

# **Das Manometer in der Saftsteigungsfrage.**

Druckmessungen an *Sorbus Americana*,

von

**E. REINDERS.**

(Mit Tafel I und II und 7 Textfiguren.)

Aus dem Botanischen Laboratorium der  
Universität Groningen.

## **E I N L E I T U N G.**

Bei der Erforschung der Saftsteigungsfrage hat man von jeher das Manometer zur Hilfe gezogen und mit Recht. Wird doch jede Wasserverschiebung durch Druckdifferenzen verursacht und beherrscht; sobald man die Verteilung des Druckes kennt, der im Innern der Wasserbahnen herrscht, ist auch die Lokalisation der wasserhebenden Kräfte vollkommen bekannt. Nun ist es aber bis jetzt unmöglich den Druck zu messen, der an jedem Punkte in den Wasserbahnen der Pflanzen herrscht; dieses ist aber vorläufig auch nicht erforderlich; wir hätten schon vieles gewonnen, wenn wir den Druck kennten an einigen Übereinander liegenden Punkten derselben Wasserbahn. Dadurch wäre nämlich sofort entschieden ob das Transpirationswasser auf direktem Wege oder stufenweise gehoben wird, das heißtt, ob es mit einem Male, durch einen genügend grossen Druckunterschied in Wurzel und Krone aufsteigt oder stufenweise, durch die Wirkung zwischenliegender Pumpapparate.

Bei der *direkten* Wasserhebung muss der Druck in derselben Wasserbahn von unten nach oben abnehmen und zwar so, dass der Druckunterschied zwischen zwei gleich weit über einander liegende Punkte um so grösser ist, je grösser der Widerstand ist in der zwischengelegenen Bahnstrecke. Der Wilderstand wächst mit der Strömungsgeschwindigkeit; je stärker also der Wasserstrom, je mehr die Spannungen an denselben übereinandér gelegenen Punkten auseinander gehen. Wäre die Hebung des Transpirationswassers eine direkte, so würden nach Obigem zwei Manometer an zwei Übereinander liegenden Punkten angebracht bei wachsender Verdunstung auseinander gehen, bei abnehmender Verdunstung sich wieder nähern.

Die *stufenweise* Wasserhebung ist nur möglich, wenn die Röhre durch wasserdichte Wände geteilt ist in Übereinander gelagerte Fächer, die nur durch Vermittlung einer Saug- und Druckpumpe miteinander in Verbindung stehen. Für jedes Fach gelten dann die obengenannten Gesetze; die Druckdifferenz aber zwischen zwei Punkten der Röhre welche durch mehrere Fächer getrennt sind kann ganz verschieden sein, je nach dem Verhalten der verschiedenen Pumpen. Sie ist aber jedenfalls geringer als im Falle directer Wasserhebung, und braucht nicht von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig zu sein.

Sowohl die Methode der direkten Wasserhebung, durch Kräfte welche nur an den Enden der Wasserbahnen angreifen, als die der stufenweisen Aufführung ist in der Literatur wiederholt zu Erklärungshypothesen ausgearbeitet worden, am erfolgreichsten in der Kohäsionstheorie und der Theorie GODLEWSKIS. Die Kohäsionstheorie nimmt eine direkte Wasserhebung an durch die Saugkraft der transpirierenden Blättern, die Theorie GODLEWSKIS eine stufenweise, wobei lebende Holzelemente für die erforderlichen Saug- und Druckwirkungen in Anspruch genommen werden.

1911 publizierte ich<sup>1)</sup> eine vorläufige Mitteilung, in welcher ich die Entscheidung zwischen diesen beiden Theorien ankündigte und eine nachfolgende eingehende Behandlung der Sache versprach. Bei den weiteren Versuchen über diesen Gegenstand zeigte sich, dass die Sachlage für gewöhnlich komplizierter ist als bei meinen ersten Versuchen der Fall war. Wenn auch keiner der nachher erhaltenen Daten der früher gegebenen Auffassung wiederstrebt, ist zu einer abschliessenden Behandlung mein Versuchsmaterial noch bei weitem nicht ausreichend; wie aus dem Nachfolgenden klar wird, sind die Erfolge, gleich bei den ersten Versuchen, einem glücklichen Zufall zuzuschreiben.

Der Hauptsache nach enthält die Mitteilung folgendes. Aus den Druckmessungen welche sich in der Literatur vorfinden geht hervor, dass im Holze an verschiedenen übereinander liegenden Punkten, welche von den transpirierenden Blattflächen genügend weit entfernt sind, der Druck nicht regelmässig von Unten nach Oben abnimmt, wie man nach der Kohäsionstheorie erwarten muss, sondern ganz unregelmässig über den Stamm verteilt ist. Hieraus würde folgen, dass die Hebung des Transpirationswassers eine stufenweise sei. Dass diese unregelmässige Druckverteilung durch die Pumparbeit lebender Elemente hervorgerufen wird und nicht etwa von Fehlern in der Methode der Druckmessung herrührt, konnte ich entscheiden, indem ich am Stamme kleiner Bäume einige Manometer ansetzte, und die Stämmchen einige Tage nach dem Ansetzen der Manometer abtötete. Solange die Stämmchen lebten, zeigten sich die Manometer völlig von einander unabhängig, sobald sie aber tot waren, trat die gegenseitige Abhängigkeit

---

1) E. Reinders, Sap-raising Forces in living Wood, Proceedings Kon. Akad. v. Wetenschappen, Saturday January 29, 1911 p. 563—573.

auf, welche einer direkten Wasserhebung, in casu der Kohäsionstheorie, entspricht, indem sie bei wachsender Transpiration stark auseinander gingen, zum Zeichen das die Widerstände recht beträchtlich waren, bei abnehmender Verdunstung aber sich wieder näherten.

Weiter hatte ich zwei Manometer am Stämmchen eines *Cornus* angesetzt, 66 cm über einander und zwar mittelst eines mit Wasser gefüllten Glaskölbchens an zwei Aststümpfen. Zuvor aber hatte ich die Insertionsstelle der Äste, welche die Manometerstümpfe liefern sollten, mit Dampf abgetötet sowie die unmittelbar angrenzenden Teile des Stämmchens. Ich wollte untersuchen, ob der zwischengelegene lebende Stammteil pumpte oder nicht. Pumpte es, so müsste es fortwährend beschäftigt sein den Druckunterschied zwischen den beiden toten Strecken zu verringern; wenn ich dann die lebende Strecke stark abkühlte, müsste diese Wirkung aber aufhören und die Manometer auf einmal auseinander gehen. Das Ergebnis war aber ein ganz anderes: die lebende Strecke pumpte nicht denn die Manometer zeigten genau dasselbe Verhalten als an einem toten Baum. Am Mittag gingen sie bisweilen 24 cm Quecksilber auseinander. Am fünften Tage aber änderte sich ihr Verhalten ziemlich plötzlich und am sechsten verließen sie gerade so unregelmässig als am lebenden Baume. Offenbar hatte der mittlere Teil von der Brühung der angrenzenden Strecken zuviel gelitten um sofort zu funktionieren und hatte er sich erst am sechsen Tage erholt. Derselbe lebte noch mehr als drei Monate, wie die vollkommen frische Rinde zeigte, dann starb er ab. Die Knospen lebten bis April des folgenden Jahres; sie starben aber vor dem Austreiben ebenfalls ab.

Bei einem dritten Versuch waren vier Manometer über einander angesetzt. Als ich den zweituntersten Stumpf und die angrenzende Stammstrecke auf electrischem Wege

abtötete, hatte dieses auf den drei andern Manometern keinerlei Auswirkung, während das zweite immer etwas stärker sog als vorher und als die Andern. Ich schloss hieraus dass die Änderungen im Verhalten der Manometer nicht etwa einer Zunahme der Widerstände zuzuschreiben sind, weil diese sich auch an den beiden höheren Manometern geäussert hätte.

Bei Wiederholung der Versuche an anderen Bäumen, auch an höheren Stämmen gelang es mir im Anfang nicht dieselben Resultate wieder zu erhalten; eine sorgfältige Untersuching der Ursachen zeigte, dass hier nicht ein prinzipieller Fehler bei den ersten Versuchen vorliegt, sondern dass vielerlei Umstände die Sache in weitaus den meisten Fällen ungemein komplizieren. Meine erste Aufgabe war demnach diese störende Umstände zu studieren. Davon habe ich bis jetzt mit Sicherheit drei kennen gelernt:

Die Erste liegt in der ungenügenden Kommunikation der Wasserbahnen im Holze in radialer und namentlich in tangentialer Richtung. Bei unseren Versuchen ist es zur Erhaltung brachbarer Resultate unbedingt notwendig dass die Manometer an dieselbe Wasserbahn angesetzt sind. Dieses ist aber nur ausnahmsweise der Fall wenn man auf gut Glück einige Manometer an einen Stamm ansetzt, weil die Holzgefässe nur bei einigen Baumarten wie bei dem Genus *Betula*, in allen Richtungen gut kommunizieren, bei den meisten Bäumen aber, wie *Sorbus* und *Acer* vertikale Wasserbahnen bilden, welche isoliert neben einander verlaufen.

Die zweite Schwierigkeit ist folgender Art. Die Manometer können nur funktionnieren, wenn ihr Inhalt mit dem Inhalt der aktiven Wasserbahnen in Verbindung steht und es ist von vornherein nicht sicher, dass dieses bei der getroffenen Versuchsanordnung immer der Fall ist. Dieses wird in Kapitel II eingehend besprochen.

Die dritte Schwierigkeit bildet die Verstopfung der angeschnittenen Gefässe. Bei heissem Wetter entwickeln sich in den Manometerröhren und in den Stümpfen alsbald Schimmelpilze und Bakterien welche die angeschnittenen Gefässe verstopfen und dadurch die Kommunikation mit dem Bauminnern aufheben. Dieser Umstand äussert sich in den Kurven in ganz auffallender Weise; die Besprechung dieses Punktes findet sich in Kapitel IV.

## K A P I T E L I.

### L i t e r a t u r ü b e r s i c h t .

Die Druckmessungen, welche sich in der Literatur finden, sind nur zum kleinsten Teile angestellt worden in der Absicht, zwischen den beiden möglichen Typen der Wasserhebung, der directen und der stufenweisen, zu entscheiden; PAPPENHEIM <sup>1)</sup> meint sogar, es sei „aussichtslos, zur Beantwortung der Frage nach der Ursache des Saftsteigens durch eine Untersuchung des Grades der in den Bäumen bestehenden Luftverdünnung beizutragen.“ Auch die Messung des Blutungsdruckes, die bekanntlich schon von STEPHAN HALES angestellt wurde und die auch in neuester Zeit mehrere Forscher beschäftigt, hatte einen andern Zweck. Trotzdem sind es gerade diese Messungen, welche zum näheren Studium des Druckes im Gefässinnern während der Transpirationsperiode Anlass gegeben haben: 1860 entdeckte TH. HARTIG <sup>2)</sup> das auf dem Bluten der Hain-

1) KARL PAPPENHEIM. Eine Methode zur Bestimmung der Gefässspannung im Splinte der Nadelbäume, Bot. Centr. 1892, Bd. 49, 82.

2) DR. TH. HARTIG, Ueber die Bewegung des Saftes in den Holzflanzen, Botan. Zeit. Bd. 19, 18 Jan. 1861, S. 17—23 und Lehrb. f. Förster, Bd. I, 10 Aufl.

buche und anderer Bäume an bestimmten Zeiten eine Saugung folgt, wie er an Bohrlochmanometern feststellte. Nach ihm hat BÖHM<sup>1)</sup>) analoge Druckmessungen durchgeführt, zum Teil an Bohrlöchern, zum grössten Teil aber an den Stümpfen abgeschnittener Äste, mit ähnlichen Resultaten wie HARTIG. Es wurden die offenen Quecksilbermanometer durch Vermittlung eines mit Wasser gefüllten Kölbchens an die Aststümpfe oder in die Bohrlöcher angesetzt. Eine eingehende Kritik dieser Druckmessungen findet sich bei VON HÖHNEL.

VON HÖHNEL<sup>2)</sup>) had viele Bestimmungen der Spannung im Holzinnern ausgeführt, jedoch mit Hilfe einer anderen Methode. Er schnitt die Versuchszweige unter Quecksilber ab, wobei dieses in die geöffneten Gefässe eindrang. Aus der Steighöhe des Quecksilbers, der Kapillardepression in den Gefässen u. s. w. berechnete er den Druck der ursprünglich im Gefäßinnern herrschte. Die Methode gestattet nicht, die Druckverhältnisse aufzuklären die an demselben Stamme in derselben Wasserbahn in verschiedenen Höhen zur selben Zeit und unter natürlichen Umständen vorhanden sind, wie für eine Beurteilung der wasserhebenden Kräfte notwendig ist. Für meine späteren Betrachtungen scheint aber das Ergebnis wichtig dass an demselben Querschnitte des Astes die verschiedenen Gefässe nicht denselben Unterdruck aufweisen; im allgemeinen ist dieser am grössten in den jüngeren Jahresringen.

Auf VON HÖHNELS Kritik der HARTIG-BÖHMSCHEN Manometerversuche möchte ich etwas näher eingehen, weil darin schon die Hauptmomente angegeben sind, welche bei meinen eigenen Versuchen eine Rolle spielen. Es

1) J. Böhm, Landwirtschaftliche Versuchsstationen, 1877 S. 357.

2) Franz von Höhnels Inaugural Dissertation und Pringsh. Jahrb. Bd. 12 1879—1881 S. 47—131: Beiträge zur Kenntnis der Luft- und Saftbewegung in der Pflanze.

handelt sich hier um Manometer, welche durch Vermittlung eines mit Wasser gefüllten Kölbchens an Aststümpfe oder in Bohrlöcher angesetzt waren. VON HÖHNERL hebt hervor, dass wir bei diesen Versuchen keineswegs mit *reinen* Druckmessungen zu tun haben, indem sowohl das interzelligulare wie das tracheale „Luftsystem“ mit dem Kölbchen in offener Verbindung stehen; das tracheale wird an der Schnittfläche Wasser aufsaugen, das interzelligulare aber Luft abgeben. Wenn durch die Saugung der Druck im Kölbchen weit genug gesunken ist, um die kapillare Wasserverstopfung der Gefässe und der Rindeninterzellularen zu überwinden, wird aus der Schnittfläche resp. aus dem Bohrloche Luft austreten. Wesentliche Luftmengen können nur aus den Gefässen des Holzes und den Rindeninterzellularen und, bei den Stümpfen, aus dem Marke austreten. VON HÖHNERL meint, aus den Gefässen komme verdünnte Luft, welche „selbstredend den Quecksilberstand (so paradox dieses auch klingt) nicht herabdrücken kann, da sie ja eine grössere negative Spannung als die durch den Quecksilberstand angezeigte haben muss, sonst könnte ja kein Wasser mehr gesaugt werden und daher das Quecksilber nicht steigen“ (Seite 80 u. f.). Die Rindenluft, welche von Atmosphärendrucke ist, wird in um so ausgiebigerem Masse austreten, je niedriger die Spannung im Kölbchen schon ist. Das Quecksilber steigt nicht mehr, sobald aus dem Rindenquerschnitte so viel Luft von Atmosphärendrucke austritt, als zugleich vom Holze Wasser eingesogen wird. Auf diese Vorstellung komme ich später zurück.

Es soll weiter das eingesogene Wasserquantum einen grossen Einfluss auf die Spannung im Stumpfe haben, sowie auch das Abschneiden der transpirierenden Blätter vom Stumpfe und der Nachschub von Wasser aus den Wurzeln. Dieses ist bei vielen Bäumen gar nicht der Fall; ich habe eine derartige Ercheinung bis jetzt nur bei

den beiden von mir untersuchten *Acer*-species (*A. Pseudoplatanus* und *A. platanoides*) beobachtet, welche sich durch weitgehende Isolation ihrer Wasserbahnen auszeichnen.<sup>1)</sup> Bei manchen Baumarten aber, wie *Sorbus latifolia*, *S. aucuparia*, *S. americana*, *Cydonia vulgaris*, dem Geschlecht *Betula* stehen die Gefäße eines Stumpfes mit denen höherer, transpirierender Äste in Verbindung, welche dadurch Wasser beziehen aus den angeschnittenen Bahnen des Versuchsstumpfes, wie ich oft mit Hilfe farbiger Lösungen konstatieren konnte.

SCHWENDENERS<sup>2)</sup> Druckmessungen beziehen sich teils auf blutende Stammstümpfe und intakte Stämme, teils auf dünne Äste; erstere sind direkte Druckmessungen mit Hilfe des Wasser- oder Quecksilbermanometers und zweckten bloss Bluten oder Saugen zu konstatieren. Dem Resultate eines dieser Versuche legt SCHWENDENER grossen Wert bei<sup>3)</sup>. SCHWENDENER fand nämlich, „dass ein Baumstamm, der nach 2—3 Regentagen durch Nachschub von unten etwas wasserreicher geworden, in mittlerer Höhe (wo vorher Saugen stattfand) Luft in das hier angebrachte Manometer hineinpresste, während oben in der Krone und insbesondere unten am Stamm weder Saugung noch Pressung stattfand“. Nach der Besprechung meiner eigenen Resultate werde ich auf diese Angabe zurückkommen und die Beschreibung des Versuches auch bis dahin aufschieben.

Bei den Druckmessungen an dünnen Ästen wandte SCHWENDENER eine Methode an, welche der VON HÖHNEL-

1) Merwin and Lyon, Sap Pressure in the Birch stem, Bot. Gaz. Vol. 48, 1909, S. 446—458.

2) S. Schwendener, Untersuchungen über das Saftsteigen, Sitzungsber. d. Kön. pr. Akad. d. Wiss. Berlin, 1881, zweiter Halbb. S. 562—602.

3) Dr. Carl Holtermann, Schwendener's Vorlesungen über mechanische Probleme der Botanik. Leipzig 1909, S. 66—67.

schen Quecksilbermethode nahe verwandt ist. Mit Hilfe einer eigens hierzu konstruierten korkbohrerartigen Doppelschere schnitt SCHWENDENER unter gefärbtem Petroleum kurze Stücke aus den Versuchsästen heraus, wobei die Flüssigkeit von beiden Seiten her in die aufgeschnittenen Gefäße eindrang. Mit Hilfe des Boyleschen Gesetzes berechnete SCHWENDENER unter Berücksichtigung der notwendigen Korrekturen die Spannung, welche vor dem Abschneiden in den Gefäßen geherrscht hatte. Es war in der Regel nicht möglich, das Eindringen der Flüssigkeit von den Schnittflächen aus an ein und demselben Gefäße zu beobachten; es wurden deshalb Messungen an verschiedenen Gefäßen angestellt und dieselben nach bestem Ermessen kombiniert. Das Resultat ergab, dass in den Gefäßen zwei- bis vierjähriger Triebe die Druckerniedrigung gewöhnlich bei  $\frac{1}{2}$  der Normalspannung stehen bleibt und nur selten unter  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  des Atmosphärendruckes herabgeht.

Für die Entscheidung in der Kardinalfrage sind diese Messungen ebensowenig brauchbar als die VON HÖHNELSCHEN und zwar aus denselben Gründen.

PAPPENHEIM<sup>1)</sup> bestimmte den Druck der Luft innerhalb der Nadelbäume an verschiedenen Höhen ihres Stammes. Er fällte die betreffenden Bäume, sägte sie in meterlange Stücke, schnitt aus jedem Stück ein etwa 6 cm langes Zylinder heraus und bestimmte dessen Frischgewicht. Durch Einpressen von Wasser unter einem gemessenen Drucke und Bestimmung des abgegebenen Quantum wenn der Druck nachliess, sowie des Quantum Wasser dass in dem Holz zurückblieb, liess sich dann mit Hilfe des Boyleschen Gesetzes der ursprüngliche Druck der Holzluft bestimmen. Das Ergebnis der Messungen war, dass an den

1) Karl Pappenheim, Eine Methode zur Bestimmung der Gasspannung im Splinte der Nadelbäume, Bot. Centr. 1892.

verschiedensten Höhen im Baume dieselben Luftdrücke konstatiert wurden: auf 17, 16, 15 m u. s. w. Höhe resp. 49, 52, 56, 58, 60, 54, 52, 54, 56, 53, 53, 57, 54, 57, 52, 56, 51, 50 cm Quecksilber.<sup>1)</sup> Die Methode unterliegt aber meines Erachtens einem ernsten Bedenken das PAPPENHEIM in seiner Arbeit nicht völlig hat beseitigen können: es wird sich der Druck im liegenden Baume ausgleichen, auch wenn der Druck oben und unten im aufrechtstehenden Baume gar nicht gleich war. PAPPENHEIM nimmt zwar an, dass die Beweglichkeit des Wassers innerhalb des Stammes dazu zu gering sei, wie aus eigenen und aus SCHWENDENERS Untersuchungen hervor gehe. Dieses wird aber gar nicht allgemein angenommen, namentlich nehmen DIXON und JOLY auf Grund ihrer Versuche eine viel grössere Beweglichkeit des Wassers im Stamme an. Die bewegenden Kräfte brauchen im Falle PAPPENHEIMS gar nicht klein zu sein: stellt man sich auf den Standpunkt der Kohäsions-theorie, so würde der Druckunterschied unten und oben bei einem 19,5 m hohen Tannenstamme mindestens 143 cm Quecksilber betragen. Es lassen sich aus den erhaltenen Druckwerten daher keine sicheren Schlüsse ziehen über die Druckverteilung im lebenden, aufrechtstehenden normalen Stamme.

1) Pappenheim giebt hier den Druck in Zehntelmillimetern an, an anderen Stellen sogar in Hundertstelmillimetern, was bei der relativ grossen Ungenauigkeit der Methode etwas fremd aussieht.

## KAPITEL II.

Die Druckmessungen im Lichte der  
Kohäsionstheorie.

Die 1895 publizierte Kohäsionshypothese DIXONS und JOLYS,<sup>1)</sup> nach welcher bekanntlich von einer gewissen Höhe an, alles Wasser im Baumstamme unter einer mehr oder weniger starken negativen Spannung stehe, stellte die Druckmessungen mit einem Male in ein ganz anderes Licht. Vom Ende der Herrschaft der SACHSSCHEN Imbibitionstheorie bis 1895 wurde von den Physiologen ganz allgemein angenommen, dass die Gefäße wenigstens der stärkere Äste und Stämme neben Wasser auch Luftblasen führen<sup>2)</sup> und man glaubte, dass die gemessenen niederen Drücke auch wirklich diejenigen seien, welche für die Wasserhebung in Betracht kommen. Die Einführung der Kohäsion aber macht eine ganz andere Deutung der wahrgekommenen Saugungen möglich, nach welcher sie mit der Ursache des Saftsteigens nichts gemein hätten. Wenn nämlich hie und da im Stamme ein Gefäß oder eine Tracheide durch das Reiszen seines Wasserinhalts ausser Gebrauch gerät, muss ein solches Element sofort von den

---

1) H. H. Dixon and J. Joly. On the ascent of sap. Philos. Transact. of the Royal Society of London, 1895; H. H. Dixon, Transpiration and the ascent of sap. Progessus Rei Botanicae. Bd. III, Heft I, 1909.

2) Max Scheit, Die Wasserbewegung im Holze, Bot. Zeit. 1884, S. 182; Jenaische Zeitschr. f. Naturwissenschaft. Bd. XIX N. F. XII behauptete u. A. das Gegenteil, doch wird in den allermeisten Abhandlungen, z. B. von Janse, Pappenheim, Von Höhnel, Schwendener, Böhm, Th. Hartig, R. Hartig, Godlewski, Vesque der Luftgehalt der Gefäße und Tracheiden als eine feststehende Tatsache behandelt, die bei jeder Besprechung den Hintergrund bildet.

angrenzenden, noch funktionnierenden leergesogen werden und ein hohes Vakuum aufweisen. Die so entstandenen luftleeren Räume müssten dan die Saugung an Stümpfen und Bohrlöchern hervorrufen, zumal, weil die Verletzungen das Zerreissen der Wasserfäden in hohem Grade befördern. Die Tatsache, dass Bohrlochmanometer an hohen Stämmen in jeder Höhe ungefähr dieselbe Spannung zeigen, welche von der Transpirationsgrösse nahezu unabhängig ist, würde in dieser Weise eine ungezwungene Erklärung finden. Noch viel weniger als die Messungen an Bohrlöchern oder Aststümpfen würden aber die Bestimmungen nach den volumetrischen Methoden den wahren wasserhebenden Kräften nahe kommen. Die älteren Druckmessungen haben demnach durch die Einführung der Kohäsionshypothese ihre Bedeutung verloren; dass sie von einigen Autoren, wie z. B. von SCHWENDENER (l. c. 1909, S. 66) noch als beweiskräftig angeführt werden, röhrt daher, dass diese die Existenz negativer Spannungen im Holze schon wegen dessen Luftgehalt in Abrede stellen.

Wenn indessen an einem Stamme während der Transpirationsperiode in derselben Wasserbahn an einem höher gelegenen Punkte Blutung beobachtet würde, während an einer niederen Stelle weder Saugung noch Pressung oder gar Saugung zu konstatieren wäre, so wäre die Kohäsionstheorie gefallen, daher SCHWENDENER mit Recht seiner Beobachtung, auf Seite 9 zitiert, grossen Wert beilegt. Ich bezweifle aber, ob die SCHWENDENERSche Deutung der Erscheinung richtig sei, wie ich nachher motivieren werde.

Die negativen Spannungen selbst lassen eine direkte Messung kaum zu, wegen der Zerbrechlichkeit der gespannten Wasserfäden; es lässt sich sogar kaum unzweifelhaft entscheiden, ob die Tensionen überhaupt bestehen. Die auf der Hand liegende Methode ist prinzipiell sehr einfach: sobald es gelingen sollte, aus einem Baum in

einer Höhe über zehn Meter flüssiges Wasser zu saugen, während unten am Stamme kein Bluten auftritt, wäre die Kohäsionstherie gefallen. Dass dieses nicht sofort gelingt beweist aber gar nichts, weil auch andere Ursachen als negative Spannungen, wie ungenügende Kontinuität, ein Nichtaustreten von Wasser veranlassen könnten, wie schon PAPPENHEIM hervorhebt.<sup>1)</sup> Selber gelang es mir am Fusse drei Meter hoher Stämmchen von *Sorbus americana* nicht, Wasser aus Aststümpfen hervorzusaugen, obwohl ich ganz bestimmt wusste, dass der Druck im Innern nicht negativ war, wie ich im Folgenden zeigen werde. Eine Methode, die negativen Spannungen zwar nicht zu messen, aber doch zu vergleichen, beruht auf dem Messen des Wasserquantums das von gleichen Bohrlöchern, die unter Luftabschluss an verschiedenen Höhen hergestellt wurden, in derselben Zeit eingesogen wird. Wenn dieses wirklich in die activen Wasserbahnen aufgenommen wird, was mit Hilfe von Farbstoff- oder Lithiumsalzlösungen leicht nachweisbar ist, müssen nach der Kohäsionstheorie die höheren Bohrlöcher mehr Wasser einsaugen als die niederen und zwar muss die Differenz bei etwas beträchtlichem Höhenunterschied recht gross sein.

Nach diesen beiden Methoden und noch einer dritten, komplizierteren habe ich Versuche zwar angestellt, doch sind dieselben noch nicht zu einem Abschluss gebracht worden.

Unter Berücksichtigung der Vorstellungen der Kohäionstheorie können aber auch die Druckmessungen nach der alten Aststumpfmethode BÖHMS oder nach HARTIGS Bohrlochmethode, in einfacher Weise auf ihre Zuverlässigkeit geprüft werden. Wenn man dem Inhalte der Kölbchen

1) Karl Pappenheim, Eine Methode zur Bestimmung der Gasspannung im Splinte der Nadelbäume, Bot. Cent. 1892.

einen Farbstoff oder ein Lithiumsalz zusetzt, kann man nach Ablauf der Messung leicht feststellen, ob der Kölbcheninhalt mit in die Blätter emporgestiegen ist oder nicht, das heisst, ob Kontakt mit den Wasserbahnen erhalten worden ist oder nicht. In den von mir studierten Fällen an kleinen Bäumchen war dieses tatsächlich der Fall; die Druckmessungen sind also in dieser wichtigen Hinsicht einwandsfrei, daher ihre nachfolgende eingehende Besprechung völlig berechtigt ist.

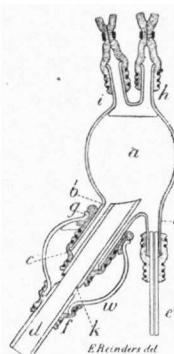
### KAPITEL III.

#### Die Versuchsanordnung.

Zum Verständnis des Nachfolgenden ist die Kenntnis der Versuchsanordnung erforderlich deren Beschreibung ich deshalb voranschicke.

Zum Ansetzen eines Manometers schnitt ich einen Ast unter Wasser so weit ab, dass ein Stumpf von etwa 12 cm am Stamm verblieb. Während die Schnittfläche fortwährend unter Wasser gehalten wurde, setzte ich die mit Wasser gefüllten Glasapparate an, welche die Verbindung mit dem Manometer vermittelten. Eine ausführliche Beschreibung der Operation findet sich in Kapitel V.

*Der Glasapparat* zeigt folgende Konstruktion. Von dem vierfach tubulierten Kölbchen *a*, Figur 1, wurde der weiteste Tubus *b* mittelst eines Kautschukschlauches *c* möglichst gut schliessend über den Stumpf *d* gebunden. Das Kölbchen war mit ausgekochtem destilliertem Wasser gefüllt.



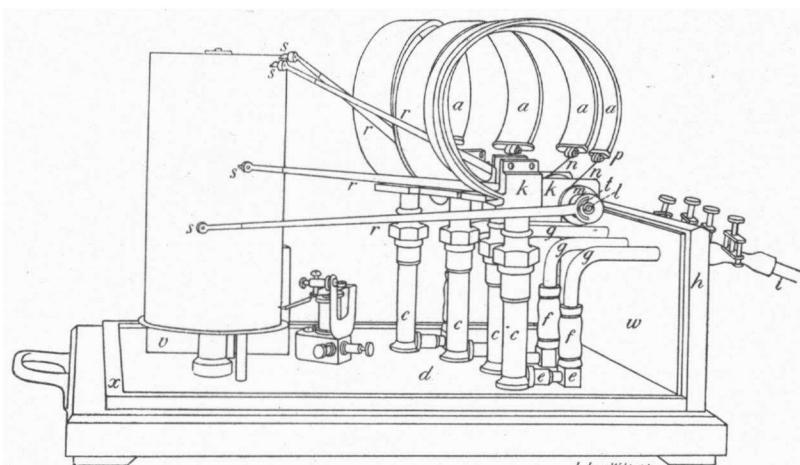
Figur 1. Längsschnitt durch den Glasapparat am Aststumpfe.  
Erklärung im Text.

Der zweite, untere, engere Tubus *e* war für die Verbindung des Kölbchens mit dem Manometer bestimmt; die Verbindung wurde von einer Glaskapillaren *e'* besorgt. Um das Eindringen von Luft in das Kölbchen *a* zwischen Bast und Kautschuk *c* unmöglich zu machen, war eine zweiseitig offene wassergefüllte Glaskugel *w* als Wasserverschluss angebracht. Bei *f* befestigte sie ein Kautschukschlauch wasserdicht um den Ast, während ihr Mund bei *g* gerade so weit war, dass ihn der Gummiverschluss *c* wasserdicht abschloss. Bei *f* war ein Rindenring entfernt, weil sonst die Rinde an der Schnittfläche immer reichlich Luft austreten lässt. Der Kolben *a* hatte ausser dem obengenannten noch zwei Ansatzröhren *h* und *i*, die mit Kautschukschlauch und Quetschhahn verschlossen waren; sie dienten zum Nachfüllen von Wasser. Während des Tages nahm der Stumpf nämlich Wasser auf aus dem Kölbchen, welches daher von Zeit zu Zeit wieder angefüllt werden musste. Das Wasser wurde aus einer Bürette durch die Ansatzröhre *h* eingelassen, das aufgenommene Quantum an der Bürette abgelesen. Die Luft konnte durch den andern Ansatz *i* entweichen. Wenn dieser Ansatz durch einen dickwandigen Kautschukschlauch in Verbindung gesetzt wurde mit einer grossen Flasche in der derselbe Luftdruck herrschte als im Kölbchen *a*, welcher Druck am Manographen abzulesen war, konnte das Nachfüllen auch geschehen ohne dass sich der Druck im Kölbchen dabei änderte. Damit nicht ein Ausfliessen von Wasser aus dem Ansatz *i* die Messung des hinzugegebenen Wassers unmöglich machte, setzte ich auch auf diesen eine Bürette; diese diente zugleich bequem zum Entfernen des Luftpäschens, das sonst leicht im Tubus *h* zurückbleibt; bei einigen späteren Versuchen setzte ich zu dem Zwecke den Tubus *i* unten am Kolben an. Das Nachfüllen unter gleichbleibendem Drucke ist eine ziemlich umständliche

Operation; es zeigte sich aber alsbald, dass man nahezu dasselbe Resultat erhält, wenn man bei Atmosphärendruck nachfüllt und nachher durch Saugen an der Bürette das Manometer auf seinen ursprünglichen Stand zurückbringt.

*Der Manograph.* Als Manometer habe ich ein selbstregistrierendes gewählt. Bei meinen Versuchen hatte ich den Druck an mindestens vier Aststümpfen zugleich zu registrieren; vier selbstregistrierende Manometer wären aber zu teuer gewesen und hätten noch dazu keine Gewähr geleistet für einen vollkommenen Synchronismus ihrer Kurven. Besser war in dieser Hinsicht ein Apparat, der den Verlauf von vier Manometern auf dieselbe Trommel nebeneinander aufzeichnete. Einen solchen mehrfachen Manographen fand ich aber in den Katalogen nicht angegeben; ich war demnach gezwungen einen solchen anfertigen zu lassen; die Metallteile wurden von Herrn Amanuensis JAC. VEENHOFF in vorzüglichster Ausführung hergestellt, die Holzteile von Herrn J. WEENING. Nach einigen Vorversuchen zeigten sich die Bourdonmanometer zu meinem Zwecke mehr geeignet als die Quecksilbermanometer mit Schwimmer und Zeiger, namentlich, weil diese Letzteren mehr Wasser aufnehmen und abgeben bei denselben Druckänderungen. Auch zeichnet der Manograph mit Quecksilber und Schwimmer die Wendepunkte in der Kurve weniger deutlich, er bleibt beim Steigen und Sinken immer etwas zurück, wenn man nicht ziemlich weite Röhren mit grossen Schwimmern anwendet und diese sind hier unbrauchbar, weil sie zu ihrer Betätigung zuviel Wasser bedürfen. Die Bourdonröhren  $\alpha$  (Figur 2) wurden erhalten aus vier Manometern, wie an den Zentralheizungen verwendet werden; sie wurden bezogen von der Firma GEVEKE & Co., Amsterdam. Die Manometer hatten einen Messbereich von  $\frac{1}{2}$  Atmosphäre Unterdruck bis  $\frac{1}{2}$  Atmosphäre Überdruck; ihre Bourdonröhre war 31 mm breit,

im Mitten 6 mm dick und in einen Kreis gebogen von 11.5 cm Durchmesser. Die innere Fläche war mit Längswellen versehen, die äussere war glatt. Die Röhren wurden an ihren ursprünglichen Ansatzröhren *c* belassen, deren



Figur. 2. *d* Eiserne Grundplatte, *w* eiserne aufstehende Wandplatte, *x* Holzrahmen darin die Grundplatte liegt auf dem hölzernen Grundbrett des Kastens, *h* fester Teil des hölzernen Kastenwandtes, *v* Kasten der Weckeruhr, welche die Trommel dreht, *a* die Bourdonröhren, *k* die Kupferstücke darin die Bourdonröhre und die Achsen *l* der Rolle *m* befestigt sind; *n* Kette, welche die Bewegung der Röhren auf die Rollen überträgt; *r* Aluminiumstreifen, welche die Schreibfedern *s* tragen, *t* Stellschraube, *c* hohle Säule; *e* kupfernes Kniestück das mittelst des Kautschuckschlusses *f* mit dem Glasrohr *g* verbunden ist; *i* die Verbindung mit den Kölbchen.

unteres Ende ein Schraubengewinde trug, mit dessen Hilfe die Manometer auf die eiserne Grundplatte *d* befestigt wurden. Der Kanal innerhalb des Schraubenteils wurde unten verschlossen und zugelötet; oberhalb der Grundplatte aber ein neues Loch seitlich in das Ansatzrohr *c* eingebohrt und darin ein Knierohr *e* eingesetzt, wie bei den Gas-

leitungen gebraucht wird. Daran wurde mittelst eines dickwandigen Gummischlauches *f* ein knieförmig gebogenes Glasrohr *g* gebunden, das durch die Wand *h* des Manometerkastens hindurch geführt wurde. An diese Glasröhren wurden dann die Glaskapillaren *i* verbunden, die nach den Stümpfen führten.

Die Ansatzröhre *c* der Manometer hatte am oberen Ende einen verbreiteten Kopf *k*, daran sich die Achse *l* einer Rolle *m* mit Kette *n* bequem befestigen liess. Die Kette war einerseits an das freie Ende *p* der Bourdonröhre, andererseits an die Peripherie der Kettenrolle *m* befestigt; diese letztere trug einen langen dünnen federnden Aluminiumstreifen *r* dessen Gewicht die Kette gespannt hielt. Das freie Ende dieses Streifens trug die Registrierfeder *s*. Wie aus der Figur ersichtlich, war die Anordnung von Scheibe und Kette so gewählt, dass eine Druckerniedrigung ein Sinken der Registrierfeder zur Folge hatte, daher die Null-linie nahe an den oberen Trommelrand gelegt wurde. Die Streifen *r* der vier Manometer waren genau gleich lang, sodass die Kreisbogen, welche die Federn beschrieben, alle genau gleich waren. Die Achsen *l* der vier Scheiben *m* liegen alle in derselben Höhe. Die Streifen *r* sind an den Scheiben *m* verstellbar und lassen sich mit einer Schraube *t* in jeder Stellung fixieren; dadurch wird ein Einstellen der Federn auf jedes gewünschte Messbereich ermöglicht, namentlich lassen sich dadurch die Federn alle auf dieselbe Null-linie setzen, wenngleich in jedem Manometer ein anderer Anfangsdruck herrscht. Dieses ist fast immer notwendig, weil die verschiedenen Manometer fast immer mit verschiedenen hohen Stümpfen verbunden werden und dadurch verschieden hohe Wassersäulen in den verbindenden Kapillaren in Rechnung zu tragen sind. Dieses geschieht selbstdäig, wenn man die Schreibfedern auf die Nulllinie stellt während die Kolben an den Stümpfen offen stehen

und also Atmosphärendruck haben. Selbstverständlich müssen dann die Manometer in dieser Stellung geaicht werden.

Die Trommel, welche 17 cm hoch war und einen Diameter hatte von 8.9 cm wurde von einem Weckerwerk  $v$  getrieben, dessen Minutenachse eine Schraube ohne Ende mitnahm; das Schneckenrad war unten an die Trommel angebracht. Minutenachse, Wurm und Wurmrad sind in der Figur nicht sichtbar. Jede 24 Stunden wurde der Papierstreifen erneuert, die Trommel aber machte in 28 Stunden eine volle Umdrehung. Die Federn sind alle um einen gewissen Betrag gegen einander verschoben; wenn also die Trommel in 24 Stunden eine volle Umdrehung machte, würden dadurch stets der Anfang der ersten Kurve und das Ende der letzten auf einander fallen was jetzt vermieden wurde. Die Uhr wurde so reguliert dass das Papier jede Stunde ein cm zurücklegte.

Als Registrierfedern benutzte ich gläserne Schiffchen mit hohler Spitze, die ich in folgender Weise herstellte. Ein plötzlich zu einer dünnen Spitze ausgezogenes Glasröhrchen lieferte durch Abbrechen und Schleifen auf Schmirgelpapier eine schöne glatte durchbohrte Schreibspitze deren Form ich unter dem Mikroskop kontrollierte. Ihr Lumen war etwas kegelförmig; durch vorsichtiges Abschleifen unter ständiger Kontrolle liess sich dadurch leicht eine Ausflussöffnung von beliebiger Weite herstellen. Je schöner, glatter die Spitze ist, desto geringer ist die Reibung der Feder auf dem Papier. Wenn die Spitze fertig war, schliff ich die obere Seite des Röhrchens der Länge nach auf; dann brachte ich die Schiffchen durch Brechen und Schleifen auf die erforderliche Länge und befestigte sie mit Schellack in eine gedrehte kupferne Fassung, mit deren Hilfe ich sie an den Aluminiumstreifen des Manometers abnehmbar befestigte.

Als Tinte benutzte ich eine Lösung verschiedener Anilinfarben in mit Wasser verdünntem Glycerin; das ausserordentlich heisse und trockene Wetter verursachte hier noch einige Schwierigkeiten indem das Wasser aus der Tinte verdunstete und das allzusehr konzentrierte Glyzerin sich in dem Papier ausbreitete wie in Fliesspapier, sodass leicht verschwommene Linien entstanden. Ein wiederholtes Nachfüllen von Wasser schaffte hier Abhilfe. Eine weitere Schwierigkeit war, dass die meisten Anilinarten an der Luft schnell Flocken bilden, welche Verstopfungen der Federspitze verursachen. Nur das Methylviolett und das Trypanrot erwiesen sich auf die Dauer praktisch brauchbar, ich verzichtete also auf die verschiedenen Farben zur Unterscheidung der Kurven, was bei deren Verschiebung gegen einander auch keinerlei Schwierigkeiten brachte.

Der ganze Manometerapparat war auf eine feste eiserne Grundplatte montirt; diese trug an der einen Seite noch eine vertikale eiserne Platte  $w$ , in welcher die Löcher gebohrt waren zum Durchlassen der Verbindungsrohren. Diese eiserne Grundplatte war auf ein teakhölzernes Brett aufgelegt, die Schraubenmuttern und was sonst unter der Grundplatte hervorragte, darin eingelassen und am Rande ein schmaler Rahmen  $x$  um die Grundplatte gelegt. An der Seite der vertikalen eisernen Platte wurde auch ein teakhölzernes Brett  $h$  aufgestellt, das die Röhren ebenfalls durchliess. Über den ganzen Apparat war nun eine abnehmbare Kappe aus Teakholz gebaut, deren eine Seite eine Glasscheibe hatte, welche ein Kontrollieren der Schreibfedern von aussen her ermöglichte. An der rechten kürzeren Seite war nur die obere Wandhälfte an der Kappe angebracht; als untere Hälfte diente das am Grundbrett befestigte vertikale Stück  $h$ . Beim Betriebe war über diese Kappe noch ein passendes Kistchen gesetzt, dessen eine kürzere Wand zur Hälfte abgebrochen war; auch hierin

war ein kleines Glasfenster angebracht um die Federn von Aussen her kontrollieren zu können. Figur 2 zeigt ausser den genannten Teilen noch einen Apparat ohne Bezeichnung; dieser ist bei den Versuchen noch nicht gebraucht worden. Es ist eine kleine Schreibfeder, die durch einen Elektromagneten nach unten abgelenkt werden kann. Sie war dazu bestimmt mit ähnlichen Apparaten am Thermographen und am Evaporographen in denselben Stromkreis einer elektrischen Kontaktuhr eingeschaltet zu werden. Wenn diese dann jede Viertelstunde einmal Kontakt gegeben hätte, wären auf alle drei Papierstreifen Zeitskalen aufgezeichnet, mit deren Hilfe ein vollkommener Synchronismus der verschiedenen Kurven gesichert gewesen wäre. Der Apparat wurde aber zu spät fertiggestellt.

#### KAPITEL IV.

##### Diskussion der Methode.

Die eingehende Besprechung der erhaltenen Kurven und deren Verlauf möge anfangen mit einer Diskussion der verschiedenen Faktoren, welche bei ihrem Zustandekommen eine Rolle spielten.

###### a. Das Wesen der Druckmessung.

Wie schon VON HÖHNERL bemerkte ist der Unterdruck, der sich im Glaskolben über den Stumpf einstellt, ein bewegliches Gleichgewicht zweier Vorgänge, die sich gegenseitig begrenzen: einerseits verursacht das Wegsaugen von Wasser aus dem Kolben ein Sinken des Druckes in dessen Innerem, anderseits verursacht das Austreten von Luft aus den Holzinterzellularen u. s. w. in den Kolben ein Steigen jenes Druckes. Von HÖHNERL nennt noch einen

dritten Faktor: das Austreten von Luft geringer Spannung aus den Gefässen in den Kolben, welche Luft, nach VON HÖHNEL, nicht die Fähigkeit habe, die Spannung im Kolben zu vergrössern. Dem Anschein nach, findet ein derartiges Austreten von Luft aus den Gefässen bei den Versuchen auch tatsächlich statt, wie mir gleich auffiel, das erste Mal, als ich ein Manometer an einen Baum ansetzte. Die Erscheinung ist aber an sich ziemlich Überraschend, denn es ist nicht sofort verständlich, wie dieselben Gefässen, die begierig Wasser aus dem Kolben einsaugen, Luft an denselben abgeben könnten. Das Einsaugen von Wasser zeigt ja, dass im Gefässinnern der Druck kleiner ist als im Kolben; Luft von geringerer Spannung kann aber in einen Raum, in welchem eine grössere Spannung herrscht, nicht eintreten. Es bleibt also nur die Möglichkeit, dass das Einsaugen von Wasser und das Abgeben von Luft nicht an demselben Gefäss stattfindet; es muss dazu in den Gefässen, welche Luft austreten lassen, ein grösserer Druck herrschen als im Kolben und in den Gefässen, welche Wasser einsaugen. Die Bemerkung VON HÖHNELS, die austretende Luft habe nicht die Fähigkeit den Druck im Kolben zu vergrössern, trifft aber keinesfalls zu, denn auch Luft von geringerer Spannung würde beim Eintreten in einen Raum in welchem eine grössere Spannung herrscht, letztere vergrössern. Für mich war es aber, nach Obigem, von Interesse die Ursprungstellen der aus dem Holze kommenden Luftblasen genau zu kennen: ich habe deshalb die Sache einer sorgfältigen Prüfung unterzogen, indem ich einen Manometerkolben herstellte, der gestaltete, die Schnittfläche während des Vorganges mit dem Mikroskop zu beobachten. Es zeigte sich, dass einige wenige Luftbläschen aus dem Marke stammten, die grosse Mehrzahl aber aus bestimmten, regellos im Holzquerschnitte verteilten Gefässen. Bei

stärkeren Saugungen nahm die Zahl der luftabgebenden Gefäße etwas zu, doch wurden namentlich die Luftbläschen an demselben Gefäße zahlreicher. Eine Farbstofflösung färbte alle Gefäße, doch konnte ich feststellen, dass sie in ein Gefäß, welches Luft ergab, nicht eindrang. Die obige Deutung ist also die Richtige.

Nach wie vor aber kann man sagen, dass der Unterdruck, der sich im Kolben einstellt, das Gleichgewicht repräsentiert, des Wegsaugens von Wasser und des Lufteintrittens. Dieser Umstand hat zwei wichtige Konsequenzen. Erstens muss dadurch der gemessene Druck stets höher sein als der wahre Druck im Inneren der Gefäße, zweitens aber ist der gemessene Druck abhängig von allen Umständen, die auf den massgebenden Faktoren Einfluss üben. Beides erfordert hier eine nähere Besprechung. Dass der wahre Druck im Innern des Baumes stets niedriger ist als der Druck im Kölbchen über dem Stumpf ist ohne Weiteres deutlich und ist auch schon öfters in der Literatur hervorgehoben worden, wie z. B. von VON HÖHNEL. Weil aber die meisten Druckmessungen vorgenommen werden in der Absicht die Spannungen in Stammesinnern an verschiedenen Höhen mit einander zu vergleichen wären sie für die Theorie der Wasserbewegung schon hinreichend genau, wenn die erhaltenen Druckwerte eine solche Vergleichung gestatteten. Es fragt sich demnach, wie weit die gemessenen Druckwerte  $P$  von den wirklichen Spannungen im Holzinnern  $D$  abweichen, mit andern Worten wie gross der Fehler  $F$  ( $F = P - D$ ) ist, der dem Messwerte anhaftet.

#### *b. Der Messfehler bei konstanter Saugung.*

Um diesen zu berechnen betrachten wir den Druck im Holzinnern  $D$  vorläufig als constant und nennen den zugehörigen Druck im Kölbchen  $P$ . Dieser ist auch constant wenn das oben besprochene Gleichgewicht herrscht.

Es wird dann Wasser in den Stumpf eingesogen; dieses hat aber bei *Sorbus* keinen merklichen Einfluss auf dem inneren Drucke D. Es sollen weiter pro Sekunde Luftblasen in den Kolben eindringen, deren Gesamtvolumen bei Atmosphärendruck gemessen gleich v sei; im Kölbchen sei schon Luft vorhanden dessen Volumen V sei beim augenblicklichen Drucke P. Die eingedrungene Luft wird den Druck P um einen Betrag p vermehren; wenn aber P constant ist muss der Stumpf pro Sekunde ein Volumen Wasser w wegsaugen, um die Spannung in Kölbchen auf P zurück zu führen. Dann ist aber

$$p = \frac{76 v}{V}$$

$$V(P + p) = (V + w)P.$$

$$w = \frac{pV}{P} = \frac{76v}{P}.$$

Das Quantum Luft v das pro Sekunde eindringt ist der Saugung im Kolben proportional, wir stellen also  $v = a(76 - P)$  (a ein Konstanter Faktor) also

$$w = \frac{76a(76 - P)}{P}$$

Das Quantum w des Wassers das pro Sekunde eingesogen wird kann dem Druckunterschied am äussern und am inneren Stumpfende, das heisst dem Messfehler F, ( $F = P - D$ ) proportional gestellt werden, also  $w = bF$ . (b ein konstanter Faktor)

$$F = \frac{w}{b} = \frac{76a(76 - P)}{bP}$$

Setzen wir  $\frac{76a}{b} = C$ , dann zeigt sich, dass

$$F = \frac{76 - P}{P} \times C.$$

Wenn man hierin die verschiedenen Drucke substituiert zeigt sich deutlich wie der Fehler mit abnehmendem Drucke immer schneller steigt.

$P = 60$	$F = 0.27$ C.	$P = 7$	$F = 9.86$ C.
$P = 50$	$F = 0.52$ C.	$P = 6$	$F = 11.66$ C.
$P = 40$	$F = 0.90$ C.	$P = 5$	$F = 14.20$ C.
$P = 30$	$F = 1.53$ C.	$P = 4$	$F = 18.00$ C.
$P = 20$	$F = 2.80$ C.	$P = 3$	$F = 24.30$ C.
$P = 12\frac{1}{2}$	$F = 5.04$ C.	$P = 2$	$F = 37$ C.
$P = 10$	$F = 6.60$ C.	$P = 1$	$F = 75.0$ C.
$P = 9$	$F = 7.44$ C.	$P = \frac{1}{2}$	$F = 151$ C.
$P = 8$	$F = 8.50$ C.	$P = \frac{1}{3}$	$F = 227$ C.

$$P = 0 \quad F = \infty$$

Was bedeutet nun dieser konstante Faktor C? Nach obigem ist

$$C = \frac{76 a}{b}$$

$$v = a(76 - P)$$

$$w = bF$$

$$a = \frac{v}{76 - P}$$

$$b = \frac{w}{F}$$

Wenn  $76 - P = 1$ , ist  $a = v$ ; a stellt also das Volumen Luft vor, gemessen bei 76 cm Spannung, das pro Sekunde in den Kolben eindringt, wenn der Unterdruck in letzterem gleich 1 cm ist; sie ist offenbar abhängig von der mehr oder minderen Luftdurchlässigkeit der Holz- und Mark-interzellularen der Gefässe und von der Dichtigkeit der Verbindung des Apparates mit dem Stumpf. Sie wird also im Allgemeinen für verschiedene Holzarten verschieden gross sein bei gleicher Güte des Verschlusses. Die *Sorbus americana*, mit welcher ich experimentierte, ist, was der Luftabgabe aus dem Holze betrifft, nicht eben ein günstiges Objekt; es wäre z. B. in dieser Hinsicht *Acer Pseudoplatanus* besser gewesen, doch standen mir geeignete Bäume dieser

Art zur Zeit des Versuches nicht zur Verfügung. Um das Eindringen von Luft zwischen Kautschukverbindung und Ast zu verhindern, wandte ich die Wasserverschlüsse an. (Figur 1).

$b = \frac{w}{F}$ . Wenn  $F = 1$ , dass heisst, wenn die Saugung im Baume 1 cm grösser ist als im Kolben, so wird  $b = w$ ;  $b$  ist also das Quantum Wasser, das in der Sekunde durch den Stumpf hindurch gesogen wird wenn der Druckunterschied an dessen Enden 1 cm Quecksilber beträgt; seine Grösse ist Abhängig von dem Widerstand im Stumpfe. Ist  $b$  gross, dass heisst, fliesst das Wasser leicht durch den Stumpf, so ist  $c = \frac{76a}{b}$  klein, also der Fehler  $F$  gering.

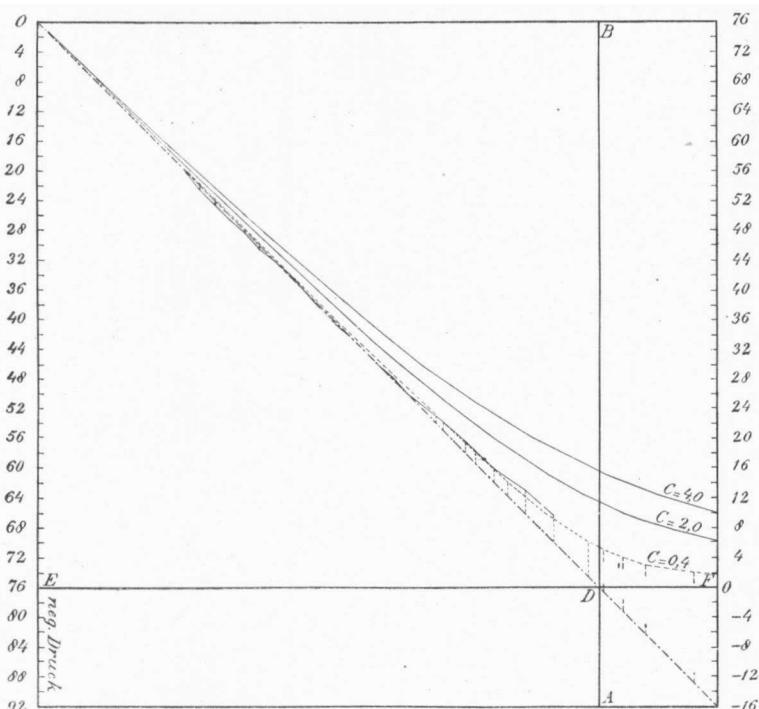
Wir haben gesehen:

$$F = \frac{76 - P}{P} \times C$$

$$D = P - F = P - \frac{76 - P}{P} \times C$$

Sobald also  $C$  bekannt ist, lässt sich zu jedem gemessenen Drucke  $P$  der Messfehler und der zu messende Druck im Bauminnern  $D$  berechnen. In Figur 3 (Seite 28) ist der Zusammenhang zwischen  $D$  und  $P$  graphisch dargestellt in einer Weise, welche sich bei der Darstellungswweise der am Baume registrierten Kurven anschliesst. Die obere Gerade 0—76 stellt den Atmosphärendruck vor; die Nummern auf der linken Seite entsprechen den Saugungen, die auf der Rechten den Drucken. EF ist der Druck 0 oder die Saugung 76, die Diagonale OD stellt die successiven Werte von  $D$  dar, wobei zu bedenken ist, das jeder Wert längere Zeit konstant sein muss. Die entsprechenden Werte von  $P$  fallen dann auf die Hyperbeln, welche je nach dem Werte von  $C$  verschiedene Form haben. Als Beispiele sind hier die Hyperbeln für  $C = 0,4$ ,  $C = 2,0$

und  $C = 4,0$  gezeichnet worden. Die dünner gezeichnete Kurve ganz in der Nähe von der punktierten Hyperbel



Figur 3. Die Beziehung zwischen den gemessenen Druck  $P$  im Kölben und dem zu messenden Holzdruck  $D$  graphisch dargestellt. Die strichpunktierte Diagonale stellt  $D$  vor; die zugehörigen berechneten Werte des  $P$  fallen auf die verschiedenen Hyperbeln, je nachdem die Fehlerkonstante  $C = 0,4$ ,  $C = 2,0$  oder  $C = 4,0$  ist. Die gezogene Linie in der Nähe von der Hyperbel  $C = 0,4$  stellt die gemessenen Drücke  $P$  dar, welche in der ersten Versuchsreihe auf Seite 30 gefunden wurden. Die Nummern links bezeichnen den Unterdruck, rechts den Druck, die obere Horizontale 0—76 stellt den Atmosphärendruck dar, 76—0 ( $E, F$ ) die Saugung von 76 cm oder das absolute Vakuum. Im Gebiete unterhalb  $E F$  ist  $D$  also negativ, während  $P$  natürlich immer positiv bleibt.

$C = 0,4$  stellt die im Versuche bestimmten Werte von  $P$  dar, wie später erörtert werden wird.

Die drei Hyperbeln wurden in folgender Weise konstruiert. Zu einigen Werten von  $P$  wurde der entsprechende  $F$  berechnet; der betreffende Wert von  $P$  wurde auf der Diagonale gesucht und von dem Punkte nach rechts horizontal der Fehler  $F$  ausgemessen. Dieses ergab den Punkt  $P$ ; der entsprechende Punkt  $D$  fand sich als der Schnittpunkt der Vertikalen durch  $P$  mit der Diagonale;  $DP$  war dann gleich  $F$ .

Rechts von  $AB$  ist  $D$  negativ; die entsprechenden Werte von  $P$  werden also nur vorkommen, wenn wirklich aus dem Stumpf Wasser in einen tensilen Wasserfaden aufgenommen würde. Die Gerade  $EF$ , der den Druck vorstellt, ist natürlich allen Hyperbeln Asymptote.

Wir sehen, wie bei regelmässig abnehmendem Druck im Baume der Druck im Kolben immer langsamer sinkt. Ein Vergleichen der inneren Drucke bleibt aber stets möglich so lange ein Abnehmen von  $D$  durch ein deutliches Sinken von  $P$  angegeben wird; solange  $D$  positiv ist und die Konstante  $C$  nicht ausserordentlich gross, ist dieses, wie aus der Figur ersichtlich, wirklich der Fall.

Hat man also zum vergleichen Stümpfe mit gleichem  $C$ , so muss ein etwas beträchtlicher Druckunterschied an den verschiedenen Höhen auch in die Manometer zum Ausdruck gelangen, so lange der innere Druck positiv ist. Wird dieser aber negativ, so treten andere Verhältnisse ein.<sup>1)</sup>

1) Wenn die zu messende Saugung grösser als 76 cm, der Druck also negativ ist, ist die Methode unbrauchbar. Das geht zugleich aus den Kurven aus Figur 3 hervor; denn sehr verschiedene negative Spannungen rufen fast denselben Druck im Kölbchen hervor, das heißt, wenn das eingesogene Wasser in die tensilen Fäden eindringt. Es werden dann aber die stärkeren negativen Spannungen mehr Wasser aus dem Kölbchen einsaugen als die schwächeren,

*c. Bestimmung des Fehlers bei konstanter Saugung.*

Bei Stümpfen mit verschiedenem C werden, so lange der Unterschied der Konstanten nicht allzugross und die zu messenden Spannungen beträchtlich verschieden sind, die Unterschiede hinreichend genau zu erkennen sein. Wie die Verhältnisse in konkreten Fällen zu beurteilen sind kann nur durch Messung des Konstanten Factors C bestimmt werden, daher ich solche an *Sorbus americana* vorgenommen habe und zwar in zweierlei Weise. Weil  $C = \frac{H}{b} a$  kan man zuerst den Wert des konstanten Faktors  $a$  bestimmen, d. h. das Volumen Luft, das pro Sekunde in das Kölbchen eindringt wenn in demselben eine Saugung von 1 cm Quecksilber herrscht und des Faktors  $b$  der die Wasser-durchlässigkeit des Stumpfes darstellt. Aus der Formel ergiebt sich dann der Wert des C. Zweitens aber kann man auch den Wert des Fehlers auf direktem Wege bestimmen indem man künstlich im Stämmchen eine Reihe gemessener Saugungen hervorruft und den entsprechenden Druck im Kölbchen am Aststumpfe bestimmt. Dazu wurde ein möglichst kurzes Stammstück das zwei Äste trug in horizontaler Lage beiderseits mit Glaskölbchen versehen und darin nach einander mit der Strahlpumpe verschiedene gemessene Spannungen erzeugt; die Stümpfe der beiden Ästen aber wurden in der üblichen Weise mit Manometern versehen. Jede Versuchsreihe gab also den Fehler für

daher die Messung des eingesogenen Wasserquantums hier an Stelle der Druckmessungen tritt. Dann aber kann man besser das Wasser aus offenen Behältern einsaugen lassen und man könnte sich dann über die Grösse der Spannungen orientieren, indem man das hindurchgesogene Quantum bei bekannten Saugungen bestimmte und daraus durch Extrapolieren die negativen Spannungen berechnete. Bis jetzt ist mir aber ein derartiger Zustand nicht vorgekommen, auch nicht an hohen Bäumen.

zwei verschiedene Stümpfe. Das Ergebnis war, dass an 4 Stümpfen von verschiedenem Holzquerschnitte der konstante Faktor C den Wert 0,5 erreichte. In Einzelheiten wurden diese Bestimmungen in folgender Weise ausgeführt. Von einem Stämmchen, das denjenigen der Versuchsbäumchen gleich war, wurde unter Wasser der obere Teil abgeschnitten und übergebracht in ein grosses Gefäß mit abgestandenem Wasser zu dem noch ein voller Kessel ausgekochten Wassers gegossen war. Beim Transport blieb die Schnittfläche fortwährend in Wasser eingetaucht. Dann wurden unter Wasser die beiden Äste und der Gipfel des Stammteiles auf der erforderlichen Länge abgeschnitten und die vier Glasapparate angesetzt. Das erste Stammstück war  $19\frac{1}{2}$  cm lang, an der unteren Schnittfläche 16 mm, an der oberen 14,5 mm im Holzquerschitte, der eine Ast sass 7 cm von der unteren Schnittfläche, der andere  $11\frac{1}{2}$  cm; der Holzkörper des Ersteren war 9 mm dick, des zweiten 12 mm; das zweite Stammstück war 18 cm lang, sein Holzkörper unten 15 mm, oben 14,5 mm; die Äste sassen resp. 7,2 und 10,7 cm über der unteren Schnittfläche; ihre Holzkörper waren 7 und 9 mm dick. Die unteren Ansätze e (Figur 1) der Kölbchen oben und unten am Stamme waren durch ein T-Stück mit einander und mit einem Manographen verbunden, die oberen Ansätze h aber mit einer grossen Flasche, in welcher der Druck mit der Strahlpumpe nach einander auf 68, 66 u. s. w. bis 26, 22, 18 u. s. w. bis auf 4 cm gebracht wurde, d. h. auf 8, 10 u. s. w. bis auf 50, 54, 58 u. s. w. bis 72 cm Unterdruck. Der Druck wurde an einem offenen Quecksilber-manometer abgelesen. Die Kolben an den Aststümpfen waren wie beim Versuche am Baume mit zwei anderen Manographen verbunden. Nach jeder Druckerniedrigung wurde so lange gewartet, bis der Druck an beiden Stümpfen völlig konstant war; bei den geringeren Saugungen dauerte dieses

nur 1 bis 2 Minuten; je stärker aber die Saugungen waren, je mehr Zeit die Herstellung des Gleichgewichts in Anspruch nahm, wie sich von vornherein erwarten liess. Auf diesen Punkt komme ich nachher zurück. Weil sich beim Wachsen der Saugung der Luftgehalt der Kölbchen bedeutend vermehrte, war ein Nachfüllen von Wasser während jeder Versuchsreihe erforderlich. Die erhaltenen Druckwerte zeigt die Tabelle in Kapitel V.

Es zeigt sich der konstante Factor C von der Astdicke nicht auffallend abhängig, was auch nicht allzusehr befremdet. Das Quantum Luft, das durch die Verschlüsse eindringt, ist praktisch Null; C hängt also vornehmlich ab von der Wasserdurchlässigkeit des Stumpfes und der Luftabgabe an der Holzschnittfläche; beide werden mit der Astdicke zunehmen, wenn nicht kapillare Ungleichheiten im Stumpfe grosse Unterschiede in den Widerständen hervorrufen; letztere werden aber bei der vollständigen Abschluss der Luft durch das Manipulieren unter Wasser sehr vollkommen vermieden.

Nach obigem ist der Schluss vollständig berechtigt, dass die Fehler bei den Messungen am Stamme von derselben Ordnung sind, d. h. dass sie erst bei *konstanten* Saugungen von mehr als 50 cm einige Bedeutung erlangen und erst bei solche von rund 60 cm beträchtlich werden. Doch werden wir nachher sehen, dass eben bei diesen starken Saugungen die Druckschwankungen einen viel grösseren Fehler verursachen.

Die Bestimmungen nach der ersten Methode wurden wie folgt vorgenommen. An einen Aststumpf am Baume wurde ein Manometerkolben mit Wasserverschluss in der üblichen Weise angesetzt; die Ansätze *i* und *h* (Figur 1) wurden mit einem Messapparat verbunden, der Ansatz *e* mit einer wassergefüllten U-röhre, welche mit einer Luftverdünnten Flasche in Verbindung stand. Die U-röhre trug

im zweiten Schenkel eine Kugel, welche das aus dem Kolben ausgesogene Wasser aufnahm. Der Messapparat bestand aus einem Kölbchen von 50 cc Inhalt, dass ausser zwei Ansätzen, welche mit *i* und *h* verbunden waren, noch einen oberen, weiteren Ansatz trug. Mit Hilfe eines Gummiringes war darauf ein kalibriertes Probirröhren umgekehrt befestigt. Vor Anfang des Versuches war der ganze Apparat bis an die Kugel in der U-röhre mit ausgekochtem Wasser gefüllt. Wenn nun der Druck im Kolben unterhalb der Atmosphärischen gebracht wurde, trat Luft aus der Schnittfläche hervor und sammelte sich im Probirröhren an; wenn nach Ablauf des Versuches der atmosphärische Druck wieder zugelassen wurde, was durch öffnen eines Hahns mit dreifacher Bohrung vor der luftleeren Flasche geschehen konnte, drang das ausgetretene Wasser wieder in das Kölbchen hinein und das Volumen der Luft, welche während der Saugung eingedrungen war, liess sich in der üblichen Weise bei 76 cm Druck bestimmen. Das Volumen zeigte sich ziemlich genau der Saugung proportional; es ist demnach nicht notwendig, in die Gleichung den Einfluss des kapillaren Widerstands an den Gefässmündungen einzutragen.

Die Leitfähigkeit des Holzes *b* wurde bestimmt durch Hindurchsaugen von Wasser durch den nämlichen Stumpf der zur Bestimmung der eingedrungenen Luftmenge gedient hatte; zu dem Zwecke wurde er unter Wasser abgeschnitten. Einwandsfrei ist diese Methode durchaus nicht, weil ein Teil des Stumpfes im Stamme verbleibt; dieses kann aber den gefundenen Wert nur etwas zu gross machen.

Es zeigte sich das Quantum Wasser, dass in der Zeit-einheit hindurchgelassen wird, der Saugung proportional; der aus dem oben bestimmten *a* und dem *b* berechnete Wert des Faktors C ist von derselben Ordnung wie der-

jenige, welcher durch die direkten Fehlerbestimmungen gewonnen wurde. Die erhaltenen Werte zeigt die zweite Tabelle in Kapitel V.

Die auf diesem Wege gewonnenen Werte von C schwan-ken zwischen 0.3 und 0.5; dass sie kleiner sind als die auf der anderen Weise bestimmten Werte liegt nach obigem auf der Hand.

Die Messung der Wasserquanten, welche bei den Ver-suchen am Baume jedesmal nachgeföllt wurden, diente zur Kontrolle der Dichtigkeit der Verschlüsse. Diese Wasser-quanten sollen nämlich stimmen mit den registrierten Saugungen im betreffenden Kölbchen; die geringste Undich-tigkeit äussert sich sofort in einem aussergewöhnlich grossen Wasserverlust des Kölbchens.

*d. Der Fehler bei veränderlichen Saugungen.*

Die Gleichung  $F = \frac{H - P}{P} \times C$  gilt nur, so lange der

Druck im Kölbchen konstant ist. Wenn aber die Saugungen nicht allzu stark sind und die Druckänderungen nicht allzu rasch verlaufen, bleibt sie auch bei veränderlichem Drucke die Beziehung zwischen F und P mit hinreichender Genauigkeit darstellen. Dieses zeigte sich bei der Bestim-mung des Messfehlers: als ich die Saugungen an den Stumpfenden allmählich in einer halben Stunde von 45 bis 30 cm Quecksilber abnehmen liess und danach in derselben Zeit wieder bis 45 cm anwachsen, zeigten die registrierten Saugungen an den Aststümpfen fast genau den Verlauf der Ersteren; der Gipfel war nur sehr wenig gerundet. Werden aber die Saugungen sehr stark so ist, zumal wenn das Kölbchen schon ziemlich viel Luft enthält, mit einer weiteren Zunahme der Saugung ein ausseror-dentlich grosser Wassertransport verbunden, der entspre-chend lange Zeiträume in Anspruch nimmt. Soll die

Saugung im Kölbchen etwa von 64 bis 68 oder 70 cm erhöht werden, der Druck also von 12 bis 8 oder 6 cm erniedrigt bei einem Luftgehalt des Kölbchens von 6 cc, so ist dazu das Einsaugen einer Wassermenge von 2 oder 3 cc erforderlich, ausser dem Quantum welches zur Bekämpfung der Luftleckage dient. Während der Zeit dass sich das neue Gleichgewicht einstellt ist aber bei diesen starken Saugungen auch schon wieder eine beträchtliche Luftmenge eingedrungen, deren Spannung auch bis auf 8 oder 6 cm erniedrigt werden muss; zudem kommt noch dass die Kraft, welche das Wasser treibt (die Druckdifferenz im Kölbchen und im Baume) fortwährend abnimmt daher P immer langsamer sinkt. In einem konkreten Falle bei der Fehlerbestimmung, als der Druck an den Enden des Stammstücks plötzlich von 56 auf 66 cm Unterdruck erniedrigt wurde, wurden die Saugungen an den Stümpfen erst nach einer halben Stunde konstant; bei der weiteren Drucksenkung von 66 auf 70 cm Unterdruck trat Gleichgewicht erst nach einer weiteren halben Stunde ein.<sup>1)</sup>

1) So lange der Druck P konstant ist spielt der Luftgehalt V des Kölbchens keine Rolle. Weiter ist die Temperatur T bei der Ableitung der Formel konstant gedacht. Ist diese aber veränderlich und die Saugungen also auch, so müssen T und V beide mit in Rechnung gezogen werden sowie auch das Quantum Wasser, welches das Manometerrohr zu seiner Betätigung aufnimmt oder abgibt. Letzteres hat wie sofort einleuchtet eine Vergrösserung des Fehlers zur Folge, ich habe deshalb Bourdonmanographe gewählt welche weniger Wasser brauchen als gleich zuverlässige Quecksilbermanographe.

Der Einfluss all dieser Factoren lässt sich mathematisch berechnen, doch gestalten sich die erhaltenen Formeln weniger einfach. Wenn man z. B. bloss mit dem Einfluss der Temperatur auf der Luft im Kölbchen rechnet, wobei also die Volumänderungen des Wassers in Kölbchen und Manometerröhre, des Kölbchens und der

Diese Umstände veranlassten mich, den Messbereich des Manographen nicht unter etwa 44 cm Unterdruck auszudehnen. Weil bei nicht allzu trockenem Wetter der Druck nie unter diesen Wert sank, hoffte ich die Verdunstung auf ein beliebiges Mass herabsetzen zu können, indem ich die Versuchsbäumchen mit einem Zelt umgab, in welchem eine Spritze fortwährend in Tätigkeit stand; der Sommer des Jahres 1911 war aber anhaltend so ausserordentlich heiss und trocken, dass dieses gar nicht gelang; die Federn sanken wiederholt unter den Messbereich und das Evaporometer zeigte starke Verdunstung auch im nassen Zelte.

#### e. Einfluss der Gefüssverstopfung.

Mit den oben Besprochenen ist aber die Zahl der Faktoren, welche auf den Gang der Manometer einwirken, nicht erschöpft. Als wichtiger Faktor kommt noch die langsame Verstopfung der angeschnittenen Gefässe durch Schimmel-pilze und Bakterien hinzu, welche nur durch eine vollkommen sterile Behandlung verhindert werden könnte. An einer Solchen konnte aber nicht gedacht werden. Ich suchte zwar durch regelmässiges Ausspülen der Wasser-verschlüsse und der Kölbchen dieselben möglichst rein zu halten, konnte aber bei dem heissen Wetter eine Verstopfung der Gefässe nicht verhindern; bei nachheriger

**Manometer selbst u. s. w. vernachlässigt werden, wird die Beziehung zwischen P und F dargestellt von der Gleichung:**

$$F = \frac{Ra}{b} \times \frac{T(H - P)}{P} + \frac{V}{bT} \frac{dT}{dt} - \frac{V}{bP} \frac{dP}{dt};$$

R ist die Gaskonstante, T die absolute Temperatur, t die Zeit; die übrigen Buchstaben behalten ihre alte Bedeutung bei. Die Funktion giebt nur den Zustand für jeden Augenblick an; sie zeigt den Einfluss der Geschwindigkeit der Temperatur- und Druckänderungen. Sie hat aber praktisch keinen Wert.

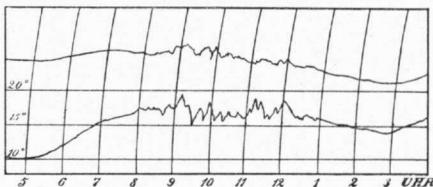
Prüfung fanden sich ganze Anhäufungen schleimiger, zum Teil brauner Massen in den Gefässen vor. Dadurch wird die Durchlässigkeit der Stümpfe immer geringer, während die Luftleckage, wie die nachträglichen Bestimmungen lehrten, in viel geringerem Grade vermindert. Die gemessenen Saugungen bleiben dadurch immer mehr hinter den zu Messenden zurück, um so mehr aber, wie oben erörtert, je stärker letztere sind. Dieses wird in den Kurven in dieser Weise zum Ausdruck kommen, dass die ganze Kurve mit der Zeit eine steigende Tendenz erhält und der mittlere registrierte Druck jeden Tag höher ausfällt; dass aber die Druckminima schneller steigen als die Maxima und also die Schwankungen schwächer werden. Wir werden sehen, dass dieses in den registrierten Kurven deutlich hervortritt. Auf diese Erscheinung komme ich noch zurück.

Wenn die Verstopfung aber weiter fortschreitet, verursacht sie ausserdem noch eine horizontale Verschiebung der registrierten Maxima und Minima gegen die zu Messenden und zwar aus zwei Gründen. Wenn der innere Druck  $D$  sinkt, muss das Volumen der im Kölbchen vorhandene Luft vergrössert werden, bis diese den entsprechenden geringeren Druck  $P$  erreicht hat. Dazu ist ein Wegfliessen von Wasser durch den Stumpf erforderlich was durch die Gefässverstopfung nicht schnell geht. Auch bei mittleren Saugungen bleibt  $P$  dadurch in seinen Schwankungen bei denjenigen von  $D$  zurück. Demzufolge wird  $P$  noch sinken, wenn  $D$  schon wieder steigt, denn  $P$  wird erst wieder zu steigen anfangen, sobald  $D$  den Wert passiert der nach der ursprünglichen Gleichung dem augenblicklichen Werte von  $P$  entspricht. Dieser Wert ist das *registrierte Minimum*, das also zeitlich nach dem *wahren Druckminimum* fällt, jedoch nie soviel, dass es ausserhalb des Gebietes der wirklichen Saugungen gelangt.

Weil dieses aber bei den Versuchen tatsächlich wohl geschieht, muss eine weitere Ursache hinzukommen, welche die Druckmessungen verdirbt. Als solche wirken die Temperaturschwankungen. Diese verursachen durch die abwechselnde Erwärmung und Abkühlung des Kölbcheninhalts starke Druckänderungen im Kölbchen, die je nach dem Grade der Verstopfung die gemessenen Drücke mehr oder weniger weit gegen die zu Messenden verschieben, bis schliesslich der registrierte Druck gerade den entgegengesetzten Verlauf hat als der wahre Druck im Holze, wie aus dem Folgenden hervor geht. Sobald die Temperatur der Umgebung steigt, wächst die Transpiration und sinkt der Druck D im Holze. Der Stumpf lässt nur wenig Wasser aus dem Kölbchen durch, folglich sinkt P nur langsam. Der Kölbcheninhalt dehnt sich aus und vermehrt den Druck P. Die erste Folge des Temperatursteigens wird also sein eine Erhöhung des registrierten Druckes und umgekehrt, wie auch regelmässig von mir beobachtet wurde. Dieses wird namentlich und schon bei geringer Verstopfung auftreten bei plötzlichen Temperaturänderungen, wie bei dem Öffnen und Schliessen des Zeltes um den Baum und dem Ansetzen und Abstellen des Spritzapparates. Auch die kleinen Schwankungen, welche alle Manometer bei Sonnenschein zeigen, sind am Temperaturwechsel des Kölbcheninhalts zuzuschreiben: ich konnte sie immer hervorrufen, wenn ich die Kölbchen abwechselnd den Sonnenstrahlern aussetzte oder diese durch ein Schirmchen abwehrte. Die betreffenden Teile der Kurven zeigen tatsächlich grosse Übereinstimmung mit der Temperaturkurve (Fig. 4). Das Nachfüllen von Wasser geschah aus einer Flasche, die immer in der Nähe des Bäumchens stand, damit das Wasser dieselbe Temperatur hatte wie das Wasser in die Kölbchen. Wenn ich einmal etwas zu kaltes Wasser nahm, trat auch sofort nach dem Schliessen

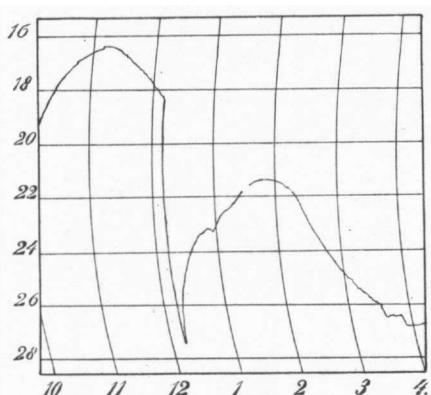
der Quetschhähne Druckerhöhung ein durch die Erwärmung des Wassers.

Bei dem grossen, langsamem Wechsel von Tages- und Nachttemperatur verursacht die Wärmezunahme am Morgen auch zuerst ein Steigen der Manometer, wenn die Verstopfung der Gefässse schon einigermassen fortgeschritten ist. Durch dieses Steigen und auch weil indessen der Druck D im Holze abnimmt, nimmt der Wassertransport durch den Stumpf zu; der Druck im Kölbchen muss sinken, sobald das Wegfliessen von Wasser die Wärmeausdehung übertrifft. Wenn dann nach einigen Stunden die Temperatur wieder abnimmt und der Druck im Holze D steigt, sinkt P durch die Zusammenziehung des Kolbeninhalts noch immerfort, weil D und P sich nicht schnell genug mehr ausgleichen. Erst nach kürzerer oder längerer Zeit, je nach dem Masse der Verstopfung, wird auch P zunehmen. Durch diese Vorgänge werden also die registrierten Maxima und Minima in der oben angedeuteten Weise verschoben. Wenn schliesslich die Verstopfung des Stumpfes vollkommen ist, bildet das System Kölbchen-Manometer nur noch ein schlechtes selbstregistrierendes Thermometer; dieses zeigt natürlich den höchsten „Druck“ bei den höchsten Temperaturen, während bei dem Druck im Holzinnern das Verhältnis gerade umgekehrt ist. Auch diese Erscheinung tritt bei längerer Dauer der Versuche regelmässig ein, wie wir bei der Besprechung der erhaltenen Druckkurven sehen werden.



Figur 4. Oben Manographenkurve, unten die zugehörige Temperaturkurve um die Abhängigkeit der kleinen Schwankungen von der Temperatur zu zeigen.

Als ich am zweiten Tage nach dem Ansetzen das Kölbchen eines Stumpfes mit Aether und Gebläse abkühlte,



Figur 5. Kurve des 4. Manometers am 28 Juli um den Einfluss der Abkühlung zu zeigen. 12 Uhr 20 Min. wurde das Kölbchen mit Aether gekühlt; das Manometer sank mehr als 9 cm Quecksilber; erst nach etwa zwei Stunden war der Einfluss verschwunden.

stattet, die Temperaturerniedrigung bei jeder Prüfung gleich gross zu nehmen.

verursachte dieses nur eine geringe Druckabnahme; 6 Tage später aber eine sehr bedeutende (mehr als 9 cm Quecksilber), wie in Figur 6 dar gestellt; man hat also in der künstlichen Abkühlung ein zuverlässiges Mittel, den Grad der Gefässverstopfung zu kontrollieren, zumal wenn man in die Kölbchen ein kleines Thermometer an bringt, welches ge-

## KAPITEL V.

### Beschreibung der Versuche.

Die Versuche wurden angestellt an zwei jungen Exemplaren von *Sorbus americana*, die fast genau gleichen Habitus hatten, gleich alt waren und unter genau denselben Umständen gewachsen, nur war das zweite etwas weniger reich beblättert als das erste. Während des Versuches waren sie fast genau gleichen Bedingungen ausgesetzt,

da sie nur etwa zwei Meter von einander entfernt standen Ein Bild ihres Habitus erhält man aus den Tafeln I und II. Das erste Bäumchen war 330 cm hoch von der Erde ab bemessen, sein Stämmchen war 2 cm über der Erde 55 mm in Durchmesser, 10 cm höher 45 mm, in 48 cm Höhe 33 mm, in 58 cm Höhe 30 mm, in 220 cm Höhe 18 mm. Über seine ganze Länge war der Stamm besetzt mit gesunden, reich beblätterten, unter sich fast gleichen Ästen; die Äste sassen resp. in einer Höhe von 21 (1), 37 (2), 45 (3), 55 (4), 64 (5), 67 (6), 79 (7), 89 (8), 100 (9), 121 (10), 138 (11), 146 (12), 150 (13), 166 (14), 204 (15), 210 (16), 215 (17), 218 (18), 223 (19), 229 (20), 224 (21) cm. Ast 3 hatte einen Durchmesser von 12,2 mm, Ast 4 von 13,5 mm, Ast 5 von 9,3 mm, Ast 16 von 7,3 mm, Ast 17 von 9,8 mm, Ast 9 von 12,8 mm; ihre Holzkörper waren resp. 8,1 mm, 9,2 mm, 6,5 mm, 5,0 mm, 6,7 mm und 9,4 mm dick. Diese Äste wurden zum Ansetzen der Apparate gewählt. Der Vertikalabstand zwischen den Ästen 3 und 5 betrug nach den obigen Angaben 19 cm, zwischen 3 und 17—170 cm. zwischen 5 und 19—159 cm, zwischen 4 und 16—155 cm; kontinuirliche Wassersäulen von entsprechender Länge würden demnach einen Druck ausüben von resp. 1,4 cm (3 bis 5), 12,5 cm (3 bis 17), 18,1 cm (3 bis 19), 11,1 cm (5 bis 17), 11,7 cm (5 bis 19) und 11,4 cm (4 bis 16).

Weil schwächere Saugungen sich nach Seite 84d genauer messen lassen als stärkere, war es notwendig die Verdunstung der Blätter beliebig herabsetzen zu können. Zu diesem Zwecke wurde der Baum am 26 Juni 1911 in ein Zelt eingehüllt (Tafel I), das aus 4 senkrechten, weissen Kattuntüchern und einem schiefen oberen Tuche als Dach bestand; die Tücher waren auf ein hölzernes Gerüst ausgespannt und liessen sich leicht abnehmen. In dem Zelte konnte ich durch zwei sehr feine, stark verstäubende Wasserstrahlen einen gleichmässigen Regen auf den Baum

fallen lassen, der auch zugleich drei Wände des Zeltes permanent nass hielt.

Am 29 Juni schnitt ich den siebzehnten Ast unter Wasser ab und setzte den Glassapparat an. Zur vorläufigen Orientierung setzte ich ihn mit einem offenen Quecksilbermanometer in Verbindung. Das Wetter war an dem Tage sehr heiss und trocken; obgleich die Spritze fortwährend in Tätigkeit war, zeigte das Manometer eine Saugung von 60,3 cm Quecksilber. Weil ich (Seite 34d) mit weniger starken Saugungen zu arbeiten wünschte, wartete ich weniger trockenes Wetter ab. Ich vergrösserte indessen die Kapizität der beiden Spritzen; das um den Stamm herabfallende Wasser fing ich zum grössten Teil auf ein passend gebogenes Blech auf. Am 4 Juli trat weniger trockenes Wetter ein; das Manometer stand gegen Mittag auf 40 cm. An dem Tage schnitt ich die weiteren drei Äste, die ich für den Versuch bestimmt hatte, unter Wasser ab und setzte die Glasapparate an; es waren die Äste 3, 5 und 19. Von 6 Uhr Abends an, wurde der Druck in jedem der 4 Kölbchen durch den Seite 17 bis 22 beschriebenen Manographen registriert. Auch das Kölbchen auf Stumpf 17 hatte ich mit dem Manographen in Verbindung gestellt. Die Bourdonröhren sowie die verbindenden Kapillaren waren mit ausgekochtem destilliertem Wasser gefüllt; ich hatte sie aber in diesem Zustande geaicht durch Vergleichung mit einem offenen Quecksilbermanometer; der Druck der verschiedenen Wassersäulen in den Apparaten wurde dadurch selbsttätig in Abzug gebracht.

Die Aichung und die Technik des Abschneidens unter Wasser findet sich Seite .

Im Zelt (Tafel I) zeichnete ein RICHARDSCHER Thermo graph die Temperatur auf; zum Schutze gegen das herabfallende Wasser war ein Blechkasten mit einer Glaswand über denselben gestülpt; das Reservoir ragte aber aus den

Kasten hervor. Zum bequemen anhängen der Büretten und der anderen Hilfsapparate diente eine Kette, welche am Dache des Zeltes befestigt war und bis auf den Boden reichte (Tafel I und II). Der Manograph war ausserhalb des Zeltes aufgestellt. Bis 13 Juli 4.30 Nachmittag wurde das Ganze sich selbst überlassen; ich sorgte nur dafür dass rechtzeitig Wasser in die Kölbchen beigegeben wurde und überwachte den Manographen; auch spülte ich jede zwei Tage die Kölbchen, jeden Tag die Wasserverschlüsse mit destilliertem ausgekochtem Wasser aus, natürlich ohne dass je die Schnittflächen mit der Luft in Berührung kamen. Weiter untersuchte ich den Einfluss des Spritzens indem ich dann und wann das geschlossene Zelt öffnete und das Spritzen unterbrach. Dieses ist jedesmal auf den Kurvenfiguren angegeben mit *T*, der entgegengesetzte Vorgang mit *N*.

Am 13 Juli zeigte das Manometer 5 einen Druck oberhalb der Atmosphäre. Ich öffnete das Kölbchen (2 Uhr Nachmittag) so dass der Druck gleich dem Atmosphärischen wurde. Ich wollte nämlich wissen, ob sich dieser Überdruck bald wieder einstellen würde. Dieses geschah aber nicht: es stieg zwar das Manometer wieder etwas über die Nulllinie, jedoch erreichte es nicht wieder den ursprünglichen Stand, obwohl die anderen Manometer in derselben Zeit noch etwas empor gerückt waren. Am selbigen Tage, 4.30 Nachmittags, entfernte ich die Glasapparate um sie einer gründlichen Reinigung zu unterwerfen; weiter versah ich den Stumpf mit einer frischen Schnittfläche indem ich ihn etwa 1½ cm einkürzte. Schliesslich setzte ich die Apparate wieder in Tätigkeit. Bei diesen Arbeiten blieb der Stumpf fortwährend unter Wasser. Am anderen Tage (14 Juli) behandelte ich Stumpf 3 in gleicher Weise; zum Schlusse aber stellte ich in seinem mit Wasser gefüllten Kölbchen eine starke Luftverdünnung her mit Hilfe einer

grossen luftleeren Flasche; der dazu konstruierte Glasapparat (Seite 32) diente um das Quantum Luft zu messen, das aus der Schnittfläche hervor kam. Auch Stumpf 5 sog ich in derselben Weise aus. Das Luftaussaugen wurde 10 Minuten fortgesetzt; alsdann liess ich die Kölbchen ebenso lange offen stehen, damit die Spannungen Gelegenheit hatten sich auszugleichen; hierbei drang aber nur wenig Wasser in die Stümpfe ein. Am nächsten Tage (15 Juli) nachmittags 3½ bis 5 Uhr handelte ich mit den Stümpfen 19 und 17 ebenso; hierbei stand 17 einige Sekunden trocken. Auch konnte ich dieses Kölbchen nach dem Auspumpen nur eine Minute lang offen lassen; die Nachwirkung der künstlichen Saugung zeigt sich deutlich in der Kurve. Es gaben die Stümpfe in derselben Zeit (10 Minuten) alle fast gleich viel Luft: 3 gab 2,4 cc, 5 gab 2,4 cc, 19 gab 2,2 cc und 17 2,6 cc. Am 18 Juli tötete ich den Stamm des Versuchsbäumchens. Zu diesem Zwecke umgab ich den Stamm mit einem Mantel aus Eisenblech der zum Durchtritt der Äste mit passenden Löchern verschen war, und umwickelte das Blech mit Watte. Von 5 bis 8 Uhr Abends sandte ich einen kräftigen Dampfstrom um dem Stamm, indem ich den Dampf am unteren Ende in den Blechmantel einführte. Um die Blätter zu schonen, leitete ich den Dampf ab durch ein biegssames Eisenrohr, das mit Hilfe eines Wattepropfes genügend dicht in das obere Ende des Mantels eingeführt war; in diesem Rohre kondensierte der Dampf fast vollständig. Während der ganzen Zeit war die Temperatur im Mantel unten 95 bis 96° C., in der Mitte 80 bis 82° C., am oberen Ende 63 bis 70° C. Die Kölbchen, welche sich alle ausserhalb der Watte befanden, standen während der Dampfbehandlung offen; ihre Temperatur stieg etwa 15° Celsius. Um 8 Uhr abends, als die Brühung abgelaufen war, füllte ich die Kölbchen ganz und schloss sie wieder, worauf die Registration der

Kurven wieder anfing. Am 20 Juli stand die Trommel während 1½ Stunde still.

Am 21 Juli entfernte ich die Manometer von den Stümpfen 5 und 17, welche völlig verstopft waren, und füllte deren Kölbchen mit einer Lösung von Säureviolett  $\frac{1}{10}\%$  in Wasser.<sup>1)</sup> Die beiden freigekommenen Manometer setzte ich an die Äste 4 und 16 welche ich dazu in der gewöhnlichen Weise abgeschnitten und mit Kölbchen versehen hatte.

Nach dem Abtöten des Stammes blieben die Blätter noch vier Tage lang absolut unverändert, am fünften Tage zeigten einige Blätter einen schmalen braunen Rand; am sechsten (27<sup>sten</sup> Juli) waren diese viel breiter geworden, und traten sie an fast allen Blättern auf. Nach dem 28<sup>sten</sup> Juli dorrrten die Blätter schnell: am 30<sup>sten</sup> Juli waren sie vollkommen trocken und zerreiblich.

Am 27<sup>sten</sup> Juli entfernte ich das Zelt mit dem Spritzapparat vom Baume und setzte es um das zweite Versuchsbäumchen. Die Feder des Manometers 16 stellte ich, weil er immer zu tief sank, auf einen tieferen Messbereich, am 28<sup>sten</sup> Juli wurde der neue Stand geaicht.

Am Mittag dieses Tages untersuchte ich den Einfluss, welchen Temperaturänderungen auf den Verlauf der Manometer hatten, indem ich Kölbchen 4 umgab mit einem Leinwandtuch das ich mit Äther nass hielt; den Äther brachte ich mit Hilfe eines Gebläses zum schnellen Verdunsten. Der Teil der Kurve, welche die Folgen dieser Operation enthält, ist in Figur 5 (Seite 40) gesondert dargestellt und allda besprochen worden.

Nach Beendigung des Versuches wurden die Manometer in Situ geaicht und von den Kölbchen entfernt. Kölbchen

1) K. Zijlstra, Bijdragen tot de kennis der Waterbeweging in de planten, Verg. Wis- en Nat. Afd. Kon. Akad. v. Wetensch. Amsterdam, Jan. 1910.

16 füllte ich mit Säureviolettlösung; es stand offen und der Stumpf nahm in 4 Minuten 20 cc der Lösung zu sich. Körbchen 4 enthielt zur Zeit der Manometerabnahme noch 190 cc Wasser, das ich mit Pikrinsäure gelb färkte; die Lösung verschwand in 55 Minuten. Als die Schnittfläche drei Minuten trocken gestanden hatte, füllte ich das Körbchen mit Säureviolettlösung; diese drang nur schwer ein: am Abend des nächsten Tages war noch nur etwa 70 cc aufgesogen. Ein Auspumpen der Luft wirkte nichts aus. Am nächsten Tage waren die Blätter trocken; es blieben die Körbchen nog drei Tage lang am Stamme, während dessen die Stümpfe nur wenig Farbstofflösung mehr aufnahmen.

Nach dem Fällen des Bäumchens zeigte sich, dass in die Stümpfe 3, 5, 17 und 19 nur äusserst wenig Farbstoff eingedrungen war: nur einige mm des Holzes unterhalb der Schnittfläche waren bläulichviolett. Diese Stümpfe waren also völlig verstopft; sie hatten in der letzten Woche auch kein Wasser mehr aufgenommen. Die Farbe, welche von den Stümpfen 4 und 16 aufgenommen war, bildete (Figur 7) einen gemeinsamen Streifen im Holze, welcher beide Stümpfe verband; als ich den Stamm in dezimeterlange Stücke zerlegte, zeigte sich, dass die Färbung sich auf die beiden jüngsten Jahresringe beschränkte.

Das zweite Bäumchen war 328 cm hoch; sein Stämmchen war 10 cm über dem Boden 50 mm in Durchmesser und wie das erste über seine ganze Länge mit Ästen besetzt, die aber etwas weniger reichblättrig waren.

Der *erste* Ast sass 37 cm hoch, der zweite 43 cm, der *dritte* 53,5 cm, der vierte 60 cm, der *fünfte* 97,0 cm, der *sechste* 10,7 cm, der *siebente* 127 cm, der *achte* 136 cm, der *neunte* 148 cm, der *zehnte* 172 cm, der *elfte* 210 cm,

*der zwölften 231 cm, der dreizehnten 236 cm, der vierzehnten 237 cm, der fünfzehnten 248 cm, der sechzehnten 253 cm.*

Der Vertikalabstand zwischen dem ersten und dritten Äste war also 16,5 cm, zwischen dem ersten und zwölften 194 cm, dem ersten und dreizehnten 199 cm, zwischen 3 und 12 — 177,5 cm, zwischen 3 und 13 — 182,5 cm, zwischen 12 und 13 — 5 cm. Die Äste lieferten die Versuchsstämpfe. Der Holzkörper von Stumpf 1 war 9,1 mm dick, der von Stumpf 3 — 8,2 mm, der von Stumpf 12 — 7,2 mm, von Stumpf 13 — 8,9 mm. Kontinuierliche Wassersäulen entsprechender Länge würden also einen Druck ausüben von resp. 1,1 cm (1 bis 3), 14,3 cm (1 bis 12) 14,6 cm (1 bis 13), 13,1 cm (3 bis 12), 13,4 cm Quecksilber (3 bis 13).

Am 27 Juli setzte ich das Zelt mit dem Spritzapparat um den Baum; die Spritze blieb vorläufig ausser Tätigkeit. Schon am 26 Juni hatte ich den Stamm mit Blechmantel und Watte umgeben um ihn zu töten. Am 1 Augustus leitete ich von 3 Uhr 15 Min. bis 5 Uhr Nachmittags Dampf durch den Mantel. Nach 3 Minuten war die Temperatur am oberen Ende 60° C., nach 6 Min. 67° C., hier blieb sie bis 5 Uhr stehen.

Gleich nach dem Brühen entfernte ich den Mantel vom Stamme und setzte die Spritze in Tätigkeit. Am folgenden Morgen waren die Blätter vollkommen frisch, sie sahen sogar gesunder aus als die der benachbarten Bäumchen derselben Art, welche nicht von der Spritze profitiert hatten. An dem Tage schnitt ich die Äste 1 und 3 unter Wasser ab, setzte die Wasserverschlüsse an und liess die Stämpfe während einer halben Stunde eine halbgesättigte wässrige Pikrinsäurelösung aufnehmen; es wurden davon etwa 70 cc in jeden Stumpf eingesogen. Dan setzte ich die tubulierten Körbchen an und schloss dieselben. Darauf handelte ich desgleichen mit den Ästen 12 und 14; um

3 Uhr Nachmittag waren die Apparate fertig zum Ansetzen der Manometer. Weil aber aus den Schnittflächen wieder ein wenig Pikrinsäure in Lösung gegangen war, spülte ich die Kölbchen noch einige Male mit viel ausgekochtem destilliertem Wasser durch. Bei dieser Operation wurde meine Aufmerksamkeit einen Augenblick abgelenkt, es stand dadurch Stumpf 14 einige Sekunden lang trocken. Darum entfernte ich die Apparate von diesem Stumpfe und setzte sie an Stumpf 13 wieder an, nachdem ich den dreizehnten Ast genau so behandelt hatte als die andern; 7 Uhr abends war alles fertig; ich schloss das Zelt und setzte die Spritze in Tätigkeit. Die Blätter waren noch vollkommen normal. 3 Aug. 7.30 setzte ich die Manometer der oberen Stümpfe in einen tieferen Messbereich; sie konnten dadurch eine Saugung von 60 cm noch registrieren. Mit diesem Augenblicke fängt das Druckdiagramm des Versuches an, das in Figur 6 dargestellt ist. Wie beim Diagramm des ersten Bäumchens ist hier das Schliessen des Zeltes und öffnen des Spritzhahns mit *N*, der entgegengesetzte Vorgang mit *T* angegeben.

Der dritte August war ein feuchter, warmer Tag, mit nur schwacher Verdunstung. Die Blätter waren noch völlig normal; am 4<sup>ten</sup> und 5<sup>ten</sup> August fingen sie aber an sich an der Spitze zu bräunen, am 6<sup>ten</sup> zeigten sie plötzlich breite, tote, aber noch grüne Ränder mit nur einem schmalen lebenden Streifen in der Mitte, wie ich durch Plasmolyse feststellte; am folgenden Tage waren sie völlig trocken und spröde. Die Manometer, welche schon am 6<sup>ten</sup> nicht mehr so tief gesunken waren als das Wetter erwarten liess, entfernte ich von den Kölbchen nachdem ich ihre Aichung noch einmal in situ kontrolliert hatte. Die Kölbchen füllte ich mit Säureviolett  $\frac{1}{10}\%$ .

Es wurde von der Lösung nur wenig mehr aufgenommen, doch zeigten vier blaue Streifen über den Holzkörper,

welche über den unteren und unter den oberen Versuchsstümpfen ansetzten und isoliert neben einander verliefen, dasz die Manometer nicht mit einander kommuniziert hatten.

Die Lücke in der Temperaturkurve entstand dadurch, dass die Trommel des Thermographen während dieser Zeit stillstand, obgleich ich das Gehwerk jeden Mittag aufzog.

*Das Abschneiden der Äste unter Wasser und das Anbringen der Glasapparate geschah in folgender Weise. Aus dünnem Messingblech schnitt ich mir ein gleichschenkeliges rechtwinkeliges Dreieck zurecht, dessen rechten Winkel ich kreisförmig ausschnitt; aufgerollt lieferte mir dieses Dreieck einen Trichter mit ziemlich weiter schiefer Öffnung. Weiter stellte ich ein dergleichen aber in allen Dimensionen etwas grösseres Dreieck her aus Gummi von dem ich eine passend grosze Fläche zusammengeklebt hatte aus Stücken eines alten Luftreifens. Ein dünner Messingstreifen wurde an das eine Ende eines viel stärkeren Streifens zu einem T-Stücke angénietet; dann wurde das Gummi tuch um den Messingtrichter herum gelegt, der dünne Streifen des T-Stückes aussen am Rande darum gelegt, so, dass das stärkere Band über eine beschreibende Linie des Trichters fiel und schliesslich Messingtrichter, Gummi und Streifen C an einigen Stellen zusammen genietet. Ich hatte also einen Trichter der seitlich offen war und um den Ast gebunden werden konnte. Die Ränder des Gummitrichters ragten unten und an den Seiten über die des Kupfertrichters hervor; ich konnte also das Gummi wasserdicht um den Ast herum festbinden und den seitlichen Spalt schliessen, indem ich die Ränder mit drei Klammern zusammendrückte. Wenn ich dann den Trichter mit ausgekochtem destilliertem Wasser füllte, konnte ich ohne Mühe mit einem gewöhnlichen Messer den Ast unter Wasser durchschneiden. Der innere Kupfertrichter*

verhütete ein Verletzen des Gummisackes welches sich ohne denselben schwer vermeiden lässt.

Bevor ich den Apparat um den Ast befestigte reinigte ich die betreffende Stelle und auch noch ein grosses Stück des angrenzenden Stammes mit einer steifen Bürste und vielem Wasser. Nachdem der Ast unter Wasser abgeschnitten, war es ein Leichtes, die Wasserverschlüsse und die Manometerkolben anzubringen, ohne dass die Schnittfläche je mit Luft in Berührung kam. Dazu schob ich die Verschlüsse, die sich beim Eintauchen in den Trichter von selbst mit Wasser füllten, über die Schnittfläche. Der Gummischlauch war so weit genommen, dass er sich von selbst wasserdicht um den Ast zusammenzog während er sich ohne allzugrosse Mühe über die Rinde verschieben liess. Sobald der Wasserverschluss angebracht war konnte ich ohne Gefahr den Trichter entfernen weil die Glaskugel einen neuen Wasserbehälter bildete. Dann schnitt ich einen Rindenring unterhalb des Gummischlauches ab, dabei sorgfältig vermeidend den Holzkörper zu verletzen; die Stelle wurde so gewählt, dass sie sich beim fertigen Apparate genau unterhalb des Gummischlauches *c* und oberhalb *f* (Figur 1) in dem Wasser des Verschlusses befand. Also war ein Einsickern von Luft längs der Rinde und durch die Rindeninterzellularen in die Manometerkolben völlig ausgeschlossen. Während der obigen Manipulation lag der dazu bestimmte Manometerkolben bereit; die Gummischläuche seiner Tuben waren zugequetscht, mit Ausnahme des weitesten der über den Stumpf geschoben wird; weiter war das Kölbchen mit ausgekochtem destilliertem Wasser gefüllt. Sobald der Ring entfernt und die wunde Stelle mit Wasser abgespült war, verschloss ich den weiten Tubus des Manometerkölbchens beim Umkehren mit dem Finger und öffnete ihn erst wieder unter dem Wasser des Verschlusses, sodass kein Wasser herauslief;

sodann schob ich ihn über den Stumpf und zugleich den Verschluss so weit nach unten, dass der Gummischlauch des Manometerkölbens frei kam; diesen schnürte ich mit Kupferdraht um den Ast fest zu. Schliesslich füllte ich die Wasserdichtung und brachte sie in ihre definitive Lage, und hiermit war der Apparat fertig um mit dem Manometer in Verbindung gestellt zu werden.

*Die Aichung der Manometer* und die Bestimmung des Wasserquantums welches sie pro cm Druckvermehrung aufnahmen, geschah in folgender Weise. Die Kapillaren, welche die Glaskolben über den Stümpfen mit dem Manographen verbinden sollten, wurden in genau derselben Weise wie später am Baume an eine Art Galgen aufgehängt; oben war jede mit einer fast horizontal gestellten, etwa  $\frac{1}{2}$  cm weiten Röhre verbunden; es befanden sich also diese Röhren in den Höhen der verschiedenen Äste am Stamme, sodass die in Rechnung zu tragenden Wassersäulen bei der Aichung und beim Versuche gleich hoch waren. Die Bourdonröhren waren zuerst sehr sorgfältig mit destilliertem Wasser ausgespült worden und blieben während des ganzen Versuches vollständig mit Wasser gefüllt, ebenso die verbindenden Kapillaren. Bei der Aichung stand das Wasserniveau etwas unterhalb der Mitte des schiefen Ansatzrohres. Diese Ansatzröhren aller vier Manometer waren mittelst eines dünnen, relativ starkwandigen Gummischlauches verbunden mit vier Ansätzen eines Glasröhrchens; ein fünfter Ansatz führte nach einem offenen Quecksilbermanometer. Ein sechster bot die Gelegenheit, in allen Apparaten zugleich die Luft zu verdünnen. Es herrschte in dieser Weise derselbe Druck in den horizontalen Röhren, welche die Kolben am Baume repräsentierten und im Quecksilbermanometer. Die Aichung selbst wurde nun wie folgt ausgeführt: zuerst herrschte

an allen Stellen der Atmosphärendruck; die Registrierfedern wurden bei diesem Drucke auf 0 gestellt, die Trommel mit der Hand einen vollen Umgang gedreht. So entstand die 0-linie. Dann wurden durch Aussaugen von Luft mit dem Munde nach einander Unterdrücke (Saugungen) von 2, 4, 6, bis 44 cm Quecksilber hergestellt und jedesmal die Trommel um ein kleines Stück mit der Hand gedreht. In dieser Weise entstanden auf der Trommel kurze horizontale Striche, die 2, 4, 6 u. s. w. bis 44 cm Quecksilberdruck vorstellten; die betreffende Zahl wurde jedesmal daneben geschrieben. Dann wurde von unten nach oben, das heisst von 44 bis 0 cm, dasselbe wiederholt; beide Strichserien stimmten genau mit einander überein, zum Beweise, dass die Reibung der Federn auf dem Papier keinen merklichen Einfluss hatte.

Während der Unterdruck im Apparate von 0 bis 44 cm sank, trat aus den Bourdonröhren natürlich etwas Wasser aus, dessen Volumen gemessen wurde. Dieses geschah, indem die Niveaus des Wassers in den schiefen Röhren bei Atmosphärendruck und bei 44 cm Unterdruck markiert wurden; nach dem Auseinandernehmen des Apparates füllte ich dann das Horizontalrohr bis an die obere Marke mit Wasser, liess dieses bis an die untere Marke abfliessen und wog das abgeflossene Wasser. Es zeigte sich, dass die vier Bourdonröhren alle gleich viel Wasser abgegeben hatten und zwar 2,4 cc für 44 cm Druckunterschied. Diese Bestimmung ist natürlich nur eine ziemlich rohe, doch war sie für den vorliegenden Zweck vollkommen ausreichend.

*Die erhaltenen Kurven* sind einer Diskussion nicht sofort zugänglich, weil sie durch die Stellung der vier Federn (Seite 20) in horizontalem Sinne gegen einander verschoben sind. Ausserdem gehen die Skalen der einzelnen Kurven nog ein wenig auseinander; es war demnach

notwendig, sie auf dasselbe Mass zu reduzieren und die zeitlich zusammengehörigen Punkte unter einander zu bringen, wie auf Tafel III dargestellt. Zu dem Zwecke wurde für jede Kurve ein Papierband mit dem entsprechenden Koordinatensystem versehen, die vertikalen Koordinaten in Kreisbogenform deren Radius gleich der Schreibfederlänge war, in Horizontalabständen gleich der Strecke welche die Trommel in einer Stunde zurücklegte; die horizontalen Koordinaten gerade, in Abständen welche für das betreffende Manometer mit 2 cm Quecksilberdruck übereinkamen. Mit Hilfe von Karbonpapier und Glasstift wurden dann die entsprechenden Kurven auf dem Diagrammpapier abgedruckt. Die Übertragung aller vier Kurven auf ein einziges Koordinatensystem geschah dann in folgender Weise.

Auf einen weissen Karton wurden je 5 mm aus einander horizontale Linien gezogen, deren Abstände 2 cm Quecksilberdruck darstellten; weiter stellten vertikale Linien in Abständen von 2 mm die Stunden vor. Es wurden die Kurven mit Hilfe dieses Liniennetzes alle vier auf dem Karton abgezeichnet; die Schnittpunkte der Kurven mit Linien wurden bestimmt und durch gerade Striche verbunden. Diese Arbeit erfordert viel Ausdauer; sie wurde mit grosser Sorgfalt und Genauigkeit ausgeführt von Herrn L. van Wolde, Zeichner des Instituts. Kleinere Krümmungen innerhalb der Rechtecke wurden vernachlässigt; sie würden bei dieser kleinen Skala auch nur geschadet haben. Wo ich sie für meine Betrachtungen brauchte, habe ich die betreffenden Teile der Kurve gesondert grösser abgebildet (Figur 4 und 5). Von den Stundenlinien wurden nur vier pro Tag mit Tusche gezogen, nämlich zwölf Uhr nachts und mittags, sechs Uhr morgens und abends, die anderen später wegradiert. Die Mitternachtslinien wurden als Tagesgrenzen etwas stärker gewählt.

Der Druck ist in der Weise dargestellt, dass die obere Horizontallinie (die 0-Linie) den Druck der Aussenluft vorstellt; der Unterdruck (die Saugung) wurde nach unten ausgesetzt; die Zahlen 4 bis 44 geben also die Saugungen an. Ein Unterdruck von 34 cm bedeutet, dass im Glaskolben am Stumpfe ein Druck herrscht von  $H - 34$  cm, wenn  $H$  die Barometerhöhe vorstellt.

Die einzelne Kurve in der zweiten Skala stellt die Temperatur vor während des Versuches. Sie wurde erhalten mittelst des Richardschen selbstregistrierenden Thermometers, das im Zelte zwischen den Ästen des Versuchsbäumes aufgestellt war. Es zeigte sich bei genauer Prüfung, dass die Trommel der Richardschen Apparate nicht regelmässig dreht, sondern bisweilen sogar eine halbe Viertelstunde vorgehen, beziehungsweise zurückbleiben kann im Verlaufe weniger Tage, namentlich wenn der Apparat, wie hier, im Freien aufgestellt ist. Ich habe die Fehler so gut wie möglich korrigiert, die restierenden Fehler sind jedenfalls so klein, dass sie hier ohne Einfluss bleiben. Die Übertragung der Originalkurven auf den Karton geschah wie bei den Druckkurven, nur dass hier ein Zwischenstadium nicht notwendig war.

#### TABELLE.

I. Tabelle der direkt gemessenen Werte des Fehlers  $F$  und der daraus berechneten Werte des konstanten Faktors  $C$  (Seite 26). D der Druck an den Enden des Stammstumpfes,  $P$  der Druck welcher sich in dem Kölbchen über den betreffenden Stumpf einstellte,  $F$  der Messfehler ( $P - D$ ); nur von der ersten Bestimmung sind die Drücke von 68 bis 6 cm alle aufgenommen, von den übrigen nur diejenigen von 22 cm bis ungefähr 6 cm, weil nur diese einen brauchbaren Wert ergeben.

## A. Erster Ast; Holzquerschnitt 9 mm.

D	P	F	76-P	C
68	68	0	8	—
66	66	0,0	10	—
64	64	0,0	12	—
62	62	0,0	14	—
60	60	0,0	16	—
58	58	0,0	18	—
56	56	0,0	20	—
54	53,7	— 0,3	22,3	—
52	51,7	— 0,3	24,3	—

D	P	F	76-P	C
50	49,7	— 0,3	26,3	
48	47,9	— 0,1	28,1	
46	45,7	— 0,3	30,3	
44	44,0	0,0	32,0	
42	42,1	0,1	33,9	
40	40,0	0,0	36,0	
38	37,8	— 0,2	38,2	
36	35,9	— 0,1	40,1	
34	34,0	+ 0,0	42,0	

D	P	F	76-P	C
32	32,0	0,0	44,0	
30	30,0	0,0	46,0	
28	28,2	+ 0,2	47,8	
26	26,0	0,0	50,0	
22	22,8	+ 0,8	53,2	0,4
18	19,4	+ 1,4	56,6	0,5
14	15,7	+ 1,7	60,3	0,4
10	13,0	+ 3,0	63,0	0,6
6	9,3	+ 3,3	66,7	0,5

D	P	F	76-P	C
22	22,3	+ 0,3	53,7	0,1
18	19,3	+ 1,3	56,7	0,4
14	16,0	+ 2,0	60,0	0,5
10	12,6	+ 2,6	63,4	0,5
34	8,0	+ 4,6	68,3	0,5

## B. Zweiter Ast; Holzquerschnitt 12 mm.

D	P	F	76-P	C
22	22,9	0,9	53,1	0,4
18	19,4	1,4	56,6	0,5
14	16,0	2,0	60,0	0,5
10	12,5	2,5	63,5	0,5
6	9,2	3,2	66,8	0,4

D	P	F	76-P	C
22	23,1	1,1	52,9	0,5
18	19,3	1,3	56,7	0,4
14	16,2	2,2	59,8	0,7
10	12,4	2,4	63,6	0,5
5	9,0	4,0	67,0	0,5

D	P	F	76 - P	C
22	23,1	1,1	52,9	0,5
18	19,4	1,4	56,6	0,5
14	15,9	1,9	60,1	0,5
10	12,8	2,8	63,2	0,6
5,5	9,0	4,1	66,4	0,7

## C. Dritter Ast; Holzquerschnitt 7 mm.

D	P	F	H-P	C
22	22,9	0,9	53,1	0,4
18	19,6	1,6	56,4	0,6
14	16,0	2,0	60,1	0,5
10	12,7	2,7	63,3	0,5
6	—	—	—	—

D	P	F	H-P	C
22	23,2	1,2	52,8	0,5
18	—	—	—	—
14	15,9	1,9	60,1	0,5
10	12,9	2,9	63,1	0,6
5,8	10,1	4,3	65,9	0,6

D	P	F	H-P	C
22	23,0	1,0	53,0	0,4
18	19,5	1,5	56,5	0,5
14	15,9	1,9	60,1	0,5
10	12,6	2,6	63,4	0,5
3,8	8,4	4,6	67,6	0,6

## D. Vierter Ast; Holzquerschnitt 9 mm.

D	P	F	H - P	C
22	22,6	0,6	53,4	0,3
18	19,6	1,6	56,4	0,6
14	15,9	1,9	60,1	0,5
10	12,8	2,8	63,2	0,6
4	8,6	4,6	67,4	0,6

D	P	F	H-P	C
22	23,2	1,2	52,8	0,5
18	19,3	1,3	56,7	0,4
14	15,7	1,7	60,3	0,4
10	12,4	2,4	63,6	0,5
6,4	9,9	3,5	66,1	0,5

D	P	F	H-P	C
22	23,3	1,3	52,7	0,6
18	19,4	1,4	56,6	0,5
14	16,1	2,1	59,9	0,6
10	12,6	2,6	63,4	0,5
5	9,2	4,2	66,8	0,6

II. Tabelle der direkten Messung der konstanten Faktoren  
 a und b; a die pro Stunde eintretende Luftmenge bei  
 1 cm Saugung, in Kubikmillimetern, b die pro Stunde  
 durch den Stumpf geflossene Wassermenge bei einem Druck-  
 unterschied von 1 cm, in Kubikcentimeter ausgedrückt.

*1. Durchmesser des Holzkörpers 12 mm.*

Saugung H-P.	In 10 Stunden abgegebenes Luftquantum, gemessen bei 76 cm	a in kubik mm	Druck- differenz	In 1 Stunde durch geflos- senes Wasser- quantum in cub. cm	b in kubik cm
10	1,35 cc	13,5	10	36,2	3,62
20	2,85 "	14,0	20	66,3	3,31
30	4,3 "	14,3	30	102,4	3,41
40	5,8 "	14,5	40	120,7	3,02
50	7,4 "	15,0	50	141,9	2,84
Mittel: a = 14,3 cmm			Mittel: b = 3,24 cc		

$$C = \frac{76 \times 14,3}{3240} = 0,34$$

*2. Durchmesser des Holzkörpers 10 mm.*

Saugung 76-P.	In 10 Stunden abgegebenes Luftquantum, gemessen bei 76 cm	a in kubik mm	Druck- differenz	In 1 Stunde durch gelas- senes Wasser- quantum in cub. cm	b in kubik cm
10	1,0 cc	10	10	24,5	2,45
20	2,3 "	11,5	20	48,2	2,41
30	3,6 "	12,0	30	60,4	2,01
40	4,6 "	11,5	40	84,7	2,12
50	5,7 "	11,5	50	100,6	2,01
Mittel: a = 11,3 cmm			Mittel: b = 2,20 cc		

$$C = \frac{76 \times 11,3}{2200} = 0,39$$

Bei einigen Versuchen an anderen Bäumen zeigte sich deutlich der Einfluss des kapillaren Widerstandes an der Schnittfläche, indem zum Beispiel bei einer Saugung von 20 cm nur 9 kubikmillimeter, bei einer solchen von 30 cm aber 13 kubikmillimeter Luft pro Stunde und pro centimeter Saugung in das Kölbchen hineinleckte (*Cydonia*

*vulgaris*), ein anderes Mal bei 20 cm Saugung 15 Kubikmillimeter, bei 36 cm 22 Kubikmillimeter (*Crataegus monogyna*). In diesen Fällen traten auch tatsächlich erst bei einigen centimeter Saugung Luftblasen ein. Für diesen Fall hätte die Gleichung eine kleine Änderung zu erfahren, indem die eindringende Luftquanten nicht direkt der Saugung proportional sind sondern der Saugung nach Abzug eines konstanten Betrages. Dieses hat nur einen geringen Einfluss auf den Verlauf des Fehlerwerts und zwar einen günstigen.

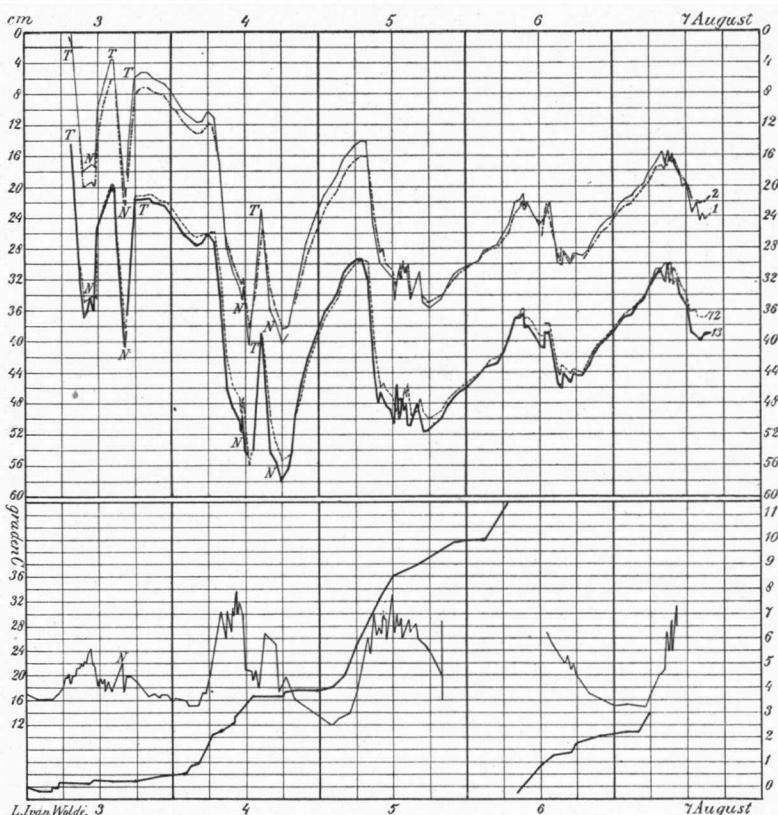
## K A P I T E L VI.

### Diskussion der Versuche.

Tafel III und Figur 6 stellen die erhaltenen Druckdiagramme vor, nachdem diejenige desselben Versuchsbäumchens alle auf ein gleiches Mass reduziert und die zeitlich zusammengehörigen Punkte der verschiedenen Kurven vertikal untereinander gebracht sind in der Seite 53 beschriebenen Weise. An beiden Versuchsbäumchen (*Sorbus americana*) war unten und oben ein Manometerpaar angebracht, das höhere Paar beim ersten Bäumchen etwa 162 cm, beim zweiten 188 cm über das untere, beim ersten Bäumchen am dritten und fünften, am siebzehnten und neunzehnten Ast, beim zweiten Bäumchen am ersten und dritten, am zwölften und dreizehnten Ast. Zuerst bespreche ich die Kurven des ersten Bäumchens, Tafel III.

Die punktierte Kurve gehört zu Stumpf 3, die schwere, gezogene zu Stumpf 5, die dünne gezogene zu Stumpf 17, und die strichpunktiierte zu Stumpf 19. Die obere horizontale Linie stellt den Druck der Atmosphäre vor; die Saugungen sind vertikal nach unten abgemessen, die Zeit horizontal nach rechts; die Zahlen 4, 8, 12 u. s. w.

stellen den Unterdruck (die Saugung) in cm Quecksilber dar; die horizontalen Intervalle stellen Zeiträume von 6 Stunden dar. Die Tage sind durch schwerer gezogene Linien, die Mitternachtslinien, von einander getrennt.



Figur 6.

Unterhalb der Druckkurven ist die zugehörige Temperaturkurve angebracht; sie wurde erhalten mittelst eines Richardschen Termographen.

Figur 6 zeigt unterhalb der Druckkurven ausser der

Temperaturkurve, deren Skala auf der linken Seite angegeben ist, die Kurve des Richardschen Evaporographen; sie verläuft schief durch das Feld von unten nach oben und stellt in ihrer Neigung die Verdunstungsgeschwindigkeit dar. Die Nummern auf der rechten Seite sind die des Evaporographen.

Das Kölbchen am 17. Ast (Tafel III, dünn gezogen) wurde einige Tage vor den Andern angesetzt; der Stumpf war dadurch beim Anfang der Registrierung schon merklich verstopft, daher die zugehörige (dünn gezogene) Kurve weit weniger starke Schwankungen zeigt als die drei Anderen.

Es zeigen aber alle Kurven an den ersten vier Tagen ein Druckminimum (eine maximale Saugung) in den Mittagstunden, wenn die Transpiration am stärksten ist; die Saugungen fallen sämtlich unterhalb des Meszbereichs des Manographen. Dieses stimmt mit der längst bekannten Tatsache, dasz in nicht allzugrosser Entfernung von transpirierenden Blattflächen die Saugung den Schwankungen der Verdunstung folgt. Nachts tritt demnach ein Druckmaximum (Saugungsminimum) ein. Dasz dieses Druckmaximum in der zweiten Nacht weniger hoch war als in der ersten, erklärt sich aus den Wetterverhältnissen. Die erste Nacht zeichnete sich durch einen kalten, schweren Nebel aus, der die Verdunstung so gut wie unmöglich machte; die zweite Nacht war noch etwas nebelich, jedoch nur sehr wenig, während die Dritte einen klaren Himmel und eine nur mäsig feuchte Luft brachte. Die vierte und namentlich die fünfte Nacht waren sogar ziemlich trocken, zudem wurde während der fünften Nacht nicht gespritzt. Das Evaporometer zeigte dementsprechend in der ersten Nacht eine ausserst geringe Verdunstung, in der zweiten, dritten und vierten, namentlich aber in der fünften eine erheblich stärkere. Das spätere Ansteigen der Maxima sowie der Minima ist aber eine Folge der nach und nach zu-

nehmenden Verstopfung der Gefäsze in den Stümpfen, durch welche nach Seite 36 die gemessenen Druckwerte immer höher ausfallen, indem der Fehler immer wächst, zumal aber bei den stärkeren Saugungen. Die steigende Tendenz der ganzen Kurve, welche nach Seite 37 zu erwarten ist, tritt sehr deutlich zu Tage. Die Kurve des fünften Aststumpfes (die schwere gezogene) z. B. überschreitet die Athmosphärenlinie am 13 Juli; die Erscheinung wird verursacht durch die vollkommene Verstopfung des Stumpfes; dadurch wird kein Wasser mehr aus dem Kölbchen ausgesogen während immer mehr Luft aus dem Holze und Wasser aus den Wasserverschlüssen hineinleckt; dadurch steigt der Druck bis er durch die Erwärmung bei Tage oberhalb des atmosphärischen Druckes steigt, bei Nacht durch die Abkühlung unterhalb desselben sinkt und bei Tag im Mittel gleich viel Luft und Wasser aus dem Kölbchen ausgepreszt wird als Nachts hineinleckt. Als ich am Mittag des dreizehnten Juli etwas Luft aus dem Kölbchen entweichen liesz, zeigte sich die Kurve nachher etwas tiefer: sie fing aber sofort wieder zu steigen an. Auch die andern Kurven steigen mit der Zeit an; jedoch weniger schnell. Die Verstopfung ist offenbar in den verschiedenen Kurven verschieden rasch fortgeschritten, was sich auch kaum anders erwarten lässt.

Sehr deutlich ist die Seite 37 besprochene zeitliche Verschiebung der Maxima und Minima durch das immer stärkere Vorherrschen der Ausdehnung und Zusammenziehung des Kölbcheninhalts durch die Temperaturschwankungen über die Druckmessung. Noch bis 8 Juli fallen die maximalen Saugungen genau mit den höchsten Temperaturen, also mit der maximalen Verdunstung zusammen, 10 Juli aber schon gar nicht mehr. Am 11, 12, 13, 14 Juli zeigt Kurve 5 schon fast genau denselben Verlauf als die Temperaturkurve; sie ist in der Tat auch nichts Weiteres als eine Solche.

Am 14, 15, 18 und 21 Juli fallen grosse Unregelmässigkeiten auf. Diese sind sämmtlich äusseren Eingriffen zuzuschreiben indem:

am 14 Juli 3 und 5, am 15 Juli 17 und 19 neu abgeschnitten und injiziert wurden (Seite 48),

am 18 Juli der Baum getötet wurde (Seite 44) und am 21 Juli die Manometer von den verstopften Stümpfen 5 und 17 entfernt und an neue Stümpfe 4 und 16 angesetzt wurden, was eine neue Aichung erforderlich machte. Nach 21 Juli 6 Uhr Abends stellt also die schwere Kurve die Saugung von Stumpf 4 vor, die dünne diejenige von Stumpf 16.

Letztere reagierten während der ersten Tagen auf einem öffnen des Spritzhahns und schliessen des Zeltes (N) mit einem sofortigen steigen des Druckes, auf den entgegengesetzten Vorgang (T) mit sofort verstärkter Saugung; einige Tage später aber nicht mehr, indem zuerst während einiger Minuten der Einfluss der Temperaturänderung vorherrschte; dieses kommt in der Kurve noch nicht zum Ausdruck, weil der Effekt zu gering war. Am 26 Juli ist aber die Verschiebung der Druckmaxima gegen die Temperaturminima schon deutlich; dieses stimmt mit den Resultaten der Aetherkühlung (Seite 40), welche im Anfang fast keinen Effekt hatte, am 28 Juli aber eine Drucksenkung von 9 cm hervorrief (Figur 5, Seite 40).

Die Kurven des zweiten Bäumchens (Figur 6, Seite 59) bieten, gesondert besprochen, nichts neues, bloss ist hier der Unterschied in der Reaktion auf dem Öffnen des Zeltes und Einstellen des Spritzens (T) und dem entgegengesetzten Vorgang (N) am Anfang und später deutlich sichtbar. Während am 3 August die Kurven bei T sofort sinken, bei N sofort steigen, tritt schon am 4 August bei T zuerst eine geringe Steigung, bei N eine Senkung ein.

Es bleiben jetzt noch die Druckdifferenzen am selbigen Stamme zu diskutieren übrig. Nach obigem sind nur die Teile von 4 bis 9 Juli wahre und zuverlässige Druckmessungen und, was die Stümpfe 4 und 16 betrifft, diejenige von 21 bis etwa 25 Juli; der zuverlässige Teil von Kurve 17 (dünn gezogen) fällt vor Anfang der Registrierung (Seite 60).

In diesen Teilen saugt 19 regelmässig stärker als 5, dieser fast immer stärker als 3; nachts stimmt der Unterschied ihrer Saugungen fast mit dem hydrostatischen Druckunterschied überein; auch bei Tage ist dieses annähernd der Fall.

Die Kurven 4 und 16, die am 21<sup>sten</sup> Juli anfangen, als der Stamm schon tot war, verhalten sich gegenseitig ganz anders. Ausgenommen am 23 Juli zeigt 16 überall eine tiefe, scharf markierte Einsenkung, wo 4 eine viel weniger tiefe hat. Dieses Kurvenpaar stimmt auf das vollkommenste überein mit dem Druckverlauf an zwei über einander gelegenen Punkten derselben Röhre bei direkter Wasserhebung. Die Einsenkungen fallen jedesmal zusammen mit dem Auftreten verdunstungsfördernder Ursachen, wie Temperaturerhöhung oder Einstellen des Spritzens.

Die Kurven des zweiten Versuchsbäumchens (Figur 6) zeigen im Ganzen denselben Charakter als die des Ersten im Anfang. Namentlich aber fällt auf, dass die Druckdifferenzen sowohl bei den schwachen als bei den stärksten Saugungen dem hydrostatischen Druckunterschied nur sehr wenig übersteigen. So ist am 3 August 2 Uhr 15 n.M. die Saugung von 1:3,5 cm, von 2:6 cm, von 12 und 13:20 cm. Als ich dann das Spritzen einstellte und das Zelt öffnete (T) waren um 4 Uhr n.M. die Saugungen gewachsen bis 22 cm am unteren Manometerpaar, 40,5 am oberen. Also waren zuerst die Druckdifferenzen von 1 bis 12 und 1 bis 13 gleich 16,5 cm; 2 bis 12 und



2 bis 13 gleich 14 cm Quecksilber; später aber alle gleich 18,5 cm; die hydrostatischen Druckunterschiede sind resp. 1 bis 12: 14,3 cm; 1 bis 13: 14,6 cm; 3 bis 12: 13,1 cm; 3 bis 13: 13,4 cm. Bei einer Drucksenkung von fast 20 cm in nur 13 Stunden trat ein Wachsen der Druckdifferenz von nur 2 resp. 4,5 cm ein.

Die Ursache des ungleichen Verhaltens des verschiedenen Manometerpaare zeigte sich nach der Farbstoffinjektion: es waren nur 4 und 16 am ersten Bäumchen durch einen ununterbrochenen gefärbten Streifen im Holze mit einander verbunden, wie Figur 7 zeigt; die zwei Manometer waren also an dieselbe Wasserbahn angesetzt. Die 4 Manometerstümpfe des zweiten Bäumchens kommunizierten dagegen gar nicht; die von ihnen ausgehende Farbestreifen zeigten keinerlei Zusammenhang, auch nicht als ich das ganze Stämmchen durch Querschnitte in dezimeter-lange Stücke zerlegte.

Das eigentümliche gegenseitige Verhalten der Manometer an den Stümpfen, welche keine Kommunikation zeigten, dasz sie nämlich fast genau den hydrostatischen Druckunterschied zeigten, unabhängig von der Transpirationsgrösze ist mir vorläufig unerklärlich. Eine kleine Zunahme der Druckdifferenz bei steigender Saugung ist allerdings zu beobachten, doch ist dieselbe bei Weitem nicht so grosz, als mit Rücksicht auf den Schwankungen des Widerstandes zu erwarten wäre. Mit der Lebenstätigkeit des Holzes hat die

Figur 7. Stamm des 1. Bäumchens, geschält.  
Der farbige Streifen scharz wo er an der Vorderseite, punktiert wo er an der Rückseite verläuft.  
Die Versuchsstäbe nummeriert.

Erscheinung nichts zu tun, weil das tote Stämmchen sich genau so verhält wie das lebende. Die auf der Hand liegende Erklärung, dass die Druckerniedrigung bei starker Verdunstung lediglich dazu diente, die Wasseraufnahme durch die Wurzeln zu steigern, während die Zunahme der Widerstände zum Vernachlässigen gering sei, wird widerlegt durch das Verhalten der Manometer 4 und 16 welche grosze Schwankungen des Widerstands zeigen.

Es spielt hier vielleicht die Verteilung der Blattflächen über die verschiedenen Wasserbahnen, an welche die Manometer angesetzt waren, eine hervorragende Rolle; die Farbstoffinjektion zeigte, dass bisweilen ein kleines Segment eines Astes von der gefärbten Wasserbahn versorgt wurde, während die anderen Teile desselben, oft dünnen Ästchens ganz farblos waren. Hier liegt ein interessantes Problem vor, davon bis jetzt noch gar wenig und vor allem wenig sicheres bekannt ist.

Zum Schlusse möchte ich auf die zitierte SCHWENDENER-sche Druckmessung<sup>1)</sup> zurückkommen. Dieselbe wurde ange stellt an einer jungen Eiche von etwa 16 cm Stamm durchmesser. Am 7 Juni wurde innerhalb der Krone eine mit Wasser gefüllte offene Manometerröhre in 15 Minuten leer gesogen (über die Menge des eingesogenen Wassers fehlt nähere Auskunft), während ein in mittlerer Höhe, noch über den untersten Ast angebrachtes Manometer zwar gleichsinnig, aber sehr schwach reagierte und ein zunächst der Basis befindlicher gar keine Veränderung zeigte. Der Tag war ein warmer. Nach 3 bis 4 regnerischen kalten Tagen (am 10 und 11 Juni) trat in das mittlere Manometer Luft aus dem Baume ein, das Wasser

---

1) S. Schwendener, Untersuchungen über das Saftsteigen, Sitzungsber. Kön. preuss. Akad. d. Wissensch. Berlin, 1886 II S. 584.

vor sich her drängend; während unten am Stämme und oben in der Krone weder Saugen noch Bluten zu bemerken war. Die Manometer waren an pfriemenförmige Metallspitzen angesetzt, die in frisch gemachte Bohrlöcher eingezwängt waren. Die Spitzen waren bis in die Nähe der Spitze längs durchbohrt und hinter der Spitze mit zwei bis drei Reihen von seitlichen Öffnungen versehen, welche die Kommunikation der Bohrlöcher mit dem Spitzennern herstellten. Die Metallspitzen waren mit etwa 15 cm langen und 2 bis 3 mm weiten Glaskröpfchen in Verbindung.

Ein vollständiger Luftabschluss während der Einführung wäre nach SCHWENDENER zwecklos, weshalb er die Bohrlöcher ohne Luftabschluss herstellt. Nach meiner Erfahrung macht es aber einen grossen Unterschied, ob man die Bohrlöcher resp. die Schnittflächen unter Wasser oder bei Luftzutritt ausführt: im ersten Falle nehmen die Wunden meistens zwei bis dreimal so schnell Wasser auf als im zweiten. Wenn also schon beim Anbringen der Manometer eine mehr oder weniger weitgehende Verstopfung der Gefässe stattfand kann sicher nach drei bis vier Tagen keine Gewähr geleistet werden für eine gute Kommunikation mit dem Bauminnern; die beobachtete Erscheinung kann demnach sehr wohl hervorgerufen sein durch die oben diskutierten sekundären Ursachen.

## Z U S A M M E N F A S S U N G.

1. Druckmessungen, in der beschriebenen Weise an Aststümpfen ausgeführt ergeben während der ersten Tage nach dem Ansetzen mit relativ grosser Genauigkeit den wahren Druck im Holze.
  2. Nach einigen Tagen verstopfen sich die angeschnittenen Gefässe. Dadurch werden die Messungen unbrauchbar. Durch künstliche Abkühlung der Kölbchen an den Stümpfen lässt sich der Grad der Verstopfung kontrollieren.
  3. Die von SCHWENDENER wiederholt angeführte Druckmessung, bei welcher von drei in verschiedener Höhe angesetzten Manometern das Mittlere den höchsten Druck aufgewiesen hätte, beruht wahrscheinlich auf Täuschung durch Verstopfung der angeschnittenen Gefässe und Ausdehnung des Manometerinhalts durch Temperatursteigung.
  4. Bei *Sorbus americana* bilden die Gefässe des Stammes mehrere, von einander praktisch isolierte Wasserbahnen; sogar bei dünnen Stämmchen ist es ein glücklicher Zufall, wenn beim Ansetzen einiger Manometer gerade ein Paar derselben auf dieselbe Wasserbahn trifft. Durch Einsaugenlassen von Säureviolett  $\frac{1}{10}\%$  lässt sich darüber Sicherheit erlangen.
  5. Die an *Sorbus americana* erhaltenen Daten lassen sich nicht unbegrenzt verallgemeinern. Sie gelten nur für Baumarten, welche denselben Grad der Kommunikation ihrer Gefässe aufweisen und vorläufig nur für kleine Bäumchen.
-

## T A F E L E R K L Ä R U N G.

### Tafel I. Anordnung des Versuches.

Der 1. Versuchsbaum im Zelte, der Manograph in Tätigkeit im Schutzkasten. Sichtbar links das Wasserleitungsrohr, das sich etwas unterhalb des Querbodens im Zelte verzweigt; die vordere Brause welche aus dem Tuche hervorragt, der Thermograph auf dem Querboden unter Blechkasten, und die Kette welche von oben längs dem Stamm herunterhängt; an ihr hängt eine Bürette. Von den Kölbchen ist nur dasjenige von Stumpf 4 auffallend, weil es infolge der augenblicklichen Pikrinsäurefüllung schwarz sieht; es zeigt den zweiten Nachfüllungsansatz seitlich.

Tafel II. Unterer Teil des 1. Versuchsbäumchens mit dem Manographen dessen Schutzkappe abgenommen. Das Tuch vom Zelte entfernt und durch Gaze ersetzt zum Schutz gegen die zahlreichen Amseln: am oberen Teil noch ein Seitenwand sichtbar.

Das Bild zeigt den Glasapparat des 3. Stumpfes, weniger deutlich dasjenige des 5. Stumpfes, weiter die Verbindungen mit dem Manographen, die Kette zum Anhängen der Nebenapparate und das Wasserleitungsrohr.

Tafel III. Druckkurven des 1. Versuchsbäumchens samt der zugehörigen Temperaturkurve. Die Saugungen sind nach unten ausgemessen und mit 0 bis 44 (cm Quecksilber) bezeichnet, punktiert die Kurve des dritten, schwer gezogen die des fünften, dünn gezogen die des siebzehnten, strichpunktiert die des neunzehnten Stumpfes; von 21 Juli 6 Uhr nachmittags an aber schwer gezogen: Kurve des vierten, dünn gezogen die des sechszehnten Stumpfes, letztere sinkt am 22 und 27 Juli in das Gebiet der Temperaturkurve hinein. N = nasz, T = trocken.



