden, am äußeren Rand der entfeuchtenden Zone, in welcher aber keine Entnahme von Proben stattgefunden hat. Um die Unsicherheit im Bezug auf gleichwertige Bodenverhältnisse zu minimieren wurden parallel zu der Entnahme von Pflanzenproben auch immer Bodenproben von den untersuchten Stellen gezogen.

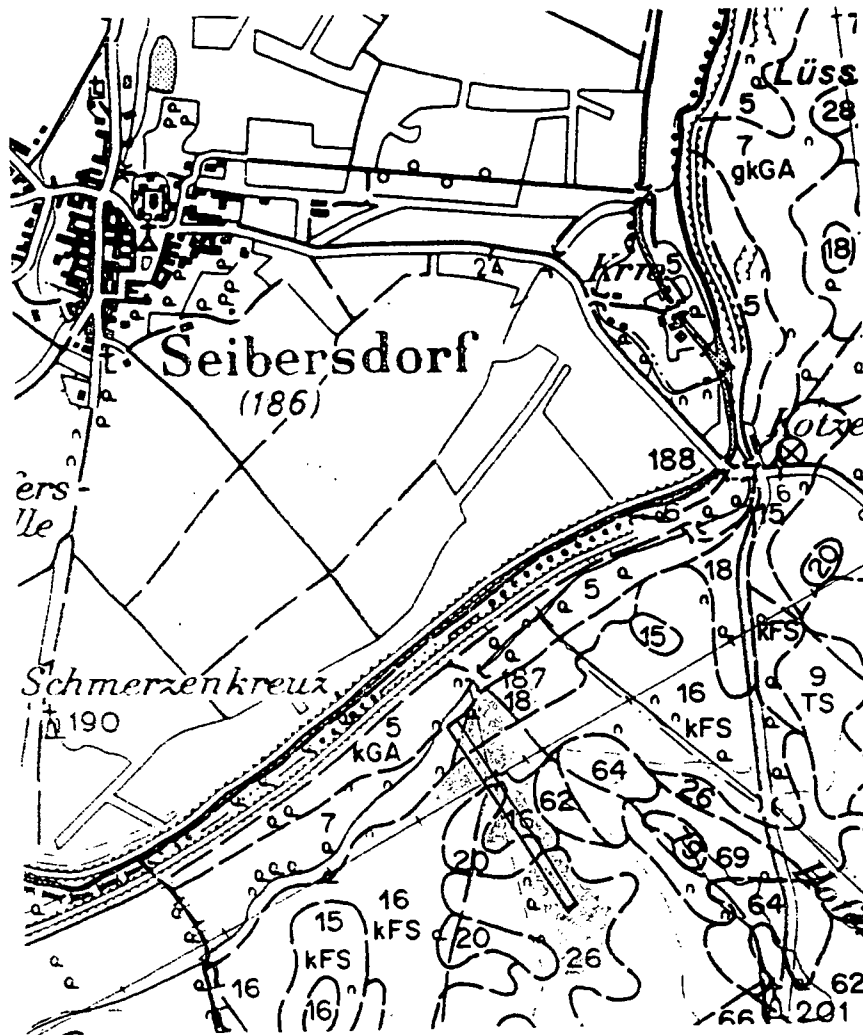


Abb. 3.2 Lage des Feldes mit Darstellung der Bodenarten. Es handelte sich dabei ausnahmslos um kalkhaltige Feuchtschwarzerden. Das befeuchtende Gerät war im blau dargestellten Bereich mit der Bodenart Nr.:26 errichtet. Das entfeuchtende im Bereich mit der Bodenart Nr.:18.

Über die Versuchsfläche im Freiland wurde zur besseren Einschätzung des Geländes ein Nivellement gezogen. Das ist die Vermessung der Höhenunterschiede mittels eines eigenen optischen Gerätes und einer Messlatte. Die Untersuchung wurde von Dipl.-Ing. Mag. Ernst Kortschak durchgeführt der mir seine Ergebnisse dankenswerterweise zu Verfügung gestellt hat. Es zeigt sich, dass nur geringe Höhenunterschiede, kleiner als ein Meter, im Feld auf dessen Länge von 600m auftreten und dieses daher weitgehend als eben bezeichnet werden darf. Die folgende Darstellung zeigt das Auftreten der Höhenunterschiede im Feld, wobei die Werte der Ordinate, wie bei Geländedarstellungen üblich, stark überhöht dargestellt werden.

Längsprofil Freilandversuch

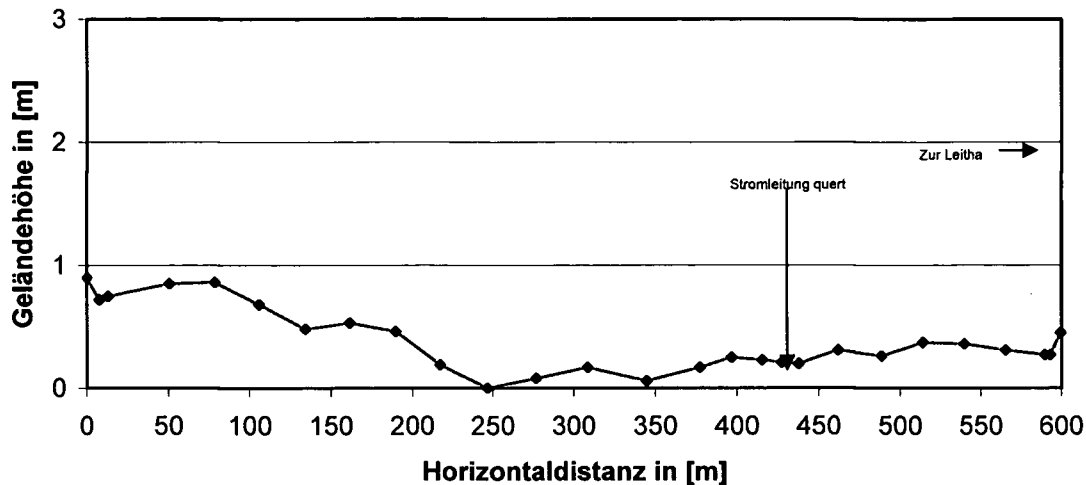


Abb. 3.2.1 Diagramm der Höhenunterschiede vom Feld im Freilandversuch. Die Höhenkoten wurden zur besseren Leserlichkeit stark überhöht dargestellt.

Aufgrund der lehmigen Bodenart die zwar ein gutes Wasserspeicherpotential hat, aber zu Vernässungen, speziell nach ergiebigen Niederschlägen führt, war es notwendig das Feld schon vor vielen Jahren zu drainagieren. Bei einer Drainage werden geschlitzte Rohre in einer Tiefe von etwa 1,5m christbaumartig im Boden verlegt. Das Bodenwasser mit einem leicht positiven Potential, z.B. bei Staunässe oder einem Grundwasserspiegel der weniger als 1,5m unter der Bodenoberfläche liegt, fließt durch die Schlitzte in das Drainagerohr und wird über ein geringes Gefälle einem Vorfluter, meistens einen Bach, zugeführt. Damit wird die vollkommene Wassersättigung im Boden verhindert und in den Bodenporen befindet sich neben Wasser auch Luft. Die Luft ist wichtig für Pflanzenwurzeln, die sonst zu faulen beginnen und für die Atmung der Bodenorganismen die aerob leben. Eine Drainage bringt also bei staunässegefährdeten Böden eine Verbesserung des Pflanzenwachstums. Die Lage und der Abstand der Rohre werden über komplizierte Verfahren errechnet. Die folgende Darstellung zeigt die Lage der geschlitzten Rohre auf der Versuchsfläche. Die strichlierte Linie welche im rechten Drittel des Feldes nach links oben verläuft ist der Strang eines Hauptsammlers.

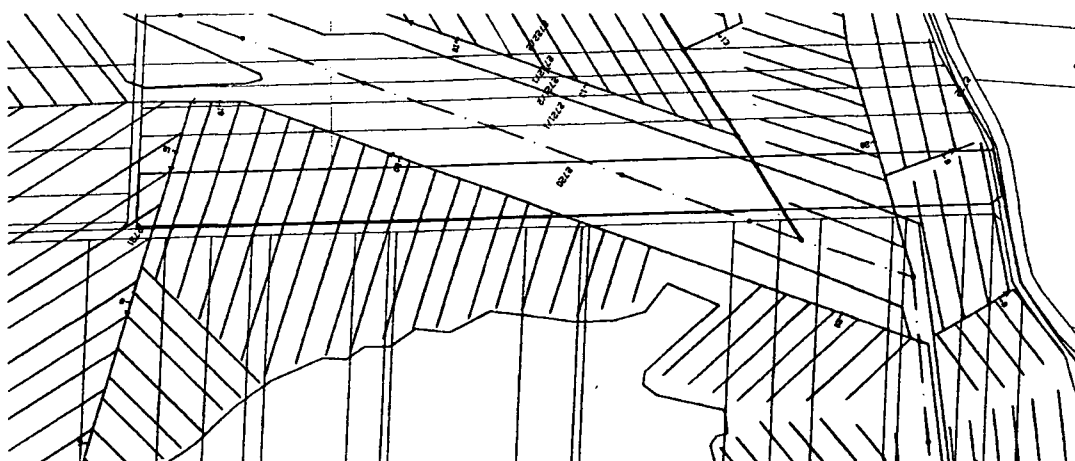


Abb. 3.2.2 Drainagenplan vom Versuchsfeld das rot markiert ist. Am linken Feldrand befindet sich die Randzone IV, die neutrale Stelle ist in der Mitte und am rechten Rand befindet sich die Randzone I. Etwa 200m vom rechten Feldende entfernt fließt die Leitha.

Das handelsübliche Aquapolgerät wird mit einem Metalldübel an der Geschosßdecke, üblicherweise in einem feuchten Kellerraum, befestigt. Zur Montage im Freiland wurde die Konstruktion mit einem Aluminiumblechmantel eingehaust und mit einer zentral angeordneten Stütze versehen um den nötigen Abstand zwischen Boden und Gerät herzustellen. Um die Stütze im Boden zu fixieren und elektrisch zu erden wurde ein etwa 80cm langer, verzinkter Eisenspieß bis zur Hälfte in die Erde gerammt und das zylindrische Rohr der Stütze darüber geschoben. Damit das Ganze mehr Stabilität gegen Windkräfte aufweisen kann wurden am oberen Ende der Stütze vier Stahlseile befestigt, die an ihrem anderen Ende mit 30 cm langen Erdspießen am Boden fixiert wurden. Das folgende Foto zeigt die Platzierung vom entfeuchtenden Aquapolgerät auf dem Versuchsfeld mit dem Getreide im Vordergrund und den Sonnenblumen im Mittelgrund. Im Hintergrund sind die Uferbäume der Leitha zu erkennen.

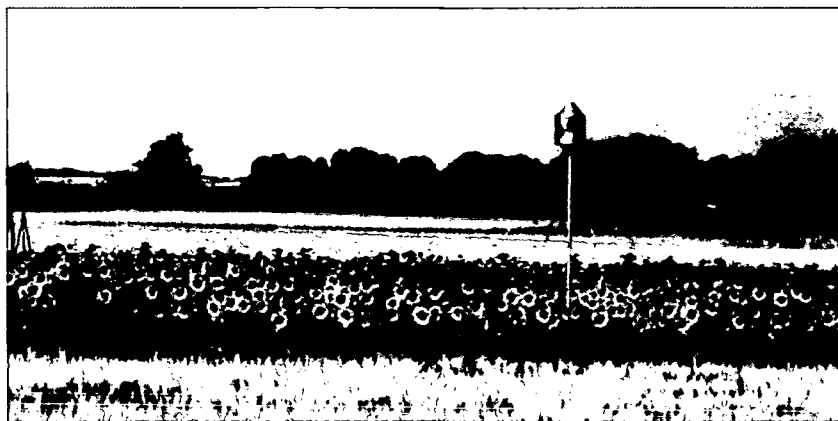


Abb. 3.3 Foto vom Versuchsaufbau im Freiland 2000. Entfeuchtendes Aquapolgerät mit wetterfestem Gehäuse und Standfuß. Am linken Rand des Bildes ist das Spalier vom Versuchsaufbau mit den Stangenbohnen zu erkennen.

Beobachtung des Pflanzenwachstums, 2000

Am 2.5.2000 begann die Dokumentation des Pflanzenwachstums von Sonnenblumen und Gerste an den jeweiligen Probenentnahmestellen. An jeder der fünf Stellen (I bis V) wurden 20 Sonnenblumen als zufällige Stichprobe ausgewählt. An diesen wurden anfangs der Gesamtdurchmesser mit den Blättern und die Höhe der Pflanze gemessen, später der Kopfdurchmesser und die Höhe der Pflanzen. Das Wachstum der Gerste wurde ebenfalls aus einer zufälligen Stichprobe im Umfang von $n=20$ (Kalra, 1998) Pflanzen ermittelt, wobei immer die Wuchshöhe dokumentiert wurde. Dieser Vorgang wurde in Abständen von ein bis zwei Wochen durchgeführt. Die Stichprobe wurde dabei immer neu gewählt. Somit wurden insgesamt 200 Pflanzen bei jeder Begehung mit einem Datenumfang von 300 Einzelmessungen erhoben. Während der Vegetationsperiode wurden neun Begehungen mit den begleitenden Messungen durchgeführt, wobei 2700 Messwerte gewonnen werden konnten.

Die Sonnenblume, *Helianthus annuus*, aus der Familie der Korbblütler dürfte aus dem zentralen Teil des heutigen Amerika stammen. Um 1000 vor Chr. wurden die Früchte der Sonnenblumen bereits von Indianern genützt welche die Pflanze auch schon auf Einkörbigkeit hin selektierten. Zu Beginn des 16. Jahrhunderts kam die Wärme liebende Sonnenblume

durch die Spanier nach Europa wo sie ursprünglich nur als Zierpflanze genutzt wurde. Erst zu Anfang des 19. Jahrhunderts kam es in Ungarn und Russland zu wirtschaftlich bedeutenden Ölpressungen. Trotz der Anpassung der Sonnenblume an trockene Bedingungen und sandige Böden ist ein maximaler Ertrag nur bei einer optimalen Wasserversorgung möglich. Diese Kulturpflanze sollte daher an Standorten mit einer günstigen Niederschlagsverteilung während der Vegetationsperiode und auf tiefgründigen Böden angebaut werden. Das Wurzelsystem der Sonnenblume ist allorhiz, wobei die kurze Pfahlwurzel mit sehr vielen langen und verzweigten Seitenwurzeln besetzt ist. Die Wurzeln können bis in eine Tiefe von 4 bis 5m in den Boden vordringen wenn dieser es zulässt (Diepenbrock, 1999). Knapp unter der Bodenoberfläche bilden sich Tauwurzeln aus, welche sich Kapillarkondensation von Wasserdampf aus der wassergesättigten Bodenluft zu Nutze machen können. Eine vertikale Wasserverlagerung kommt bei Trockenheit auch durch innere Wasserleitung im Wurzelsystem von Pflanzen zustande. In der Nacht wird Wasser, das den tiefen und feuchten Bodenhorizonten entnommen wurde, nicht nur dem Spross, sondern auch den seichtgründigen Tauwurzeln zugeleitet. Wenn das Wasserpotential der obersten Bodenschichten niedriger ist als jenes der Tauwurzeln, tritt Wasser in die Umgebung, dem Boden, aus. Später am Tag, wenn durch die Transpiration das Wasserpotential in der Pflanze wieder sinkt, kann das in der Nacht an den Boden abgegebene Wasser von der Pflanze wieder aufgenommen werden. Durch diese Wasserhebung können auch Arten mit oberflächlicher Bewurzelung in Gemeinschaft mit Tiefwurzlern besser Dürreperioden überdauern (Larcher, 1994). Die folgende Darstellung zeigt das Wurzelsystem einer Sonnenblume in Blüte, mit einer Wuchshöhe von 180cm freigelegt Mitte August auf leicht verbrauchten, grauen Auboden (Kutschera, 1960).

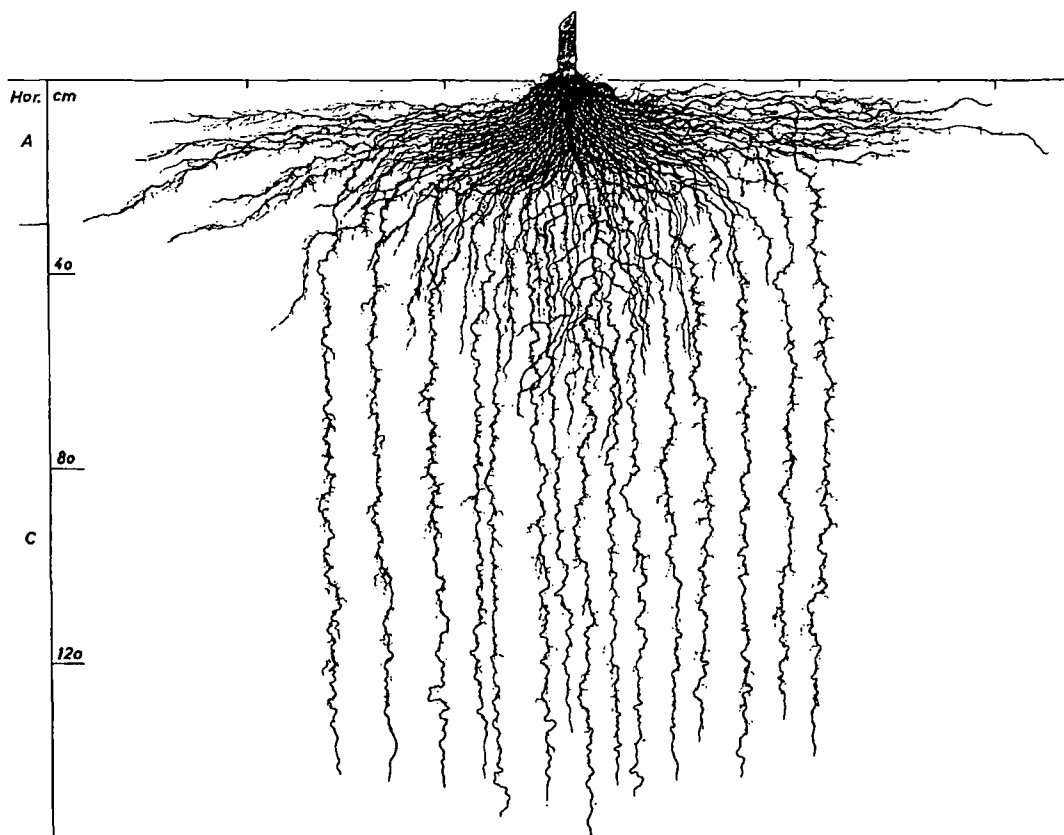


Abb. 3.3.1 Zeichnung des Wurzelsystems der Sonnenblume mit den typischen Tauwurzeln. Bodenprofil: A: 0-30cm schwach humoser, feinsandiger Lehm, C: feinsandiger Lehm, schwach verbraunt (Kutschera, 1960).

Getreidearten gehören zu den ältesten Nutzpflanzen deren Anbau sich im vorderasiatischen Raum bis 10.000 vor Chr. zurückverfolgen lässt. Wegen ihres Ertragreichtums, ihrer leichten Verarbeitbarkeit und Lagerung haben Getreidearten eine sehr große Verbreitung in der weltweiten Landwirtschaft. Alle Getreidearten gehören zu der landwirtschaftlich bedeutenden Pflanzenfamilie der Gramineen an. Die vier Hauptgetreidearten Europas sind: Weizen, Roggen, Gerste und Hafer (Diepenbrock, 1999).

Die Gerste, *Hordeum vulgare*, wird weiter unterschieden in Wintergerste als wichtigste Getreideart unserer Breiten, welche zur Viehfütterung verwendet wird und Sommergerste zur Verwendung in der Malz- und Brauindustrie. Die Bodenansprüche der Braugerste sind kontinuierliche Wasserversorgung und eine geringe Stickstoff- Nachlieferung (Diepenbrock, 2005). Die Verzweigung vom Sprossaufbau erfolgt bei der Gerste wie bei den anderen Getreidearten durch Bestockung welche im dicht unter der Erdoberfläche liegenden Bestockungsknoten stattfindet. Dort sind auch die Voraussetzungen für die Bildung des Büschelwurzelsystems, also samenbürtiger Wurzeln, gegeben. Die unten folgende Zeichnung zeigt das Wurzelsystem von zweizeiliger Gerste, milchreif, Höhe 90cm, freigelegt Ende Juni auf Mullgleyboden (Kutschera, 1960).

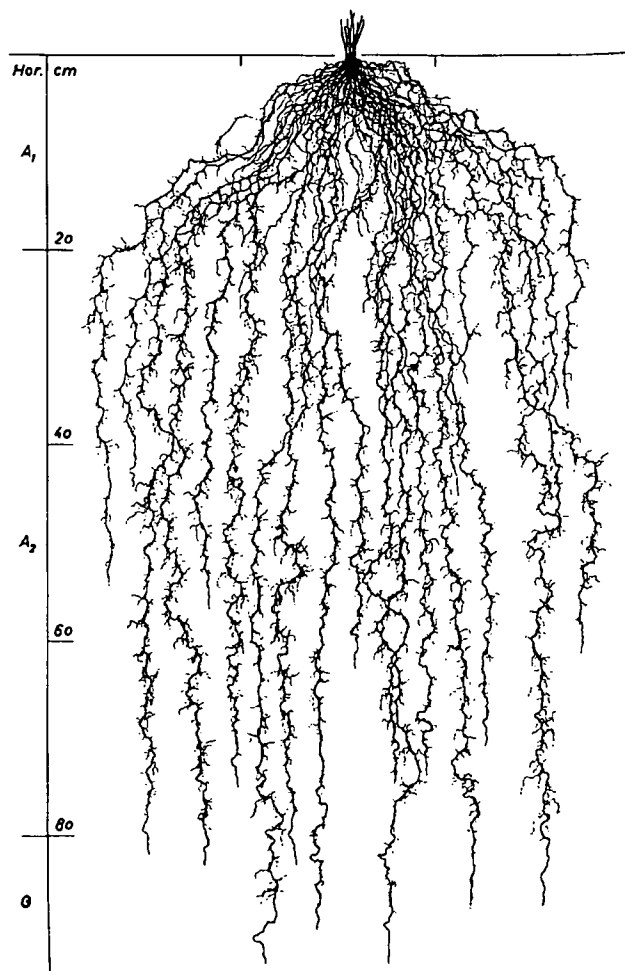


Abb. 3.3.2 Zeichnung des Büschelwurzelsystems der zweizeiligen Gerste Bodenprofil: A1: 0-20cm stark humoser, sandiger Lehm A2: 20-80cm stark humoser, kiesiger, sandiger Lehm G kiesiger, sandiger Lehm, zementgrau (Kutschera, 1960).

Um besser zwischen Labor- und Feldversuchen vergleichen zu können wurden am 6.6.2000 auf dem Feld auch Stangenbohnen der Sorte Kwintus, jene wie im Labor verwendet, angepflanzt. Die Stangen- oder Gartenbohne, *Phaseolus vulgaris* L., wird vorwiegend zur Körnernutzung in der Frischvermarktung und Konservenindustrie verwendet. In Mittelamerika wurde die Phaseolusbohne, welche hinsichtlich Wuchstyp und Samenfarbe stark variiert, bereits 6.000 vor Chr. kultiviert und gelangte 1542 nach Europa. Der Wuchstyp Stangenbohne ist eine einjährige linkswindende Schlingpflanze. Das Wurzelsystem besteht aus einer krautigen Pfahlwurzel mit langen Seitenwurzeln (Diepenbrock, 1999).

Um mögliche unterschiedliche Bodenverhältnisse ausgleichen zu können, wurden die Bohnen in Tontöpfen mit einem Durchmesser von 24cm gesät. Diese Tontöpfe, die mit homogenisierter Erde gefüllt waren, wurden in den gewachsenen Boden gesenkt. Um Wechselwirkungen der Bodenfeuchtigkeit zwischen den Tontöpfen und dem sie umgebenden Erdreich zu unterbinden, wurden die Bohnen mit einer genau dosierten Wassermenge gegossen. Diese Wassermenge von 1,25 Liter pro Topf, entsprechend der empirisch festgestellten Feldkapazität des Bodens im Topf, wurde alle drei bis vier Tage, je nach augenscheinlicher Bodenfeuchtigkeit, aufgebracht. Dieser Versuchsaufbau war an den Stellen entfeuchtend (II), neutral (V) und befeuchtend (III) installiert. An den Randzonen, I und IV wurden keine Bohnen gesetzt.

In den Tontöpfen mit 24cm Durchmesser hatten jeweils fünf Bohnen Platz. An jeder Stelle befanden sich vier Tontöpfe, in Summe also 12 Töpfe mit 60 Bohnen. Diese wurden so wie die Gerste und Sonnenblumen immer wieder untersucht. Auch auf dem Feld wurde den Bohnen eine Kletterhilfe geboten. Dazu wurden pro Topf drei Holzstangen mit einer Länge von drei Metern senkrecht etwas in die Erde gesenkt und an ihrem oberen Ende zusammengebunden. Schon recht bald zeigten sich an den Bohnen allerdings Fraßspuren von Nagetieren. Aus diesem Grund habe ich um die eingesenkten Töpfe ein Drahtgitter mit 20mm quadratischer Lochweite montiert. Später, gegen Ausreifung der Körner, wurde allerdings auch diese Methode unwirksam, weil der Versuchsaufbau auch noch von größeren Wildtieren heimgesucht wurde.



Abb. 3.3.3 Foto vom Versuchsaufbau im Freiland 2000. Stangenbohnen der Sorte Kwintus in eigenen Tontopf mit homogenisierter Erde, frisch bewässert, Fraßschutz gegen Nagetiere und Stangenspalier für die Bohnenranken.

Druckbombenmethode nach Scholander

Neben der Beobachtung des Pflanzenwachstums wurde durch das Institut für Botanik an der Universität für Bodenkultur die Möglichkeit geboten auch das Wasserpotential an den Blattstielen der Sonnenblumen zu messen. Die dafür erforderliche Apparatur, die sog. Scholanderbombe oder Druckbombe wurde vom Institut zu Verfügung gestellt.

Scholander und Mitarbeiter griffen Mitte der sechziger Jahre eine Konstruktion von Henry Dixon (Dixon, 1914 zitiert von Herppich, 1995) auf und verbesserten dessen Apparatur zur Messung des negativen hydrostatischen Druckes von Pflanzen. Mit ihrer „Druckbombe“, oft auch als „Scholanderbombe“ bezeichnet, schufen sie eine Möglichkeit, auf einfache, schnelle und zuverlässige Weise das Gesamtwasserpotential von ganzen Pflanzen, Zweigen, Blättern oder sogar Blattstücken zu bestimmen.

Dabei wird angenommen, dass das Wasserpotential im Xylem näherungsweise dem des ganzen Organs entspricht. Einerseits weil in vielen Fällen das osmotische Potential des Xylemsaftes vernachlässigbar ist, andererseits das Xylem in engen Kontakt mit den meisten Zellen der Pflanze steht (Taiz, 1998). In einer transpirierenden Pflanze steht der Wasserfaden im Xylem unter einem Unterdruck, einer Saugspannung. Wird ein Blatt oder ein Zweig von dieser Pflanze abgeschnitten, muss sich dieses negative Wasserpotential entspannen und der Meniskus des Xylemsaftes sich in die Gefäße zurückziehen (Salisbury, 1996). Durch direkte Messung und durch indirekte experimentelle Ansätze konnte gezeigt werden, dass in den Leitelementen des Xylems einer transpirierenden Pflanze tatsächlich ein Unterdruck, eine Spannung herrscht. Das heißt, das Druckpotential im Xylem ist negativ. Die Spannung wird dadurch bedingt, dass das Xylem als Gesamtheit betrachtet, zwischen den Wurzel- und den Blattmesophyllzellen mit ihren unterschiedlichen Wasserpotentialen (Wurzel-, Xylem-, Blattpotential) „eingespannt“ ist. Schneidet man nun einen Ast oder ein Blatt ab, erzeugt man ein großes Leck, ähnlich wie bei der Kavitation und der Unterdruck in den Wasserleitbahnen muss sich durch Ansaugen von Umgebungsluft entspannen. Der hydrostatische Druck im Xylem ist dann annähernd gleich dem der umgebenden Atmosphäre ($\sim 0,1$ MPa), wie durch direkte Messung mit einer Miniaturdrucksonde nachgewiesen wurde.

Die Xylemflüssigkeit ist als eine hochverdünnte Lösung anzusehen. Zwar wird das osmotische Potential im Xylem mit abnehmendem Blattwasserpotential negativer, absolut gesehen beträgt sein Wert jedoch meist weniger als 5 % des Gesamtwasserpotentials. Das Wasserpotential im Xylem wird also in erster Linie durch die Druckkomponente P_{Xylem} bestimmt. Wenn sich der Unterdruck im Xylem nach dem Abschneiden des Blattes oder Zweiges entspannt, wird das Xylemwasserpotential weniger negativ. Es kann dann entlang des neuen Wasserpotentialgradienten solange Wasser in die Mesophyllzellen des Blattes fließen, bis sich die Wasserpotentiale beider Bereiche angeglichen haben. Mit der Reduktion des Wasservolumens im Xylem muss sich auch der Wasserfaden in die Gefäße zurückziehen. Da sowohl das Gesamtwasservolumen im Xylem als auch dessen Wasserspeicherkapazität sehr klein (~ 1 % des Mesophylls) ist, sollte dieser Prozess eine sehr geringe Halbwertszeit aufweisen.

Wenn man nun auf die Mesophyllzellen des Blattes einen Überdruck ausübt ($P > P_{\text{Atmosphäre}}$), erhöht man definitionsgemäß deren Druckpotential und damit auch das Gesamtwasserpotential. Der Wasserfluss aus dem Xylem in das Mesophyll, der nach dem Abschneiden aufgetreten war, kehrt sich nun um. Ist der auf das Blatt wirkende Überdruck schließlich dem Betrag nach gleich der vorher herrschenden Wasserspannung im Xylem, sollte der Ausgangszustand wieder hergestellt sein. Dann muss der Meniskus des Wasserfadens in den Gefäßen wieder an der Schnittstelle auftauchen. Dieser Überdruck muss somit ein Maß für die Wasserspannung im Xylem darstellen (Herppich, 1995) und kann in

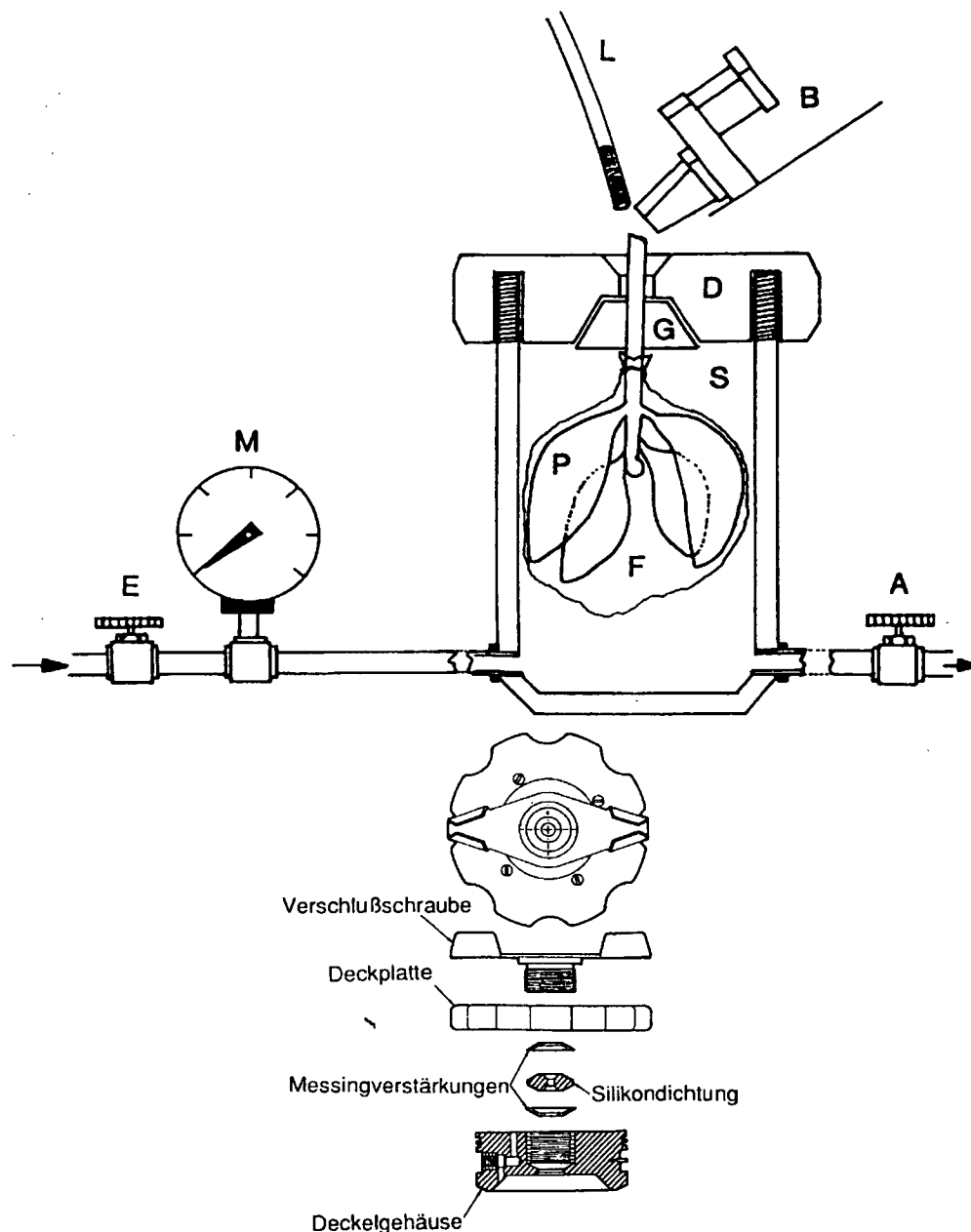
erster Näherung dem Blattwasserpotential gleichsetzt werden. Unter diesen Voraussetzungen erfasst man mit der Druckbombe nach Scholander tatsächlich die Xylemspannung und nicht das Gesamtwasserpotential im Xylem oder im Mesophyll. Effektive Messgröße ist der Bombendruck, bei dem der Xylemwasserfaden wieder in den Gefäßen an der Schnittstelle zu beobachten ist. Wie oben dargestellt, entspricht dieser der Xylemspannung, die wiederum in sehr guter Näherung dem Xylemdruckpotential gleichzusetzen ist. Will man das Xylemgesamtwasserpotential erfassen, muss das osmotische Potential des Xylemsaftes bestimmt und eingerechnet werden.

Das Xylemwasserpotential ist nur dann einem mittleren, volumen- bzw. kapazitätsgemittelten Blattwasserpotential (annähernd) äquivalent, wenn sich das Wasserpotentialgleichgewicht nach dem Abschneiden auch tatsächlich vollständig etabliert hat. Dies muss aber nicht nur zwischen Xylem und Mesophyll, sondern über dem gesamten Blattsymplasten der Fall sein. Ist aber die hydraulische Leitfähigkeit in Teilen des Symplasten sehr klein und treten, wie bei stark transpirierenden großen Blättern leicht möglich, große Gradienten im Wasserpotential über der Blattspreite auf, kann sich dieses Gleichgewicht nur bedingt einstellen. Unter diesen Bedingungen erfolgt bei Druckerhöhung der Wasserfluss aus dem Mesophyll in das Xylem zuerst aus den Zellen, die das geringste Wasserdefizit besitzen. Das sind diejenigen, die sehr nahe an den großen Gefäßen der Blattrippen liegen. Bei diesen Zellen ist auch der Weg am kürzesten. Ein solcher Wasserpotentialgradient konnte experimentell an großen, leicht trockengestressten Sonnenblumenblättern nachgewiesen werden. Mit der Scholanderbombe wurden Potentiale von $-1,65 \pm 0,06$ MPa bestimmt. Das Wasserpotential des Gewebes nahe der Mittelrippe, gemessen mit einem In-situ-Psychrometer, betrug $-1,67 \pm 0,13$ MPa, am Blattrand dagegen $-2,49 \pm 0,05$ MPa. Es ist einsichtig, dass man in diesem und in ähnlichen Fällen die Ergebnisse der Druckbombenmessung sinnvollerweise nur mit dem positivsten möglichen (feuchtesten) Blattwasserpotential gleichsetzten kann (Herppich, 1995).

Die Methode eignet sich gleichermaßen gut für den Labor- und den Freilandeinsatz. Eine Scholanderbombe funktioniert ohne elektronische Bauteile und ist deshalb wenig stör anfällig und sehr verlässlich. Sie ist außerdem noch vergleichsweise billig in der Anschaffung. Es verwundert daher nicht, dass die Druckbombe nach Scholander die am häufigsten verwendete Apparatur zur Bestimmung des Gesamtwasserpotentials ist (Herppich, 1995). Moderne Druckbomben werden aus Aluminium, Stahl oder rostfreiem Stahl hergestellt. Solche Druckgefäße können je nach Auslegung Überdrücken bis zu 10 MPa, das entspricht einem Druck von 100 bar, problemlos standhalten.

Alle Scholanderbomben sind prinzipiell nach dem gleichen Schema aufgebaut. Zur Erzeugung des notwendigen Überdruckes wird entweder Stickstoff oder Druckluft aus Druckflaschen verwendet. Durch ein Reduzierventil kann der Flaschendruck auf einen gewünschten Wert erniedrigt werden. Das Feinventil, mit dem der Gasdruck in der Bombe genau eingestellt werden kann, ist oft durch einen Zweiwegehahn gesichert. Mit diesem kann man den Gasweg von der Druckflasche zum Druckgefäß vollständig sperren. Zur Messung des angelegten Druckes dient ein hochauflösendes Manometer, das durch ein Überdruckventil geschützt sein sollte. Es ist sinnvoll, auswechselbare Manometer zu verwenden, die den jeweils erwarteten Wasserpotentialbereich abdecken. Die Druckkammer selbst kann bei manchen Modellen ausgetauscht und so ein Gefäß angebaut werden, dessen Volumen der Größe des Versuchsmaterials entspricht. Der Verschlussdeckel der Kammer wird entweder mit einem Gewinde, oder günstiger, mit einem Bajonettverschluss auf dem Gefäß verriegelt. Die einzelnen Typen von Druckbomben unterscheiden sich auch in der Art der verwendeten Dichtung, in die der Blattstiel oder Zweig eingesetzt wird. Im einfachsten Fall wird in eine Vertiefung im durchbohrten Deckel ein aufgeschnittener Gummistopfen gesetzt. Dieser wird durch den Kammerdruck gegen den Deckel abgedichtet. Bei anderen Typen, so wie sie von mir verwendet wurden, kann man die Dichtung von oben her austauschen wie im unteren Teil der folgenden Abbildung gezeigt wird. Diese Konstruktion hat den Vorteil, dass man

Dichtungen mit unterschiedlichen Öffnungen einsetzen kann. Die Bohrungen können rund sein, wenn Blätter mit langen Blattstielen, oder ein kleiner Ast gemessen werden sollen. Für Grasblätter können sie schlitzförmig oder auch speziellen Bedürfnissen angepasst sein. Als Material für die Dichtungen bietet sich entweder Gummi oder Silikon an (Herppich, 1995).



L... Licht, Beleuchtung
B... Binokular
D... Deckel
G... Gummidichtung
S... Stahlgehäuse

P... pflanzliches Material
F... Folienbeutel
E... Einlassventil
M... Manometer
A... Auslassventil

Abb. 3.4 Skizze über den Aufbau der Scholanderbombe zur Messung des Wasserpotentials von Pflanzen. Die Pflanzenprobe wird in die dichte Kammer eingebaut und mit Luftdruck beschickt bis der Pflanzensaft an der Schnittstelle wieder sichtbar wird (Herppich, 1995).

Zur Beobachtung der Schnittfläche sollte möglichst ein Binokular verwendet werden. Dies erleichtert die Beobachtung und schützt die Augen des Experimentators. Alternativ kann man auch eine Handlupe benutzen. Dann ist es aber ratsam, eine Schutzbrille zu tragen und nicht direkt über dem Deckel zu beobachten, sondern immer schräg von der Seite. Bei höheren Drücken kann es vorkommen, dass ein Blattstiel gequetscht und durch die Dichtung geschossen wird. Auch bei den Versuchen mit Sonnenblumen neigen die Blattstiele dazu sich durch die Dichtung zu schieben. Eine Scholanderbombe sollte nie mit Öl gereinigt werden, da sonst beim Anlegen eines Druckes die Gefahr einer Explosion besteht. Man darf grundsätzlich nicht vergessen, dass die Arbeit mit einem Druckgefäß immer gefährlich sein kann, auch wenn die Konstruktion an sich sehr sicher ist.

Um eine möglichst konstante Umgebungstemperatur zu gewährleisten, wurde das ganze Gerät auf der Rückbank eines Pkws installiert. Dadurch war es auch möglich die einzelnen Messpunkte in möglichst rascher Reihenfolge anzufahren, bevor die Temperaturunterschiede die im Laufe eines Tagesverlaufs auftreten, zu groß wurden. Aus diesem Grund wurden anfangs auch nur die Stellen Entfeuchtend (II) und Befeuchtend (III) beprobt. Zur Messung wurde immer das vierte Blatt vom oberen Ende der Pflanze abwärts gezählt, verwendet. Vor der Trennung des Blatts von der Pflanze durch eine scharfe Rasierklinge wurde dieses, zur Verhinderung von Wasserverlusten, mit einem Kunststoffbeutel umhüllt. Die Zeitspanne zwischen Abschneiden und Beginn der Messung konnte ebenfalls sehr kurz gehalten werden. Um den Blattstiel wegen seiner Mittelrippe ohne ihn zu quetschen einspannen zu können, wurde der Hohlraum der Mittelrippe mit Kitt verschlossen. Um Wasserverluste des Blattes während der Untersuchung zu verhindern, wurde am Bombenboden ein wassergetränktes Tuch mit einer Abdeckung zum Blatt hin, um direkten Kontakt zu vermeiden, deponiert.

Am 27.7.2000 wurde nach einigen Vorversuchen zur besseren Handhabung der Apparatur um 15 Uhr mit den Messungen begonnen. Dabei wurden insgesamt acht Messungen durchgeführt. Am 28.7.2000 setzte um sechs Uhr früh Regen ein und die Messreihe musste schon nach drei Messungen abgebrochen werden. Am 29.07.2000 konnten am Vormittag in Summe vier Messwerte gewonnen werden.

Allerdings war es am 13.8.2000 möglich einen ganzen Tagesgang zu messen, wobei alle Stellen von I bis V mit insgesamt 30 Messungen beprobt wurden. Auch am 19.8.2000 konnte ein Tagesgang im Zuge von 20 Messungen aufgezeichnet werden.

Am 14.8 wurde die Methode von Scholander auch an den Stangenbohnen auf dem Feld an den Stellen Befeuchtend (III), Entfeuchtend (II) und Neutral (V) angewendet. Es wurden immer die Blätter im unteren Drittel der Pflanzen zur Messung herangezogen. Dabei war es wichtig darauf zu achten, dass das fragile Blatt beim Einbau in die Druckbombe nicht knickte oder sonstigen Schaden nahm. Es wurde jeweils eine Messung, in Summe 15, durchgeführt.

Ernte einer Pflanzenstichprobe, 2000

Nach Ausmessen des Pflanzenabstandes und dem Abstand der Saatreihen an den Sonnenblumen war es möglich den Pflanzenbestand pro Quadratmeter zu berechnen. Dabei kamen wir auf neun Sonnenblumen pro Quadratmeter. Diese wurden auch zur Probenentnahme herangezogen um einen Hektarertrag errechnen zu können. Die Entnahme erfolgte am 10.9.00 an folgenden Stellen:

- Beim herkömmlichen, entfeuchtenden Gerät im Bereich des Gerätewirkfeldes; Stelle II.
- In der Mitte des Feldes, in der Zone, die ohne Einfluss war; Stelle V.
- Beim Gerät mit befeuchtender Wirkung im Bereich des Gerätewirkfeldes; Stelle III.

An jeder Stelle wurden die Pflanzen von fünf Quadratmetern entnommen, also in Summe 45 Stück und über das ganze Feld 135 Stück. Für eine statistische Auswertung und zum Vergleich der Entnahmestellen werden mindestens 20 Stück je Stelle benötigt (Kalra, 1998). An jeder Entnahmestelle wurde auch noch eine Bodenprobe bis in eine Tiefe von einem Meter gezogen.

An den Stellen II, III und V wurde auch eine Probe der Gerste in dem Umfang von einem Quadratmeter pro Stelle entnommen. Dazu wurde ein Rahmen mit einem Meter Innenseitenlänge beliebig in das Feld gelegt. Alle Pflanzen, die sich im inneren des Rahmens befanden wurden, wie das Bild zeigt, entnommen.

Von den Bohnen wurde alles mitgenommen, doch es konnten nur noch die verbliebenen Früchte ausgewertet werden.

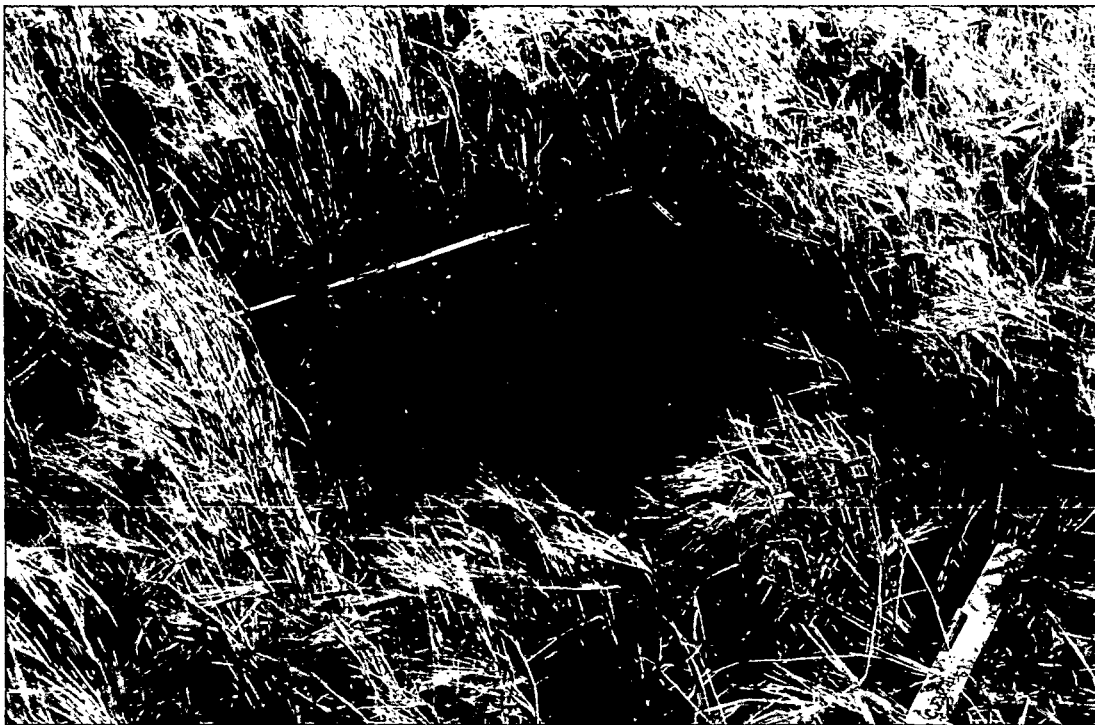


Abb. 3.5 Foto von Gerste im Freiland 2000. Zur Stichprobenentnahme wurde ein Rahmen mit einer Innenfläche von 1m² in das Feld gelegt und alle darin befindlichen Pflanzen für die späteren Untersuchungen entfernt.

Kontrollversuch mit Weizen, 2001

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Bodenverhältnisse auf dem Feld an den Probeentnahmestellen identisch sind, was auch in der Bodenkarte ersichtlich ist, wurde ein Jahr nach dem Versuch mit den Aquapolgeräten ein zweiter durchgeführt. Im zweiten Fall waren aber keine Be- oder Entfeuchtungsgeräte aufgestellt. Die Entscheidung über die Art des Anbaus lag beim Grundstückseigentümer und dieser wollte die normale Fruchtfolge beibehalten. So war das Feld nicht geteilt und mit Weizen der Sorte „Capo“ bebaut. Am Ende der Vegetationsperiode wurde am 28.7.2001 eine Stichprobe entnommen. Auch hier wurde an den drei Stellen entfeuchtend, neutral und befeuchtend ein Rahmen, allerdings mit 0,25m Innenseitenlänge, beliebig in das Feld gelegt. Alle Pflanzen die sich im Inneren des Rahmens befanden wurden entfernt. Diese Prozedur wurde an jeder Stelle viermal wiederholt um ebenfalls einen m² zu gewinnen und um die Streuung an den Entnahmestellen überprüfen zu können.

Die Getreideart Winterweizen, *Triticum aestivum* L., nimmt in unseren Breiten die Anbau-Spitzenstellung unter den Getreidearten ein. Er wird zur Herstellung von Teigwaren, Stärke, ferner als Rohstoff in Brennereien und Brauereien, sowie als Konzentratfutter in der Tierhaltung verwendet. Die Ertragsbildungsprozesse bei Weizen gleichen denen der übrigen Getreidearten. Auffallend ist jedoch die Ährchenzahl pro Ähre, die unter ungünstigen Bedingungen wie Wasser- oder Nährstoffmangel abnimmt. Die Verzweigung vom Sprossaufbau erfolgt beim Weizen wie bei den anderen Getreidearten durch Bestockung welche im dicht unter der Erdoberfläche liegenden Bestockungsknoten stattfindet. Dort wird das Büschelwurzelsystem, also samenbürtiger Wurzeln, ausgebildet. Beim Freilegen von Jungpflanzen des Winterweizens ist sichtbar wie sehr das Wachstum des Keimwurzelsystems jenem des Sprosses vorausseilt. Der Unterschied zur Tiefe des reifen Wurzelsystems ist hier relativ gering. Das reife Wurzelsystem erreicht auf dem gleichen Wuchsort eine Tiefe von 178,5cm. Die folgende Zeichnung zeigt das Wurzelsystem von *Triticum aestivum*, Gewöhnlicher Weizen, milchreif, Höhe 130cm freigelegt Ende Juni auf Mullgleyboden (Kutschera, 1960).

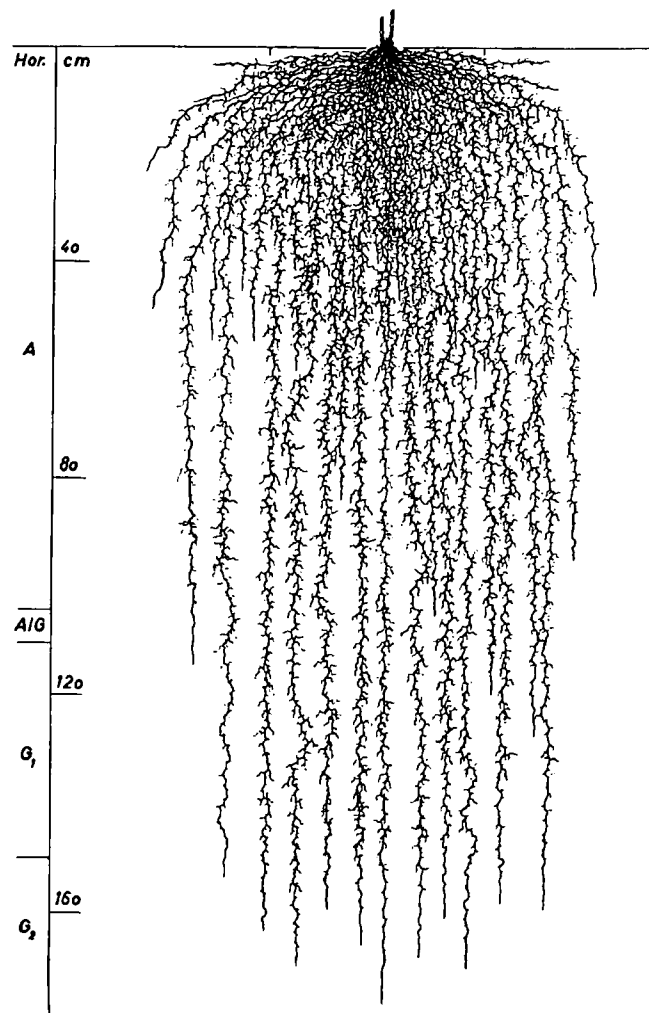
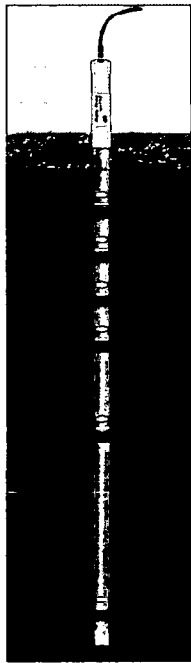


Abb. 3.5.1 Zeichnung des Büschelwurzelsystems von Gewöhnlichen Weizen. Bodenprofil: A: 0-110cm humoser Lehm A/G: 110-120cm humoser Lehm, rostfleckig G1: 120-150cm Lehm ,stark rostfleckig G2: feinsandiger Lehm, schwach rostfleckig (Kutschera, 1960).

Kontrollversuch mit Sonnenblumen, 2005

Um die gewonnenen Ergebnisse zu vertiefen und besser interpretieren zu können wurde der Versuch im Jahr 2005 auf dem gleichen Feld abermals mit Sonnenblumen wiederholt. Diesmal aber wurden die Aquapolgeräte anders aufgebaut. Das entfeuchtende Gerät vom Jahr 2000 wurde an die Stelle vom befeuchtenden Gerät aus dem Jahr 2000 installiert. Wo also früher ein entfeuchtendes Gerät stand, stand im Jahr 2005 ein befeuchtendes und umgekehrt. Das Feld war nicht geteilt und nur mit Sonnenblumen der Hochöl Säure Sorte PR64H41 bebaut.

Des weiteren waren auf dem Feld vier Sonden zur Messung der Bodenfeuchte installiert. Dabei handelte es sich um Profilsonden (PR1) von der Firma Delta-T Devices Ltd, vertreten bei UP, Umweltanalytische Produkte GmbH, Cottbus, Deutschland. Diese Profilsonde basiert



auf dem Prinzip der Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante des Bodens vom Wasser. Wasser hat eine Dielektrizitätskonstante von 81, Bodenpartikel von 4 und Luft von 1. Das macht das Sondensignal relativ unempfindlich gegen Änderungen der Bodendichte und Bodenzusammensetzung. Zur Bestimmung der Bodenfeuchte wird ein 100 MHz-Signal verwendet, das über 2 Edelstahlringe in den Boden „geleitet“ wird. Abhängig vom Wassergehalt des Bodens dringt dieses Signal mehr oder weniger tief in den Boden ein bzw. wird mehr oder weniger davon zur Sonde zurück reflektiert. Der reflektierte Teil des Signals wird mit dem Ausgangssignal zu einer „stehenden“ Welle kombiniert, deren Amplitude der Bodenfeuchte entspricht. Die Sondenringe wurden so konstruiert, dass das elektromagnetische Feld eine Eindringtiefe von ca. 100 mm erreicht. Daraus ergibt sich ein Messvolumen von rund 1.5 Liter. Die Empfindlichkeit nimmt mit der Entfernung ab. Daher gehen Luftlöcher, die z.B. bei der Installation der Sondenrohre entstehen können, bzw. entlang des Sondenrohres eindringendes Regenwasser überproportional in die Messung ein. Beides ist folglich so gut als möglich zu vermeiden (Delta-T Devices Ltd, 2001). Genauigkeit im Bereich von 0-40% Wassergehalt: ± 4 bzw. $\pm 6\%$ absolut (UPgmbh, 2007).

Abb. 3.5.2 Schema der PR1-Sonde mit 6 Messtiefen in 10, 20, 30, 40, 60 und 100cm Tiefe.

Zwei dieser Sonden waren im befeuchtenden Wirkungsbereich und zwei im entfeuchtenden Wirkungsbereich der Aquapolgeräte im Boden installiert. Aufgrund der Umstände wie z.B. ungeteiltes Feld, teuren, sensiblen Sonden im Boden und der Erfordernis der Befahrbarkeit mit landwirtschaftlichen Geräten war es notwendig die Aquapolgeräte mehr an den Rand des Feldes, auf gleicher Linie wie die Sonden zu platzieren. Diese Verschiebung um einige Meter sollte aber bei einem postulierten Wirkradius der Geräte von mehr als 80m keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben.

Der Versuchsaufbau aus diesem Jahr wurde von Herrn DI. Ernst Kortschak betreut, welcher die Effekte der Aquapolgeräte auf einigen Versuchsflächen im Zuge seiner Dissertation untersuchte. Seine Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen hat er mir hier dankenswerterweise zur Verfügung gestellt. Am 21.08.2005 wurde die Wuchshöhe der Sonnenblumen stichprobenartig erhoben und bildlich dokumentiert.

Am 15.09.2005 wurde jeweils an den Stellen befeuchtend, neutral und entfeuchtend die Wuchshöhe von 100 Pflanzen, in Summe 300, gemessen. Weiters wurden an diesem Tag von jeder Stelle 30 Sonnenblumenköpfe, in Summe 90, zur weiteren Untersuchung entnommen (Kalra, 1998). Im Zuge dieser Untersuchungen, welche von Herrn DI Ernst Kortschak durchgeführt wurden, ist das Kopfgewicht, Korngewicht und Tausendkorngewicht, sowie das Gewicht der Spreu festgestellt worden. An jeder Entnahmestelle wurde auch noch eine

Bodenprobe bis in eine Tiefe von einem Meter gezogen und die Bodenart an Ort und Stelle bestimmt.

Bodenproben

Grundvorgänge der Bodenbildung und Bodenbestandteile

Die Böden bilden sich unter dem Einfluss des Klimas und der Organismenwelt aus der Gesteinsunterlage. Bei der zeitlichen und örtlichen Überlagerung der drei Phasen Luft, Wasser und Gestein entsteht ein neuer nährstoffreicher, gepufferter Lebensraum der ein äußerst komplexes Substrat mit einer sehr großen spezifischen Oberfläche ist. So kann die Tonfraktion (Korngröße kleiner als $2\mu\text{m}$) im Boden bei einem Würfel mit 1 cm Kantenlänge eine spezifische Oberfläche von mehr als $6\text{m}^2/\text{cm}^3$ erreichen. Diese innere Oberfläche bietet Platz für Kleinstlebewesen und chemische Reaktionen. Schon auf einem Gramm Ackerboden finden sich 10^6 bis 10^9 Bakterienzellen, eine der wichtigsten Organismengruppen für den Boden (Gisi, 1997). Der Humus, der die oberste Bodenschicht fruchtbar macht ist etwa 3.000 bis 5.000 Jahre alt. Der Boden, oder die Pedosphäre, wird als klimabedingtes, petrogenes und biogenes Umwandlungsprodukt der festen Erdrinde definiert. Zirka 100 Jahre sind erforderlich bis aus einem Zentimeter Rohboden ein Zentimeter fruchtbare Erde entsteht (Kraner et al., 2006). Seiner Entstehung gemäß zeigt jeder Boden eine gesetzmäßige Entwicklung, eine mit dieser fortschreitenden Horizontierung und eine Zusammensetzung aus einer Vielzahl verschiedener Bauelemente. Diese umfassen nicht nur feste Bestandteile verschiedener Herkunft und Funktion, sondern auch Wasser in wechselnder Menge und Luft mit einer unterschiedlichen Zusammensetzung als in der freien Atmosphäre.

Innerhalb der festen Bestandteile der Böden sind anorganische und organische zu unterscheiden. Zu den ersteren gehören Trümmer des Muttergesteins im Besonderen dessen Minerale, daneben aber auch im Zuge der Verwitterung neu gebildete mineralische Substanzen. Als solche sind die Tonminerale, sowie limonitisches Eisen und andere Oxydationsprodukte zu nennen.

Die festen organischen Bestandteile umfassen die in der Erde lebenden Organismen, wie Bakterien, Pilze, Algen und kleine Bodentiere in großer Zahl und in einer den Standortverhältnissen angemessenen Artenkombination, sowie die lebenden Wurzeln der auf dem Boden stockenden Vegetation. Tote pflanzliche und tierische Zellen und Gewebe in frischem oder mehr oder weniger zersetztem Zustand gehören auch dazu (Franz, 1960).

Organismengruppe	Biomasse g/m ² 20cm tief	Biomasse % der Totalmasse
unterirdische Pflanzenorgane	600,0	50,00
Hefe- u. Fadenpilze	350,0	29
Bakterien	150,0	13
Regenwürmer	60,0	5
Protozoen	25,0	2
Nematoden	4,0	0,3
Enchytraeen	2,0	0,2
Schnecken	2,0	0,2
Tausendfüßler	2,0	0,1
anderes	5,0	0,2
Summe	1200,0	100,0

Tab. 3.1 Biomasse von lebenden Bodenorganismen und unterirdischen Pflanzenorganen. Durchschnittliche Werte in g pro m² und 20 cm Bodentiefe sowie in Prozent der Totalmasse (Gisi, 1997).

Jeder Boden stellt ein ganzheitliches System dar. Die Bodenbestandteile stehen nicht beziehungslos im Raume nebeneinander, sondern sie beeinflussen sich gegenseitig. Die einzelnen chemischen und physikalischen Veränderungen sind voneinander abhängig. Diese Wechselbeziehungen dauern so lange, bis sich das Gleichgewicht aller bodenbildenden Prozesse einstellt. Dieses Gleichgewicht ist allerdings nicht starr, sondern dynamisch, es ermöglicht jahreszeitliche und auch durch andere äußere Einflüsse bedingte Schwankungen des Gesamtzustandes. Trotzdem wird nach einer gewissen Zeit der mittlere Zustand stets wiederhergestellt, welcher im hohen Maße stabil ist, weil das dynamische Gleichgewicht alle Standortsfaktoren und alle Umwelteinflüsse einbezieht.

Ändert der Mensch das Milieu etwa durch Ent- oder Bewässerung, unter anderem durch radikale Umformung der Pflanzendecke (Veränderung der Holzartenzusammensetzung im Walde, Rodung, Grünlandumbruch), Humusverzehr in der Ackerwirtschaft, intensive Mineralzufuhr, dann stört er das natürliche Gleichgewicht, er löst neue Entwicklungstendenzen aus, die erst nach Erreichung eines neuen Gleichgewichtszustandes zur Ruhe kommen. Somit entstehen anthropogene Böden, die in den Kulturländern immer größere Flächen einnehmen (Franz, 1960).

Bodenluft und Bodenwasserhaushalt

Die Zusammensetzung der Bodenluft weicht von derjenigen der freien Atmosphäre durch hohen Wasserdampfgehalt, höheren Kohlendioxid- und geringeren Sauerstoffgehalt ab. Die Bodenluft ist fast immer wasserdampfgesättigt, ihr Kohlendioxidgehalt (CO₂) ist in intensiv belebten, "tätigen" Böden höher als in "untätigen", er nimmt gegen das Bodeninnere zu. Bodenwasser und Bodenluft stehen miteinander in doppelter Hinsicht im Gleichgewicht. Auf der einen Seite teilen sie sich das Hohlraumvolumen des Bodens, welches entweder mit Luft oder Wasser gefüllt ist. Auf der anderen Seite finden zwischen Bodenluft und Bodenwasser Austauschvorgänge statt, die den Gesetzmäßigkeiten für aneinandergrenzende Flüssigkeiten und Gase folgen. Das Boden-Wasser-Luft-Verhältnis schwankt in verschiedenen Böden in weiten Grenzen. Als optimal für biogene Prozesse wird etwa ein Volumsverhältnis 50: 30: 20 angesehen (Franz, 1960).

Das Wasser tritt im Boden in vier verschiedenen Formen auf (Gisi, 1997):

- als Adsorptionswasser, und Hydratationswasser, welches an die Grenzflächen der Kolloide durch elektrostatische Kräfte, Dipolkräfte und Wasserstoffbrücken gebunden ist
- als Kapillarwasser, gebunden durch Kohäsion, welches in den Bodenhohlräumen gespeichert wird
- als freies Wasser, welches im Boden nur dann auftritt, wenn dieser unter Grundwassereinfluss steht oder wenn ihm Niederschlagswasser zugeführt wird, und
- als freier, mit der Bodenluft vermischter Wasserdampf.

Das Bodenwasser ist nicht reines H_2O , sondern enthält Stoffe suspendiert (in fester Form aufgeschlämmt), sowie in kolloidaler und echter Lösung. Unter den gelösten Stoffen spielen Mineralsalze als Anionen und Kationen eine große Rolle. Fallweise treten neben ihnen organische Säuren und Basen, wie Kohlensäure auf. Das Bodenwasser ist demnach im Gleichgewicht mit der CO_2 -reichen Bodenluft stehend, immer mit CO_2 angereichert.

Zwischen den einzelnen Formen des Wassers im Boden lassen sich nach ihrer Bindungsfestigkeit keine scharfen Grenzen ziehen. Im Bindungsgrad bestehen zwischen den Wasserhüllen der Bodenkolloide, also dem Adsorptionswasser, und dem die kleinsten Bodenhohlräume füllenden Kapillarwasser, gleitende Übergänge. Ebenso auch zwischen dem in den größeren Kapillaren eben noch gegen die Schwerkraft gehaltenen Wasser und dem langsam versickernden freien Wasser. Das Wasser in den größten Kapillaren ist am schwächsten, das in der innersten Hydrathülle der Ionen und Kolloide am festesten gebunden. Die innerste, an die trockenen Grenzflächen der Bodenkolloide angelagerte Wasserhaut steht unter einer Dampfspannung von etwa 1000 MPa.

Die meisten im Boden vorkommenden festen Grenzflächen adsorbieren Wasser und sind daher mit einem Film aus Wassermolekülen überzogen. Die Dicke dieses Films fällt und steigt mit dem Wasserangebot in der Umgebung. Wo austauschbare Ionen an den Mineraloberflächen anhaften, stellt deren Hydratationswasser einen erheblichen zusätzlichen Anteil an Adsorptionswasser (Hartge, 1999).

Als ein Maß für den Bindungsgrad des Adsorptionswassers hat E. Mitscherlich unter Hygroskopizität des Bodens die Wassermenge definiert, die dieser im Dampfspannungsgleichgewicht mit 10%iger Schwefelsäure bei Zimmertemperatur festhält. Die Saugspannung der äußersten Wasserhülle der Bodenkolloide, die bei $16,5^\circ C$ im Gleichgewicht mit der Dampfspannung der 10%igen Schwefelsäure steht, beträgt rund 5 Mpa. Bei der angegebenen Temperatur entspricht diese Dampfspannung einer relativen Luftfeuchtigkeit von 94,1% (Franz, 1960).

Dieser Betrag des hygroskopisch gebundenen Wassers von 5 Mpa liegt erheblich über den Saugspannungen, mit denen die Pflanzenwurzeln das Wasser aufnehmen können. In untenstehender Tabelle sind die Wurzelsaugspannung ($=\Psi_{\text{Wurzel}}$) einiger wichtiger Kulturpflanzen zusammengestellt woraus ersichtlich wird, dass die Pflanzen nicht in der Lage sind, das hygroskopische Wasser zu verwenden.

Pflanzenart	Wurzelsaugspannung in Mpa
Winterweizen	3,00
Sommerweizen	2,75
Roggen	3,20
Hafer	2,05
Mais	2,75
Erbse	2,55
Luzerne	2,70
Zuckerrübe	1,43

Tab. 3.2 Wurzelsaugspannungen bei verschiedenen Arten von Kulturpflanzen. Werte in Mpa (Franz, 1960).

Da das hygroskopische Wasser im Boden nichts anderes ist als das an der Oberfläche der Ionen und Kolloidteilchen festgehaltene Hydratationswasser, hängt die Menge des hygroskopisch gebundenen Wassers vom Kolloid- und Kationengehalt des Bodens ab. Für humusfreie Proben von Böden verschiedener Texturklassen werden folgende Hygroskopizitätswerte in Gramm je 100 Gramm Boden in der Tabelle angegeben. Je größer die Zahl umso mehr Wasser ist gebunden und daher nicht pflanzenverfügbar. Humusgehalte erhöhen die Hygroskopizität bedeutend.

Bodenart	Hygroskopizität g Wasser/100g Boden		
Sand	0	bis	0,5
lehmiger Sand	1	bis	2
sandiger Lehm	2	bis	3
Lehm	2	bis	6
toniger Lehm	6	bis	8
sandiger Ton	8	bis	15
Ton	15	bis	25

Tab. 3.3 Hygroskopizität nach Mitscherlich bei verschiedenen Bodenarten. Werte in g Wasser / 100g Boden (Franz, 1960).

Alles nicht hygroskopisch gebundene Wasser des Bodens wird als Kapillarwasser bezeichnet. Die Hygroskopizität ist ein konventionell gewählter Grenzwert, der keineswegs die Grenze angibt, unter der es im Boden nur noch durch Hydratationskräfte gebundenes Wasser gibt. Wie die Bindungsfestigkeit des hygroskopischen, so schwankt auch die des Kapillarwassers in weiten Grenzen. Sie wird als Kapillarkraft bezeichnet und ist umso größer, je kleiner der Durchmesser der Kapillaren ist, in denen das Wasser festgehalten wird. Der Betrag des kapillaren Hubes ist abhängig vom Kräfteverhältnis zwischen Adhäsion der Kapillarwand und Kohäsion der Flüssigkeit. Er hängt auch von dem Durchmesser der Kapillaren ab, da ja die Kapillarkräfte die Flüssigkeit nur bis zu der Höhe heben, die dem Gewicht der Flüssigkeitssäule entspricht. In engen Kapillaren, in denen nur ein geringes Flüssigkeitsvolumen Platz findet, wird demnach die Flüssigkeit höher gehoben werden als in weiten. Dementsprechend wächst auch die Saugspannung des Kapillarwassers mit abnehmendem Kapillardurchmesser, die Saugspannung des Bodenwassers nimmt mit abnehmendem Wassergehalt zu, da zuerst die größeren und dann immer feinere Kapillaren ihr Wasser abgeben.

Die Saugspannung, mit der das Wasser im Boden festgehalten wird, wird in der Bodenphysik als Druck einer Wassersäule von bestimmter Höhe in cm ausgedrückt. Da 0,1 Mpa (1bar) dem Druck einer Wassersäule (WS) von 1000cm (10m) gleichkommt, ist die entsprechende Saugspannung 1000cm WS. Einem Vorschlag von R.K. Schofields entsprechend wird heute nicht der Wert in cm WS, sondern der pF- Wert angegeben, der in salzfreien Böden des humiden Klimas dem Logarithmus des Werts in cm WS gleichkommt. Einige Beispiele, die das Verständnis der Zusammenhänge fördern, sind in unten angeführter Tabelle dargestellt. Wie im Kapitel: „Wasserhaushalt von Pflanzen“ dieser Arbeit beschrieben, haben die Tracheiden bei Pflanzen einen Durchmesser von 30 µm, die von Tracheen 400 µm.

Kapillarpotential C.P. in cm Wassersäule	pF- Wert	angenäherter Druck in Mpa	Durchmesser (µm) der Kapillaren die beim angegebenen Druck entwässert werden
1	0	0, 0001	3000, 0
10	1	0, 001	300, 0
100	2	0, 01	30, 0
345	2,5	0, 0345	8, 5
1.000	3	0, 1	3, 0
10.000	4	1, 0	0, 3
15.000	4,2	5, 0	0, 2
100.000	5	10, 0	0, 03
1.000.000	6	100, 0	0, 003
10.000.000	7	1000, 0	0, 0003

Tab. 3.4 Beziehung der Werte von cm Wassersäule und pF über den Briggschen Logarithmus, sowie Darstellung der zugehörigen Drücke und Kapillarendurchmesser (Franz, 1960).

Die verschiedenen Bodenwassergehalten entsprechenden Saugspannungen ergeben eine Kurve, die in verschiedenen Böden unterschiedlich verläuft. Sie ist in erster Linie von der Korngrößenzusammensetzung der Böden abhängig. Auch bei fortschreitender Wassersättigung, die eine Abnahme der Saugspannung zur Folge hat, entstehen charakteristische Saugspannungskurven. In kolloidhaltigen Böden sind die Saugspannungswerte, die für denselben Wassergehalt in der Austrocknungs- und in der Befeuchtungsphase gewonnen werden, verschieden. Dies ist dadurch bedingt, dass die Bodenkolloide nur allmählich Hydratwasser aufnehmen und dem entsprechend langsam quellen. Es ist deshalb notwendig, bei Saugspannungskurven anzugeben, ob sie für zunehmende oder abnehmende Wassergehalte Gültigkeit haben. Bei steigendem Wassergehalt ist die Saugspannung von der Zeit abhängig, die für die Quellung der Kolloide zur Verfügung steht, während bei fortschreitendem Wasserentzug der Zeitfaktor nicht berücksichtigt werden muss. Deshalb arbeitet die Bodenphysik zumeist mit der Saugspannung bei fortschreitendem Wasserentzug (Franz, 1960).

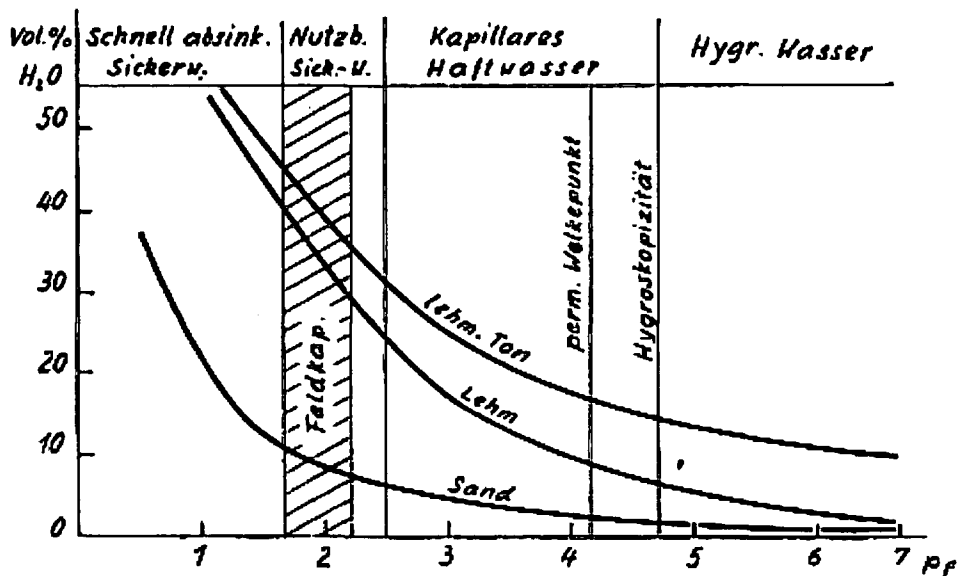


Abb. 3.6 Saugspannungskurven verschiedener Bodenarten. Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserpotential im Boden bei fortschreitendem Wasserentzug (Franz, 1960).

Für die Ergänzung der Wasservorräte des Bodens spielt außer den Saugspannungskräften, mit denen flüssiges Wasser in den Boden gesaugt wird, auch die Kondensation von Wasserdampf aus der Bodenluft eine gewisse Rolle. Der Sättigungsdampfdruck der Luft ist über Kapillaren geringer als über einer freien Wasseroberfläche. Dadurch kann es unter bestimmten Voraussetzungen zur Kapillarkondensation kommen, wobei die unter hoher Spannung stehende Kapillaroberfläche aus der angrenzenden Bodenluft Wasserdampfteilchen an sich reißt. Während der nächtlichen Auskühlung der obersten Bodenschichten diffundiert Wasserdampf aus dem wärmeren Unterboden an die Oberfläche und kondensiert im Wurzelraum. Es wurde nachgewiesen, dass sich auch schon bei der Anlagerung von Hydratwasser im Boden kapillare Kondensationseffekte bemerkbar machen. Es muss demnach in porösen Körpern im Zuge der Absättigung der Hydratspannung zu kapillaren Kondensationsvorgängen kommen. Sobald sich nämlich die Phasengrenzflächen zweier fester Körper berühren, berühren sich zwangsläufig auch ihre Hydratsäume. Diese stoßen nicht spitzwinkelig zusammen, sondern fließen auf Grund der Kohäsionsspannung des Wassers in einer Krümmung ineinander. Der dabei entstehende Meniskus hat das Bestreben, seine Oberfläche zu verkleinern, er zieht mit großer Energie Wasser auch aus dem Wasserdampf der Luft an (Franz, 1960).

In gemäßigttem Klima erreicht die Kapillarkondensation bei landwirtschaftlich nutzbaren Böden jährlich einen Betrag von mindestens 30mm Niederschlag. In den trockenen Subtropen scheinen noch höhere Werte erreichbar zu sein und es erfolgt dort auch gelegentlich ihre bodenwirtschaftliche Ausnützung. So wird im Trockenfelddbau auf den Kanaren der Boden mit porösem basaltischem Schlackenmaterial bedeckt, um so nicht nur einen Strahlungs- und Verdunstungsschutz, sondern auch Kapillarkondensation zu bewirken (Franz, 1960).

Alles Wasser, das im Boden nicht während längerer Zeit entgegen der Schwerkraft festgehalten werden kann, wird als spannungsfreies Wasser bezeichnet ($\Psi=0$), es tritt entweder als Sickerwasser oder, dort wo es nicht ungehindert versickern kann, als Grundwasser auf. Als Sickerwasser wird jenes Bodenwasser bezeichnet, welches der Schwerkraft folgend in die Tiefe wandert. Auch das kapillar festgehaltene Wasser unterliegt der Schwerkraft und wäre daher besser als kapillares Sickerwasser zu bezeichnen. Wie es von den

groben Poren des Bodens, die der Luft- und Wasserbewegung dienen, alle Übergänge bis zu den feinsten Kapillaren gibt, so finden sich auch die Zwischenstufen zwischen rasch versickerndem und zäh in den feinen Bodenhohlräumen festgehaltenem Wasser (Franz, 1960).

Sehr langsam versickerndes Wasser kann von den Pflanzen ausgewertet werden, was sich schon daraus ergibt, dass die mittlere Geschwindigkeit des Wachstums der Wurzelspitze an der Senkwurzel bei Getreide im Frühjahr 0,04cm pro Stunde erreicht, während die Versickerungsgeschwindigkeit des Wassers im Löss nur 0,02 bis 0,03 cm pro Stunde beträgt. Das pflanzenaufnehmbare Sickerwasser wird auch als nutzbares Sickerwasser bezeichnet. Die Geschwindigkeit, mit der das Niederschlagswasser im Boden versickert, ist in verschiedenen Böden sehr unterschiedlich. Sie ist von der Korngrößenzusammensetzung des Bodens sowie von der Form und Größe seines Porenvolumens abhängig. Sie wird unter anderem auch von dem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt und der jeweiligen Höhe des Grundwasserstandes, von der Bedeckung und der stofflichen Beschaffenheit des Bodens beeinflusst.

Um angeben zu können, wie viel pflanzennutzbare Wasser ein Boden maximal zu speichern vermag, muss man neben dem Wassergehalt beim Welkepunkt diejenige Wassermenge kennen, die er längere Zeit gegen die Schwerkraft festzuhalten in der Lage ist. Man nennt die maximale Menge des Wassers, die ein Boden adsorptiv und kapillar zu speichern vermag, seine Wasserkapazität. Sie wird zumeist in Gewichtsprozenten bestimmt und als g Wasser in 100 g Boden (getrocknet bei 105°C) angegeben. Die Bestimmung der Wasserkapazität ist schwierig. Daher wird jener Wassergehalt ermittelt, den ein vegetationsloser Boden 2 bis 3 Tage nach einer längeren Regenperiode oder nach intensiver künstlicher Beregnung enthält. Dieser Wassergehalt wird Feldkapazität genannt. Sie umfasst nicht nur das Adsorptions- und Kapillarwasser, sondern besonders in bindigen Böden auch noch eine gewisse Menge langsam abziehenden Sickerwassers. Die Feldkapazität ergibt daher höhere Werte als die Wasserkapazität: $\text{Feldkapazität} = \text{Wasserkapazität} + \text{nutzbares Sickerwasser}$. Bei den meisten Böden liegt die Saugspannung bei der Feldkapazität zwischen 0,02 bis 0,05 Mpa. In der Bodenphysik wird in erster Annäherung als nutzbares Wasser im Boden jene Wassermenge gewertet, die mit Saugkräften zwischen 0,033 und 1,5 Mpa festgehalten wird. Böden, die stark ausgetrocknet sind, bedürfen einer gewissen Zeit, bis sie die volle, der Feldkapazität entsprechende, Wassermenge zu speichern vermögen. Sie weisen Schwundrisse auf, in denen das Wasser rasch in die Tiefe versickert, ohne alle Teile des Bodens gleichmäßig zu benetzen. In Böden, in denen das Niederschlagswasser durch verdichtete Horizonte nicht versickern kann und in denen es daher zu Tagwasserstau kommt, besteht mindestens zeitweilig ein Zuviel an Nässe in den oberen Bodenschichten. In solchen Böden ist die nutzbare Wasserspeicherung sehr eng begrenzt.

Die Bestimmung der Feldkapazität hat nicht bloß für die Bestimmung jener Menge an Niederschlagswasser Bedeutung, die in einem Boden maximal gespeichert werden kann, sondern auch für die Beantwortung der Frage, welche Menge Wasser ein Boden bei künstlicher Bewässerung aufzunehmen vermag (Franz, 1960).

Wird im Zuge der Beregnung, oder der Berieselung künstlich Wasser zugeführt, so ist darauf zu achten, dass die Feldkapazität, auf das gesamte durchwurzelte Bodenprofil berechnet, nicht überschritten wird. Ist dies der Fall, so wird nicht nur kostbares Wasser nutzlos verschwendet, sondern darüber hinaus eine Auswaschung im Bodenwasser gelöster Stoffe in den Untergrund bewirkt. Es ist zu bedenken, dass nicht alle Pflanzen beim gleichen Wassergehalt des Bodens das Optimum ihres Wachstums erreichen und dass dieses Optimum bei vielen Kulturpflanzen bei einem Wassergehalt unterhalb dem der Feldkapazität liegt. Das hängt damit zusammen, dass vor allem in bindigen Böden bei höherem Wassergehalt das Sauerstoffbedürfnis der Wurzeln nicht mehr voll befriedigt werden kann. Untersuchungen ergaben, dass in Böden mit

weniger als 10% Luftvolumen kein Pflanzenwachstum mehr stattfindet. Der ideale Wassergehalt im Boden ist also von den darauf kultivierten Pflanzen abhängig und bewegt sich zwischen den Grenzen von Welkpunkt und Feldkapazität.

Gewinnung von Bodenstichproben

Um unterschiedliche Bodenverhältnisse auf dem 600 Meter langen Feld erheben zu können waren zahlreiche Bodenproben notwendig. Auf dem Institut für Botanik war ein Bodenbohrer mit 3cm Innendurchmesser und einer maximalen Bohrtiefe von 55cm verfügbar. Damit wurden Untersuchungen während der Wachstumsperiode durchgeführt. Später konnte auch ein zweiter Bohrer, der Probenentnahmen aus 100cm Tiefe ermöglichte, verwendet werden. Aufgrund des sehr trockenen Sommers, der auch zu Ernteausfällen führte, und der Festigkeit des Aubodens, war es recht mühsam die Proben zu ziehen.

Die Proben während der Wachstumsphase wurden in Abständen von zehn Zentimeter geteilt. Bei den gewonnenen Bohrkernen aus einem Meter Tiefe konnten die Horizonte gut abgelesen und so die Probe geteilt werden. Dies geschah gleich am Feld. Die Proben wurden sofort in einem Kunststoffbeutel eingeschlossen, wodurch eine spätere Untersuchung auf Wassergehalt möglich wurde. Das Feuchtgewicht der einzelnen Bodenhorizonte wurde ermittelt und die Proben bis zur Gewichtskonstanz luftgetrocknet, um die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen zu errechnen. Danach wurden diese bei 105°C wieder bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank deponiert. Damit die Bodenproben während des Abkühlens vor dem Wägen keine Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen konnten wurden sie in einem Exikator verwahrt.

Daraus ließ sich der **Bodenwassergehalt** wie folgt errechnen. (Pregl, 2001)

$$w = \frac{m - m_s}{m_s}$$

w...Bodenwassergehalt in %

m...Feuchtgewicht der Probe

m_s... Masse des getrockneten Bodens

Die Bodenproben, welche am Ende der Vegetationsperiode gewonnen wurden, wurden im Labor weiter untersucht auf:

- Kornfraktionen
- Karbonatgehalt
- Kohlenstoff / Stickstoff Verhältnis

Kornfraktionen (Blum, 1989): Nach Zerlegung der Bodenaggregate in ihre Einzelbestandteile wird der prozentuelle Anteil der einzelnen Korngrößenfraktionen in einer Suspension bestimmt. Um die Kittsubstanzen, welche die Primärteilchen zu Aggregaten verbinden, aufzulösen, wird der Boden mittels Natriumpyrophosphatlösung dispergiert. Es wird ein kombiniertes Sieb- und Sedimentationsverfahren angewandt. Die dazu erforderlichen Geräte und Reagenzien sind:

- Sieb mit 0.063 mm Maschenweite
- Pipette nach KÖHN
- Schüttel- oder Vibrationsgerät
- 11 Glas- oder Kunststoffzylinder
- Wiegeschalen aus Keramik
- Exikator mit Trocknungsgel
- Trockenschrank
- 600ml Bechergläser zur Probenvorbereitung

- Thermometer
- destilliertes Wasser
- 0.1 mol Natriumpyrophosphatlösung: 44.606 g $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
(tetra-Natriumdiphosphat-Decahydrat) p.a. werden in destilliertem Wasser zu 1 l gelöst.

Es wird wie folgt vorgegangen: 10 g lufttrockener, auf 2 mm gesiebter Feinboden sind in einem 600 ml Becherglas mit 25 ml Natriumpyrophosphatlösung zu versetzen und mindestens 8 Stunden stehen zu lassen. Nach Zusatz von mindestens 200 ml destilliertem Wasser ist die Probe 6 Stunden zu schütteln. Anschließend wird die Probe einer Nass- Siebung unterzogen. Hierfür wird die Aufschlämmung auf einen Siebsatz mit den zu ermittelnden Sandfraktionen entsprechenden Maschenweiten (0.063 mm, gegebenenfalls zusätzlich 0,200 mm und 0.630 mm) gebracht. Es ist so lange mit destilliertem Wasser nachzuwaschen (max. 700 ml), bis alle Teilchen mit Durchmessern unter 0.063 mm nach Passieren des Siebes in einem 1 l Glas- oder Kunststoffzylinder verlustfrei aufgefangen sind.

Die in den Sieben verbliebenen Teilchen sind mittels destilliertem Wasser (Spritflasche) in Wägeschälchen überzuführen, bei 105°C bis Massenkonzanz zu trocknen, im Exikator abzukühlen und zu wiegen.

Für die Sedimentationsanalyse ist der im Glaszylinder befindliche Siebdurchlauf auf 1 l aufzufüllen und zu homogenisieren (Umkippen oder kräftiges Rühren). Die Sedimentation muss bei möglichst konstanter Temperatur und weitgehend erschütterungsfrei durchgeführt werden.

Entsprechend der in der Suspension gemessenen Temperatur kann in nachstehender Tabelle die Fallzeit, nach der die Absaugung von je 20 ml Suspension mit der KÖHN-Pipette stattzufinden hat, entnommen werden. Als Eintauchtiefe wurde 10 cm für Ton, Fein- und Mittelschluff und 15 cm für Grobschluff zugrundegelegt. Um Fehler durch dauerndes Verstellen der Eintauchtiefe der KÖHN-Pipette zu vermeiden habe ich die Grobschlufffraktion rechnerisch ermittelt. Es ist darauf zu achten, dass die Absaugung zügig, aber ohne Wirbelbildung durchgeführt wird. Die entnommenen Proben werden in Wägeschalen überführt und bei 105°C bis zur Massenkonzanz getrocknet und nach Abkühlung im Exikator gewogen.

Sedimentationszeiten in Abhängigkeit von der Temperatur: Da die Absaugung ca. 4 sec dauert, werden die nach dem Stoke'schen Fallgesetz berechneten Zeiten bereits um 2 sec vermindert angegeben.

Temperatur °C	Sedimentationszeit in hh:mm:ss		
	Ton	Feinschluff	Mittelschluff
20	07:45:00	00:46:53	00:04:39
21	07:34:00	00:45:46	00:04:32
22	07:23:00	00:44:41	00:04:26
23	07:13:00	00:43:40	00:04:20
24	07:03:00	00:42:37	00:04:14
25	06:53:00	00:41:40	00:04:08

Tab. 3.5 Sedimentationszeit der Suspension zur Bestimmung der Kornfraktionen Schluff und Ton nach dem Pipettenverfahren von Köhn (Blum, 1989).

Durch die Zugabe des Dispergierungsmittels entsteht ein Salzfehler der korrigiert werden muss. Dabei sind von der Natriumpyrophosphatlösung drei mal je 25 ml in einem Glas- oder Plastikzylinder auf einen Liter aufzufüllen, aus jedem Zylinder nach kräftigem Durchmischen 20ml zu entnehmen und in einem gewogenen Schälchen bei 105°C bis zur Massenkonstanz zu trocknen, im Exikator abzukühlen und zu wiegen. Der aus den Auswaagen gebildete Mittelwert ist die als Salzfehler bei den Pipettenfraktionen in Abzug zu bringende Masse des Natriumpyrophosphats (Hartge, 1992).

Berechnung der Pipettenfraktion:

$$\text{Massen\% der Korngröße} = (\text{Auswaage} - \text{Masse des Dispergierungsmittels}) * 500 - \text{Massen\% aller kleineren Pipettenfraktionen}$$

Berechnung der Siebfraktion:

$$\text{Massen\% der Korngröße} = \text{Auswaage} * 10$$

Über die Kornfraktionen wird mit dem Texturdreieck die Bodenart bestimmt. Auf der Ordinate findet sich die Schlufffraktion in%, auf der Abszisse die Tonfraktion. Tonminerale sind Schichtsilikate kolloider Größenordnung (Korndurchmesser kleiner 2µm). Sie besitzen eine große spezifische Oberfläche (Blum, 1992) an der sie Wassermoleküle an und einlagern können. Deshalb verändern sie in Abhängigkeit vom Wassergehalt ihr Volumen und ihre mechanischen Eigenschaften. Sie sind wichtig für die Gefügebildung und Nährstoffadsorption. Bei Schluff tritt das Wasser als Wasserfilm, der das Korn umschließt, auf.

Karbonatgehalt: Karbonate wie Calcit CaCO_3 , Siderit FeCO_3 und Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ halten in Böden ein alkalisches Milieu aufrecht. Alkalische Bedingungen bei der Verwitterung von basischen Silicatgesteinen begünstigen die Karbonatbildung im Boden. Böden mit einem Calcitgehalt von mehr als 30 Masseprozent werden als Kalkböden bezeichnet, welche eine große Pufferkapazität gegenüber Wasserstoffionen besitzen. Diese Böden können also Wasserstoffionen im begrenzten Maß aufnehmen ohne dabei ihren pH-Wert zu ändern (Fiedler, 2001).

Mit Salzsäure werden die Karbonate zerstört. Dabei entwickelt sich CO_2 , welches nach Scheibler unter Berücksichtigung von Atmosphärendruck und Temperatur gasvolumetrisch bestimmt werden kann. Die dazu erforderlichen Geräte und Reagenzien sind:

- Scheiblerapparatur
- Barometer
- Thermometer
- HCl, rauchend, mit destilliertem Wasser 1:2 verdünnt
- H_2SO_4

Durchführung: Je nach Kalkgehalt werden 0.5 - 10 g Feinboden in das Reaktionsgefäß der Scheiblerapparatur eingewogen und mit destilliertem Wasser angefeuchtet, um die darin enthaltene Luft zu verdrängen. Die verdünnte Salzsäure (ca. 10 ml) wird in den dafür vorgesehenen Einsatz gebracht. Das Gefäß wird mit dem Stopfen verschlossen und bei geöffnetem Ausgleichshahn das Niveau des (mit H_2SO_4 angesäuerten) Wassers auf die Höhe „0“ der Messröhre mit dem Niveaugefäß eingestellt. Danach schließt man den Ausgleichshahn, bringt die Salzsäure mit dem Boden in Kontakt und schüttelt abgesetzt solange, bis sich das Niveau des Wassers in der Messröhre nicht mehr ändert (ca. 5-10 min). Dabei darf das Reaktionsgefäß nicht durch die Hand erwärmt werden. Gleichzeitig lässt man aus dem einen Rohrende in dem Maße Wasser ab, wie sein Niveau im anderen Rohrende

infolge des CO_2 - Druckes sinkt. Nach Abschluss der CO_2 - Entwicklung stellt man auf Niveaugleichheit ein und liest das Volumen des entwickelten Gases ab.

Zum besseren Verständnis findet sich auf dem nächsten Bild eine Scheiblerapparatur wie sie vom Institut für Bodenforschung verwendet wird. Mit dieser Anordnung ist es möglich drei Versuche gleichzeitig ablaufen zu lassen. Dies erwies sich als sinnvoll, weil Böden mit besonders hohem Karbonatgehalt untersucht wurden und es daher länger dauerte bis sich das Niveau des Wassers in der Messröhre nicht mehr änderte. Gut zu erkennen sind das Reaktionsgefäß, das nochmals in Vergrößerung abgebildet ist, der Verschlussstopfen und der Silikonschlauch der zur Messeinheit führt. Um bei einer beträchtlichen Gasentwicklung das System nicht zum Überlaufen zu bringen, wird überschüssiges angesäuertes Wasser am oberen Ende der Messeinheit über einen Silikonschlauch in den Kolben, der auf dem Bild ersichtlich ist, abgeleitet.

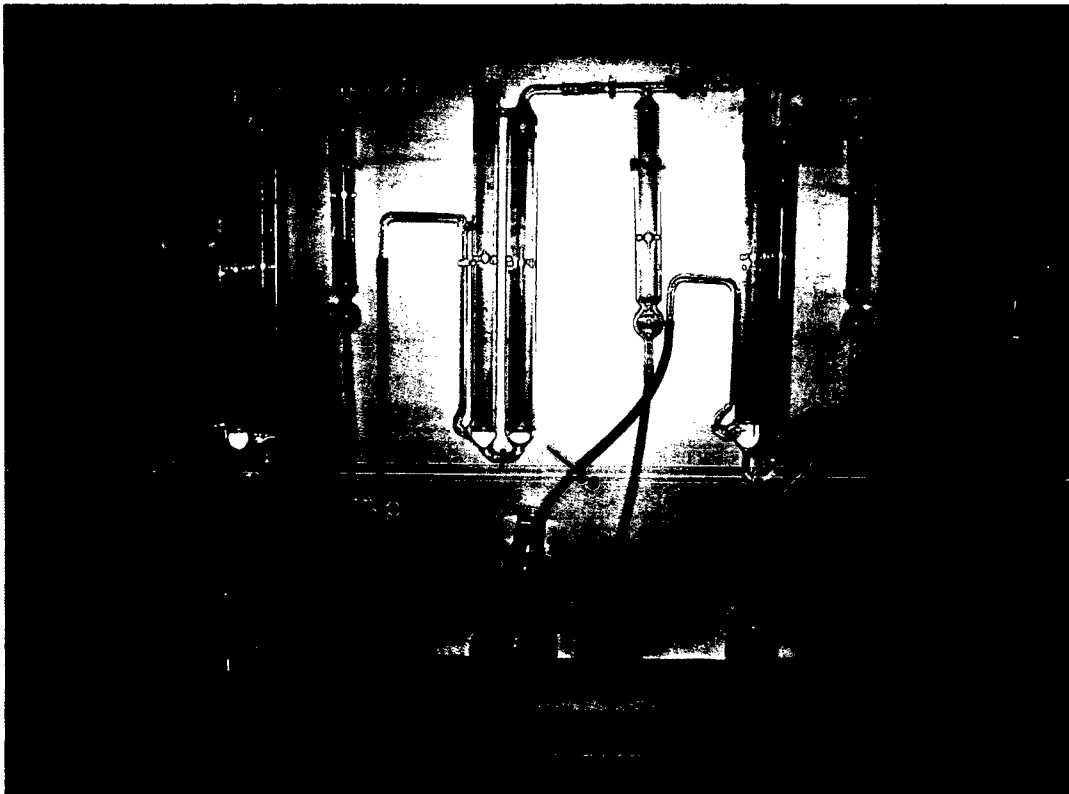


Abb. 3.7 Apparatur zur Bestimmung des Karbonatgehalts einer Bodenprobe nach Scheibler. Drei parallel ablaufende Versuche sind mit dieser Anlage möglich. In dieser Darstellung wird nur der rechte Aufbau verwendet. Aufgenommen am Institut für Bodenforschung auf der Universität für Bodenkultur, Wien.

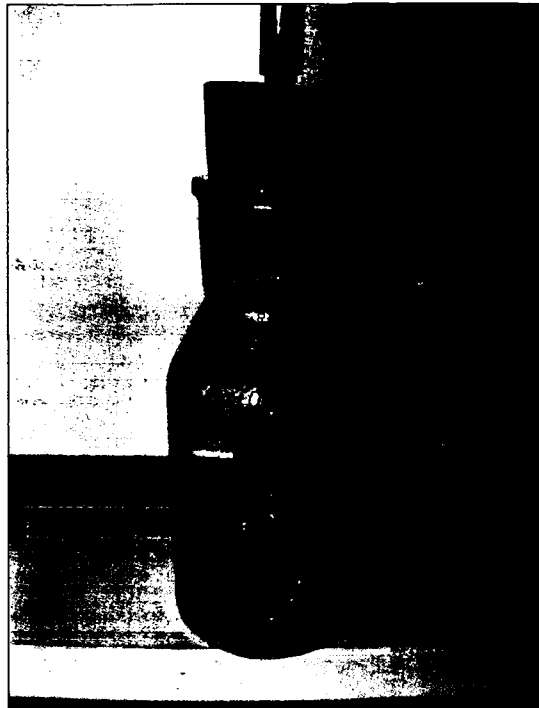


Abb. 3.8 Detailaufnahme der Apparatur zur Bestimmung des Karbonatgehalts einer Bodenprobe nach Scheibler. Behälter mit Bodenprobe, im inneren Zylinder die Salzsäure, mit luftdichtem Verschluss und Anschluss für die Messung der entstehenden Gasmenge. Aufgenommen am Institut für Bodenforschung auf der Universität für Bodenkultur, Wien.

Berechnung:

Mit Hilfe von Tabellenwerten kann man die Messwerte (ml CO₂) bei den gegebenen Versuchsbedingungen (Atomsphärendruck und Raumtemperatur) in mg CO₂ umrechnen. Mit dem Faktor 2.274 wird auf mg CaCO₃ umgerechnet:

$$\frac{mlCO_2 * Tabellenwert * 2,274 * 100}{Einwaage \text{ in } mg} = \%CaCO_3$$

Kohlenstoff, Stickstoff: Im Labor für Bodenforschung auf der Universität für Bodenkultur wurde von Ing. Brauner der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt des Feldbodens erhoben. Daraus lässt sich das C/N- Verhältnis als ein Maß für die biotische Aktivität und der Abbauresistenz der Ausgangssubstanzen für Humus ermitteln. Da die Mikrobentätigkeit gehemmt ist, wenn nicht genügend Eiweiß- Stickstoff für den Aufbau der Körpersubstanz zur Verfügung steht, erfolgt bei einem C/N- Verhältnis größer 25:1 ein gehemmter Substanzabbau. Bei einem C/N- Verhältnis kleiner als 20:1 erfolgt eine deutliche Freisetzung von Organisch gebundenem Stickstoff. Auch die Mikroorganismen selbst sind dann nach dem Absterben leicht zersetzbar, da sie ebenfalls aus leicht abbaubaren Stoffen bestanden haben (Blum, 1992).

Ergebnisse der Laborversuche

Thermoelementpsychrometer

Die Versuche mit dem Thermoelementpsychrometer waren nicht reproduzierbar und wurden daher nach zirka vier Wochen abgebrochen. Stellvertretend für die vielen Versuche möchte ich eine Grafik darstellen die den gewöhnlichen, fallenden Verlauf der Messwerte zeigt. Eventuelle Lösungsvorschläge habe ich im Kapitel „Empfehlung für weitere Untersuchungen“ erwähnt.

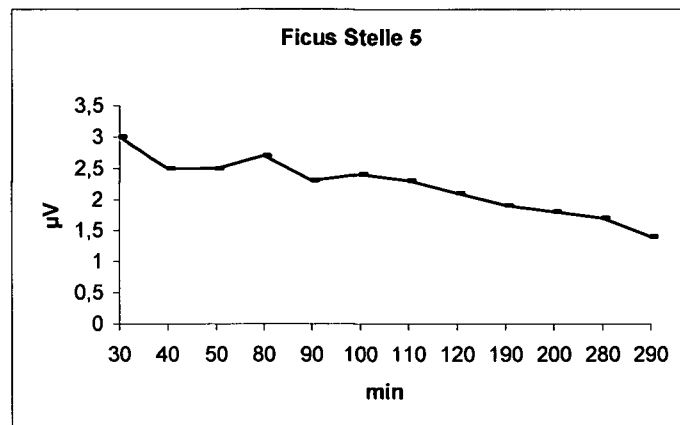


Abb. 4.1 Psychrometrische Versuchsergebnisse im Jahr 2000. Vorversuche an Zimmerpflanzen wie Ficus und anderen. Abszisse: Messwerte in Mikrovolt. Ordinate: Fortschreitende Zeit in Minuten. Stelle 5 steht für den fünften Versuch an den verschiedenen Blättern einer Pflanze, in diesem Fall Ficus.

Keimversuche

Bei den Keimversuchen ohne Wasserstress stellte sich nach öfteren Wiederholungen und der genauen Einhaltung der Randbedingungen wie z.B. desinfizieren der Petrischalen mit Alkohol, ein Gleichgewicht zwischen den Reaktionen im befeuchtenden Ansaugbereich und im entfeuchtenden Wirkbereich des Aquapolgerätes ein. Das bedeutet, dass letztendlich gleich viele Bohnen ähnlicher Qualität im Ansaugbereich wie im Wirkbereich keimten.

Beobachtung des Pflanzenwachstums

Bei der Weiterführung des Versuches, also der Beobachtung des Wachstums ohne Wasserstress an den Stangenbohnen, ließen sich keine objektiven Unterschiede messen. Rein subjektiv betrachtet erschienen die Bohnen im Ansaugbereich vitaler und grüner. Tatsächlich waren bei dem Versuchsabbau im befeuchtenden Ansaugbereich noch einige Blätter grün, wogegen im entfeuchtenden Wirkbereich alle bereits vertrocknet und abgefallen waren. Der Anteil der noch grünen Blätter im Vergleich zu allen Blättern im Ansaugbereich lag bei knapp 4 %. Auf den unteren Bildern ist links der Aufbau im befeuchtenden Ansaugbereich, rechts

jener des entfeuchtenden Wirkbereichs dargestellt. Beide Aufbauten wurden im gleichen Abstand zu den Fenstern im Raum aufgestellt.

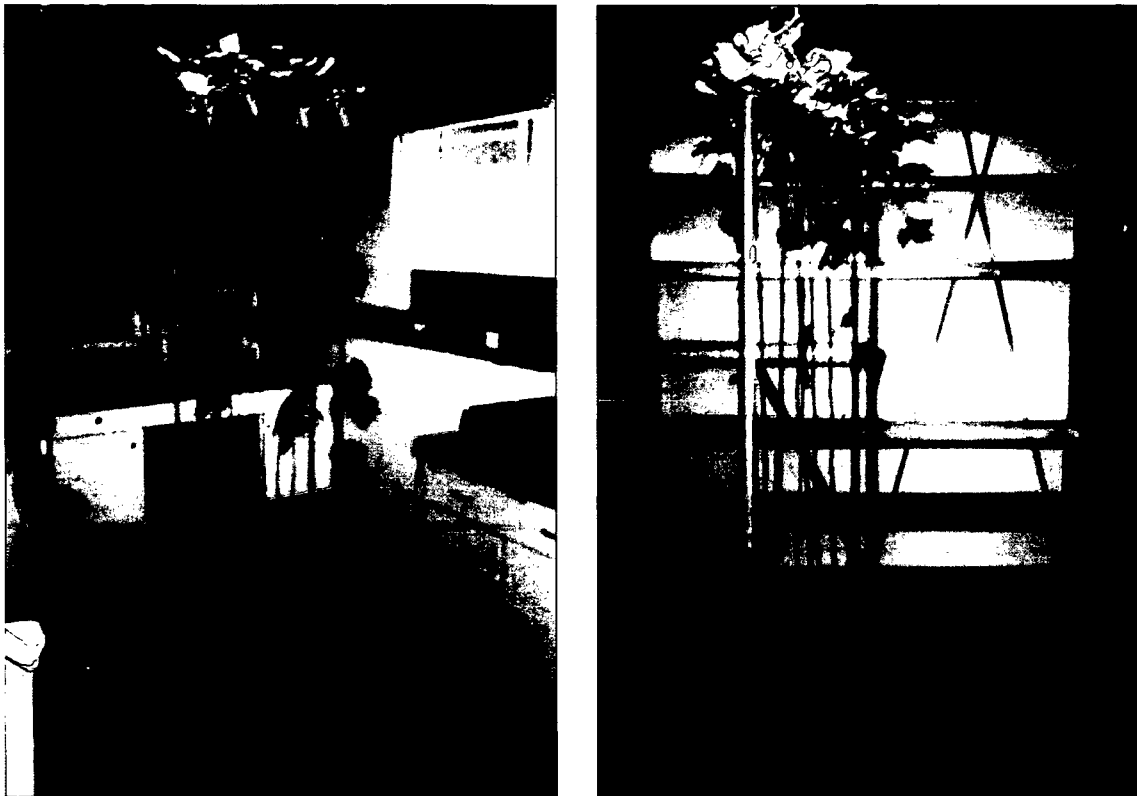


Abb. 4.2 Versuchsaufbau der Stangenbohnen im Labor im Jahr 2000. Das linke Bild zeigt den befeuchtenden Ansaugbereich, das rechte Bild stellt den entfeuchtenden Wirkbereich des konventionellen Aquapolgerätes dar.

Alle aus dem Versuch gewonnenen Pflanzen wurden nun einzeln untersucht. Auch die Wurzeln wurden berücksichtigt und durch Waschen mit der Wurzelwaschanlage des Instituts für Botanik von der Erde befreit. Die Pflanzen wurden zuerst in Wurzeln, Stiele, Früchte und Körner unterteilt.

Weiter wurden die Früchte in Fruchtgewicht pro Pflanze und Gewicht pro Frucht unterteilt.

Die Körner wurden ferner unterteilt in Anzahl der Körner pro Frucht, Anzahl der Körner pro Pflanze, Gesamtgewicht der Körner pro Pflanze und Durchschnittsgewicht der Körner pro Pflanze.

Die Blätter konnten den einzelnen Pflanzen nicht mehr zugeordnet werden und wurden daher nur in Ansaugbereich und Wirkbereich unterteilt.

Zur besseren Übersicht möchte ich nun zuerst den Vergleich der Biomassen darstellen. Die Biomasse sei hier definiert als Summe von Wurzeln, Stielen Blättern und Früchten mit deren Körnern. Reste, die bis zum Erntezeitpunkt abgefallen waren, sind hier berücksichtigt. Beim befeuchtenden Ansaugbereich ergab sich ein Gewicht der Biomasse von 127,57g, beim entfeuchtenden Wirkbereich nur 125,23g. Das ergibt einen Unterschied von 1,8%. Genauer ist in der Tabelle ersichtlich.

Summe (g)	Wurzeln	Stiele	Blätter	ganze Früchte	Reste	Biomasse
Ansaugbereich	3,45	25,80	44,44	46,40	7,48	127,57
Wirkbereich	2,16	23,57	45,46	44,82	9,22	125,23

Tab. 4.1 Versuchsergebnis der Stangenbohnen im Labor Gesamtbiomasse im Überblick.

Auch zwischen geerdeten und nicht geerdeten Pflanzen pro Versuchsstandort gab es Unterschiede. Allein im Ansaugbereich waren die nicht geerdeten um 4% besser entwickelt als die geerdeten. Nur im Wirkbereich lagen aber die geerdeten Pflanzen um 7 % vor den nicht geerdeten.

Teilt man nun die Ergebnisse der Biomassen ohne Blätter und Reste zwischen geerdeten und nicht geerdeten Pflanzen auf, so ergeben sich immer für den Ansaugbereich bessere Werte. Bei den geerdeten liegt der Unterschied zwischen befeuchtenden Ansaugbereich und entfeuchtenden Wirkbereich nur bei 1,3%, bei den nicht geerdeten aber bei 11,9%. Weitere Ergebnisse sind in unten angeführter Tabelle ablesbar.

	Summe (g)	Wurzeln	Stiele	ganze Früchte	Biomasse
Ansaugbereich	geerdet	1,76	11,21	24,08	37,05
	nicht g.	1,69	14,59	22,32	38,60
Wirkbereich	geerdet	0,82	11,08	24,65	36,55
	nicht g.	1,34	12,49	20,17	34,00

Tab. 4.2 Versuchsergebnis der Stangenbohnen im Labor Gesamtbiomasse aufgeteilt in geerdete und nicht geerdete Pflanzen im Überblick.

Ein Gesamtergebnis über alle an den einzelnen Pflanzen erhobenen Parameter und deren Standardabweichungen vom Mittelwert ist im Folgenden angeführt. Dabei ist ersichtlich, dass sich die Unterschiede zwischen befeuchtenden Ansaugbereich und entfeuchtenden Wirkbereich bei der Anzahl der Früchte pro Pflanze und dem Gewicht pro Frucht wieder ausgleichen.

Bohnen, Labor Mittelwerte und Standardabweichung

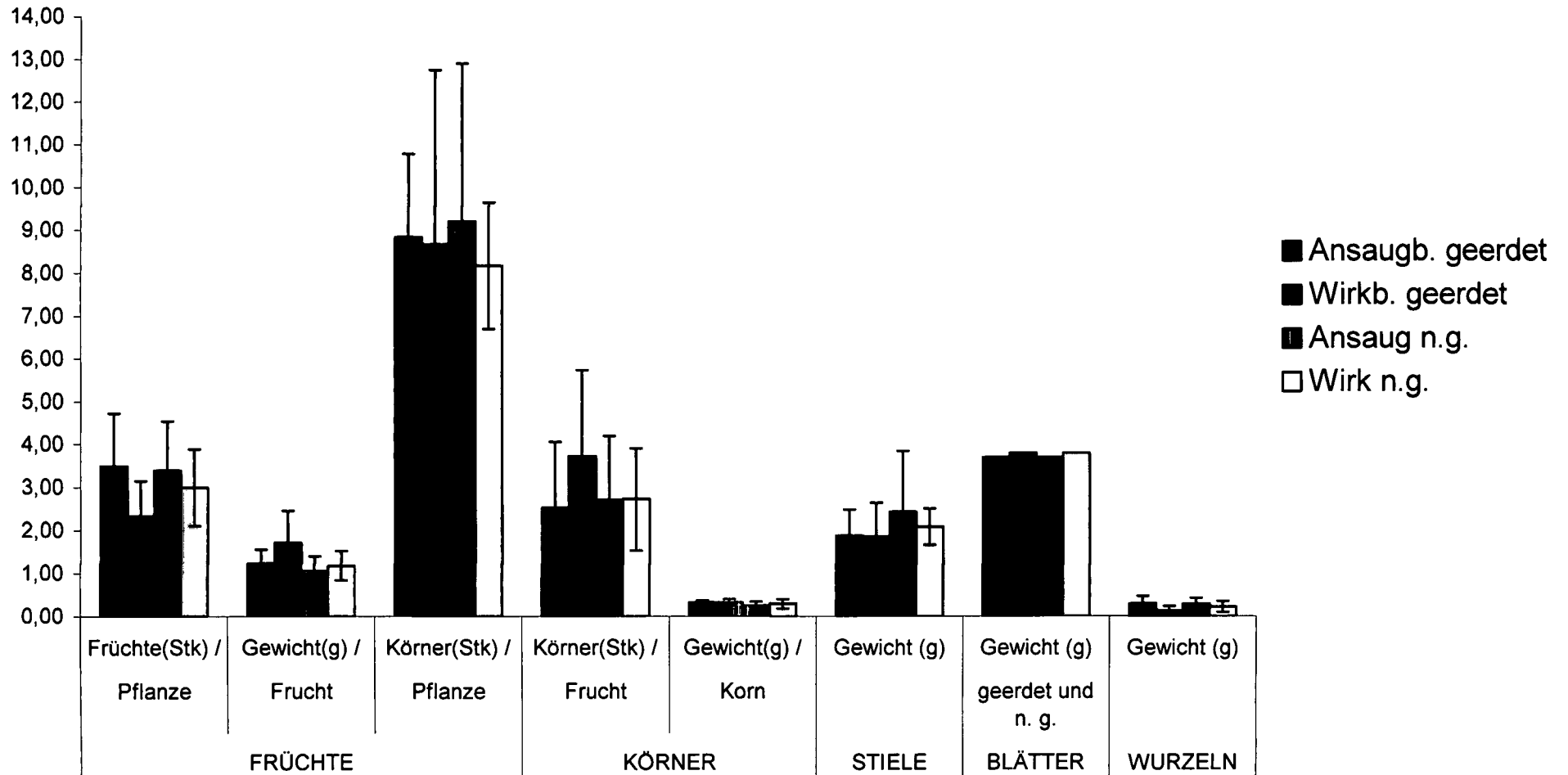


Abb. 4.3 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Stangenbohnen im Labor. Gesamtbiomasse aufgeteilt in entfeuchtenden und befeuchtenden Wirkungsbereich des Quapolgerätes und in geerdete und nicht geerdete Pflanzen.

Ergebnisse der Feldversuche

Beobachtung des Pflanzenwachstums, 2000

Prinzipiell war an der Stelle an der das befeuchtende Gerät montiert war, also an der Stelle III, das Wachstum bei den Pflanzen größer. Am deutlichsten war dies bei der Höhe der Sonnenblumen zu erkennen. Dieser Trend setzte sich auch beim Pflanzendurchmesser und später beim Kopfdurchmesser fort. Deutlich ist auch zu erkennen, dass dieser Effekt am Rand des Wirkbereichs der Geräte kleiner war. Die Stelle I war scheinbar näher am Rand des Wirkbereichs als die Stelle IV. An der Stelle I ergeben sich daher ähnliche Werte wie an der Stelle neutral (V) die von beiden Geräten nicht beeinflusst wurde.

Die Stelle V wurde erst nach dem 2. Mai eingeführt, deshalb fehlt dieser Wert in den Diagrammen bei der Messung an diesem Tag. Im Diagramm ist auch ersichtlich, dass sich die Wuchshöhe ab 21. Juni wieder verringert. Das kommt daher, weil sich die Köpfe der reifenden Pflanzen nach unten biegen. Gemessen wurde der höchste Punkt am gekrümmten Stiel. Im Stichprobenumfang waren jeweils 20 Pflanzen. Aus den Messungen wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet.

Es zeigte sich ein großer Unterschied zwischen den Stellen „entfeuchtend“ und „befeuchtend“, besonders am 02.07.2000 weshalb für diesen Termin auch die einzelnen Messwerte im Diagramm gezeigt werden. Der große Unterschied kommt daher, dass sich die Köpfe an der befeuchtenden Stelle erst zu einem späteren Zeitpunkt nach unten bogen. Die Standardabweichungen wurden mit zunehmender Wuchshöhe immer kleiner und erreichten schließlich Werte von 4 bis 10% vom entsprechenden Mittelwert. Auffallend ist die große Standardabweichung von 10% bei der neutralen (V) Zone. In diesem Bereich zeigten sich auch große regionale Unterschiede bei den Wuchshöhen was auf unterschiedliche Bodenbedingungen zurückzuführen war, wie durch Bodenproben bis in eine Tiefe von einem Meter bestätigt werden konnte. An den übrigen Untersuchungsstellen war die Standardabweichung geringer.

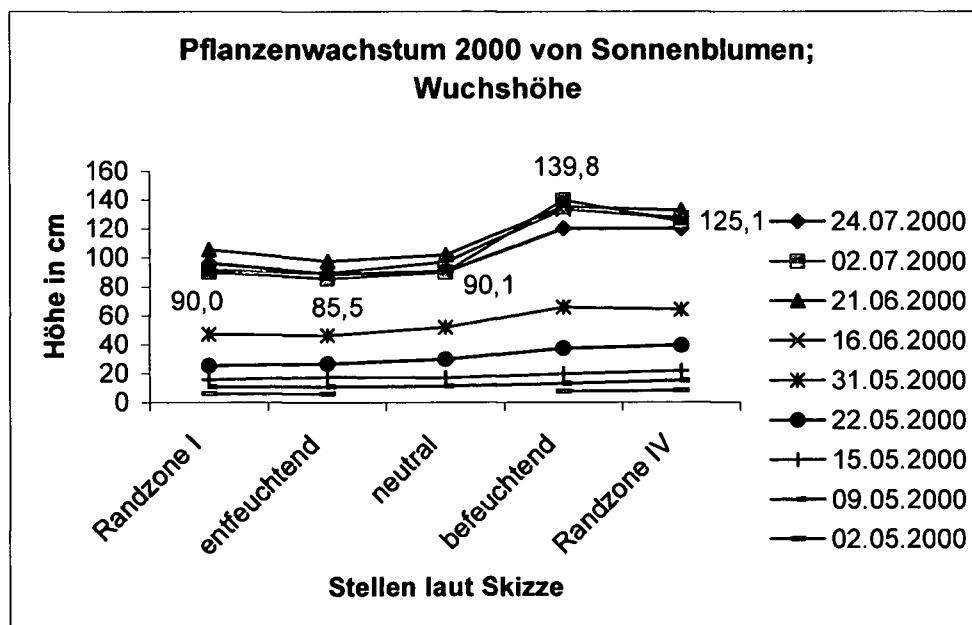


Abb. 5.1 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung der steigenden Mittelwerte der Pflanzenwuchshöhe mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Um die zeitliche Entwicklung des Höhenunterschiedes zwischen den Pflanzen darzustellen, subtrahierte ich die größeren Werte der Stelle III, „befeuchtend“ von den Werten der Stelle II „entfeuchtend“ und drückte das Ergebnis in Prozent aus. Das ist dem Diagramm: „Höhe von Stelle III minus Stelle II“, dem auch eine Trendlinie zugefügt wurde, zu entnehmen. Dabei ist zu erkennen, dass die Wuchshöhe an der befeuchtenden Stelle immer größer war als an der entfeuchtenden. Die Differenz steigert sich über das Fortschreiten der Vegetationsperiode.

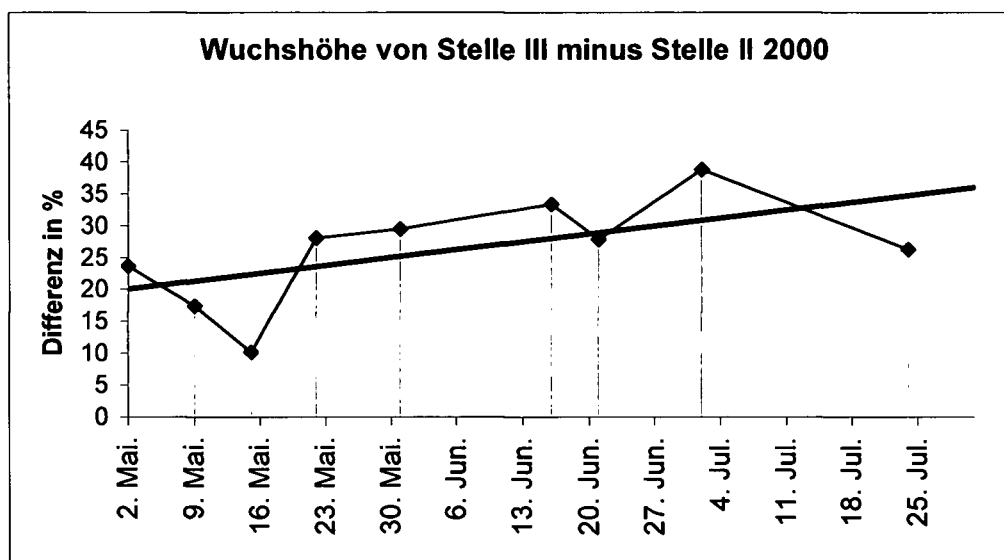


Abb. 5.2 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Vergleich der befeuchtend wirkenden Stelle mit der entfeuchtenden durch Subtrahieren der Messwerte und Angabe der Differenz in Prozent. Zusätzliche Darstellung des Ergebnisses mit einer Trendlinie.

Von 2.5.2000 bis 16.6.2000 wurde der Pflanzendurchmesser protokolliert. Dieser wurde per Maßband an diametral gegenüberliegenden Blattenden abgegriffen. Auch hier ergibt sich eine deutliche Steigerung des Wachstums an jener Stelle, an welcher das befeuchtende Aquapol Gerät stand. Manche Messungen, speziell an der Randzone I, weichen vom Trend ab. Das kommt daher, weil die Pflanzen aus der Stichprobe immer wieder neu ausgewählt wurden. Dabei kam es wahrscheinlich vor, dass gerade an den Randzonen I und IV, welche nicht markiert waren, manchmal außerhalb des Wirkbereichs der Geräte gemessen wurde. Dennoch geht in allen Kurven der Trend zum befeuchtenden Gerät hin, obwohl sich keine signifikanten Unterschiede ergaben.

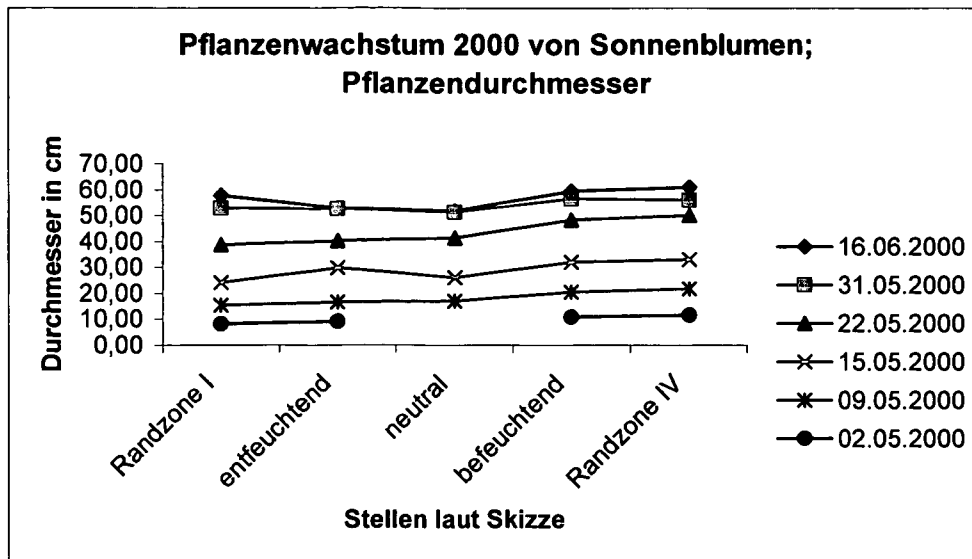


Abb. 5.3 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung des steigenden Pflanzendurchmessers an gegenüberliegenden Blattenden mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten.

Von 21.6.2000 bis 24.7.2000 wurde der Kopfdurchmesser der Sonnenblumen gemessen, da sich der Pflanzendurchmesser nicht mehr änderte. Dies geschah ebenfalls mit einem Maßband. Gemessen wurde von einem Ansatz der Körner über den Mittelpunkt zum gegenüberliegenden Ansatz der Körner. Die Blütenblätter wurden also nicht berücksichtigt. Am 2.7. und am 24.7. ergab sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Stellen entfeuchtend und befeuchtend, wobei scheinbar auch hier einige Werte aus einer unbeeinflussten Randstelle im Feld erhoben wurden. Die Standardabweichungen lagen aber bis zu 25% um den entsprechenden Mittelwert woraus sich kein signifikanter Unterschied zwischen be- und entfeuchtender Stelle ergibt.

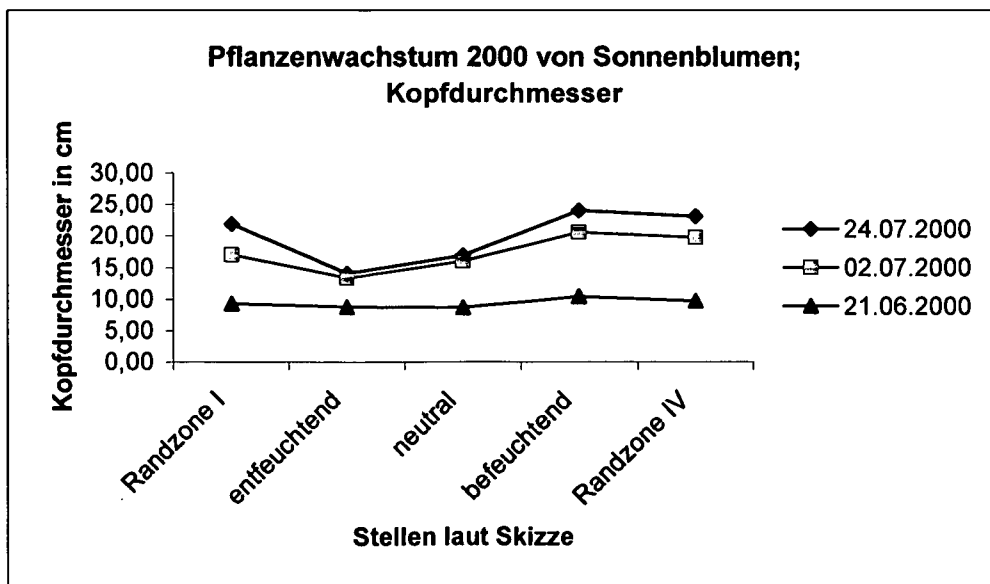


Abb. 5.4 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung des steigenden Kopfdurchmessers der Pflanzen mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten.

Auch an der Gerste wurde das Pflanzenwachstum protokolliert, ebenfalls mit einem Stichprobenumfang von $n=20$. Die Untersuchungen wurden am 22.5.2000 abgebrochen, weil die Gerste auf dem Feld augenscheinlich sehr unregelmäßig wuchs und die Standardabweichungen für einen signifikanten Unterschied zu groß waren. Dennoch ging auch hier der Trend der Wuchshöhe zum befeuchtenden Gerät hin.

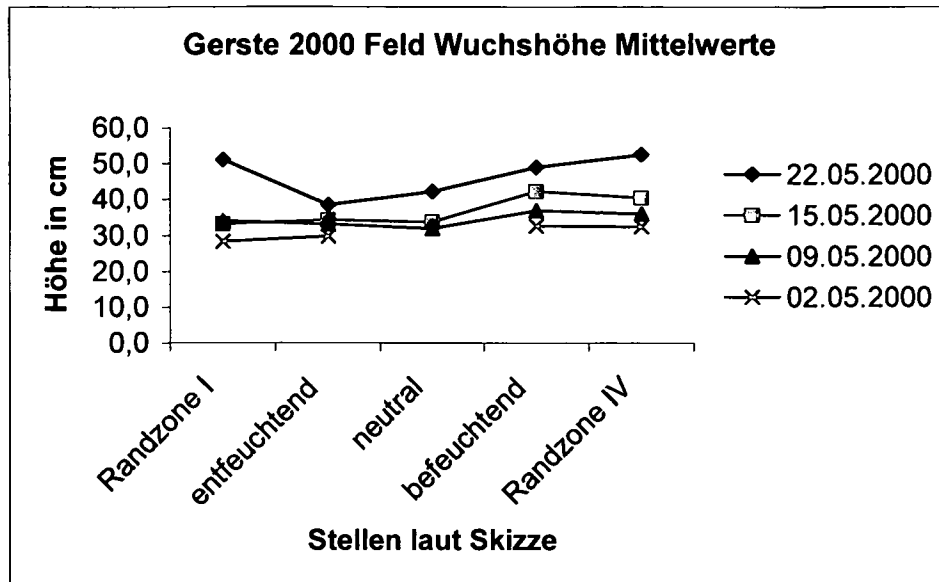


Abb. 5.5 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Gerste auf dem Feld. Darstellung der steigenden Pflanzenwuchshöhe mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Bei den Bohnen auf dem Feld ließ sich die Wuchshöhe wegen der unterschiedlichen Durchmesser der Kletterhilfen und der Fraßverluste nicht erheben.

Druckbombenmethode nach Scholander

Von 27.7.2000 bis 29.7.2000 wurde versucht, einen wesentlichen Unterschied zwischen befeuchtender und entfeuchtender Wirkung der Aquapolgeräte auf das Wasserpotential bei Sonnenblumen zu erheben. Am 27.7.2000 war es möglich mit einem Stichprobenumfang von vier zu arbeiten.

Am 28.7.2000 setzte um sechs Uhr morgens Regen ein und die Messreihe musste abgebrochen werden. Der Stichprobenumfang betrug hier nur zwei, beziehungsweise an der befeuchtenden Stelle nur eins. Deshalb war es hier auch nicht möglich eine Standardabweichung zu errechnen. Dennoch ist ein höheres Potential an der entfeuchtenden Stelle zu erkennen. Am 29.7.2000 lag der Stichprobenumfang ebenfalls bei zwei. Der größte Mittelwert im entfeuchtenden Bereich lag am 27.07.2000 bei 16,6bar. Der kleinste Mittelwert im befeuchtenden Bereich lag am 28.07.2000 bei 7,0bar.

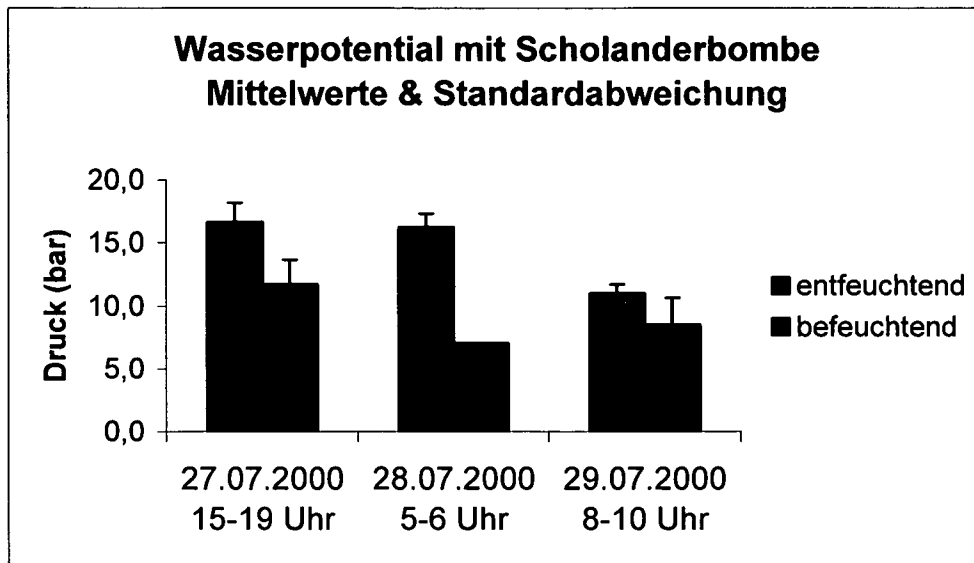


Abb. 5.6 Versuchsergebnis im Jahr 2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Gegenüberstellung des Wasserpotentials von Sonnenblumen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Am 13.8.2000 war es möglich einen ganzen Tagesverlauf zu messen. Dabei wurden auch die jeweiligen Randzonen mit der neutralen Zone erhoben. Durch die Änderung der Temperatur über die Zeit des Tagesverlaufes, wurde an jeder Stelle immer nur an einem Blatt gemessen. An den erhobenen Werten konnte deshalb keine Statistik angewendet werden. Bei der ersten Messung von 5 Uhr 55 bis 6 Uhr 20 war an den Blättern noch Taubildung zu beobachten. Auch hier lässt sich ein Trend zu einem höheren Potential in den entfeuchtenden Regionen feststellen. Das gemessene Wasserpotential war im entfeuchtenden Wirkbereich des Aquapolgerätes immer höher als im befeuchtenden Wirkbereich. Die starken Schwankungen lassen sich durch das Messen an verschiedenen Pflanzen erklären.

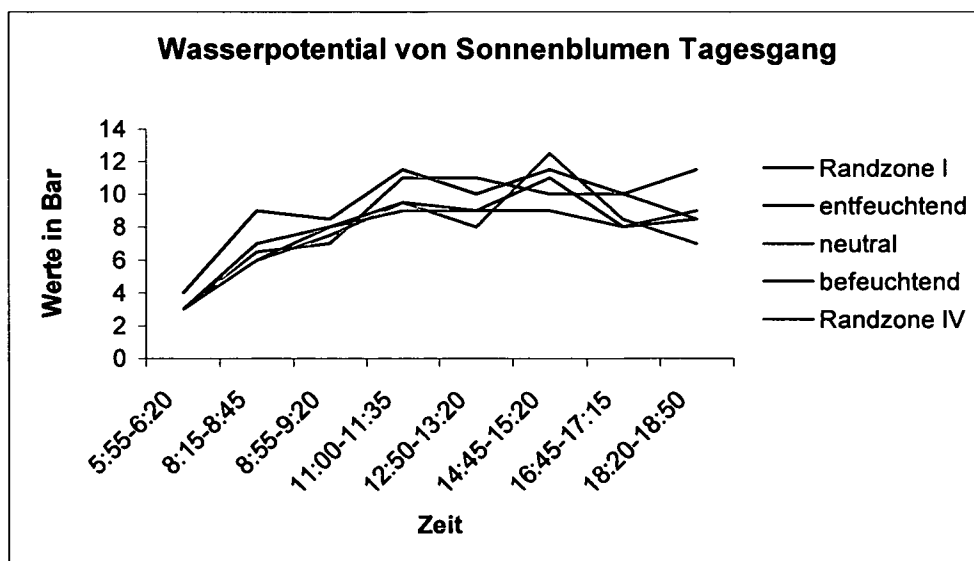


Abb. 5.7 Versuchsergebnis vom 13.08.2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Messung vom Tagesverlauf des Wasserpotentials von Sonnenblumen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Am 19.8.2000 gelang es die Schwankungen, bis auf jene der neutralen Stelle, auszugleichen. Die Qualität der Messungen nahm durch sorgfältigeres Arbeiten zu, die Quantität durch den erhöhten Zeitaufwand ab.

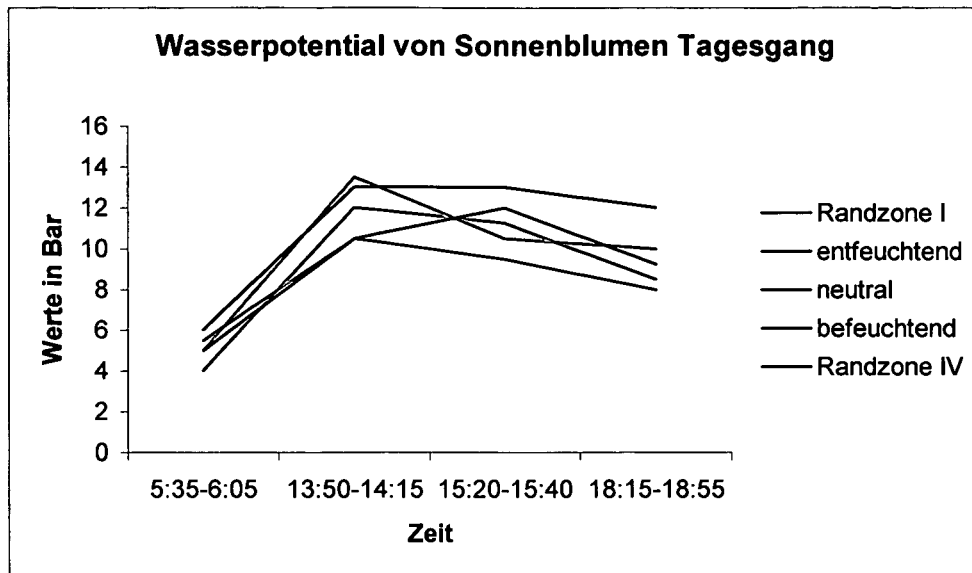


Abb. 5.8 Versuchsergebnis vom 19.08.2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Messung vom Tagesverlauf des Wasserpotentials von Sonnenblumen unter Einfluss von be- und entfuchtenden Aquapolgeräten.

Am 14.8.2000 wurde die Methode von Scholander auch an den Stangenbohnen auf dem Feld angewendet. Es wurden immer die Blätter im unteren Drittel der Pflanzen zur Messung herangezogen. Dabei war es wichtig darauf zu achten, dass das fragile Blatt beim Einbau in die Druckbombe nicht knickte oder sonstigen Schaden nahm. Es wurde jeweils eine Messung, an jeder der drei Stellen, durchgeführt. Bei fünf Durchläufen konnten in Summe also 15 Messwerte gewonnen werden. Beachtenswerterweise verhält sich hier das Wasserpotential anders als bei den Sonnenblumen. Hier wurde im befeuchtenden Wirkungsbereich des Aquapolgerätes das höhere Wasserpotential gemessen. Dieser Unterschied lässt sich wahrscheinlich auf die künstlich bewässerte Versuchsanordnung der Bohnen auf dem Feld zurückführen. Auffallend sind die Messergebnisse von 17:10 bis 17:30 wobei an der entfuchtenden Stelle ein besonders hohes Wasserpotential gemessen wurde. Dabei könnte es sich um einen Fehler handeln oder das Blatt welches zur Messung verwendet wurde war kurz zuvor einer direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt gewesen.

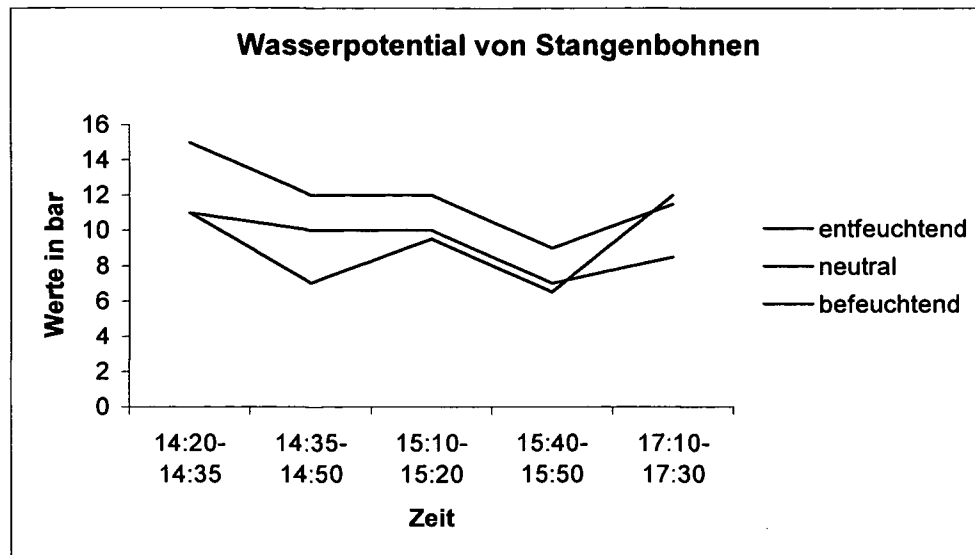


Abb. 5.9 Versuchsergebnis vom 14.08.2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Messung vom Tagesverlauf des Wasserpotentials von Stangenbohnen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Ergebnisse der Pflanzenstichprobe, 2000

Die Ernte von Sonnenblumen, Gerste und Bohnen erfolgte wie bei der Versuchserklärung beschrieben am 10.9.2000 an folgenden Stellen:

- Beim herkömmlichen, entfeuchtenden Gerät im Bereich des Gerätewirkfeldes (II).
- In der Mitte des Feldes, in der Zone die ohne Einfluss war (V).
- Beim Gerät mit befeuchtender Wirkung, im Bereich des Gerätewirkfeldes (III).

Die gewonnenen Pflanzen, neun Sonnenblumen pro m^2 und fünf m^2 pro Stelle, also 45 Stück pro Stelle, wurden genauer untersucht und wie folgt unterteilt: Köpfe, Stiele, Wurzeln und Blätter. Die Köpfe wurden aufgeteilt in Spreu, Körner gesamt und Tausendkorngewicht.

Die Werte aus folgendem Diagramm sind Mittelwerte aus $n=45$ und beziehen sich immer auf eine Pflanze. Die Körner aus den Köpfen der Sonnenblumen wurden per Hand gewonnen und in dem Gebläse der Versuchsanstalt Großenzersdorf von der Spreu getrennt. Dies geschah mit jeweils neun Köpfen der Pflanzen von einem m^2 Feldboden. Bei den Werten von „Körnern“ und „Spreu“ in dem Diagramm wurde ebenfalls auf den Mittelwert einer Pflanze, also $n=45$, rückgerechnet. Von den Wurzeln konnten in erster Linie nur Teile der oberflächennahen Tauwurzeln gewonnen werden, das restliche Wurzelwerk bis in eine Tiefe von etwa 130cm (Kutschera, 1960) wurde nicht freigelegt. Bei folgenden Diagrammen wird manchmal auf die direkte Beschriftung der Ordinate verzichtet. Dadurch können unterschiedliche Einheiten wie Masse oder Länge gemeinsam in einem Diagramm dargestellt werden. Bei diesen Diagrammen ist durch die Beschriftung der Abszisse erklärt, um welche Einheit es sich konkret bei einem Ergebnis handelt. Auffallend ist der große Unterschied der Biomassefraktionen zwischen befeuchtenden und entfeuchtenden Aquapolgerätewirkfeld. Weiters zeigt sich beim Blattgewicht an der befeuchtenden Stelle entgegen aller anderen Ergebnisse ein geringerer Wert. Zu Bedenken ist, dass an der befeuchtenden Stelle die Sonnenblumenblätter größer als alle anderen waren, was im Diagramm 5.11 gezeigt wird. Zum Erntezeitpunkt waren alle diese Blätter welk und sehr spröde. Daher ist es leicht möglich, dass beim Hantieren mit den Pflanzen Blattstücke abbrechen und dadurch der Spreu-Fraktion, die an befeuchtender Stelle besonders groß war, zugerechnet wurden.

Sonnenblumen 2000 Mittelwerte und Standardabweichung

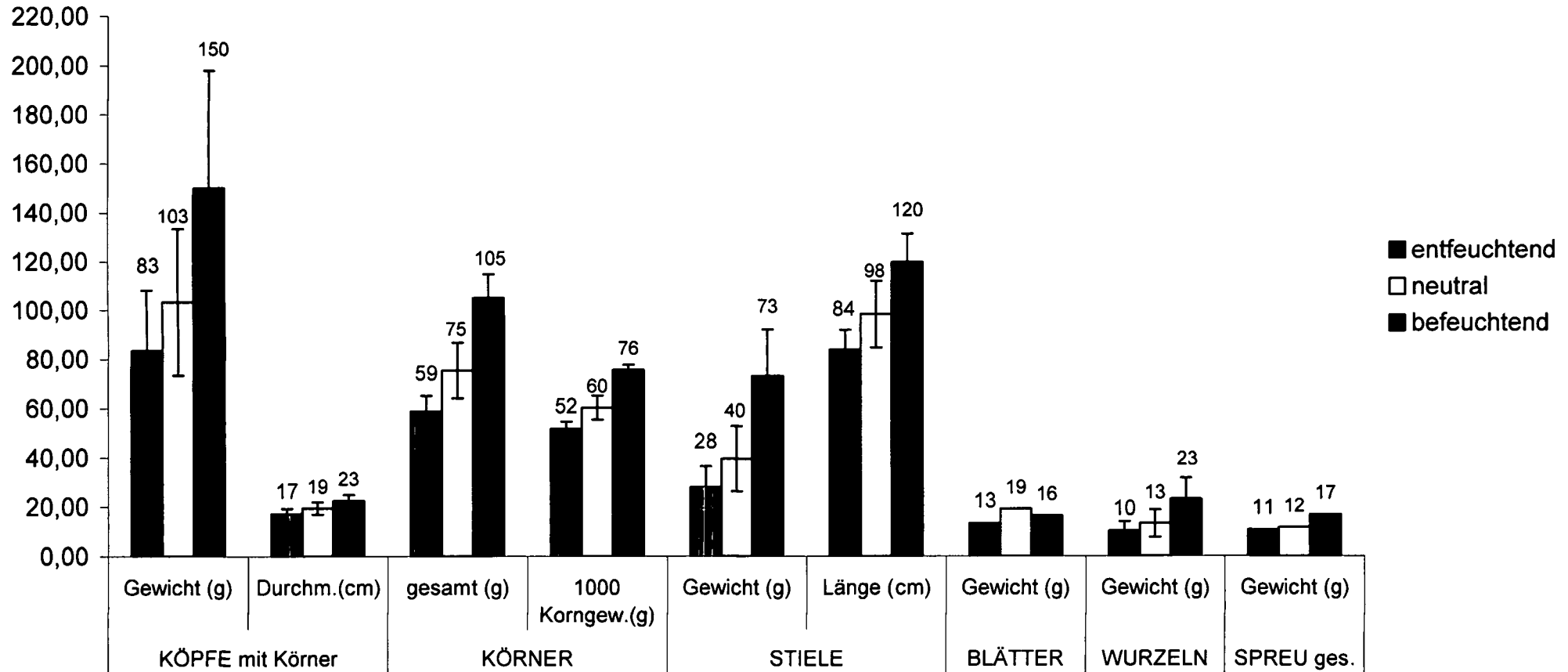


Abb. 5.10 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe aus jeweils 5m² von Sonnenblumen aus dem Jahr 2000, zurückgerechnet auf eine Pflanze. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Weiters wurde an zwei mal neun, also 18, Pflanzen pro Entnahmestelle die Verteilung der Blattgewichte untersucht. Dabei wurden die Blätter am Stamm von den Wurzeln aufwärts gezählt, nummeriert und einzeln gewogen. Es zeigt sich, dass an der befeuchtenden Stelle ein höheres Blattgewicht auftritt als an den Vergleichsstellen. In diesem Diagramm zeigt sich auch nochmals der Unterschied in der Wuchshöhe. Die Blattverteilungskurve der befeuchtenden Stelle ist nach rechts versetzt, da sich auch an dieser Stelle eine größere Wuchshöhe der Sonnenblumen ergab. Umso größer die Blattmasse der Pflanze ist, umso mehr Wasser benötigt diese, weil über die Spaltöffnungen der Blätter Wasserverluste auftreten. Bis zum zwölften Blatt ergeben sich noch keine Unterschiede, weil die Sonnenblumen bei fortschreitendem Wachstum die unteren Blätter, welche ja dann von den oberen beschattet werden, wieder einziehen.

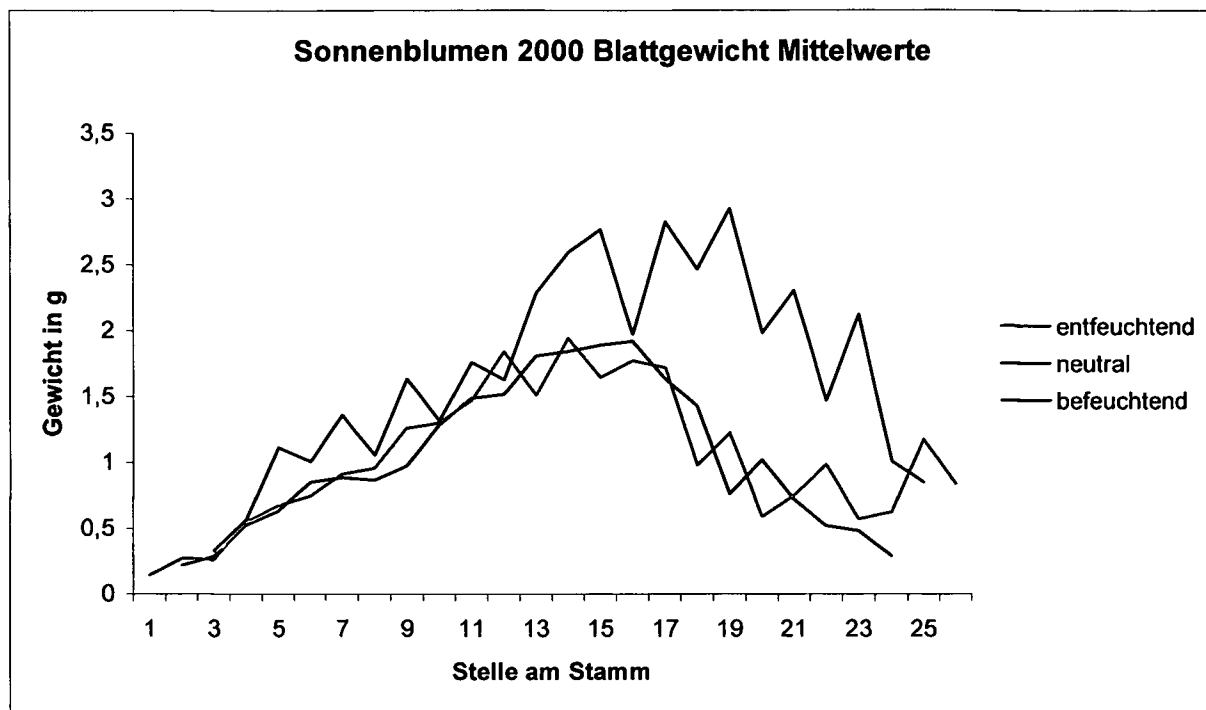


Abb. 5.11 Versuchsergebnis der unterschiedlichen Masseverteilung von Blättern der Sonnenblumen aus dem Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfuchtenden Aquapolgeräten.

Von der Gerste wurde auch an jeder Stelle (befeuchtend III, entfuchtend II und neutral V) jeweils ein m^2 entnommen und die darauf entfallenen Pflanzen weiter ausgewertet, was in folgendem Diagramm gezeigt wird. Zuerst erfolgt eine Gesamtdarstellung des Erntergebnisses, aufgeteilt in Längen, Massen und Körnern des ganzen Quadratmeters. Die Körner wurden mit Hilfe eines Langlochsiebes mit der Schlitzweite von 2,1mm weiter unterteilt in Schmachtkörner und nutzbare Körner. Diese Trennung erfolgt auch in Erntemaschinen. Dabei ist auffällig, dass sich im befeuchtenden Wirkungsbereich weniger Schmachtkörner befanden, was sich auch im höheren 1000 Korngewicht an dieser Stelle zeigt. Woraus sich schließen lässt, dass die Gerste an der befeuchtenden Stelle unter besseren Bedingungen wachsen konnte und mehr gesundes Gewebe produzieren konnte als an den Vergleichsstellen. Die Wurzeln konnten nicht berücksichtigt werden, weil nicht erfassbar ist, wie viele Wurzeln mit einer Tiefe von etwa 90cm (Kutschera, 1960) beim Herausziehen der Pflanzen im Boden verblieben sind. Tauwurzeln wie bei den Sonnenblumen kommen beim Getreide nicht vor. Bei folgenden Diagrammen wird manchmal auf die Benennung der Ordinate verzichtet. Dadurch können unterschiedliche Einheiten wie Masse oder Länge gemeinsam in einem Diagramm dargestellt werden. Bei diesen Diagrammen ist durch die Beschriftung der Abszisse erklärt um welche Einheit es sich im Konkreten Fall handelt.

Gerste 2000 Mittelwerte

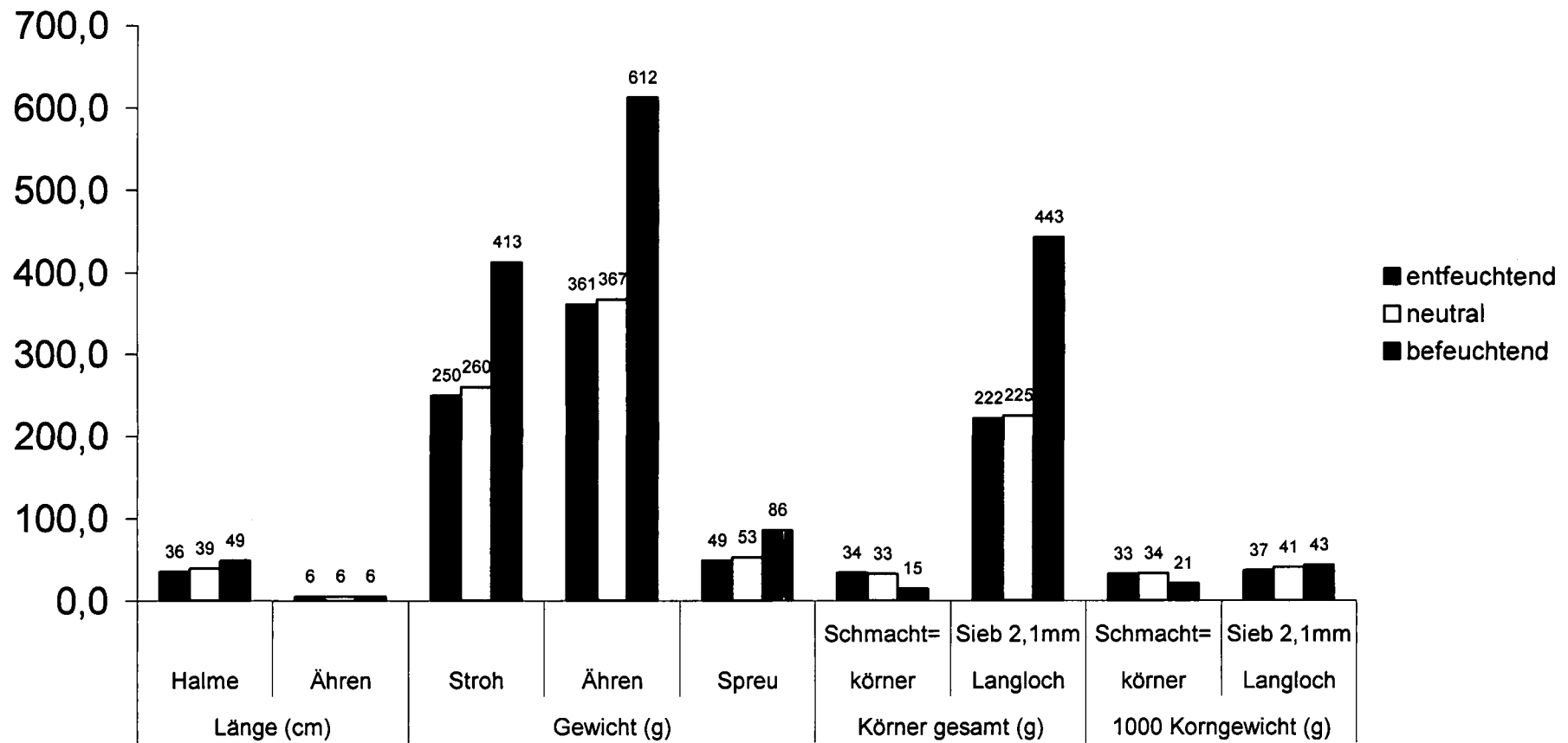


Abb. 5.12 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe im Umfang von 1m² der Gerste aus dem Jahr 2000. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfuchtenden Aquapolgeräten.

Das Ergebnis der Halmlänge von der Gerste konnte durch den Stichprobenumfang von n=50 auch auf Signifikanz hin untersucht werden. Dabei wird ein Unterschied zwischen be- und entfeuchtender Stelle erkennbar.

Halmlänge Gerste	entfeuchtend	neutral	befeuchtend
Mittelwert	35,8	39,5	49,3
Standardabweichung	3,3	3,5	4,6
Standardabw. in %	9,2	9,0	9,3

Tab. 5.1 Auswertung auf Signifikanz der Halmlänge bei Gerste im Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Differenz aus Halmen und Ähren ergibt die Verluste wie taube oder verloren gegangene Ähren. Dabei zeigt sich eine vergleichbare Pflanzenanzahl je m² an jeder Stelle. Bei der Anzahl von Halmen und Ähren liegt aber wieder die befeuchtende Zone an der Spitze, was sich auch in der geringen Anzahl der tauben Ähren und im höheren Bestockungsgrad der befeuchtenden Zone zeigt.

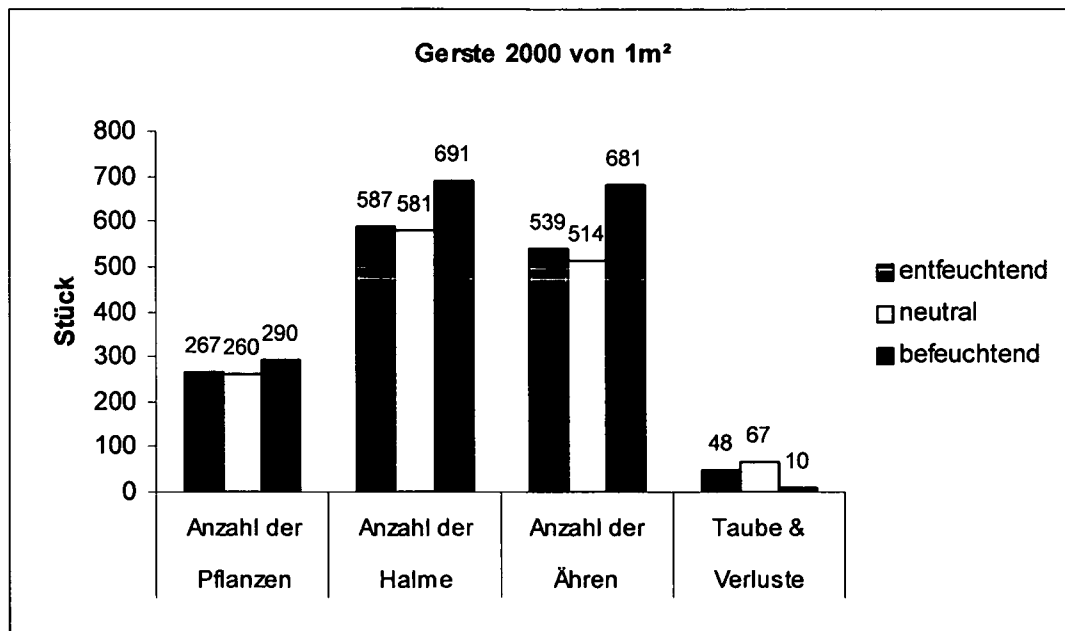


Abb. 5.13 Auswertung der Pflanzenanzahl und Anzahl von Halmen und Ähren bei Gerste im Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

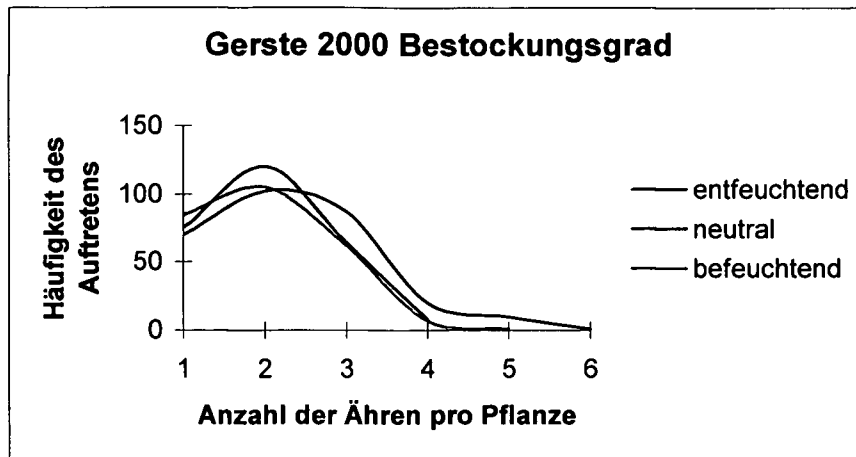


Abb. 5.14 Gegenüberstellung des Bestockungsgrades von jeweils 1m² Gerste im Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Um die einzelnen Stellen besser unterscheiden zu können und um den Fehler von u Unterschiedlichen Pflanzenanzahlen pro Entnahmestelle korrigieren zu können, wurden die jeweiligen Ergebnisse auf eine einzelne Pflanze zurückgerechnet. Gewichte, wie Stroh, Ähren, Spreu, Schmachtkörner und Nutzkörner, wurden durch die Anzahl der Halme, oder Anzahl der Ähren z.B. bei den Körnern dividiert. Daraus ergeben sich die Mittelwerte pro Pflanzeinheit, also einer Pflanze, die im nächsten Diagramm dargestellt sind. Diese Darstellung erleichtert auch den Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Kontrollversuch mit Weizen im Jahr 2001. Die Trennung zwischen Körnern und Schmachtkörnern erfolgte mit einem gängigen Langlochsieb mit einer Maschenweite von 2,1mm. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen be- und entfeuchtender Stelle auf dem Feld. Auch hier ist ersichtlich, dass die Gerste an der befeuchtenden Stelle unter besseren Bedingungen wachsen konnte und mehr gesundes Gewebe produzieren konnte als an den Vergleichsstellen. Das ist im hohen Korngewicht und dem geringen Anteil an Schmachtkörnern an der befeuchtenden Stelle erkennbar.

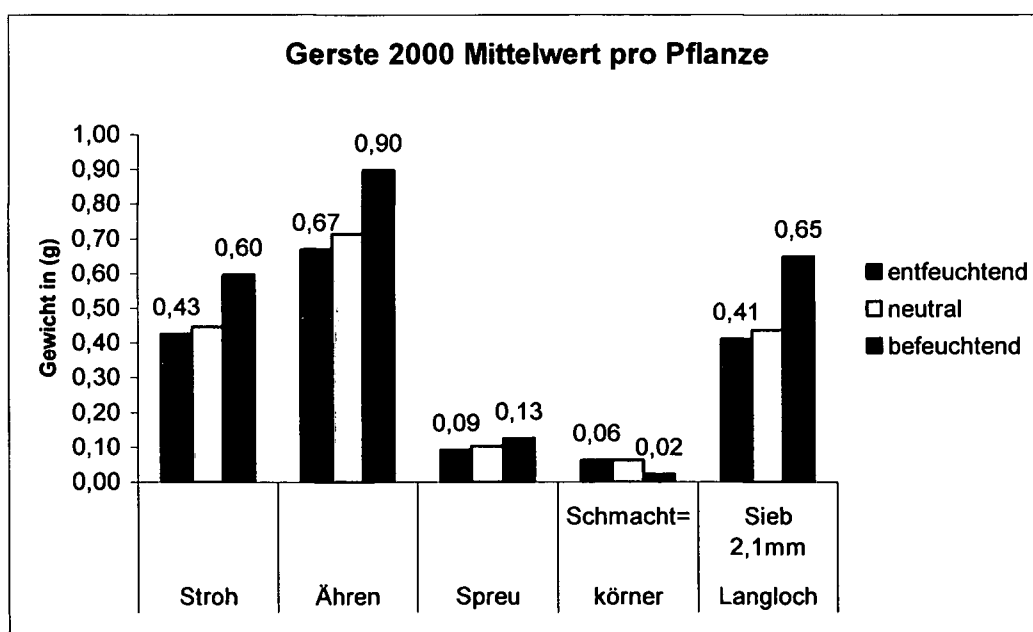


Abb. 5.15 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe von der Gerste aus dem Jahr 2000. Gegenüberstellung der auf eine Pflanze zurückgerechneten Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Auf Grund der Verluste durch Tierfraß konnten bei den Bohnenkulturen auf dem Feld nur noch die verbliebenen Früchte und deren Körner ausgewertet werden. Wie eingangs erwähnt, wurden die Bohnen auf dem Feld genau so wie jene im Labor künstlich bewässert.

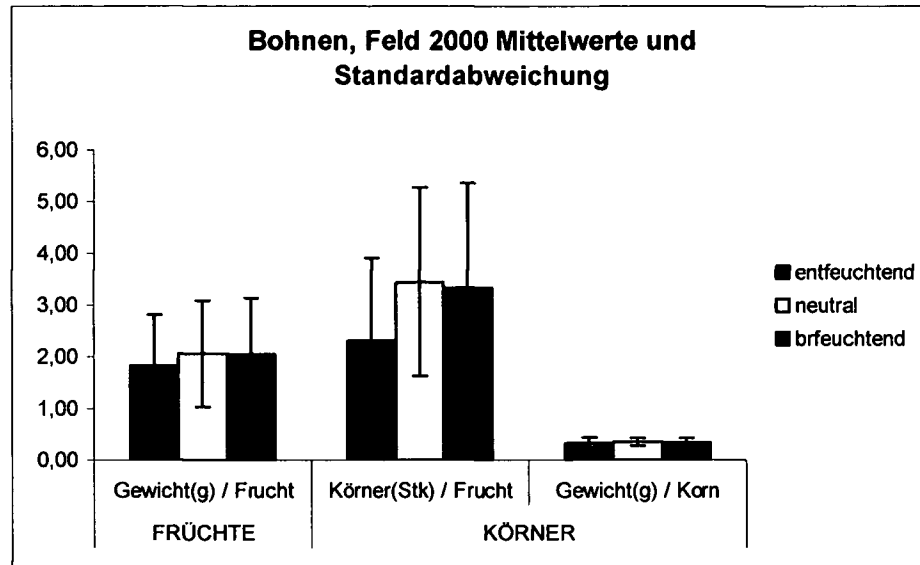


Abb. 5.16 Versuchsergebnis der bewässerten Stangenbohnen auf dem Feld aus dem Jahr 2000. Gegenüberstellung der Früchte unter Einfluss von be- und entfachtenden Aquapolgeräten.

Kontrollversuch mit Weizen, 2001

Ein Jahr nach der Versuchsdurchführung mit Sonnenblumen, Gerste, Stangenbohnen und Bodenproben wurde das Feld 2001 mit Weizen bebaut und der Versuch ohne Aquapol- Geräte wiederholt. Um auch ein Maß für die Streuung zu erhalten wurde nicht wie zuvor bei der Gerste ein ganzer m^2 pro Stelle auf einmal entnommen, sondern viermal $1/4m^2$. Die Summe bleibt gleich, aber es ist möglich dadurch mit einem Stichprobenumfang von $n=4$ zu arbeiten, was die Berechnung der Standardabweichung ermöglicht. Zum besseren Vergleich werden die Ergebnisse vom Weizen wie jene der Gerste dargestellt, allerdings mit zarteren Farben um immer darauf aufmerksam zu machen, dass keine Aquapolgeräte in dieser Zeit installiert waren. Bei folgenden Diagrammen wird manchmal auf die Benennung der Ordinate verzichtet. Das deshalb weil aus Gründen einer besseren Übersicht unterschiedliche Einheiten wie Masse oder Länge nebeneinander gezeigt werden. Bei diesen Diagrammen ist durch die Beschriftung der Abszisse erklärt um welche Einheit es sich im Konkreten Fall handelt. Bei der Versuchsauswertung wird zunächst ein recht heterogenes Ergebnis festgestellt. Die Werte der neutralen Stelle liegen sogar unter jenen der entfachtenden Stelle. Dieses Ergebnis ändert sich, wenn die Anzahl der Pflanzen auf jeder der Versuchsflächen beachtet wird.

Weizen 2001 ohne Aquapolgeräte Mittelwerte & Standardabweichung von 0,25m²

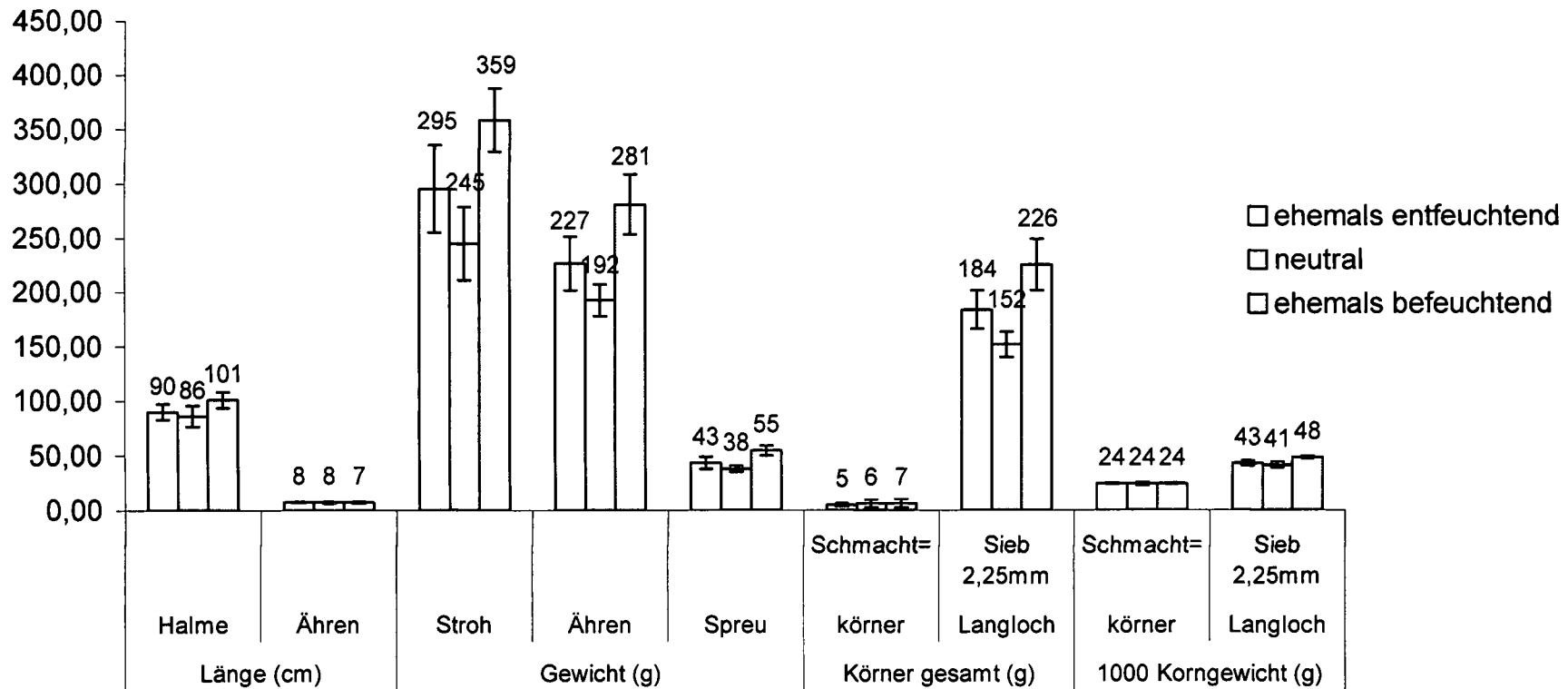


Abb. 5.17 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe im Umfang von 0,25m² vom Weizen aus dem Jahr 2001. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen ohne Einfluss von Aquapolgeräten.

Auch die Anzahl der Pflanzen für jeden $1/4\text{m}^2$ wurde erhoben. Die Pflanzen wurden weiter ausgezählt in Halme und Ähren. Dabei konnte auch gleich der Bestockungsgrad vom Weizen erhoben werden. Die Differenz daraus ergibt die Verluste wie taube oder verloren gegangene Ähren. Wie bei der Gerste zeigen sich unterschiedliche Pflanzenanzahlen je Versuchsfläche, allerdings gibt es fast keinen Unterschied zwischen befeuchtender und entfeuchtender Stelle. Beim Bestockungsgrad zeigen sich keine Unterschiede.

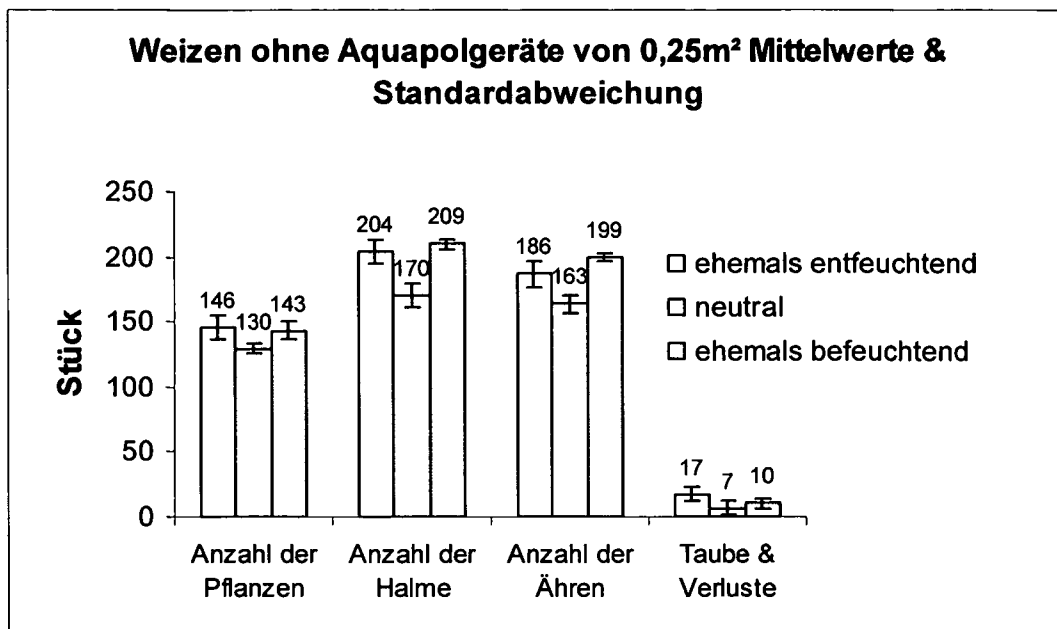


Abb. 5.18 Auswertung der Pflanzenanzahl und Anzahl von Halmen und Ähren bei Weizen im Jahr 2001 ohne Einfluss von Aquapolgeräten.

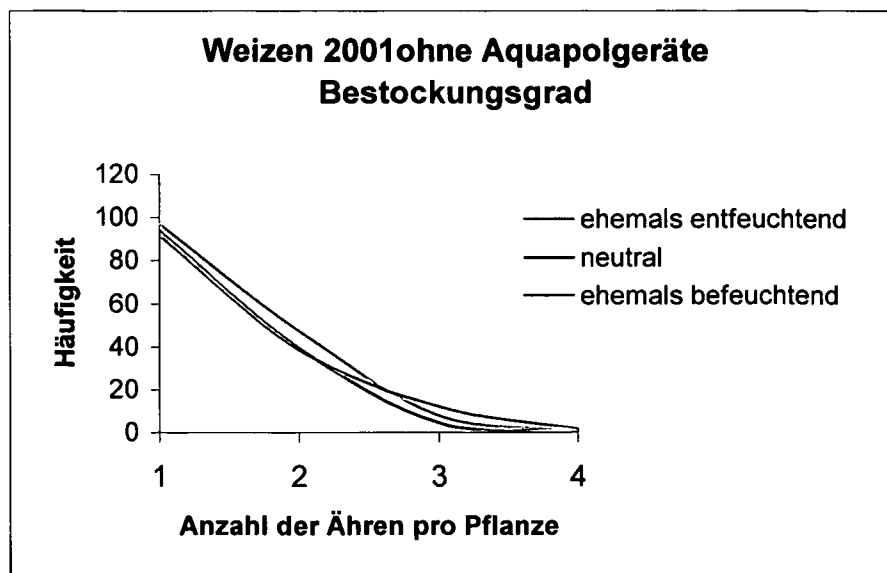


Abb. 5.19 Gegenüberstellung des Bestockungsgrades von jeweils 1m^2 Weizen im Jahr 2001 ohne Einfluss von Aquapolgeräten.

Um die einzelnen Stellen besser unterscheiden zu können, wurden die jeweiligen Gewichte, wie Stroh, Ähren ect. durch die Anzahl der Halme oder Ähren dividiert. Daraus ergeben sich die Mittelwerte pro Pflanzeinheit, also pro Pflanze, die im nächsten Diagramm dargestellt sind.

Die Trennung zwischen Körnern und Schmachtkörnern erfolgte mit einem gängigen Langlochsieb mit einer Maschenweite von 2,1mm. Es zeigen sich an der ehemals befeuchtenden Stelle höhere Werte als bei den Vergleichsstellen. Das bedeutet, dass das Pflanzenwachstum an dieser Stelle von natur aus besser ist als auf dem restlichen Feld.

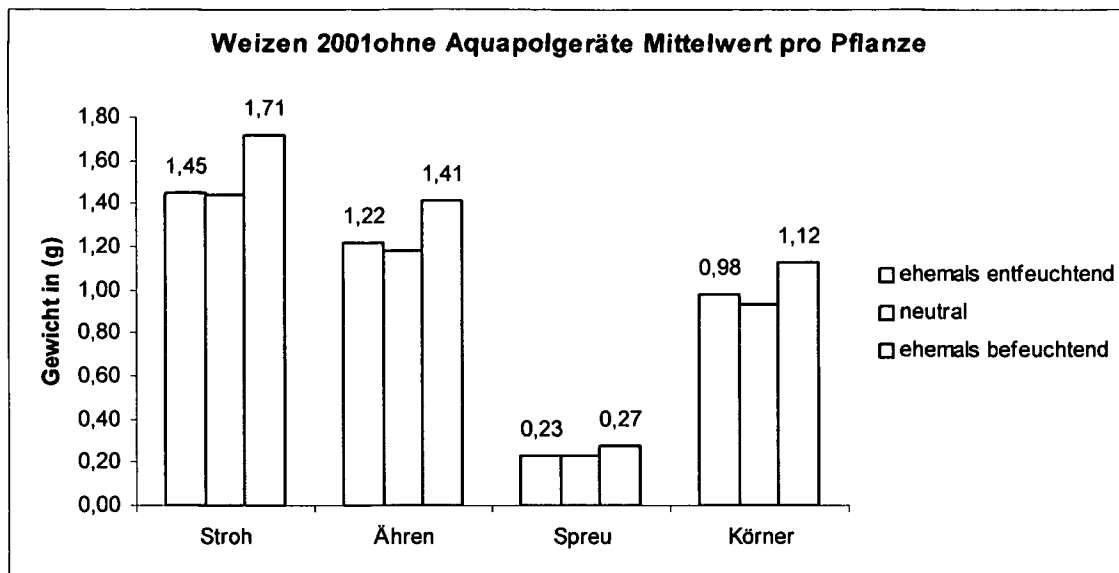


Abb. 5.20 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe von Weizen aus dem Jahr 2001. Gegenüberstellung der auf eine Pflanze zurückgerechneten Biomassefraktionen ohne Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Kontrollversuch mit Sonnenblumen, 2005

Um die vorangegangenen Ergebnisse der Versuche mit Sonnenblumen, Gerste und Weizen besser interpretieren zu können wurde der Versuch im Jahr 2005 auf dem selben Feld wie in den Jahren 2000 und 2001 abermals mit Sonnenblumen wiederholt. Diesmal aber wurden die Aquapolgeräte anders aufgebaut. Das entfeuchtende Gerät wurde an die Stelle des zuvor befeuchtenden Aquapolgerätes errichtet und umgekehrt.

Am 21.08.2005 fand eine Begehung des ganzen Feldes statt, wobei auf Bereiche mit unterschiedlicher Wuchshöhe geachtet wurde. In diesen Bereichen wurde stichprobenartig die Wuchshöhe der Sonnenblumen mit einem Stahlmaßband erhoben. Zu diesem Zeitpunkt waren die Pflanzen schon ausgewachsen, aber noch grün. Am 15.09.2005 wurde jeweils an den Stellen befeuchtend, neutral und entfeuchtend die Wuchshöhe von 100 Pflanzen, in Summe 300, gemessen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Pflanzen schon zur Gänze ausgereift, daher liegen die Werte der Wuchshöhen so nahe beieinander.

In dem folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse aus dem Jahr 2005 so dargestellt, dass sie mit den Ergebnissen aus dem Jahr 2000 im Bezug auf entfeuchtend, neutral und befeuchtend verglichen werden können. Die Werte von 2005 sind demnach seitenverkehrt gezeichnet was bedeutet, dass die Randzone IV nun am linken Diagrammrand liegt. Bei Diagrammen aus dem Jahr 2000 liegt die Randzone IV am rechten Diagrammrand. Die im Kontrollversuch 2001 ohne Geräte festgestellten besseren Wachstumsbedingungen an der ehemals befeuchtenden Stelle (III) finden sich im Versuch 2005 an der entfeuchtenden Stelle (III). Die Bezeichnung mit den römischen Zahlen bleibt gleich, da sie all die Jahre hindurch nicht verändert wurde. Es ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen befeuchtender und entfeuchtender Stelle zwar vorhanden, aber mit durchschnittlich 7,5cm Unterschied der Wuchshöhe gering sind. Aus der Begehung vom 15.09.2005 konnte aus dem großen Stichprobenumfang auch die

Standardabweichung ermittelt werden, welche zwischen 8,6 und 11% der Mittelwerte lag. Erstaunlich ist, dass gerade an den Randzonen um gut 40cm größere Wuchshöhen als in der Mitte auftraten.

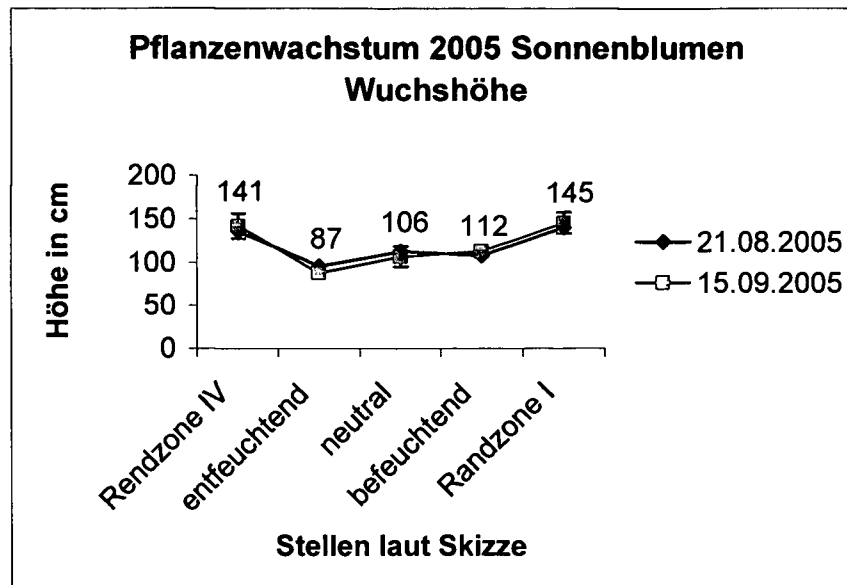


Abb. 5.21 Versuchsergebnis im Jahr 2005 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung der Pflanzenwuchshöhe aus zwei Begehungen unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Am 15.09.2005 wurden jeweils an den Stellen befeuchtend, neutral und entfeuchtend 30 Sonnenblumenköpfe entnommen und einzeln gewogen. Diese Werte wurden später nach Gewicht sortiert und zeigen untenstehendes Ergebnis, was erkennen lässt, dass die Verteilung des Kopfgewichtes bei allen Stellen sehr ähnlich ist. Lediglich an der befeuchtenden Stelle gibt es einen einzigen Kopf mit 400g, der aber unter den restlichen 30 als Ausreißer zu betrachten ist.

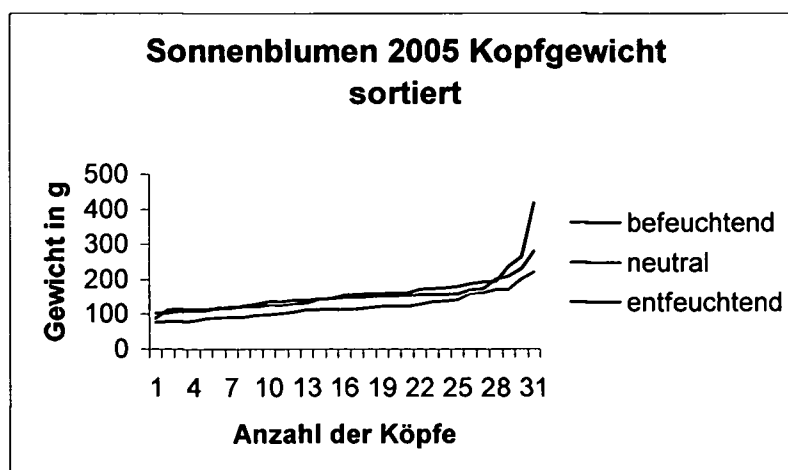


Abb. 5.22 Versuchsergebnis im Jahr 2005 der Sonnenblumen auf dem Feld. Sortierte Darstellung der einzelnen Kopfgewichte unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Wie bei den Sonnenblumen im Jahr 2000 wurden nun die Köpfe und die Körner händisch getrennt. Aus den Gesamtkörnern wurde durch Zählen das Tausendkorngewicht pro Entnahmestelle ermittelt. Die Spreu stellt alles dar, was nach der Behandlung der Köpfe, nach

dem entfernen der Körner, geblieben ist. Dabei zeigt die neutrale Stelle einen erhöhten Wert, der darauf zurückzuführen ist, dass einige Pflanzen zum Zeitpunkt der Entnahme schon überreif waren und deren Köpfe wenig Festigkeit aufwiesen. Die Ergebnisse von be- und entfeuchtender Stelle liegen mit einem Unterschied von etwa 10% recht nahe beieinander. Nur die Werte aus der neutralen Zone liegen darunter.

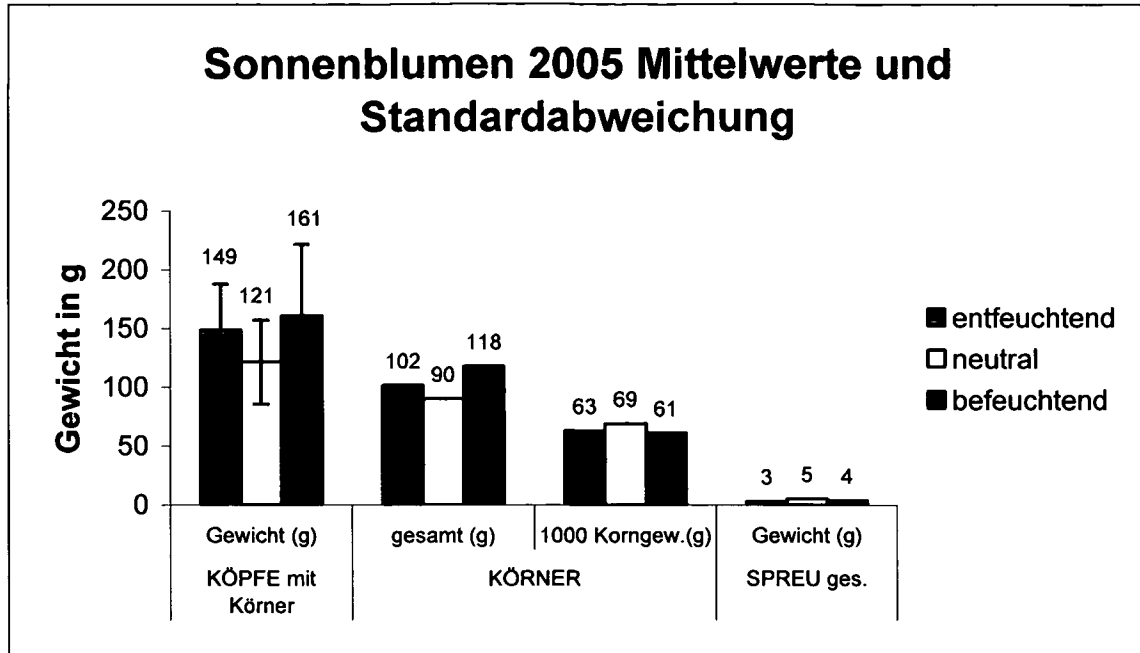


Abb. 5.23 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe im Umfang von jeweils 30 Stück von Sonnenblumen aus dem Jahr 2005, zurückgerechnet auf eine Pflanze. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Ergebnisse der Bodenuntersuchung

Bodenwassergehalt

Am 5.7.2000 wurde während der Erhebung vom Pflanzenwachstum mit der Entnahme der Bodenstichproben bis in eine Tiefe von 55cm begonnen. Dabei wurde jeweils eine Probe entnommen und diese alle 10cm geteilt um die Bodenwassergehalte zu bestimmen. Die oberste Schicht ging von 0 bis 15cm Tiefe, die zweite von 15 bis 25cm Tiefe und die unterste von 45 bis 55cm. Die oberste Schicht wurde deshalb größer gewählt, weil durch das Eindringen des Bohrers der Boden im oberen Bereich verdichtet wird. So ergeben sich die Werte der Bodentiefe in der Darstellung von 10 bis 50cm. Dieser Vorgang wurde am 14.8.2000 und am 20.8.2000 wiederholt. Insgesamt wurden auf diese Weise 45 Bodenproben untersucht. Aus den erhobenen Daten wurde der Mittelwert ($n=3$) gebildet und in den nachstehenden Diagrammen mit der entsprechenden Standardabweichung dargestellt. Es wurde der Wassergehalt bis zur Lufttrockenheit und jener bei 105°C bestimmt. Zur besseren Übersicht wird auf die Darstellung der Standardabweichung für die neutrale Entnahmestelle verzichtet.

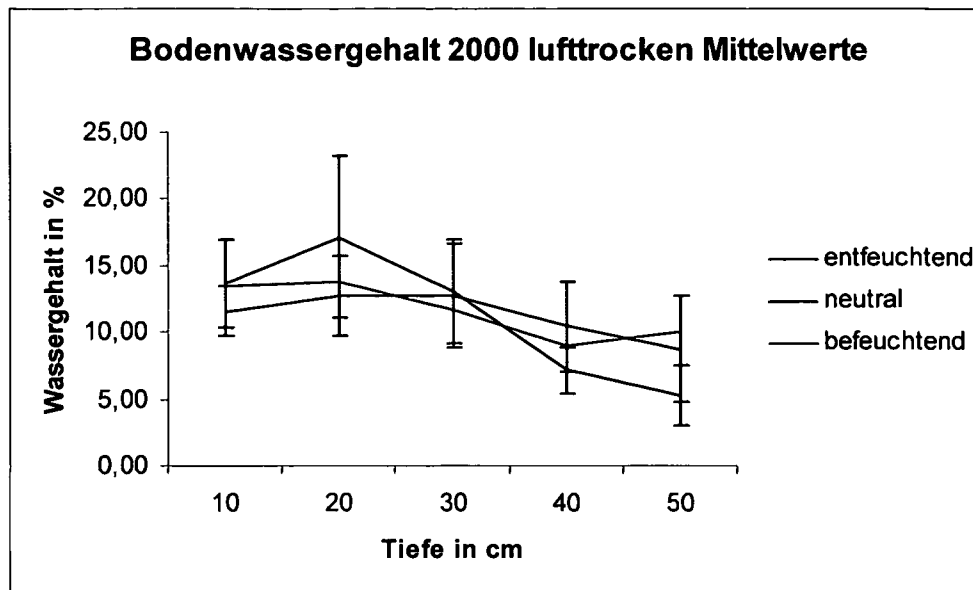


Abb. 5.24 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Lufttrockenheit auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten bis in eine Tiefe von 50cm.

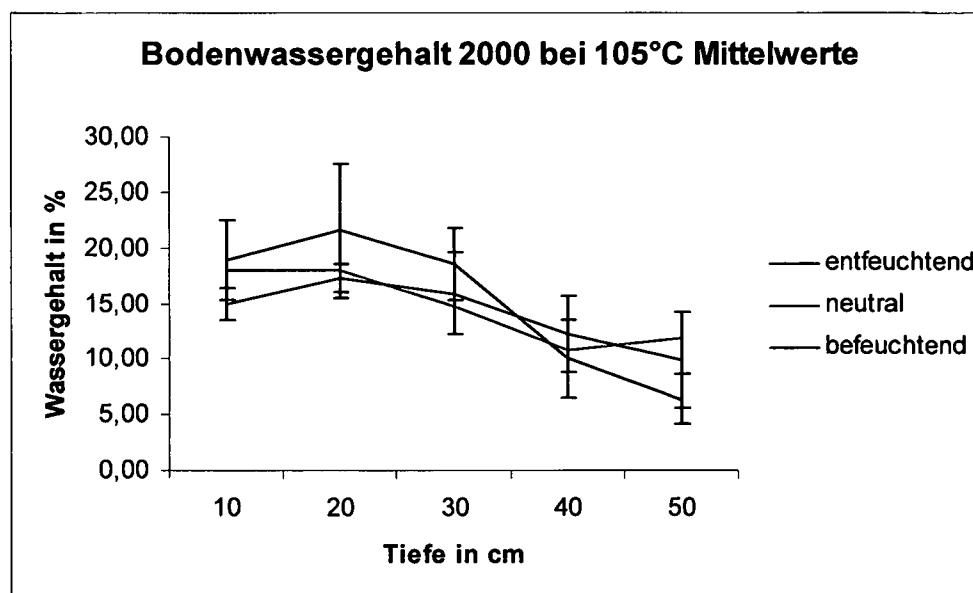


Abb. 5.25 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Trocknung im Ofen bei 105°C auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten bis in eine Tiefe von 50cm.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Standardabweichungen überschneiden, was auf eine große Heterogenität des Bodens in dieser oberen Schicht schließen lässt. Um die Unterschiede zwischen lufttrockenen und bei 105°C getrockneten Bodenproben besser darstellen zu können, wurden in der folgenden Grafik die Mittelwerte der Bodenwassergehalte ohne Standardabweichungen nebeneinander dargestellt.

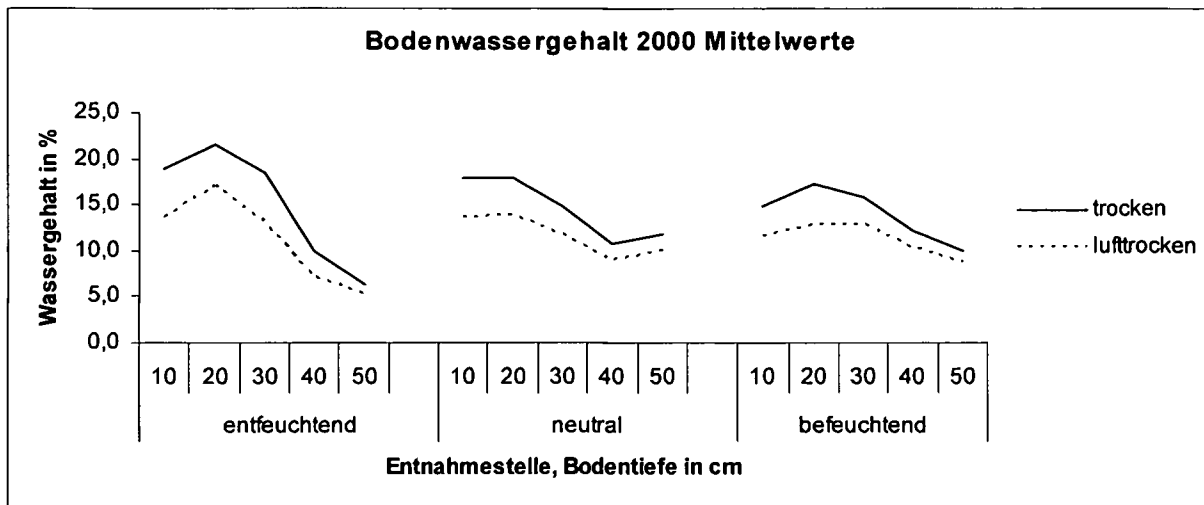


Abb. 5.26 Gegenüberstellung der Bodenwassergehalte lufttrocken und nach Trocknung bei 105°C von Bodenproben bis in eine Tiefe von 50cm vom Feld aus dem Jahr 2000 unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Die Differenz zwischen den Wassergehalten lufttrocken und bei 105°C getrocknet verringert sich mit zunehmender Tiefe. An der entfeuchtenden Stelle zeigt sich eine größere Wassermenge in den oberen Bodenschichten, dafür eine auffallend geringere in größerer Tiefe. Die neutrale und befeuchtende Stelle verhalten sich im Bezug auf den Wassergehalt in der oberen Bodenschicht recht ähnlich. Wird nun aus allen Beobachtungen über das Datum und die Tiefe der Mittelwert gebildet, sind keine Unterschiede im Wassergehalt mehr feststellbar.

Zeitgleich mit der Entnahme der Sonnenblumen, am 10.9.2000, wurde auch die Entnahme von Bodenproben bis in eine Tiefe von 100cm durchgeführt. An jeder der drei Stellen entfeuchtend (II), befeuchtend (III) und neutral (V) wo jeweils Sonnenblumen im Umfang von 5m² entnommen wurden, wurden auch fünf Bodenproben, in Summe 15, gezogen. So war es möglich die Mittelwerte aus n=5 zu berechnen. Generell konnten den Proben folgende Horizonte zugeteilt werden:

- 0 bis 40 cm Tiefe: Ah
- 40 bis 75cm Tiefe: Ac
- 75 bis 100cm Tiefe: C

Der Ah Horizont verlief über das ganze Entnahmegebiet recht konstant mit einer Streuung von +/- 7cm. Auffallend war das vermehrte Auftreten des C Horizontes an der befeuchtenden Stelle bei vier von fünf Proben. An der entfeuchtenden Stelle trat dieser Horizont nur einmal auf, an der neutralen Stelle zweimal. Andernfalls ging der Ac Horizont weiter als bis 100cm Tiefe, dem Ende des Bodenbohrers. Auch aus diesen Proben, insgesamt 38 Stück, wurde der Wassergehalt bei Lufttrockenheit und bei 105°C errechnet, welcher in den nächsten Diagrammen als Mittelwert je Probestelle mit den dazugehörigen Standardabweichungen dargestellt wird. Zur besseren Übersicht wird auf die Darstellung der Standardabweichung für die neutrale Entnahmestelle verzichtet.

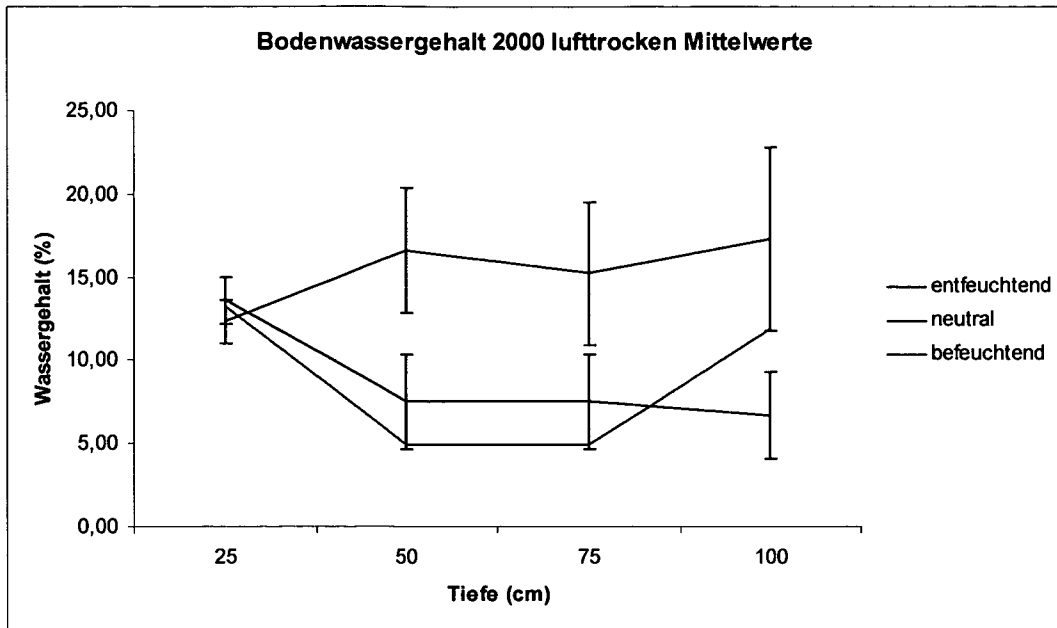


Abb. 5.27 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Lufttrocknung auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben bis in eine Tiefe von 100cm unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

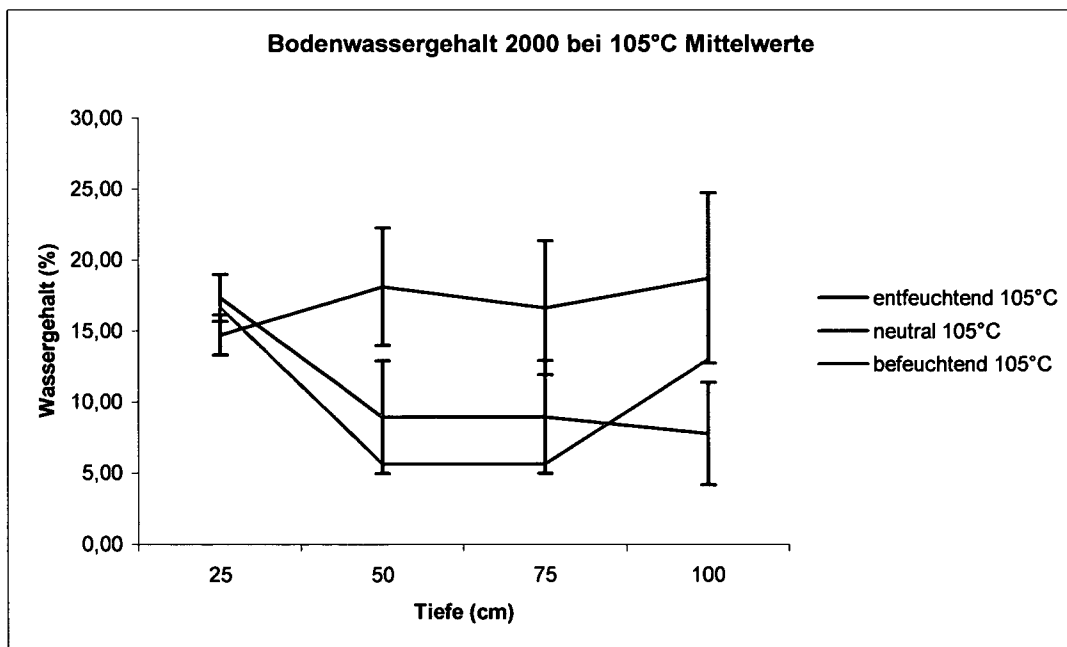


Abb. 5.28 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Trocknung im Ofen bei 105°C auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben bis in eine Tiefe von 100cm unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Die Wassergehalte aus dem oberen Horizont Ah, liegen recht nahe beieinander, was sich auch bei den Bodenproben bis in eine Tiefe von 55cm zeigt. Erst mit zunehmender Tiefe werden die Wassergehalte deutlich unterschiedlicher. Eine Ausnahme ist der Wassergehalt an der neutralen Stelle bei der Tiefe von 75 bis 100cm, der sich plötzlich wieder erhöht. Dabei handelt es sich um weit streuende Einzelergebnisse in der Wassergehaltsbestimmung. Auch der sehr feuchte C Horizont tritt an dieser Stelle zweimal auf. Es zeigt sich, dass der Wassergehalt mit dem Pflanzenwachstum korreliert. Der Boden an der Stelle mit dem befeuchtend wirkenden Aquapolgerät ist tatsächlich feuchter, an dieser Stelle ergab sich auch eine höhere Biomasse der

Pflanzen. Ob sich die größere Bodenfeuchtigkeit durch das Aquapolgerät ergibt, lässt sich an dieser Stelle noch nicht beurteilen.

Folgendes Diagramm zeigt die Gegenüberstellung der Wassergehalte des lufttrockenen Bodens mit jenen bei 105°C.

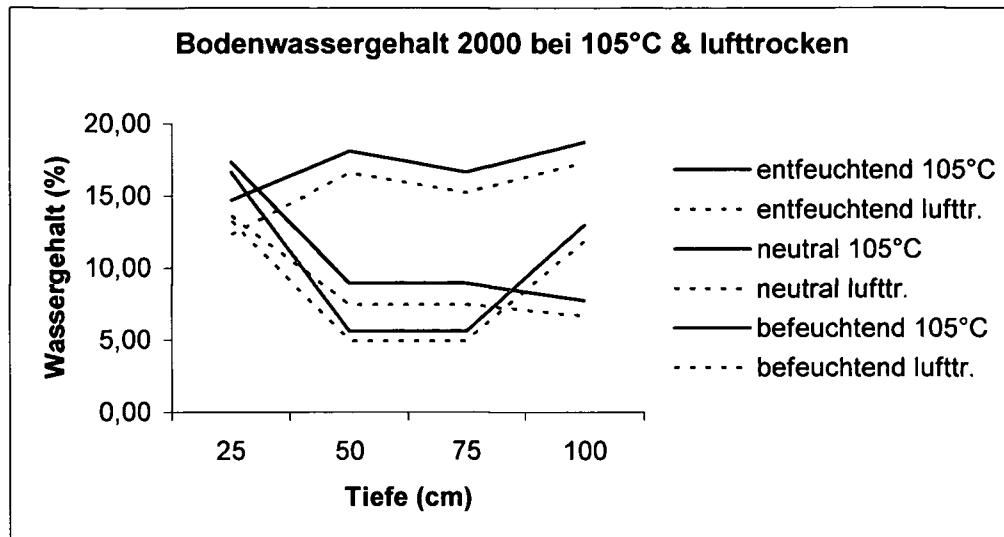
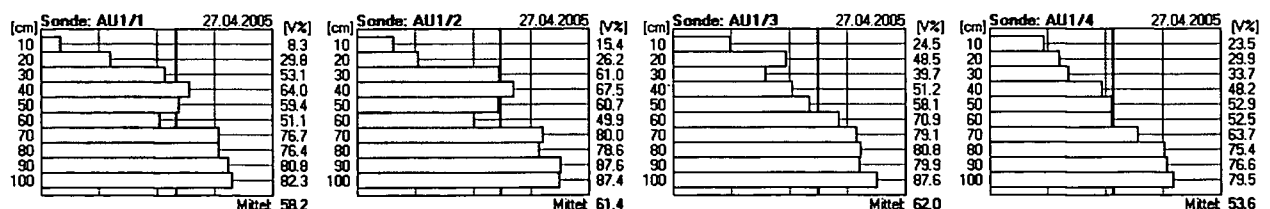


Abb. 5.29 Gegenüberstellung der Bodenwassergehalte lufttrocken und nach Trocknung bei 105°C von Bodenproben bis in eine Tiefe von 100cm vom Feld aus dem Jahr 2000 unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Wie im Kapitel „Feldversuche“ beschrieben wurde auch im Jahr 2005 der Bodenwassergehalt auf der Freilandversuchsfläche ermittelt. Dabei kamen Profilsonden (PR1) von der Firma Delta-T Devices Ltd zum Einsatz. Die Sonden AU1/1 und AU1/2 waren an der befeuchtenden Stelle installiert, die beiden anderen an der entfeuchtenden Stelle. Am 27.04.2005 wurde von Herrn DI. Ernst Kortschak mit den Messungen begonnen, welche bis 15.09.2005 dauerten, wobei das Feld sechsmal beprobt wurde. Er hat mir seine Ergebnisse dankenswerterweise zu Verfügung gestellt. Dabei zeigte sich aber nur ein minimaler Unterschied in den Bodenwassergehalten über die Tiefe und der Messdauer. Folgende Diagramme zeigen die Ergebnisse zu diesen Messungen. Jeweils vier Diagramme nebeneinander für jeden Tag an welchem Messungen durchgeführt wurden. Zuerst jene der befeuchtenden Stelle in türkisblau dargestellt, danach jene der entfeuchtenden Stelle in orangerot. Am linken Rand der Diagramme ist nach unten hin steigend die Bodentiefe angegeben, am rechten Rand die Wassergehalte in Volumprozent des Bodenporenvolumens. Weiters wird der Mittelwert der Bodenwassergehalte über die Tiefe hin numerisch und grafisch, in Form der blauen senkrechten Linie angegeben. Am 22.06.2005 gab es bei der Sonde AU1/1 in der Tiefe von 90cm kein Ergebnis, deshalb wurde der Wert von den benachbarten Tiefen übernommen.



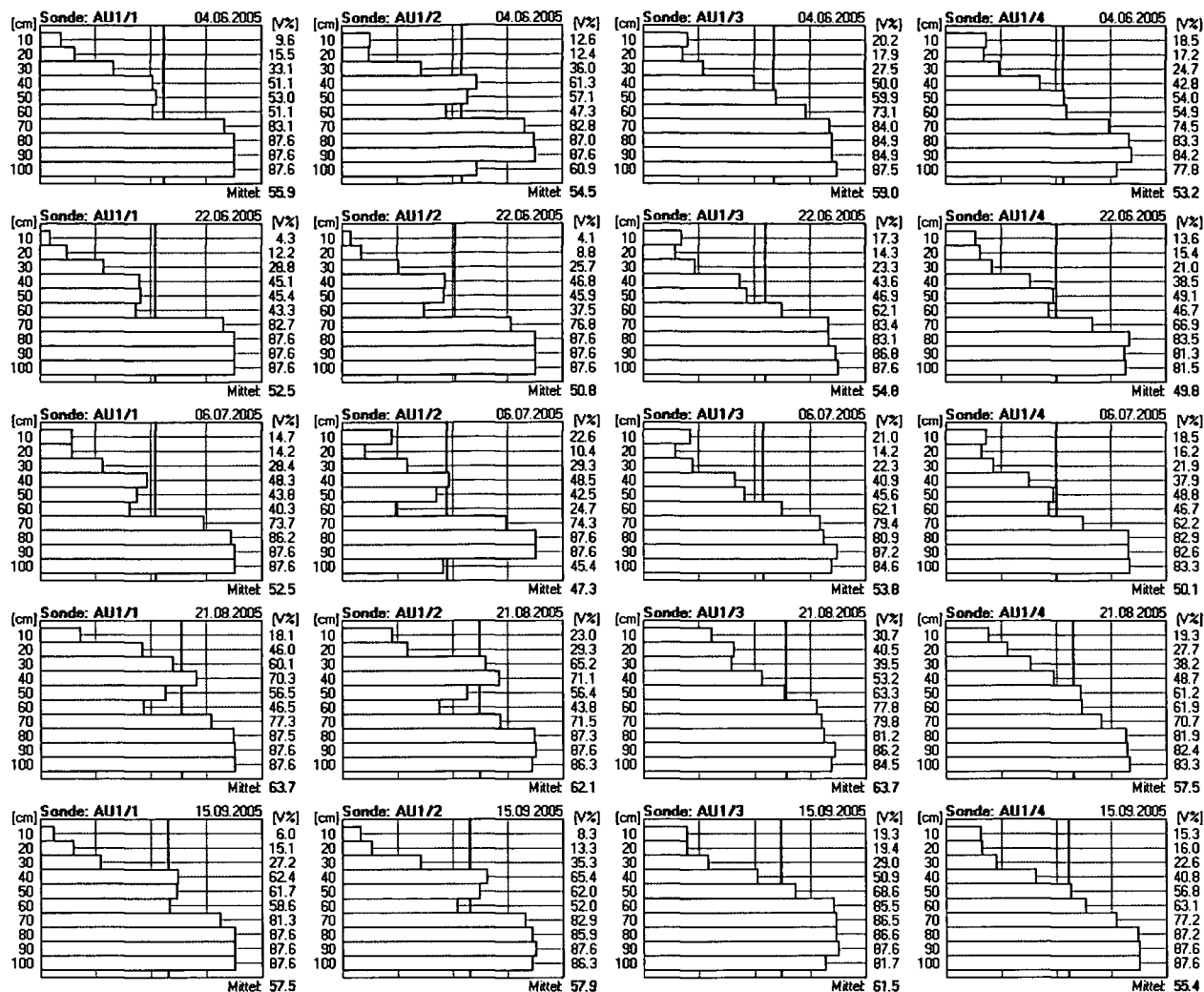


Abb. 5.29.1 Bodenwassergehalte 2005, erhoben mit Profilsonden. Befeuchtende Stellen türkis unterlegt, entfeuchtende orange. Jeweils vier Messungen pro Tag über sechs Tage im Zeitraum von April bis September 2005.

Das nächste Diagramm zeigt zusammenfassend den Verlauf der Bodenwassergehalte von April bis September 2005 wo die Trockenheit im Juni und die große Regenspende vom August deutlich erkennbar sind.

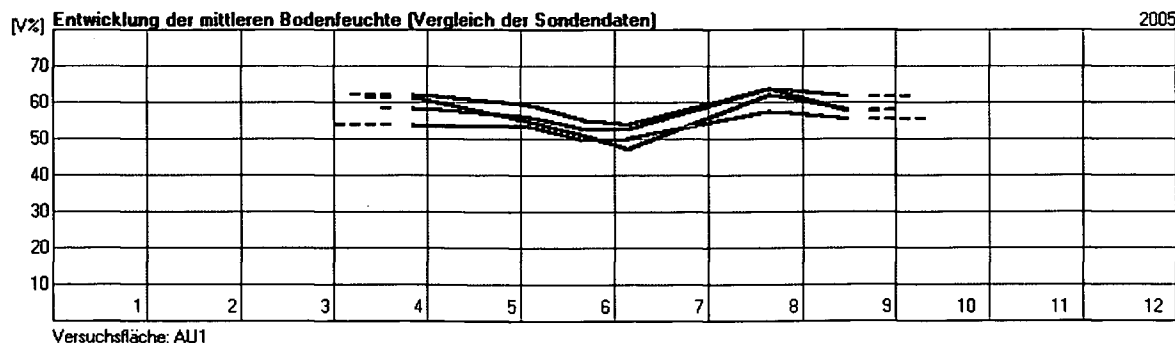
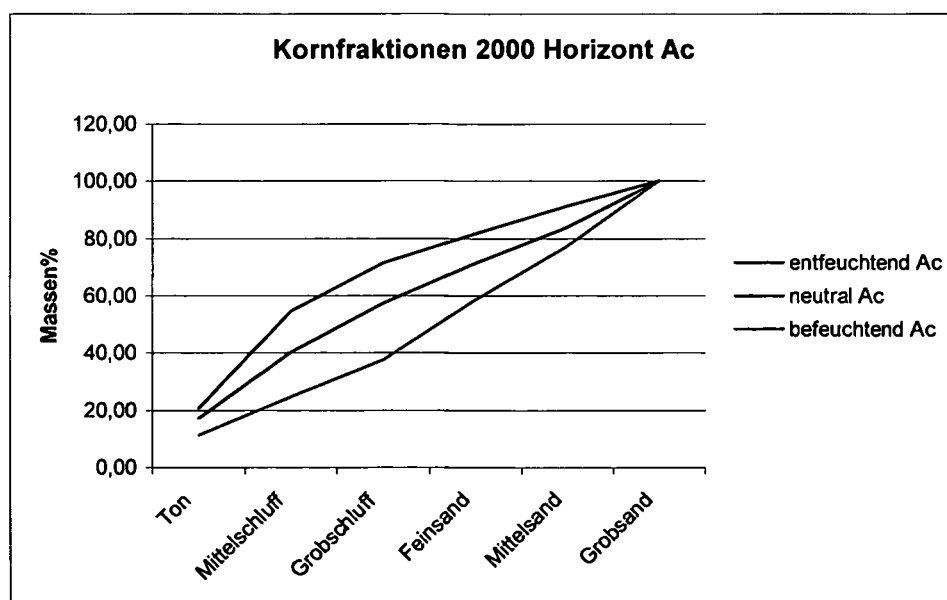
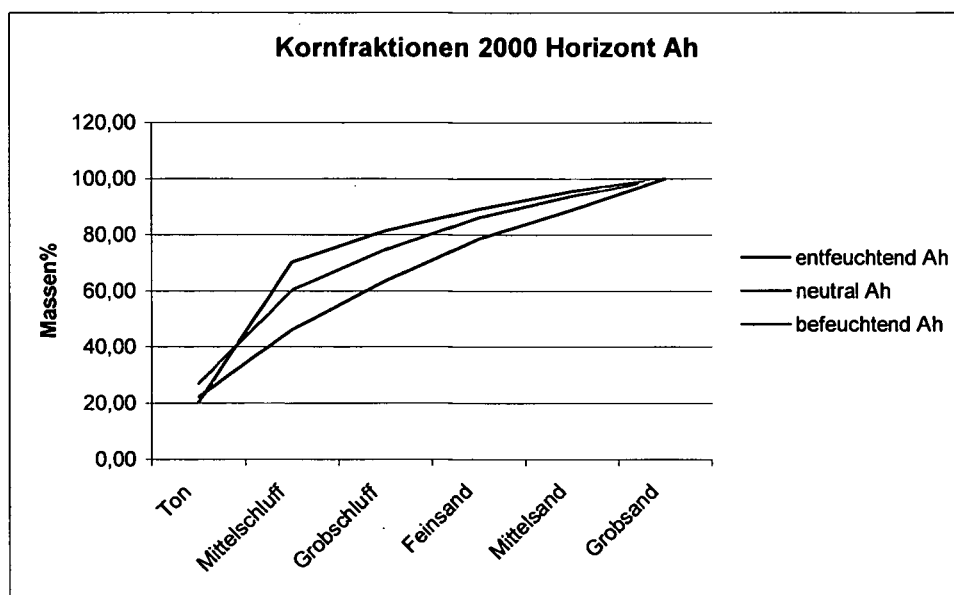


Abb. 5.29.2 Mittelwert der Bodenwassergehalte über einen Zeitraum von April bis September 2005 bis in eine Tiefe von 100cm. Auf der Ordinate die Bodenwassergehalte in Volumprozent, Abszisse als Zeitachse.

Kornverteilungsanalyse

Die 15 Bodenproben mit jeweils drei Horizonten, welche bis in eine Tiefe von einem Meter gewonnen werden konnten, wurden neben der Wassergehaltsbestimmung auch einer Kornverteilungsanalyse unterzogen. Diese Untersuchung fand so wie sie im Kapitel Feldversuche beschrieben wurde im Labor des Institutes für Bodenkunde der Universität für Bodenkultur statt. Aufgrund der aufwendigen Prozedur der Korngrößenbestimmung wurden die 15 Einzelproben zu drei Proben, jeweils eine für die befeuchtende, neutrale und entfeuchtende Stelle zusammengeschüttet. Die Aufteilung in die drei Bodenhorizonte blieb dabei erhalten. Um die Ergebnisse überprüfen zu können wurden an den Stellen entfeuchtend und befeuchtend die Untersuchungen zweimal durchgeführt. Diese Werte schwanken innerhalb einer natürlichen Bandbreite, für eine genauere Aussage sind mehrere Proben notwendig. Die folgenden Grafiken zeigen jeweils die Summenkurven der Kornfraktionen der einzelnen Bodenhorizonte bei den entsprechenden Entnahmestellen befeuchtend, neutral und entfeuchtend.



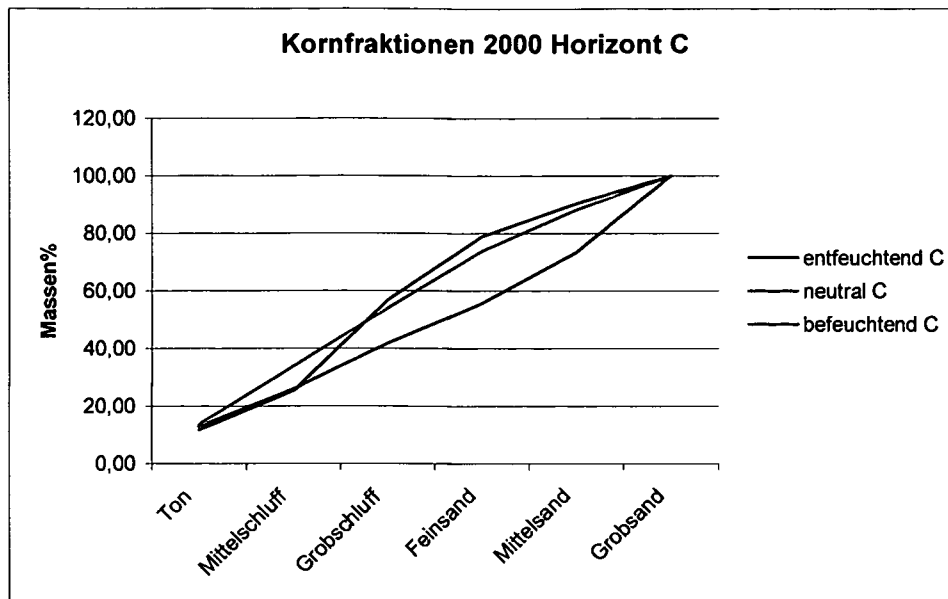


Abb. 5.30 Kornfraktionen aus dem Jahr 2000 der einzelnen Bodenhorizonte an den Stellen be- und entfeuchtend u. neutral.

Es ist beim Horizont Ah an der entfeuchtenden Stelle ein besonders hoher Feinkornanteil ersichtlich, welcher sich aber mit zunehmender Tiefe bis zu C-Horizont hin verliert. Die Kornverteilung an der befeuchtenden Stelle zeigt über die Tiefe betrachtet die größte Konstanz. Über die Kornfraktionen wird mit dem Texturdreieck die Bodenart bestimmt. Auf der Ordinate findet sich die Schlufffraktion in Prozent, auf der Abszisse die Tonfraktion. Für das Versuchsfeld ergaben sich folgende Bodenarten, wie die nächste Darstellung zeigt. Dabei bedeuten:

- IU...lehmiger Schluff
- IS...lehmiger Sand und
- sL...sandiger Lehm.

Die Horizonte Ah und Ac entsprechen bis auf zwei Ausnahmen der Bodenart sandiger Lehm. Alle C-Horizonte liegen im Bereich der Bodenart lehmiger Sand. Der größte Ausreißer findet sich bei der neutralen Stelle im Horizont Ac, ebenfalls als lehmiger Sand.

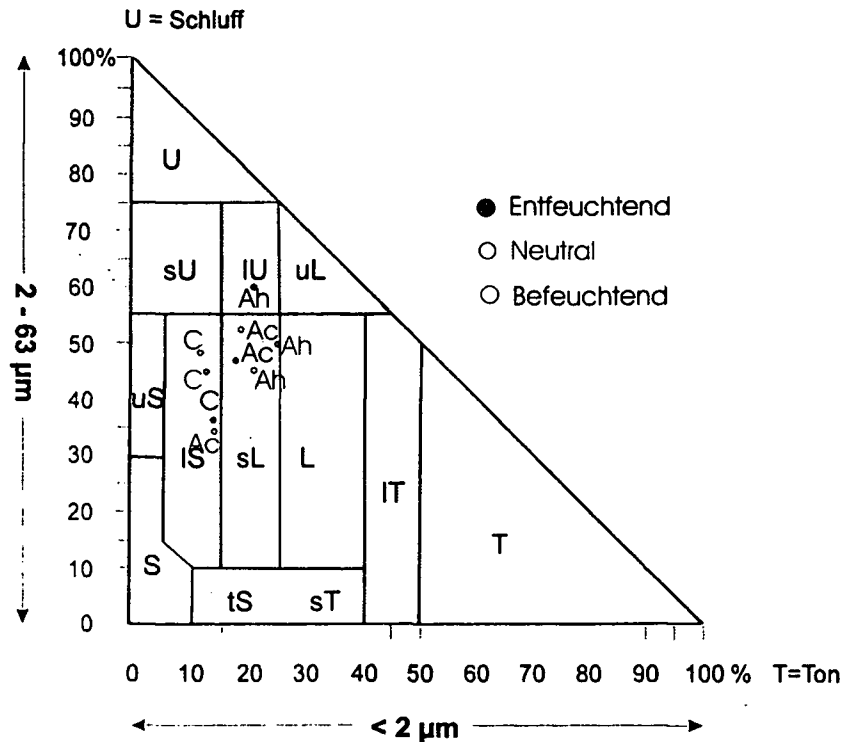


Abb. 5.31 Texturdreieck zur Bestimmung der Bodenarten vom Feld aus dem Jahr 2000. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

Karbonatgehalt

Wie im Kapitel Feldversuche beschrieben, wurde jeder einzelne Boden zweimal auf Karbonatgehalt in Prozent der Bodenmasse untersucht und mit dem Mittelwert der Ergebnisse weitergearbeitet. Durch Rücksprache mit Hr. Ass. Prof. DI. Dr. Axel Mentler wurde mir versichert, dass eine Abweichung der einzelnen Ergebnisse unter 5% ein genaues Arbeiten mit der Scheiblerapparatur bestätigt. Meine Ergebnisse variierten im Durchschnitt um 3%. Eine Ausnahme bildete jedoch die entfeuchtende Stelle wo der Karbonatgehalt in den Horizonten Ah und C stark schwankte. Der größte Unterschied lag im Ah- Horizont wo der Karbonatgehalt zwischen 17% und 25% CaCO_3 lag. Die entfeuchtende Stelle wurde daher ein zweites Mal untersucht. Dazu wurde die Probe gemahlen um eventuelle kleine Karbonatbrocken zu zerlegen, welche die Dauer der Messung gegen unendlich tendieren lassen. Aus den so erhaltenen, insgesamt vier Werten pro Horizont konnte einer des Ah- Horizontes als Ausreißer identifiziert werden. Dieser Wert, 25% CaCO_3 wurde entfernt. Der Mittelwert der restlichen drei Proben beträgt 16,3% CaCO_3 . Im C-Horizont der entfeuchtenden Stelle ergaben sich auch bei der Wiederholung unterschiedliche Werte in der Größenordnung von 15 % Unterschied. Dadurch ergibt sich hier eine größere Standardabweichung. Mittelwerte und Standardabweichungen des Karbonatgehalts sind in folgendem Diagramm abgebildet. Der Boden des Feldes, welches für die Freilandversuche verwendet wurde ist, speziell in den tieferen Schichten sehr kalkreich, wodurch sich eine hohe Pufferkapazität gegenüber einen saurem Milieu ergibt.

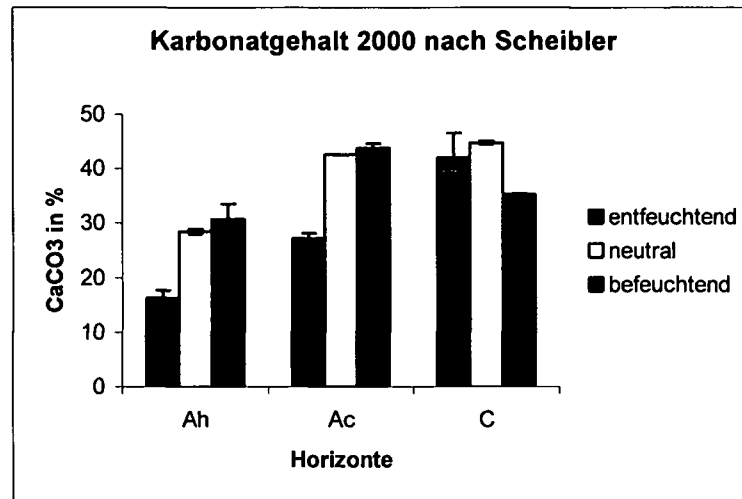


Abb. 5.32 Karbonatgehalt nach Scheibler von den Bodenarten vom Feld. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

C/N Verhältnis

Die Werte für Gesamtstickstoff und Gesamtkohlenstoff wurden von Hr. Ing. Brauner durch Gaschromatographie auf dem Institut für Bodenforschung ermittelt. Dabei wurde ebenfalls aus zwei Messergebnissen der Mittelwert gebildet und dieser für weitere Berechnungen herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt deutlich, wie der Stickstoffgehalt rasch mit der Tiefe hin abnimmt und Stickstoff in tieferen Horizonten gar nicht mehr vorkommt.

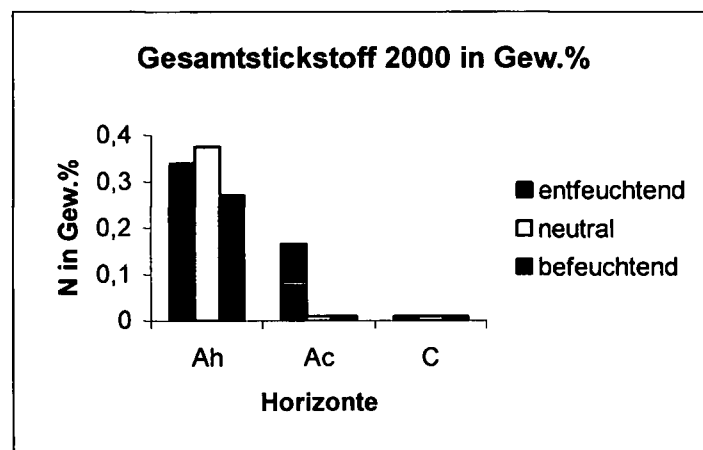


Abb. 5.33 Gesamtstickstoffgehalt N_t der Bodenarten vom Feld. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

Beim Gesamtkohlenstoff sieht die Lage schon anders aus, er ist über die Bodenschichten hin recht homogen verteilt, was bei der Berechnung des C/N- Verhältnisses zu hohen Werten führt.

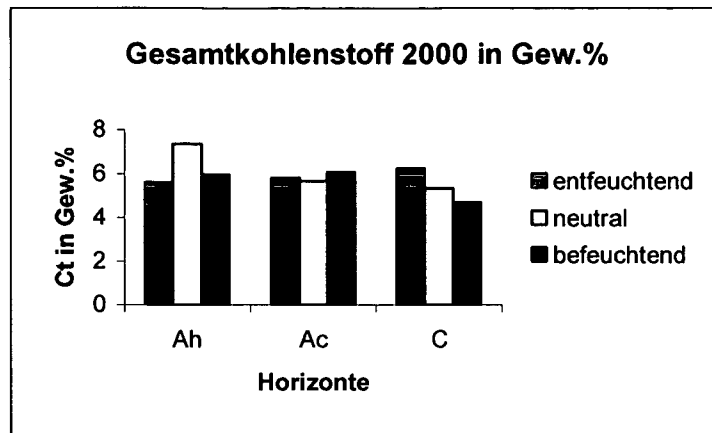


Abb. 5.34 Gesamtkohlenstoffgehalt C_t der Bodenarten vom Feld. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

Die Graphische Darstellung des C/N- Verhältnisses ist in folgendem Diagramm ersichtlich. In der Grafik werden nur relevante Werte, kleiner als 40 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der obersten Bodenschicht, dem Ah- Horizont eine Freisetzung von Organisch gebundenem Stickstoff erfolgt, während in den tieferen Bodenschichten ein gehemmter Substanzabbau vorliegt. Auch bei der befeuchtenden Stelle im Ac-Horizont liegt das C/N-Verhältnis über 25 und es ist mit einer verringerten Organismen-tätigkeit zu rechnen. Die Darstellung der Standardabweichung in untenstehender Grafik entfällt, weil sie nur maximal 5% vom Ergebnis ausmacht.

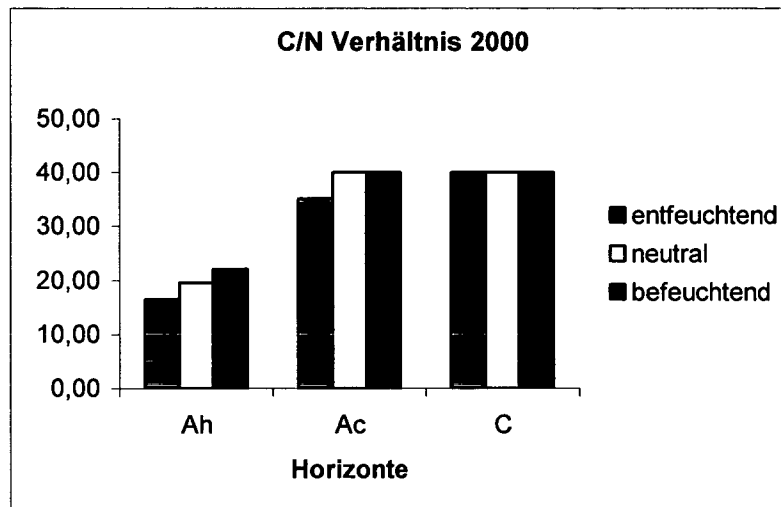


Abb. 5.35 Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff als Maß für die Aktivität von Bodenorganismen. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf den Feldversuch im Jahr 2000.

Diskussion der Ergebnisse

Zusammenfassung

Laborversuche

Die geringen Unterschiede bei dem Versuch mit Stangenbohnen im Labor aus dem Jahr 2000 deuten darauf hin, dass das entfeuchtend wirkende Aquapol Gerät auf wassergesättigte Böden keinen, oder nur einen sehr geringen Einfluss hat.

Feldversuche

Bei den **Sonnenblumen** im Jahr 2000 zeigten sich die besten Ergebnisse hinsichtlich der These, dass die Aquapol- Geräte einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum auf dem Feld haben. Nicht nur, dass deutliche Unterschiede von manchmal mehr als 30% zwischen be- und entfeuchtender Stelle auftraten, auch die neutrale Zone lag eher in der Mitte der Werte. Bei allen Untersuchungen an Sonnenblumen im Jahr 2000 wie

- Wuchshöhe, Pflanzendurchmesser, Kopfdurchmesser während der Vegetationsperiode
- Wasserpotentialmessung mit der Scholanderbombe

Biomassefraktionen der Pflanzenstichproben inklusive Verteilung der Blattgewichte; zeichneten sich Ergebnisse mit denselben Tendenzen ab. Fragen ergeben sich bei der Interpretation der Ergebnisse der Wuchshöhe von den Randzonen, welche nicht immer den erwarteten Werten entsprachen.

Bei den Untersuchungen mit **Gerste** im Jahr 2000, wo folgende Werte erhoben wurden:

- Wuchshöhe während der Vegetationsperiode
- Biomassefraktionen der Pflanzenstichproben
- Signifikanzuntersuchung der Halmlängen
- Bestockungsgrad

zeigten sich die gleichen Effekte wie bei den Sonnenblumen. An der Stelle wo das befeuchtende Aquapolgerät stand waren die Pflanzen besser entwickelt. Allerdings lag die neutrale Stelle weniger in der Mitte der Werte als bei den Sonnenblumen. Die Unterschiede zwischen be- und entfeuchtender Stelle schwankten, je nach Untersuchungskriterium, zwischen 25 und 29%, manchmal auch mehr.

Bei den **Stangenbohnen** auf dem Feld im Jahr 2000 wo

- Wasserpotentialmessungen mit der Scholanderbombe und
- Biomassefraktionen erhoben wurden

ergab sich kein erkennbarer Unterschied, welcher wohl auf die künstliche Bewässerung für diesen Versuchsaufbau zurückzuführen ist.

Beim Versuch mit **Weizen** im Jahr 2001 wobei

- Biomassefraktionen der Pflanzenstichproben und der
- Bestockungsgrad

erhoben wurde, zeigte sich aber schon ein anderes Ergebnis. Obwohl keine Aquapolgeräte installiert waren ergab sich beispielsweise an der ehemaligen befeuchtenden Stelle (III) mit dem erhöhten Pflanzenwachstum aus dem Jahr 2000 wieder ein um knapp 16% höherer Wert der Strohmasse als auf der neutralen Vergleichsfläche. Aber auch die Werte von der entfeuchtenden Stelle lagen geringfügig über jenen der neutralen Stelle. Dies lässt darauf schließen, dass die Bodenqualität an der ehemals befeuchtenden Stelle (III) doch besser ist als auf dem übrigen Feld.

Beim zweiten Kontrollversuch mit **Sonnenblumen** im Jahr 2005, wo die Aquapolgeräte umgekehrt aufgestellt waren und Untersuchungen der

Wuchshöhe am Ende der Vegetationsperiode und

Biomassefraktionen der Pflanzenstichproben

durchgeführt wurden, ergaben sich nur geringe Unterschiede von etwa 10% zwischen be- und entfeuchtender Stelle der Aquapolgeräte- Wirkfelder. Erstaunlich sind auch hier die Ergebnisse der Wuchshöhe aus den Randzonen, welche deutlich größere Werte aufzeigten.

Natürlich ist zu berücksichtigen, dass bei den **Bodenuntersuchungen** geringe Unterschiede im Substrat auftraten, auch wenn der Bodentyp Feuchtschwarzerde für das gesamte Feld zutrifft. So brachte aber letzters die Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität der Böden an be- und entfeuchtender Stelle, am Institut für Bodenforschung mit Hilfe von Herrn Ao.Univ.Prof. DI. Dr.nat.techn. Nicola Rampazzo ein Ergebnis, das die Böden hinsichtlich ihrer Wasserhaltekapazität doch wieder vergleichbar macht. Genauso interessant sind die Unterschiede in den Bodenwassergehalten aus dem Jahr 2000, welche immer mit der entsprechenden Wuchshöhe der Pflanzen korrelierten. So fanden sich erwartungsgemäß gut entwickelte Pflanzen an Standorten deren Böden feuchter waren als trockenere Vergleichsböden mit geringer gut entwickelten Pflanzen. Die Bodenwassergehalte im Jahr 2005 waren sich sehr ähnlich und es ergaben sich kaum Unterschiede zwischen be- und entfeuchtender Stelle.

Interpretation der Ergebnisse

Im Vergleich mit den Labor- und Feldversuchen an Stangenbohnen lässt sich behaupten, dass bei wassergesättigten Böden kein Einfluss des Aquapolgeräte- Wirkfeldes auf Pflanzen zu erwarten ist. Für die Anwendung der Aquapolgeräte in Gebäuden bedeutet dies, dass keine Einflussnahme auf Zimmerpflanzen zu erwarten ist, sofern diese regelmäßig gegossen werden.

Beim Vergleich des Pflanzenwachstums der Sonnenblumen aus den Jahren 2000 und 2005 über die ganze Länge des Feldes betrachtet, ergab sich am Ende der Vegetationsperiode folgendes Diagramm. Darin ist ein relativ geringer Unterschied zwischen den Jahren 2000 und 2005 an der neutralen Stelle erkennbar, wodurch sich die Ergebnisse vergleichen lassen. Ferner zeigte sich ein deutlicher Unterschied an der Stelle III, welche im Jahr 2000 befeuchtend wirkte und im Jahr 2005 entfeuchtend. Auch an der Stelle II, welche im Jahr 2000 entfeuchtend wirkte und im Jahr 2005 befeuchtend, zeigte sich der entsprechende Unterschied, aber nicht so deutlich. Wie in der Zusammenfassung schon erwähnt passen die erhöhten Werte von den Randzonen nicht so recht zu den restlichen Werten der Wuchshöhen an den Stellen II, III und V. Dabei ist aber zu bedenken, dass sich die Wuchshöhe direkt proportional mit der Bestandsdichte ändert (Diepenbrock, 1999). Ist die Bestandsdichte groß, ist auch die Wuchshöhe der Pflanzen, die um Licht in gegenseitiger Konkurrenz stehen, größer. Aufgrund von Wendemanövern mit den landwirtschaftlichen Maschinen an den jeweiligen Enden des Feldes ist es wahrscheinlich möglich, eine größere Bestandsdichte zu verursachen. Speziell bei der Aussaat, Düngeraufbringung und Schädlingsbekämpfung wäre es möglich, dass die Randzonen überlappend befahren wurden. Ferner könnten an den Randzonen andere Bodenparameter vorliegen, da ja nur die Stellen II, III und V mit den recht aufwendigen Bodenanalysemethoden untersucht wurden. Wie im Kapitel „Empfehlung für weitere Untersuchungen“ noch erwähnt wird, ist es auf monotonen Ackerflächen kaum möglich Bezugspunkte zur genauen Orientierung über Jahre hinweg zu fixieren. Somit ist es möglich, dass Pflanzenproben aus Randstellen entnommen wurden welche falsch zugeordnet waren.

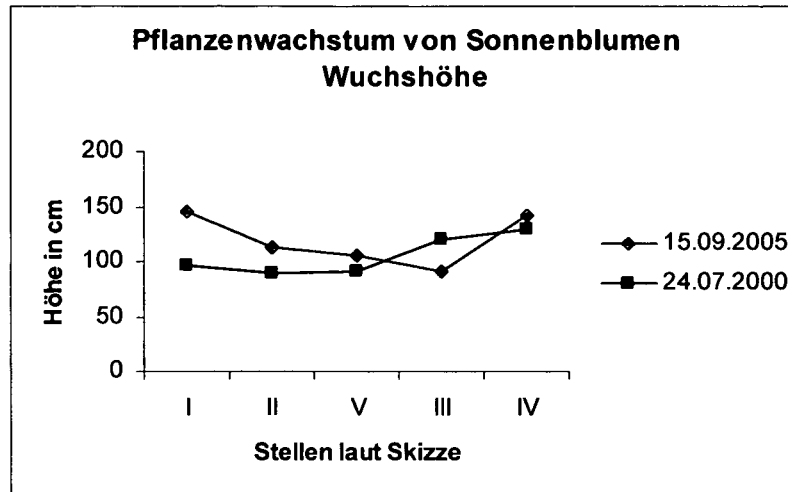


Abb. 6.1 Vergleich der Wuchshöhe der Sonnenblumen aus dem Jahr 2005 mit jenen aus 2000. I: Randzone, II: entfeuchtend im Jahr 2000, befeuchtend 2005, III: befeuchtend im Jahr 2000, entfeuchtend 2005, IV: Randzone, V: neutrale Zone.

Bei der vergleichenden Darstellung des Pflanzenwachstums der Sonnenblumen aus den Jahren 2000 und 2005 nach den entsprechenden Wirkweisen der Aquapolgeräte ergibt sich folgendes Diagramm. Dabei wurden die Daten so dargestellt, dass die Unterteilung befeuchtend, neutral und entfeuchtend zutreffend ist. Es wurde also die Kurve aus dem Jahr 2005 spiegelverkehrt gezeichnet. Die Randzonen wurden nicht weiter beschriftet, da jeweils Daten aus der Randzone I und Daten aus der Randzone IV nun an derselben Stelle liegen. Es zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg der Wuchshöhe von der entfeuchtenden Stelle über die unbeeinflusste zur befeuchtenden Stelle hin. Natürlich stechen auch hier die unerwarteten Werte aus den Randzonen ins Auge, deren mögliche Erklärungen bereits oben diskutiert wurden.

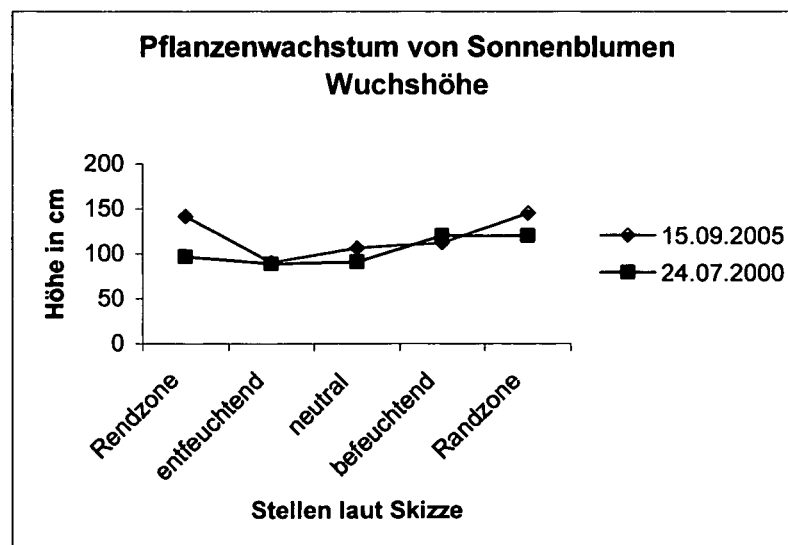


Abb. 6.2 Vergleich der Wuchshöhe der Sonnenblumen aus dem Jahr 2005 mit jenen aus 2000. Die Werte wurden so dargestellt, dass alle be- und entfeuchtenden Ergebnisse übereinander liegen und die Abszissenbeschriftung somit richtig ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungskriterien und der natürlichen Streuung der Ergebnisse ist es schwierig diese Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Daher möchte ich mich

bei den weiteren Aussagen im Bezug auf die Unterschiede von be- und entfeuchtenden Wirkungsbereich der Aquapolgeräte auf das Gesamtkorngewicht und das Tausendkorngewicht beschränken.

Der Unterschied im Gesamtkorngewicht, zurückgerechnet auf eine Pflanze, der Sonnenblumen und der Gerste im Freilandversuch 2000 in der Größe von 44% beziehungsweise 37% lässt sich wahrscheinlich bis zu einem gewissen Grad auf die Wirkung der Aquapolgeräte zurückführen. Beim Versuch mit Weizen 2001, ohne Geräte, zeigte sich ein Unterschied im Gesamtkorngewicht von 12,5%. Auch wenn nun dieses Ergebnis von jenem aus dem Jahr 2000 abgezogen wird, bleibt immer noch eine Differenz von mindestens 24% zwischen be- und entfeuchtender Stelle bestehen.

Bei den Sonnenblumen aus dem Jahr 2005 ergab sich aber trotz der Wirkung von Aquapolgeräten im Gesamtkorngewicht zwischen be- und entfeuchtender Stelle ein Unterschied von nur 13,6% zugunsten der befeuchtenden Stelle (II). Einen übersichtlichen Vergleich zwischen den einzelnen Feldfrüchten und Untersuchungsjahren zeigt folgende Tabelle.

Jahr	Feldfrucht	Korngewicht in g / Pflanze		
		entfeuchtend	neutral	befeuchtend
2000	Sonnenblumen	59	75	105
	Gerste	0,41	0,44	0,65
2001	Weizen (ohne Geräte)	0,98	0,94	1,12
2005	Sonnenblumen	102	90	118

Tab. 6.1 Vergleich von Korngewichten innerhalb der drei Versuchsjahre mit den einzelnen Probestellen entfeuchtend, neutral und befeuchtend.

Allerdings ist zu beachten, dass die Niederschläge in Dauer und Intensität während der drei Versuchsjahre sehr unterschiedlich waren und daraus der beobachtete Unterschied zwischen den Jahren 2000 und 2005 resultieren könnte. Allein die Niederschlagsmenge aus dem Jahr 2005 ist, wie folgende Tabelle zeigt, deutlich höher als jene aus 2000 (16,5%) und auch noch höher als die vom langjährigen Mittelwert. Im Gegensatz dazu ist ersichtlich, dass in den Jahren 2000 und 2001 im Vergleich zum Mittelwert wenig Regen gefallen ist und zwar um 12% und um 10% weniger. Folgende Tabelle zeigt die Hektarerträge der einzelnen Feldfrüchte in den Untersuchungsjahren. Der Hektarertrag ist das Gesamtkorngewicht bezogen auf einen Hektar, der einer Fläche von 10.000m² entspricht. Hier ergeben sich beim Getreide andere Unterschiede als zuvor beschrieben, weil hier nicht auf eine Pflanze zurückgerechnet wurde sondern auf eine Fläche, auf der unterschiedlich viele Pflanzen standen, hochgerechnet wurde.

Jahr	Niederschlags- summe	Feldfrucht	Ertrag in t/ha		
			entf.	neutral	bef.
Mittelwert	570				
2000	502	Sonnenblumen	2,27	2,88	4,03
		Gerste	2,22	2,25	4,43
2001	512	Weizen (o.G.)	7,36	6,08	9,04
2005	601	Sonnenblumen	3,92	3,46	4,54

Tab. 6.2 Vergleich von Hektarerträgen der drei Versuchsjahre mit den einzelnen Probestellen entfeuchtend, neutral und befeuchtend. Der mittlere Niederschlag wurde aus den Jahren 1982 bis 2001 errechnet. (o.G.) bedeutet, dass im Jahr 2001 ~~waren~~ keine Aquapolgeräte im Einsatz waren.

Um dies noch besser zu veranschaulichen zeigt die folgende Grafik die Monatssummen der Niederschläge aus den Versuchsjahren und die Mittelwerte der Monatssummen von 1982 bis 2001 zusammen mit deren Standardabweichung. Dabei zeigte sich im Jahr 2000 bei den Sonnenblumen, welche von Juni bis August ihren größten Wasserbedarf aufweisen, besonders im Juni ein großer Wassermangel (Eitzinger, 2007). Dieser Wassermangel konnte in den folgenden Monaten auch nicht kompensiert werden, da die Niederschlagsmengen auch hier knapp unter dem langjährigen Mittelwert liegen.

Bei der Gerste im Jahr 2000, welche in den Monaten Mai bis Juni ihren größten Wasserbedarf hat (Eitzinger, 2007), ist durch unteres Diagramm ersichtlich, dass auch hier ein großer Wassermangel gegeben war. Da auch im April nur eine geringe Niederschlagsmenge gefallen war, war der Boden zuvor auch schon recht trocken und seine Wasserspeicherkapazität erschöpft. Die große Niederschlagsmenge im März wirkt sich durch die Versickerung in tiefere Bodenschichten sicher nicht mehr im Mai aus.

Beim Weizen im Jahr 2001, welcher etwas später als die Gerste, aber immer noch in den Monaten Mai bis Juni seinen größten Wasserbedarf zeigt (Eitzinger, 2007), lässt sich beim Anblick des Diagramms folgendes feststellen: Die Niederschlagsmenge in den Monaten April und Mai ist sehr gering, erst im Juni ergibt sich eine geringfügige Besserung der natürlichen Wasserversorgung. Aber auch im Juni liegt die Niederschlagsmenge unterhalb der Standardabweichung vom langjährigen Mittelwert. Die verhältnismäßig große Niederschlagsmenge im Juli kommt zu spät und hat auf den Weizen nur noch einen geringen Einfluss.

Ganz anders war es bei den Sonnenblumen 2005. Hier lag zwar für den Juni wenig Niederschlag vor, aber es ist anzunehmen, dass durch die ergiebigen Niederschläge im Mai der Boden feuchter war als in den Jahren davor. Im Juli war ebenfalls eine durchschnittliche Wasserversorgung gegeben und im August kam es zu einer gewaltigen Niederschlagsmenge. Erst im Oktober, nach der Ernte der Sonnenblumen fiel wieder vergleichsweise wenig Regen.

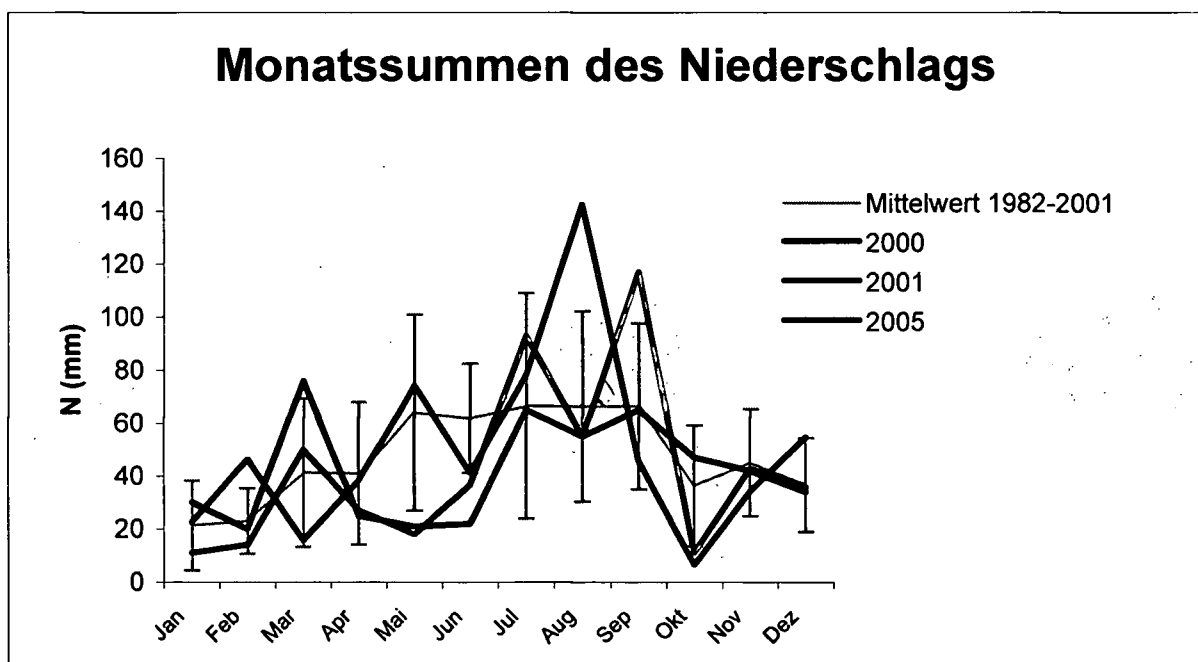


Abb. 6.3 Vergleich der Niederschläge aus den Versuchsjahren mit dem langjährigen Mittelwert und dessen Standardabweichung (Wimmer, 2007).

Daraus lässt sich erklären, dass im Jahr 2005 für die Sonnenblumen ausreichend Wasser aus den Niederschlägen vorhanden war und sich deshalb, so wie bei den Stangenbohnen, kein Effekt der

Aquapolgeräte einstellen konnte. Doch dadurch stellt sich die Frage nach der Differenz des Korngewichts im Jahr 2005 an der befeuchtenden Stelle (II) in der Größe von 13,6%. Dazu ist zu bemerken, dass die Ergebnisse der Sonnenblumen im Bezug auf Massen aus dem Jahr 2005 eine beachtliche Streuung aufwiesen. Die Standardabweichungen beim Gesamtkopfgewicht streuten von 26 bis 38% um den Mittelwert. Somit gehen die Unterschiede bei den Sonnenblumen aus dem Jahr 2005 im statistischen Rauschen unter.

Das Tausendkorngewicht der Sonnenblumen streute im Jahr 2000 nur zwischen 2,7 und 8% vom Mittelwert. Somit ergab sich im Jahr 2000 beim Tausendkorngewicht der Sonnenblumen ein signifikanter Unterschied zwischen be- und entfeuchtender Stelle in der Größe von 31,6%. Bei der Gerste 2000 ergab sich beim Tausendkorngewicht, bei unbekannter Streuung nur ein Unterschied von knapp 14% zugunsten der Stelle III (befeuchtend). Allerdings zeigte sich hier noch ein deutlicher Unterschied in der Menge an tauben Ähren. An der befeuchtenden Stelle war das Aufkommen von tauben Ähren fünfmal geringer als an der entfeuchtenden Stelle. Beim Weizen 2001 lag der Unterschied im Tausendkorngewicht, ebenfalls bei unbekannter Streuung bei geringen 10,4% zugunsten der Stelle III. Beim Weizen war kein deutlicher Unterschied der tauben Ähren zwischen den entsprechenden Stellen be- und entfeuchtend zu beobachten. Wenig überraschend ist das Ergebnis der Sonnenblumen von 2005 mit einem Unterschied von nur 3,2%, allerdings zugunsten der diesmal entfeuchtenden Stelle (III).

Jahr	Niederschlags- summe	Feldfrucht	Tausendkorngewicht in g		
			entf.	neutral	bef.
Mittelwert	570				
2000	502	Sonnenblumen	52	60	76
		Gerste	37	41	43
2001	512	Weizen (o.G.)	43	41	48
2005	601	Sonnenblumen	63	69	61

Tab. 6.3 Vergleich von Tausendkorngewicht der drei Versuchsjahre mit den einzelnen Probestellen entfeuchtend, neutral und befeuchtend. (o.G.) bedeutet, dass im Jahr 2001 ~~waren~~ keine Aquapolgeräte im Einsatz waren.

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich von Ergebniswerten welche in dieser Arbeit gewonnen wurden mit Werten wie sie allgemein aus der Literatur bekannt sind. Die Untersuchungsergebnisse liegen meistens innerhalb der je nach Feldfrucht zu erwartenden Werte (Diepenbrock, 1999 und 2005). Auffallend in der Literatur sind die großen sortenbedingten Schwankungen und die Korrektur der Ertragsdaten nach oben hin, aufgrund der Verbesserungen in der Landwirtschaft. Ferner interessant sind die höheren Werte bei den Keimpflanzen/m² und Ähren/m² bei dieser Arbeit. Beim Ziehen der Stichprobe auf dem Feld wurden jene Pflanzen entnommen, deren Steile innerhalb des Rahmens waren. Natürlich ragten Halme und Ähren manchmal über diesen Rahmen hinaus und wurden dennoch mitgenommen. Darin resultiert der Unterschied zwischen den Daten aus der Literatur und jenen aus dieser Arbeit. Dieser Fehler verringert sich mit der Größe der Entnahmestelle.

Feldfrucht	Kriterium	Werte dieser Arbeit	Werte aus der Literatur
Stangenbohnen	Tausendkorngewicht in g	250 bis 320	200 bis 300
Sonnenblumen	Ertrag in t/ha	2,3 bis 4,5	etwa 3
	Tausendkorngewicht in g	52 bis 76	72 bis 106
Gerste	Ertrag in t/ha	2,2 bis 4,4	etwa 5,1
	Tausendkorngewicht in g	37 bis 43	etwa 45
	Keimpflanzen/m ²	260 bis 290	etwa 272
	Ähren/m ²	514 bis 681	etwa 578
Weizen	Ertrag in t/ha	7,4 bis 9,0	etwa 8,3
	Tausendkorngewicht in g	43 bis 48	40 bis 50
	Keimpflanzen/m ²	520 bis 584	200 bis 500
	Ähren/m ²	652 bis 796	350 bis 700

Tab. 6.4 Vergleich der Ergebniswerte dieser Arbeit mit Werten aus der Literatur (Diepenbrock, 1999 und 2005).

Fazit

Beim Vergleich von Gesamtkorngewicht, Ertrag und Tausendkorngewicht über alle Versuchsjahre hinweg ergeben sich dieselben Tendenzen. Die gewonnenen Werte stimmen in ihrer Größenordnung mit jenen aus der Literatur überein woraus die Arbeit als in sich geschlossen betrachtet werden kann. Im Jahr 2000 zeigte sich auf dem Feld bei allen Parametern ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Beobachtungsstellen, welcher wahrscheinlich auch auf die Wirkung von Aquapolgeräten zurückzuführen ist. Beim Versuch ohne Geräte im Jahr 2001 zeigten sich geringe Differenzen der Werte, welche auf die natürliche Heterogenität der Freilandversuchsfläche hinwiesen. Auch im Jahr 2005 zeigten sich nur geringe Unterschiede obwohl Aquapolgeräte im Einsatz waren. Allerdings war in diesem Jahr die Niederschlagsmenge bedeutend größer als in den Jahren zuvor und Bodenproben bescheinigten eine gute Wasserversorgung der Pflanzen. Wenn es nun eine Wirkung von Aquapolgeräten gibt, zeigt sich diese nur an eher trockenen Standorten. Sobald genügend Wasser im Boden vorhanden ist, was sich auch bei den Versuchen mit Stangenbohnen zeigte, ergibt sich kein erkennbarer Unterschied. Da im Zuge dieser Arbeit nur in einem Jahr Indizien für die Wirkung von Aquapolgeräten gefunden werden konnten ist es notwendig zur endgültigen Klärung dieser Frage weitere Versuche durchzuführen.

Empfehlung für weitere Untersuchungen

Allen voran erscheint es sinnvoll Versuche mit wasserstressanfälligen Pflanzen unter Wasserstress durchzuführen. Dazu bieten sich Versuche in semiariden bis ariden Gebieten an.

Die Versuchsdauer über eine Vegetationsperiode erscheint in Anbetracht dessen, dass die Trockenlegung bei einem Gebäude über Jahre erfolgt, zu kurz. Erst recht dann, wenn auch der Wassergehalt der Böden durch die Aquapolgeräte verändert werden soll. Im Fall von Gebäudetrockenlegungen hat die Firma Aquapol genügend Erfahrung. Interessant wäre es versuchshalber einmal die Zielsetzung dabei umzukehren: Ein Gebäude mit einem befeuchtenden Gerät auszustatten und zu beobachten wie sich der Wassergehalt in den Mauern ändert.

Feldversuche

Der Einfluss auf die Keimfähigkeit der Pflanzen auf dem Feld wurde noch nicht untersucht, da beim Versuch mit den Sonnenblumen diese bereits 2cm über die Erde ragten. Im Labor ergaben sich bei Keimversuchen keine Unterschiede, wobei zu bedenken ist, dass hier bei wassergesättigten Bedingungen gearbeitet wurde.

Die signifikanten Unterschiede beim Pflanzenwachstum zeigten sich bei den Sonnenblumen erst ab dem 22.Mai, somit wäre zu überlegen die Messreihen am Getreide wie z.B. Wuchshöhe in Zukunft fortsetzen, auch wenn es anfänglich keine Unterschiede zwischen den Pflanzen zu erkennen sind. Parallel dazu ist aber eine Kontrolle der Bestandsdichte erforderlich, da sie großen Einfluss auf die Wuchshöhe haben kann.

Die Pflanze ist als Indikator für die Bodenverhältnisse zu sehen. Allein der Vergleich zwischen dem geordneten Kapillarsystem der Pflanzen, welches möglichst verlustfrei arbeiten möchte, und dem ungeordneten Kapillarsystem im Boden, ist es nahe liegend, die im Versuch gemessenen Unterschiede der Wirkung des Aquapol Gerätes im Boden zuzuschreiben. Bei Freilandversuchen liegt es in Zukunft nahe, sich weniger an den Pflanzen, sondern vielmehr nach den Substraten und deren Wassergehalt zu orientieren. Natürlich hat auch die Pflanzendecke einen Einfluss auf den Wasser- und Nährstoffgehalt des Bodens, was zu berücksichtigen wäre. Eine einfache Möglichkeit die Bodenfeuchte zu messen bietet der Einsatz von TDR- Sonden.

Weiterführend ist eine Untersuchung der Saugspannungs- Wassergehaltskurven von Mauern um sie mit jenen des Bodens vergleichen zu können.

Zur Gewinnung einer aussagekräftigen kleinen Bodenstichprobe, als Teil einer größeren Substratentnahmemenge, ist ein begehbarer Aufschluss von Vorteil. Die Menge des Bodens zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes sollte 4cm^3 nicht überschreiten, damit das Abkühlen im Exikator schneller vorangeht und mehr Proben gleichzeitig bearbeitet werden können.

Die Durchführung von mehrjährigen Versuchen lassen physiologische Unterschiede in den Hintergrund treten. Dabei sind die Niederschlagsmengen, Temperaturdifferenzen und andere Umweltparameter mitzuprotokollieren. Langzeitversuche könnten eventuell an Obstkulturen, Weingärten und in der Forstwirtschaft durchgeführt werden.

Bei mehrjährigen Versuchen, speziell im Freiland, ist es sinnvoll Probeentnahmestellen mittels GPS genau zu vermessen und so zu fixieren. Es kann sonst nicht gewährleistet werden genau dieselben Stellen später nochmals zu finden. Auf großflächigen, monotonen Ackerflächen ist es

auch kaum möglich irgendwelche bleibenden Markierungen anzubringen oder Sperrmaße zu erheben und zu protokollieren.

Bei kleineren Versuchsflächen, welche in größeren eingebunden sind, ist eine entsprechende Umzäunung mit einer Höhe von etwa 1,5m gegen Wildschäden notwendig. Das Wild orientiert sich immer zuerst nach dem, was in geringerer Menge verfügbar ist. Somit werden die kleinen Versuchsflächen zuerst besucht und kommen dadurch zu Schaden.

Laborversuche

Die Messung der Wasserbilanz einer Pflanze an ihrem natürlichen Standort ist nicht möglich weil die Wasseraufnahme einer im Boden wurzelnden Pflanze keinem Messverfahren zugänglich ist. Es ist aber möglich, die Wasseraufnahme einer Pflanze über eine einfache Versuchsanordnung, dem Potometer zu messen. Dazu werden die Wurzeln einer Pflanze in eine wässrige Lösung gesenkt und der Übergang zwischen Gefäß und Pflanzenstiel luftdicht verschlossen. Über das Zulaufventil kann Wasser in das System nachgefüllt werden. Durch die Verschiebung vom Meniskus im Gasrohr kann die Wasseraufnahme abgelesen werden. Wird die ganze Versuchsanordnung noch auf eine Waage gestellt, ist auch die Messung der Wasserabgabe, die Transpiration der Pflanze, möglich. Mit diesen Werten lässt sich die Wasserbilanz errechnen. Untere Darstellung zeigt den Versuchsaufbau ohne Waage (Munk, 2001).

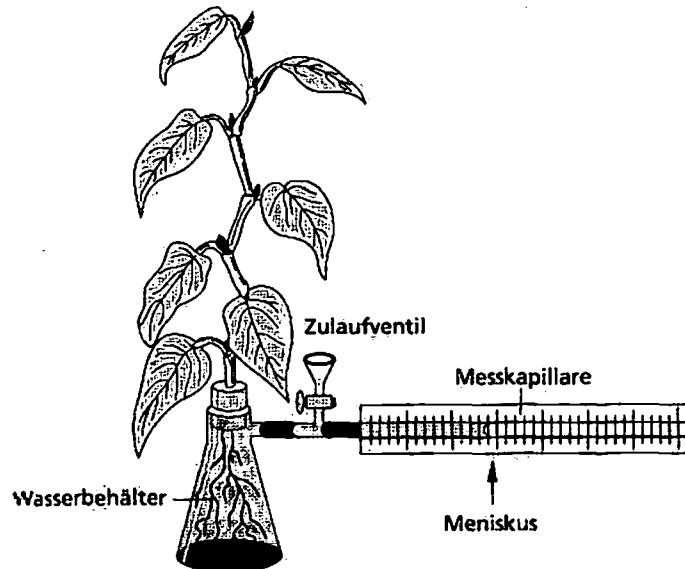


Abb. 7.1 Versuchsaufbau eines Potometers zur Bestimmung der Wasseraufnahme durch eine Pflanze (Munk, 2001).

Mit dem Thermoelementpsychrometer lässt sich genau so wie mit der Scholanderbombe das Wasserpotential der Pflanze messen. Die Vorteile dieser Methode liegen in der zerstörungsfreien Messung und der Beobachtbarkeit über einen längeren Zeitraum. Die Nachteile liegen in der Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen und der Eichung der einzelnen Sensoren. Sinnvoll wäre es, die zu untersuchenden Pflanzen in einer Truhe unterzubringen. Bei konstant halten von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Beleuchtung, sowie unter Beobachtung der Pflanze

über einen längeren Zeitraum, ist es vielleicht möglich auf diese Weise eine Potentialänderung durch den Einfluss eines Aquapol Gerätes zu beobachten. Weiter wäre es empfehlenswert, mehrere Sensoren gleichzeitig zu verwenden und diese auch an einen Datalogger anzuschließen. Automatisierte Messungen in diesem Bereich sind heute bereits Stand der Technik. Somit könnten Fehler, wie etwa die Undichtigkeit zwischen Blatt und Messkammer, schneller entdeckt werden. Für Versuche dieser Art ist eingeschultes Personal mit einiger Erfahrung dringend zu empfehlen.

Die Geschwindigkeit des Transpirationsstroms im Xylem ändert sich sehr schnell bei einer Veränderungen der äußeren Bedingungen. Sie variiert auch zwischen verschiedenen Stellen der Pflanze (Blätter, Stamm, Wurzel). Auch innerhalb des Tagesgangs gibt es Unterschiede in der Strömungsgeschwindigkeit. Solange die Wasseraufnahme nicht behindert ist, nimmt die Geschwindigkeit des Xylemstroms mit der Transpirationsintensität zu (Lüttge, 2002). Im Labor lassen sich Umweltvariable konstant halten oder messen. Das Aquapol- Gerät lässt sich durch entfernen von der Geschoßdecke leicht „ein oder ausschalten“.

Abbildungsverzeichnis

- 1= Einleitung
- 2= Laborversuche
- 3= Feldversuche
- 4= Ergebnisse der Laborversuche
- 5= Ergebnisse der Feldversuche
- 6= Diskussion der Ergebnisse
- 7= Empfehlung für weitere Untersuchungen

Abb. 1.1 Modellhafte Darstellung der Arbeit des Aquapolgerätes bei der Mauertrockenlegung. Die konzentrisch strichlierten Linien um das grün hervorgehobene Aquapolgerät stellen einen Teil des entfeuchtenden Wirkbereichs dar (Baufachmappe, 2001).

Abb. 1.2 Modellhafte Darstellung der Arbeit des Aquapolgerätes bei der Trockenerhaltung von Mauerwerk. Das erneute Aufsteigen von Wasser wird verhindert, jetzt kann der Putz dauerhaft saniert werden (Baufachmappe, 2001).

Abb. 1.3 Sinnbildliche Darstellung einer gravomagnetischen Welle. Die breite strichlierte Kurve stellt die magnetische Wellenkomponente dar um welche die gravitatorische Wellenkomponente zirkular rotiert (Mohorn, 1996).

Abb. 1.4 Auszug der Bauformen des Aquapolgerätes. Sendeeinheit Fig. 3 und Empfangsteil Fig. 4 bilden das Kernstück des Gerätes. Fig. 5 zeigt zwei jeweils zu Hälfte dargestellte handelsübliche Beispiele für das Trockenlegungsgerät (Europäische Patentschrift, 1996).

Abb. 1.5 Darstellung der Wirkbereiche des Aquapolgerätes. Die nach unten gerichteten Pfeile stellen im Bereich 2 das entfeuchtende Wirkungsfeld, im Bereich 1 von oben einfließende Energie in das Gerät dar. Die strichlierten, nach oben zeigenden Pfeile beschreiben den befeuchtenden Ansaugbereich des Gerätes (Baufachmappe, 2001).

Abb. 1.6 Schematische Darstellung einer Pflanzenzelle im Querschnitt mit ihren kompartimentierten Organen, der Zellwand und Teile der Zellwände der Nachbarnzellen (Lüttge, 2002)

Abb. 1.7 Veranschaulichung der Wasserpotentiale und Wasserleitungswiderstände vom Boden über die Pflanze in die Atmosphäre, links schematisch und rechts durch ein elektrotechnisches Schaltbild dargestellt (Larcher, 1994).

Abb. 1.8 Saugspannungs- Wassergehaltskurven der Bodenarten Sand und Lehm und die unterschiedliche Fähigkeit von Pflanzen, dem Boden Wasser zu entziehen. PWP = Permanenter Welkepunkt FK = Feldkapazität (Larcher, 1994).

Abb. 1.9 Links Längenschnitt und rechts Querschnitt durch eine Pflanzenwurzel in verschiedenen Maßstäben dargestellt. Durch den Casparyschen Streifen kann Wasser nur symplastisch in die Wasserleitorgane der Pflanze gelangen (Nobel, 1999).

Abb. 1.10 Axialtransport von Wasser im Xylem und Assimilaten im Phloem im auszugsweise dargestellten Zentralzylinder von Pflanzen (Nobel, 1999).

Abb. 1.11 Blattquerschnitt stark vergrößert. Wasserabgabe der Pflanze vom Xylem bis zu den Spaltöffnungen. Ausgezogene grüne Linien zeigen das Wasser in flüssiger, gestrichelte Linien in gasförmiger Phase (Schopfer, 1999).

Abb. 2.1 Vereinfachte Darstellung eines Psychrometers zum Messung des Wasserpotentials in Pflanzen. Über die Luftfeuchtigkeit in der Probenkammer kann auf das Wasserpotential des pflanzlichen Gewebestücks rückgerechnet werden. (Taiz, 1998).

Abb. 2.1.1 Links: Foto vom Mikrovoltmeter HR-33-T Rechts: Abbildung des Blattkammer-taupunkthygrometers L-51 mit eingespanntem Blatt (Wescor, 1998).

Abb. 2.2 Schematische Darstellung des Pflanzenwachstumsversuchs im Labor. Die Bohnenkeimlinge wurden unter den befeuchtenden Ansaugbereich und den entfeuchtenden Wirkbereich des Aquapolgerätes gestellt, beleuchtet und gegossen.

Abb. 3.1 Skizze vom Versuchsaufbau im Freiland. Es wurde ein konventionelles, entfeuchtendes Aquapolgerät mit rot dargestellten Wirkbereich und ein befeuchtendes mit blau dargestellten Wirkbereich verwendet.

Abb. 3.2 Lage des Feldes mit Darstellung der Bodenarten. Es handelte sich dabei ausnahmslos um kalkhaltige Feuchtschwarzerden. Das befeuchtende Gerät war im blau dargestellten Bereich mit der Bodenart Nr.:26 errichtet. Das entfeuchtende im Bereich mit der Bodenart Nr.:18.

Abb. 3.2.1 Diagramm der Höhenunterschiede vom Feld im Freilandversuch. Die Höhenkoten wurden zur besseren Leserlichkeit stark überhöht dargestellt.

Abb. 3.2.2 Drainagenplan vom Versuchsfeld das rot markiert ist. Am linken Feldrand befindet sich die Randzone IV, die neutrale Stelle ist in der Mitte und am rechten Rand befindet sich die Randzone I. Etwa 200m vom rechten Feldende entfernt fließt die Leitha.

Abb. 3.3 Foto vom Versuchsaufbau im Freiland 2000. Entfeuchtendes Aquapolgerät mit wetterfestem Gehäuse und Standfuß. Am linken Rand des Bildes ist das Spalier vom Versuchsaufbau mit den Stangenbohnen zu erkennen.

Abb. 3.3.1 Zeichnung des Wurzelsystems der Sonnenblume mit den typischen Tauwurzeln. Bodenprofil: A: 0-30cm schwach humoser, feinsandiger Lehm, C: feinsandiger Lehm, schwach verbraunt (Kutschera, 1960).

Abb. 3.3.2 Zeichnung des Büschelwurzelsystems der zweizeiligen Gerste Bodenprofil: A1: 0-20cm stark humoser, sandiger Lehm A2: 20-80cm stark humoser, kiesiger, sandiger Lehm G: kiesiger, sandiger Lehm, zementgrau (Kutschera, 1960).

Abb. 3.3.3 Foto vom Versuchsaufbau im Freiland 2000. Stangenbohnen der Sorte Kwintus in eigenen Tontopf mit homogenisierter Erde, frisch bewässert, Fraßschutz gegen Nagetiere und Stangenspalier für die Bohnenranken.

Abb. 3.4 Skizze über den Aufbau der Scholanderbombe zur Messung des Wasserpotentials von Pflanzen. Die Pflanzenprobe wird in die dichte Kammer eingebaut und mit Luftdruck beschickt bis der Pflanzensaft an der Schnittstelle wieder sichtbar wird.

Abb. 3.5 Foto von Gerste im Freiland 2000. Zur Stichprobenentnahme wurde ein Rahmen mit einer Innenfläche von 1m² in das Feld gelegt und alle darin befindlichen Pflanzen für die späteren Untersuchungen entfernt.

Abb. 3.5.1 Zeichnung des Büschelwurzelsystems von Gewöhnlichen Weizen. Bodenprofil: A: 0-110cm humoser Lehm A/G: 110-120cm humoser Lehm, rostfleckig G1: 120-150cm Lehm ,stark rostfleckig G2: feinsandiger Lehm, schwach rostfleckig (Kutschera, 1960).

Abb. 3.5.2 Schema der PR1-Sonde mit 6 Messtiefen in 10, 20, 30, 40, 60 und 100cm Tiefe.

Abb. 3.6 Saugspannungskurven verschiedener Bodenarten. Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserpotential im Boden bei fortschreitenden Wasserentzug (Franz, 1960).

Abb. 3.7 Apparatur zur Bestimmung des Karbonatgehalts einer Bodenprobe nach Scheibler. Aufgenommen am Institut für Bodenforschung auf der Universität für Bodenkultur, Wien.

Abb. 3.8 Detailaufnahme der Apparatur zur Bestimmung des Karbonatgehalts einer Bodenprobe nach Scheibler. Aufgenommen am Institut für Bodenforschung auf der Universität für Bodenkultur, Wien.

Abb. 4.1 Psychrometrische Versuchsergebnisse im Jahr 2000. Vorversuche an Zimmerpflanzen wie Ficus und anderen. Abszisse: Messwerte in Mikrovolt. Ordinate: Fortschreitende Zeit in Minuten. Stelle 5 steht für den fünften Versuch an den verschiedenen Blättern einer Pflanze.

Abb. 4.2 Versuchsaufbau der Stangenbohnen im Labor im Jahr 2000. Das linke Bild zeigt den befeuchtenden Ansaugbereich, das rechte Bild stellt den entfeuchtenden Wirkbereich des konventionellen Aquapolgerätes dar.

Abb. 4.3 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Stangenbohnen im Labor. Gesamtbiomasse aufgeteilt in entfeuchtenden und befeuchtenden Wirkbereich des Aquapolgerätes und in geerdete und nicht geerdete Pflanzen.

Abb. 5.1 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung der steigenden Pflanzenwuchshöhe mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Abb. 5.2 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Vergleich der befeuchtend wirkenden Stelle mit der entfeuchtenden durch subtrahieren der Messwerte und Angabe der Differenz in Prozent. Zusätzliche Darstellung des Ergebnisses mit einer Trendlinie.

Abb. 5.3 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung des steigenden Pflanzendurchmessers an gegenüberliegenden Blattenden mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten.

Abb. 5.4 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung des steigenden Kopfdurchmessers der Pflanzen mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten.

Abb. 5.5 Versuchsergebnis im Jahr 2000 der Gerste auf dem Feld. Darstellung der steigenden Pflanzenwuchshöhe mit fortschreitender Zeit unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Abb. 5.6 Versuchsergebnis im Jahr 2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Gegenüberstellung des Wasserpotentials von Sonnenblumen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.7 Versuchsergebnis vom 13.08.2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Messung vom Tagesverlauf des Wasserpotentials von Sonnenblumen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.8 Versuchsergebnis vom 19.08.2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Messung vom Tagesverlauf des Wasserpotentials von Sonnenblumen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.9 Versuchsergebnis vom 14.08.2000 mit der Scholanderbombe auf dem Feld. Messung vom Tagesverlauf des Wasserpotentials von Stangenbohnen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.10 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe aus jeweils 5m² von Sonnenblumen aus dem Jahr 2000, zurückgerechnet auf eine Pflanze. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.11 Versuchsergebnis der unterschiedlichen Masseverteilung von Blättern der Sonnenblume aus dem Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.12 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe im Umfang von 1m² der Gerste aus dem Jahr 2000. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.13 Auswertung der Pflanzenanzahl und Anzahl von Halmen und Ähren bei Gerste im Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.14 Gegenüberstellung des Bestockungsgrades von jeweils 1m² Gerste im Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.15 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe von der Gerste aus dem Jahr 2000. Gegenüberstellung der auf eine Pflanze zurückgerechneten Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.16 Versuchsergebnis der bewässerten Stangenbohnen auf dem Feld aus dem Jahr 2000. Gegenüberstellung der Früchte unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.17 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe im Umfang von 0,25m² vom Weizen aus dem Jahr 2001. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen ohne Einfluss von Aquapolgeräten.

Abb. 5.18 Auswertung der Pflanzenanzahl und Anzahl von Halmen und Ähren bei Weizen im Jahr 2001 ohne Einfluss von Aquapolgeräten.

Abb. 5.19 Gegenüberstellung des Bestockungsgrades von jeweils 1m² Weizen im Jahr 2001 ohne Einfluss von Aquapolgeräten.

Abb. 5.20 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe von Weizen aus dem Jahr 2001. Gegenüberstellung der auf eine Pflanze zurückgerechneten Biomassefraktionen ohne Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.21 Versuchsergebnis im Jahr 2005 der Sonnenblumen auf dem Feld. Darstellung der Pflanzenwuchshöhe aus zwei Begehungen unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Abb. 5.22 Versuchsergebnis im Jahr 2005 der Sonnenblumen auf dem Feld. Sortierte Darstellung der einzelnen Kopfgewichte unter dem Einfluss von Aquapolgeräten mit be- und entfeuchtender Wirkung.

Abb. 5.23 Versuchsergebnis der Pflanzenstichprobe im Umfang von jeweils 30 Stück von Sonnenblumen aus dem Jahr 2005, zurückgerechnet auf eine Pflanze. Gegenüberstellung der Biomassefraktionen unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.24 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Lufttrockenheit auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten bis in eine Tiefe von 50cm.

Abb. 5.25 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Trocknung im Ofen bei 105°C auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten bis in eine Tiefe von 50cm.

Abb. 5.26 Gegenüberstellung der Bodenwassergehalte lufttrocken und nach Trocknung bei 105°C von Bodenproben bis in eine Tiefe von 50cm vom Feld aus dem Jahr 2000 unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.27 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Lufttrocknung auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben bis in eine Tiefe von 100cm unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.28 Unterschiedliche Bodenwassergehalte bei Trocknung im Ofen bei 105°C auf dem Feld im Jahr 2000. Gegenüberstellung des Wassergehalts in % von Bodenproben bis in eine Tiefe von 100cm unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.29 Gegenüberstellung der Bodenwassergehalte lufttrocken und nach Trocknung bei 105°C von Bodenproben bis in eine Tiefe von 100cm vom Feld aus dem Jahr 2000 unter dem Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Abb. 5.29.1 Bodenwassergehalte 2005, erhoben mit Profilsonden. Befeuchtende Stellen türkis unterlegt, entfeuchtende orange. Jeweils vier Messungen pro Tag über sechs Tage im Zeitraum von April bis September 2005.

Abb. 5.29.2 Mittelwert der Bodenwassergehalte über einen Zeitraum von April bis September 2005 bis in eine Tiefe von 100cm. Auf der Ordinate die Bodenwassergehalte in Volumprozent, Abszisse als Zeitachse.

Abb. 5.30 Kornfraktionen aus dem Jahr 2000 der einzelnen Bodenhorizonte an den Stellen be- und entfeuchtend u. neutral.

Abb. 5.31 Texturdreieck zur Bestimmung der Bodenarten vom Feld aus dem Jahr 2000. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

Abb. 5.32 Karbonatgehalt nach Scheibler von den Bodenarten vom Feld. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

Abb. 5.33 Gesamtstickstoffgehalt N_t der Bodenarten vom Feld. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

Abb. 5.34 Gesamtkohlenstoffgehalt C_t der Bodenarten vom Feld. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf das Jahr 2000.

Abb. 5.35 Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff als Maß für die Aktivität von Bodenorganismen. Die Bezeichnungen der Bodenproben entfeuchtend, neutral und befeuchtend beziehen sich auf den Feldversuch im Jahr 2000.

Abb. 6.1 Vergleich der Wuchshöhe der Sonnenblumen aus dem Jahr 2005 mit jenen aus 2000.

I: Randzone, II: entfeuchtend im Jahr 2000, befeuchtend 2005, III: befeuchtend im Jahr 2000, entfeuchtend 2005, IV: Randzone, V: neutrale Zone.

Abb. 6.2 Vergleich der Wuchshöhe der Sonnenblumen aus dem Jahr 2005 mit jenen aus 2000. Die Werte wurden so dargestellt, dass alle be- und entfeuchtenden Ergebnisse übereinander liegen und die Abszissenbeschriftung somit richtig ist.

Abb. 7.1 Versuchsaufbau eines Potometers zur Bestimmung der Wasseraufnahme durch eine Pflanze.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1 Beispiele für die Geschwindigkeit des Transpirationsstromes bei einigen Pflanzentypen (Lüttge, 2002).

Tab. 1.2 Beispiele für die relative Leitfläche von einigen Pflanzentypen (Larcher, 1994).

Tab. 3.1 Biomasse der lebenden Bodenorganismen und unterirdischen Pflanzenorganen. Durchschnittliche Werte in g pro m² und 20 cm Bodentiefe sowie in Prozent der Totalmasse (Gisi, 1997).

Tab. 3.2 Wurzelsaugspannungen bei verschiedenen Arten von Kulturpflanzen. Werte in Mpa (Franz, 1960).

Tab. 3.3 Hygroskopizität nach Mitscherlich bei verschiedenen Bodenarten. Werte in g Wasser / 100g Boden (Franz, 1960).

Tab. 3.4 Beziehung der Werte von cm Wassersäule und pF über den Briggschen Logarithmus, sowie Darstellung der zugehörigen Drücke und Kapillarendurchmesser (Franz, 1960).

Tab. 3.5 Sedimentationszeit der Suspension zur Bestimmung der Kornfraktionen Schluff und Ton nach dem Pipettenverfahren von Köhn (Blum, 1989).

Tab. 4.1 Versuchsergebnis der Stangenbohnen im Labor Gesamtbiomasse im Überblick.

Tab. 4.2 Versuchsergebnis der Stangenbohnen im Labor Gesamtbiomasse aufgeteilt in geerdete und nicht geerdete Pflanzen im Überblick.

Tab. 5.1 Auswertung auf Signifikanz der Halmlänge bei Gerste im Jahr 2000 unter Einfluss von be- und entfeuchtenden Aquapolgeräten.

Tab. 6.1 Vergleich von Korngewichten innerhalb der drei Versuchsjahre mit den einzelnen Probestellen entfeuchtend, neutral und befeuchtend.

Tab. 6.2 Vergleich von Hektarerträgen der drei Versuchsjahre mit den einzelnen Probestellen entfeuchtend, neutral und befeuchtend. Der mittlere Niederschlag wurde aus den Jahren 1982 bis 2001 errechnet. (o.G.) bedeutet, dass im Jahr 2001 keine Aquapolgeräte im Einsatz waren.

Tab. 6.3 Vergleich von Tausendkorngewicht der drei Versuchsjahre mit den einzelnen Probestellen entfeuchtend, neutral und befeuchtend. (o.G.) bedeutet, dass im Jahr 2001 keine Aquapolgeräte im Einsatz waren.

Tab. 6.4 Vergleich der Ergebniswerte dieser Arbeit mit Werten aus der Literatur (Diepenbrock, 1999 und 2005).

Literaturverzeichnis

Aquapol (2006)

Homepage der Firma Aquapol: www.aquapol.at

Baufachmappe (2001)

Aquapol Mauertrockenlegung, Baufachmappe. CD- ROM. ADI Grafik und Design

Blum W. (1992)

Bodenkunde in Stichworten. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin-Stuttgart

Blum W., Spiegel H., Wenzel W. (1989)

Bodenzustandsinventur. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft

Bodenkarte (1986)

Bodenkarte des Kartierungsbereichs Bruck a. d. Leitha. Bundesanstalt für Bodenwirtschaft, Wien

Delta-T Devices Ltd (2001)

Handbuch „Profile Probe Type PR1“, Version 1.2, Delta-T Devices Ltd, vertreten bei UP Umweltanalytische Produkte GmbH, Cottbus, Deutschland

Diepenbrock W., Fischbeck G., Heyland K. (1999)

Spezieller Pflanzenbau. Ulmer Verlag, Stuttgart

Diepenbrock W., Ellmer F., Léon J. (2005)

Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Ulmer Verlag Stuttgart

Ehlers W. (1996)

Wasser in Boden und Pflanze. Ulmer Verlag, Stuttgart

Eitzinger J. (2007)

Persönliche Mitteilung im Zuge der Diplomarbeit

Europäische Patentschrift (1996):

EP 0 688 383 B1, Gerät zum Transport von Feuchte oder Salzen. Europäisches Patentamt, München

Fiedler H. J. (2001)

Böden und Bodenfunktionen. Expert Verlag, Renningen

Franz H. (1960)

Feldbodenkunde. Georg Fromme & CO Verlag, Wien

Gisi U. (1997)

Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart

Hartge K. H., Horn R. (1992)

- Die physikalische Untersuchung von Böden. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Hartge K. H., Horn R. (1999)
Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Herppich W., D. J. von Willert, Rainer Matyssek (1995)
Experimentelle Pflanzenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Hopkins W. G., Hüner N. P. A. (2004)
Plant Physiology. John Wiley & Sons, Inc. United States of America
- IT Wissen (2006)
Homepage: www.itwissen.info/definition/lexikon
- Kalra Y., P. (1998)
Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press, New York
- Kraner R. (2006)
Leben in der Unterwelt – Bodenworkshop. „die Umweltberatung“, Umweltschutzverein
Bürger und Umwelt, Druckerei Gugler, Melk
- Kutschera L. (1960)
Wurzelatlas DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main
- Larcher W. (1994)
Ökophysiologie der Pflanzen. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Lotz K.E. (2003)
Zum Aquapol – System mit Potentialausgleich.
Skriptum: „Zu Vorträgen, gehalten an der Fachhochschule und in der Stadthalle zu
D- 88400 Biberach/Riss“
- Lüttge U., Kluge M., Bauer G. (2002)
Botanik. Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- Mohorn W. (1996)
Die Kräfte des Universums, Aquapol Jubiläumsausgabe.
Aquapol Ges.m.b.H., Österreich
- Mohorn W. (2000)
Persönliche Mitteilung im Zuge der Diplomarbeit
- Mohorn W. (2007)
Persönliche Mitteilung im Zuge der Diplomarbeit
- Munk K. (2001)
Botanik. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin
- Nobel P. S. (1999)
Plant Physiology. Academic Press, San Diego

- Nultsch W. (2001)
Allgemeine Botanik. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Pregl O. (2001)
Handbuch der Geotechnik; Laboratoriumsübungen I zu Erd- und Grundbau. Boku Wien
- Püreschitz L. (2006)
Persönliche Mitteilung im Zuge der Diplomarbeit
- Richter H. (1995)
Vorlesungsunterlagen zu „Wasserhaushalt von Pflanzen“
- Salisbury F. B. (1996)
Plant physiology. Wadsworth biology series, Belmont California.
- Schopfer P., Brennicke A. (1999)
Pflanzenphysiologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Schubert R., Wagner G. (1993)
Botanisches Wörterbuch. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Taiz L., Zeiger E., (1998)
Physiologie der Pflanzen. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin
- Upgmbh (2007)
Homepage: www.upgmbh.com/produkte
- Wescor (1998)
Homepage der Firma Wescor: www.wescor.com
Logan, Utah, U.S.A.
- Wimmer B. (2007)
Niederschlagsdaten vom Austrian Reserach Center in Seibersdorf
Persönliche Mitteilung