

**Zeitschrift:** Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidg. Tech. Hochschule, Stiftung Rübel, in Zürich

**Herausgeber:** Geobotanisches Institut, Stiftung Rübel (Zürich)

**Band:** 74 (1981)

**Artikel:** Zum Wasserhaushalt verschiedener Strassenbaumarten unter dem Einfluss der winterlichen Streusalzanwendung = Water regime of several roadside tree species as influenced by the use of de-icing salt in winter

**Autor:** Spirig, Amadeus

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-308642>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

**Zum Wasserhaushalt verschiedener  
Strassenbaumarten unter dem Einfluss der  
winterlichen Streusalzanwendung**

**Water regime of several roadside tree species as influenced  
by the use of de-icing salt in winter**

von Amadeus SPIRIG

1981



## Inhalt

Vorwort	5
1. Einleitung und Problem	6
1.1. Die Anwendung von Auftaumitteln	6
1.2. Standortbedingungen in der Stadt	6
1.2.1. Bodenstruktur und Nährstoffe	7
1.2.2. Klimatische Faktoren	7
1.2.3. Schadfaktoren direkt anthropogenen Ursprungs	8
1.2.4. Zusammenfassung von 1.2.	8
1.3. Funktion und Wert von Strassenbäumen	8
1.4. Ziel der eigenen Untersuchungen	9
2. Salzwirkungen, Salzschiiden und Salztoleranz	11
2.1. Streusalz und Boden	11
2.2. Spritzschaden an Fernstrassen	12
2.3. Veranderungen der Mineral- und Inhaltsstoffe bei Pflanzen	12
2.4. Morphologische und ultrastrukturelle Wirkungen	14
2.5. Salz und Stoffwechsel	15
2.6. Salz und Wasserhaushalt	16
2.7. Salztoleranz von ausgewählten Gehölzen	17
3. Material und Methoden	18
3.1. Auswahl der Untersuchungsobjekte	18
3.2. Standorte	18
3.3. Probennahme	19
3.4. Messgrössen und Methodik	20
4. Resultate	28
4.1. Jahresgänge	28
4.2. Jahreszeitliche Abhängigkeit der nachmittäglichen Tendenzen	40
4.3. Verhalten der Arten während der sommerlichen Stressphase	45
5. Diskussion	50
5.1. Sind die Ergebnisse repräsentativ?	50
5.2. Vergleich der Baumarten	52
Zusammenfassung	59
Summary	60
Literatur	61





## Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Oekologie der Technischen Universität Berlin unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. R. Bornkamm und am Geobotanischen Institut der ETH, Stiftung Rübel, Zürich unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. E. Landolt während der Jahre 1974 bis 1980 durchgeführt und geschrieben. Sie wurde aus den Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unterstützt.

Für die Gewährung von Stipendien bedanke ich mich bei der Einwohnergemeinde Olten, dem Kanton Solothurn und der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Ohne sie wäre meine Dissertation nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr. R. Bornkamm, TU Berlin, danke ich für das Thema, seine Hilfe und seinen Rat bei der Durchführung der Arbeit sowie für die Möglichkeit, die Einrichtungen seines Institutes zu benützen.

Herrn Prof. Dr. E. Landolt, ETH Zürich, danke ich für sein Wohlwollen, seine Ratschläge und seine Unterstützung bei der Gestaltung der Dissertation.

Herrn PD Dr. A. Gigon, ETH Zürich, und Herrn Prof. Dr. J. Oertli, ETH Zürich, danke ich für ihre konstruktiven Anregungen und ihre Beratung bei der Auswertung und Interpretation meiner Ergebnisse.

Herrn Dr. R. Horn, TU Berlin, und Herrn Dr. W. Bennert, Universität Bochum, danke ich für ihre fachliche Information und Hilfe.

Frau E. Heideklang fertigte die Zeichnungen an und beriet mich in graphischen Fragen; Frau M. Zander führte einige Bestimmungen durch. Bei beiden bedanke ich mich.

Schliesslich danke ich all denen, die mich durch ihr Interesse, ihren Rat und ihre Hilfe direkt oder indirekt unterstützt und so zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen haben.

## 1. Einleitung und Problem

### 1.1. Die Anwendung von Auftaumitteln

Die Verwendung von Natriumchlorid und anderen Salzen zur Beseitigung von Schnee- und Eisglätte wurde bereits in den ersten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts diskutiert. Der praktische Gebrauch in grösserem Umfang erfolgte in den USA in den vierziger Jahren, in der Bundesrepublik Deutschland, der Schweiz und anderen europäischen Ländern erst ab Anfang der sechziger Jahre (RUGE 1978). Als Gründe für den Einsatz der Abtaumittel anstelle der bis anhin üblichen Abstumpfmittel werden angegeben (CARLIER 1966):

- effizientere und länger anhaltende Wirkung
- Möglichkeit zur mit wesentlich geringerem Material- und Arbeitsaufwand verbundenen Präventivsalzung (ZULAUF 1966a)
- Absinkung der durch Winterglätte verursachten Unfälle (AHLBRECHT 1966, Zeitschriftenanzeigen der deutschen Salzindustrie)
- Sicherstellung der Versorgung der Bevölkerung und der Industrie (Ausfall von Arbeitsstunden, verspätete Lieferungen etc.)
- bei richtiger Dosierung ist das Naturprodukt Salz unschädlich (Zeitschriftenanzeigen der deutschen Salzindustrie)

Demgegenüber betrachtete man die durch vermehrte Korrosion entstehenden Kosten (BUKOWIECKI 1966) als geringfügig; durch entsprechende Massnahmen wären Salzschäden an Autos und Strassen leicht zu verhindern (CARLIER 1966). Die Belastung des Grundwassers durch das im Schmelzwasser gelöste Natriumchlorid wurde - im Verhältnis zu anderen vorhandenen Schadstoffen wie Blei und unter Berücksichtigung der Gesamtbelastung der Gewässer - als gering beurteilt, wenn auch über lokale Schadfälle berichtet wurde (MICHELSEN 1972, HUTCHINSON 1970).

### 1.2. Standortbedingungen in der Stadt

Für eine ausführliche Behandlung sei auf die zusammenfassenden Arbeiten von MEYER (1978), RUGE (1968, 1975) und BERNATZKY (1969) verwiesen. Der folgende kurze Abriss basiert auf den Inhalten dieser Publikationen, welche nicht einzeln zitiert werden.

#### 1.2.1. Bodenstruktur und Nährstoffe

Kennzeichnend für die Verhältnisse im Stadtgebiet ist ein durch einen hohen Kalkgehalt (Bauschutt, Mörtel!) verursachter alkalischer pH-Wert, welcher die Nährstoffversorgung wegen der dadurch verminderten Löslichkeit der Mineralstoffe (vor allem der Schwermetalle) erschwert. Die Aktivität der für viele Bäume obligaten *Mycorrhiza*-Symbionten wird ebenfalls verringert.

Der Anteil der Grobporen (Äquivalenzdurchmesser  $> 0.01$  mm) im Boden wird durch zunehmende Verdichtung (Verkehr, Bebauung!) vermindert. Da diese Poren für die Durchlüftung des Bodens verantwortlich sind, entsteht nach Regenfällen - bei welchen die Mittel- und Feinporen mit Wasser gefüllt werden - ein Sauerstoffdefizit im Boden, welches zur Denitrifikation führen kann.

Durch die Laubentfernung im Herbst werden die dem Boden entzogenen Nährstoffe aus dem Mineralstoffkreislauf entfernt. Der ohnehin meist humusarme Boden verarmt weiter an Nährstoffen. Zusätzliche Quellen wie Bauschutt und Kehrricht sorgen im allgemeinen für eine ausreichende Kalziumversorgung, aber andere Nährstoffe wie Kalium und Phosphor bleiben knapp.

#### 1.2.2. Klimatische Faktoren

Der Anteil der diffusen Himmelsstrahlung an der Globalstrahlung wird durch die grosse Aerosolmenge über dem Stadtgebiet (Dunstglocke!) auf Kosten der kurzwelligen Einstrahlung um bis zu 100 % erhöht. Die Blätter, welche aufgrund des ihnen anhaftenden Staubes vermehrt langwellige Strahlung absorbieren, werden deswegen stärker aus dem unteren Halbraum angestrahlt. Dies resultiert in einem erhöhten Energie-Input, welcher nur bei erhöhter Blattemperatur über die zunehmende thermische Eigenstrahlung und Konvektion (= Energie-Output) wieder wettgemacht werden kann (ELLER und BRUNNER 1977, ELLER und WILLI 1975).

Die erhöhte Wärmespeicherkapazität der Baukörper und die - wegen der spärlichen Vegetationsdeckung und des erhöhten Oberflächenablaufs der Niederschläge - geringe Abkühlung durch Wasserverdunstung führen zu einer Temperaturerhöhung von  $4-6^{\circ}\text{C}$ , was aufgrund der artspezifischen, unterschiedlichen Temperatur-optima von Assimilation und Respiration einen Substanzverlust und somit eine verminderte Netto-Produktion zur Folge haben kann.

Diese Temperaturerhöhung kann das Wasserdampfdrucksättigungsdefizit um bis zu 30 % erhöhen, wodurch der Wasserhaushalt der Pflanzen belastet wird.

Die Rauigkeit der bebauten Oberfläche kann die Windgeschwindigkeit um bis zu 50 % verringern, so dass der Luftmassen- und Wärmeaustausch mit dem Umland stark zurückgeht.

#### 1.2.3. *Schadfaktoren direkt anthropogenen Ursprungs*

Beginn und Intensität der Einwirkung solcher Schadfaktoren können durch Jahrringanalyse (ASLANBOGA et al. 1978, ECKSTEIN et al. 1974) ermittelt werden. Als wichtigster Faktor ist das Streusalz zu nennen, wodurch in Berlin über 20 % der Strassenbäume geschädigt sein sollen (LEH, Vortrag bei der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft am 29.1.1976). Für eine ausführliche Besprechung sei auf Kapitel 2 verwiesen. Weitere Schadfaktoren sind:

- *Erdgas*, welches aus Leckstellen der Leitungen ausströmt und den Sauerstoff im Wurzelraum verdrängt. Mikroorganismen verbrauchen weiteren Sauerstoff bei der Verwertung des Methan. Fällt der Sauerstoffgehalt unter 10-12 %, ersticken die Wurzeln (RUGE 1978).
- *Immissionen* der Industrie, des Verkehrs, aus der Verbrennung fossiler Energieträger etc.
- *Wurzelraumabdeckung*, welche den Gasaustausch und die Wasserversorgung erschwert
- *Grundwasserabsenkungen* unter das den Bäumen vorher zugängliche Niveau.

#### 1.2.4. *Zusammenfassung von 1.2.*

Der typische Stadtstandort ist gekennzeichnet durch Nährstoffarmut, hohe Bodenverdichtung, schlechte Durchlüftung, hohe Temperaturen, Belastung des Wasserhaushaltes, Immissionen und weitere lokal begrenzte Schadfaktoren anthropogener Art.

#### 1.3. *Funktion und Wert von Strassenbäumen*

Grössere Gruppen von Bäumen, wie sie sich in Parks, Alleen und bepflanzten Strassenzügen befinden, verbrauchen einen beträchtlichen Teil der einfallenden Strahlungsenergie für ihre Transpiration. Unterhalb der Baumkronen ist die Einstrahlung stark vermindert und in ihrer spektralen Zusammensetzung verändert. Die Temperatur liegt um 2-3°C tiefer als unter einem Sonnenschirm (RUGE, Vortrag vor der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft am 29.1.1976).

Je nach Baumart werden bis zu 75 % der Stäube ausgefiltert und Lärm - vor

allem schrille Töne - um bis zu 10 dB vermindert. Einen Beitrag zur Abgasreinigung vermögen die Strassenbäume allerdings nicht zu leisten.

Psychische Auswirkungen seien nur kurz erwähnt. Nach einer 1960/62 in Frankfurt/Main durchgeführten Umfrage sollen sich über 50 % der Bevölkerung mindestens einmal pro Woche in ihrer Freizeit in Grünanlagen aufhalten, was auf deren Notwendigkeit hinweist (BERNATZKY 1969). Es fällt auch auf, dass in Kurorten viele Bäume vorhanden sind.

Das Ausmass der Möglichkeiten zur Verbesserung der städtischen Umwelt durch die Strassenbäume hängt von ihrem Kronenvolumen ab. Ein Jungbaum mit einem Kronenvolumen von 20 m<sup>2</sup> kostet nach KOCH (1978) zwischen 500.-- und 1'360.-- DM. Ein ausgewachsener Baum hat ein Kronenvolumen von ca. 2500 m<sup>3</sup>, was 125 Jungbäumen entspricht. Aehnliche Werte gibt auch BERNATZKY (1969) an.

Da durch Streusalz gerade auch ältere Bäume geschädigt werden, kann durch einen numerischen Ausgleich mit Neuanpflanzungen nur die Statistik verbessert werden. Nach der von KLUIKE (1976) zitierten Statistik sind über 20 % der insgesamt 200'000 Berliner Strassenbäume jünger als 15 Jahre. Ihr Anteil am Kronenvolumen macht höchstens 5 % aus (vgl. auch MAHLER 1976). Deswegen können sie nur geringen Anteil an der wohltuenden Wirkung der Strassenbäume auf ihre Umgebung haben.

#### *1.4. Ziel der eigenen Untersuchungen*

Strassenbäume haben eine wichtige Funktion: Sie verbessern die Lebensqualität in einer Stadt (vgl. 1.3). Um Massnahmen zur Erhaltung des vorhandenen Baumbestandes treffen zu können, ist es unerlässlich, die genaue Wirkung der ihn bedrohenden Schadfaktoren (vgl. 1.2) zu kennen. Nur so können die vorhandenen Strassenbäume geschützt und bei Neuanpflanzungen geeignete Arten ausgesucht werden.

Einer der wichtigsten und dementsprechend intensiv untersuchten Schadfaktoren ist das im Winter ausgebrachte Streusalz (vgl. 1.1). Die Baumarten reagieren unterschiedlich auf Natriumchlorid. Einzelne Arten scheinen problemlos damit fertig zu werden, doch kommt es bei den meisten zu massiven Veränderungen des Mineral- und Inhaltsstoffhaushaltes. Dies wird in vielen Publikationen der letzten Jahre (vgl. 2.4) und vor allem in der Dissertation von ZOLG (1979) belegt.

Eine Untersuchung über die Auswirkungen des Streusalzes auf den Wasserhaushalt der Strassenbäume wurde bis jetzt meines Wissens nicht durchgeführt. Der Einfluss von Natriumchlorid auf den Wasserhaushalt der Pflanzen ist zwar Gegenstand vieler Untersuchungen (vgl. 2.7), doch zählen kaum Baumarten dazu, was vermutlich auf ihre schlechte Eignung für Laborversuche zurückzuführen ist.

Folgende Wirkungen von Natriumchlorid werden genannt:

- Absinken des osmotischen Potentials als Anpassung an dasjenige der Bodenlösung (osmotische Anpassung)
- dadurch hervorgerufene Veränderungen von Wasser- und Druckpotential
- erhöhter Diffusionswiderstand für Wasserdampf und verringerte Transpiration
- Sukkulenz oder Xeromorphie.

Da an den innerstädtischen Standorten eine stärkere Belastung des Wasserhaushaltes als im Umland zu erwarten ist (vgl. 1.2), würde eine Verringerung der Transpiration positive Folgen für die Wasserbilanz haben. Negativ würde sich eine unvollständige osmotische Anpassung auswirken. Zwar liegen indirekte Hinweise vor, welche gegen diese "physiologische Trockenheit" im Sinne SCHIMPERS (1898) sprechen (RUGE 1978), doch konnte nur eine Arbeit zu diesem Thema gefunden werden (RUGE 1974).

Zielsetzung meiner Arbeit war die Untersuchung des Wasserhaushaltes ausgewählter Strassenbaumarten im Hinblick auf den Einfluss der winterlichen Streusalzgaben. Zwei Fragenkomplexe standen dabei im Mittelpunkt:

1. Wie verändern sich die Wasserverluste?

Dazu wurde die Transpiration gemessen und auf verschiedene klimatische und pflanzliche Grössen bezogen.

2. Wie verändert sich die Wasseraufnahmefähigkeit?

Dazu wurden das osmotische Potential und das Wasserpotential bestimmt. Weitere Problemkreise wie Veränderungen des Sukkulenzgrades, des Turgors, des Wassersättigungsdefizites wurden zur Ergänzung ebenfalls untersucht. Der Wasserhaushalt einer Pflanze ist ein dynamisches System, die Untersuchung erstreckte sich daher über zwei Vegetationsperioden. Ein Schwerpunkt wurde in den Sommermonaten, zur Zeit der grössten Belastung des Wasserhaushaltes, gesetzt.

## 2. Salzwirkungen, Salzschäden und Salztoleranz

### 2.1. Streusalz und Boden

In einem Strassenrandstreifen von ca. 5 m Breite muss - je nach den winterlichen Witterungsverhältnissen - mit einer jährlichen Salzzufuhr von 500-1000 g/m<sup>2</sup> gerechnet werden (KREUTZER 1974), was 25 Einzelstreuungen mit der empfohlenen Höchstmenge von 40 g pro Einsatz entspricht (AHLBRECHT 1966, RUGE 1978). Aufgrund dieser hohen, wenn auch nur vorübergehenden Salzzufuhr kann das Natriumion in erheblichen Mengen gegen andere an Bodenkolloide sorbierte Ionen ausgetauscht werden. Dies geschieht bei einem geringen Anteil von Kalzium- und Magnesiumsorptionskomplexen im Boden in zunehmendem Ausmass (KREUTZER 1974), was zur weiteren Nährstoffverarmung der ohnehin schlecht versorgten Böden im Stadtgebiet führt.

Zusätzlich bewirkt die grosse Hydrationshülle des Natriumions eine Veränderung der Bodenstruktur. Die Kolloide zerfallen, was in einer geringen Durchlüftung und kapillaren Leitfähigkeit resultiert (BERNSTEIN und PEARSON 1956, KREUTZER 1974, DAVISON 1971).

Im Gegensatz zum Natriumion wird das Chloridion kaum gebunden, so dass es frei in der Bodenlösung bleibt und nach kurzer Zeit ausgewaschen wird. Wegen der durch Natrium induzierten Veränderungen der Bodenstruktur, mit welchen Vernässung und Denitrifikation einhergehen, wird der Abfluss des chloridhaltigen Schmelzwassers verlangsamt. Die Chloridionen bleiben so länger in den oberen Bodenschichten, wo sie von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden können/müssen (RUGE 1978).

Die Intensität der Salzwirkung ist je nach Bodenart unterschiedlich; die geringsten Effekte wurden in Sandböden festgestellt. Tonig-schluffige Böden sind wesentlich stärker betroffen (WESTING 1969, LEH 1975, EVERS 1976). Die Auswaschung des Salzes ist im sandigen Boden im Frühjahr annähernd vollständig erfolgt, an andern Standorten ist sie erst im Juni komplett (KREUTZER 1974).

Als Gegenmassnahmen zur Natrium-bedingten Verschlechterung der Bodenstruktur und der Nährstoffversorgung wurden Düngergaben empfohlen (RUGE 1971, LEH 1972). Spätere Untersuchungen von LEH (1975) zeigten aber, dass die nachteiligen Effekte von Natrium allein damit nicht aufgehoben werden können.



## 2.2. Spritzschäden an Fernstrassen

Die durch das Einwirken des Streusalzes auf Schnee/Eis entstandene Salzlösung wird durch die Turbulenzen hinter schnell fahrenden Autos aufgewirbelt und kann mit dem Wind über grössere Strecken transportiert werden, bis sie an den oberirdischen Teilen der Gehölze haften bleibt. Die Salzionen werden aufgenommen und es kommt zu Schäden. Hinsichtlich der artspezifischen Empfindlichkeit finden sich beträchtliche Unterschiede, welche von BUSCHBOHM (1968) besprochen werden. Spritzschäden finden sich hauptsächlich an Fernstrassen (HOFSTRA und LUMIS 1975, EVERS 1971), wobei charakteristisch ist, dass in der Hauptwindrichtung die Schadsymptome in grösserer Entfernung von der Strasse als in den anderen Richtungen auftreten und Einzelbäume stärker beschädigt sind als gleich weit von der Strasse entfernte Bäume im Bestand (HOFSTRA und HALL 1971).

Parallel dazu werden Schäden durch im Sicker- und Abflusswasser enthaltenes Natriumchlorid in oft beträchtlicher Entfernung von der bestreuten Strasse gemeldet, an Laubbäumen von HOLMES (1961, 1966) und WALTON (1969), an Koniferen von HOFSTRA und HALL (1971) und EVERS (1971, 1976). Schäden durch Magnesiumchlorid werden von BEHM und KESSLER (1971) belegt.

Zunächst wurden Schäden dieser Art oft als Trockenschäden qualifiziert (WESTING 1966, WESTING 1969, RHEINHEIMER 1959). Dem widerspricht, dass die Symptome öfter in Senken (feuchter Standort) als auf Höhen (trockener Standort) beobachtet wurden (RUGE 1978). Eine Nachuntersuchung zu RHEINHEIMER (1959) ergab, dass Streusalz die beobachteten Symptome verursacht hatte (RUGE 1978).

In der Krautschicht scheinen sichtbare Schäden nicht aufzutreten. Da die Vitalität empfindlicher Arten beeinträchtigt wird, kann es zu einer Verschiebung des Artenspektrums kommen (DAVISON 1971). So wurde ein vermehrtes Auftreten halophiler Arten an Strassenrändern häufig beobachtet (ADOLPHI 1980, KRACH und KOEPFF 1980).

## 2.3. Veränderungen der Mineral- und Inhaltsstoffe bei Pflanzen

Ueber die Veränderungen der Mineral- und Inhaltsstoffe der Pflanzen durch Natriumchlorid liegen zahlreiche Untersuchungen vor, so auch über diejenigen bei Strassenbäumen (ZOLG 1979, ERNST und FELDERMANN 1975, LEH 1972, 1973,

1975, BEHM und KESSLER 1971, WALTON 1969, WESTING 1969, RUGE 1968, RUGE und STACH 1968).

ZOLG (1979) untersuchte parallel zu dieser Arbeit die Mineral- und Inhaltsstoffe der gleichen Bäume. In ihrer Arbeit werden die Ergebnisse der älteren Untersuchungen berücksichtigt, so dass hier ihre Ergebnisse ausführlich dargestellt werden sollen.

In ihrer Dissertation gelangt ZOLG (1979) zum Ergebnis, dass *Aesculus* und *Tilia* am salzbelasteten Standort in erhöhtem Ausmass Chlorid und - in nicht äquivalenter Menge - Natrium aufnehmen. Am Blattrand treten Nekrosen auf. Die Analysen wurden nur an Blättern durchgeführt, die Wurzeln konnten aus einsichtigen Gründen nicht untersucht werden. *Quercus* nimmt keines der beiden Ionen vermehrt auf, *Platanus* erhöht nur den Chloridgehalt. Aeusserliche Schäden konnten bei diesen Arten nicht festgestellt werden.

Auch auf die anderen Inhaltsstoffe wirkt sich die Salzbelastung artspezifisch aus. So erhöht *Aesculus* den Gehalt an Kalium, Magnesium, Nitrat, löslichen organischen Stickstoffverbindungen, Zellwandsubstanzen und Asche; der Anteil der höher polymerisierten Kohlehydrate und des Chlorophylls wird geringer. *Tilia* weist einen extrem hohen Kaliumgehalt auf, auch der Gehalt an Nitrat und löslichen organischen Stickstoffverbindungen ist erhöht. Oligo- und Polysaccharide, Saccharose und Stärke sind jedoch in geringer Menge vorhanden. *Platanus* weist wie die beiden ersten Baumarten einen erhöhten Gehalt an Nitrat und löslichen organischen Stickstoffverbindungen auf; der Saccharose- und Stärkeanteil ist zwar geringer als bei der Kontrolle, doch ist der Anteil der Oligo- und Polysaccharide erhöht. *Quercus* akkumuliert Kalium und die höher polymerisierten Kohlenhydrate.

ZOLG (1979) interpretiert einen Verlust an höher polymerisierten Kohlenhydraten in Verbindung mit einem Anstieg der löslichen organischen Stickstoffverbindungen und des Nitrats als Anzeichen einer Schädigung. Die Anreicherung von Kalium und höher polymerisierten Kohlenhydraten wird von ihr als positive Kompensation beurteilt. Sie kommt zu folgender Beurteilung der Reaktion der Arten auf die Salzbelastung:

- *Quercus* weist nur positive Kompensationen auf
- *Platanus* kommt mit den veränderten Bedingungen zurecht, die Verschiebungen in den Anteilen der Inhaltsstoffe sind teils positiv, teils negativ zu beurteilen, eine Beeinträchtigung der Photosynthese ist nicht auszuschliessen

- *Tilia* und *Aesculus* weisen zwar auch positive Kompensationsmerkmale auf, doch überwiegen die negativen Effekte, da beide Arten vor allem Chlorid in grossen Mengen aufnehmen. Es fehlt eine herbstliche Mobilisierungsphase der Kohlenhydrate, die Proteine werden nicht abgebaut und zurückverlagert, die löslichen organischen Stickstoffverbindungen nehmen im Verlauf der Vegetationsperiode ab oder bleiben konstant.

ZOLG (1979) kommt zum Schluss, dass im Gegensatz zu *Quercus* und *Platanus* bei *Tilia* und *Aesculus* eine pathologische Veränderung des Alterungsvorganges auftritt, welche durch die Salzbelastung verursacht worden sein muss.

#### 2.4. Morphologische und ultrastrukturelle Wirkungen

Salinität kann Xeromorphie (STROGONOV 1962, zitiert nach POLJAKOFF-MAYBER 1975) induzieren, doch scheint Sukkulenz der häufigere Effekt zu sein (KREEB 1974, 1975). MEIRI und POLJAKOFF-MAYBER (1967) fanden bei *Phaseolus vulgaris* eine Zunahme der Blattdicke um 25 %, als deren Ursache sie eine Volumenzunahme der Mesophyll-Zellen und des Palisadengewebes angab. Da sie gleichzeitig eine Abnahme der Blattfläche gemessen hatten, folgerten sie, dass die Zellteilung stärker als das Zellwachstum durch Salinität beeinträchtigt wurde.

Zellorganellen wurden unterschiedlich beeinflusst. Der Durchmesser der Chloroplasten nahm ab (NIEMANN und POULSEN 1971), doch ihr intralamellares System schwoll an (POLJAKOFF-MAYBER 1975) und ihr Chlorophyllgehalt nahm ab (ROZEMA 1976). MÜLLER und SANTARIUS (1978) fanden eine reversible Veränderung der Lipidzusammensetzung der Chloroplasten von *Hordeum vulgare*, was sie als mögliche Ursache der Salztoleranz dieser Art interpretierten.

Die Mitochondrien schwellen in Gegenwart von Chlorid stark an und zeigten reduzierte oxidative Phosphorylierung (MILLER et al. 1975, UDOVENKO et al. 1970, zitiert nach POLJAKOFF-MAYBER 1975); da aber ihre Anzahl zunimmt, kommt es insgesamt zu keiner Erniedrigung der Atmung (HECHT-BUCHHOLZ et al. 1971).

Weitere Effekte von Natriumchlorid waren:

- eine grössere Zahl von Polysomen (HECHT-BUCHHOLZ et al. 1971)
- dickere Zellwände im Xylemparenchym (YEO et al. 1977)
- angeschwollene Golgi-Apparate (POLJAKOFF-MAYBER 1975)
- Zunahme des endoplasmatischen Retikulums (HECHT-BUCHHOLZ et al. 1971)

- veränderte Membranstrukturen und damit veränderte Permeabilität der Wurzeln (STUIVER et al. 1978)

POLJAKOFF-MAYBER (1975) fasst zusammen, dass weder eine definitive Aussage über salzinduzierte morphologische und ultrastrukturelle Veränderungen gemacht noch beurteilt werden kann, ob es sich bei den beobachteten Veränderungen um positiv zu bewertende Anpassungen oder um Anzeichen von Schädigungen handelt.

## 2.5. Salz und Stoffwechsel

Viele Arbeiten beschäftigen sich mit den physiologischen Wirkungen von Natriumchlorid. Dabei wird zwischen Effekten toxischer und solchen osmotischer Art unterschieden. Eine Interpretation der Fakten wird erschwert durch die Tatsache, dass die Folgen von Wasserstress und Salzstress nur schwer zu unterscheiden sind:

- Anstieg des Prolingehaltes (HUBER 1974, JÄGER und PRIEBE 1975, EDER 1977, ROZEMA 1978)
- Zunahme der Abscisinsäurekonzentration (MIZRAHI et al. 1971)
- Reduktion des Proteingehaltes (KAHANE und POLJAKOFF-MAYBER 1968, BEN-ZIONI et al. 1967, JÄGER und PRIEBE 1975)

Eine Einschränkung der Photosynthese und der Atmung wurden nur selten gefunden. Dabei könnte es sich auch um einen indirekten Effekt der Stomatabewegungen handeln (KREEB 1974).

Hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber Natriumchlorid unterscheiden sich die Enzyme salztoleranter Arten nicht von denen der nichttoleranten Arten (WEIMBERG 1970), so dass der Begriff "salztolerant" keine echte "tolerance", sondern vielmehr eine "avoidance" beinhaltet. FIELD (1976) entwirft hierzu folgendes Modell: die überschüssigen Ionen werden in der Vakuole abgelagert und zum Erreichen des osmotischen Ausgleichs synthetisiert die Pflanze Mikromoleküle mit unschädlichem/protektivem Effekt wie z.B. Prolin. Im Gegensatz hierzu fanden HUBER (1974) und PRIEBE und JÄGER (1978), dass Enzyme unterschiedlich empfindlich auf Natriumchlorid reagieren. Sie erklärten ihre Ergebnisse durch die Annahme einer unterschiedlichen strukturellen Flexibilität der untersuchten Proteine.

Ueber die Auswirkungen von Natriumchlorid auf den pflanzlichen Metabolismus liegen also keine einheitlichen Ergebnisse vor. Nach JENNINGS (1976) wird oft nicht genügend zwischen toxischen und osmotischen Effekten unterschieden,

obwohl die Arbeiten STROGONOV und LAPINA (1964), LAGERWERFF (1969) u.a. auf die Unerlässlichkeit von Kontrollversuchen mit isoosmotischen Konzentrationen verschiedener Stoffe hinweisen. Auch die Möglichkeit des Entstehens von Artefakten infolge einer durch zunehmende Salzkonzentrationen verbesserten Extraktion der Pflanzensubstanzen wird nicht immer genügend beachtet.

## 2.6. Salz und Wasserhaushalt

Der Nachweis einer osmotischen Anpassung an die Salzkonzentration im Substrat nicht nur in den Blättern, sondern auch in den Wurzeln durch BERNSTEIN (1961, 1963) ist seither oft bestätigt worden (z.B. SLATYER 1961, BOYER 1965, KIRKHAM et al. 1972, COOPER und DUMBROFF 1973). Damit ist die grundsätzliche Richtigkeit der während über 50 Jahren vorherrschenden Lehrmeinung einer salzinduzierten "physiologischen Trockenheit", wie sie von SCHIMPER (1898) postuliert wurde, widerlegt. Da die osmotische Anpassung nicht bei allen Arten vollständig erfolgt, kann die SCHIMPER'sche Theorie für einzelne Arten wie z.B. *Allium cepa* trotzdem gelten (GALE et al. 1967).

Die aktive/passive Aufnahme von Salzionen bewirkt ein Absinken des osmotischen Potentials. Dem entspricht eine nicht immer äquivalente - Abnahme des Wasserpotentials, so dass kaum Schwierigkeiten mit dem Erhalten der zur Wasserversorgung notwendigen Potentialdifferenz zwischen Wurzel und Substrat auftreten (HOFFMANN und RAWLINS 1971, ACEVES-NAVARRO et al. 1975). Infolgedessen bleibt das Druckpotential konstant oder nimmt sogar zu. Die unter Einwirkung von Natriumchlorid gefundene Wachstumsreduktion kann also nicht analog zu derjenigen bei Wasserstress durch einen reduzierten Turgor erklärt werden (GALE et al. 1967, KIRKHAM et al. 1972b). OERTLI (1976) entwirft folgendes Modell: Die neu gebildeten Zellen müssen osmotisch angepasst werden. Dabei kommt es zu Versorgungsengpässen mit den benötigten Ionen (Wachstum erfolgt grob linear, Ionenaufnahme aber gemäss den Regeln einer Sättigungskinetik). So verursachte geringere Teilungsraten führen trotz ausreichender Turgidität zu einer Wachstumsreduktion.

Der durch Natriumchlorid erhöhte Widerstand gegen die Wasseraufnahme der Wurzeln hat nur geringe Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, da gleichzeitig ein Stomataschluss induziert wird, so dass der Wasserverbrauch sinkt (SHALHEVET und BERNSTEIN 1968, KIRKHAM et al. 1972a, 1974). Es folgt, dass alle

die Transpiration erhöhenden Faktoren die Salzwirkungen nachhaltig verstärken. Besonders eindrücklich wurde dies durch NIEMANN und POULSEN (1967) und HOFFMANN und RAWLINS (1971) für niedrige Luftfeuchtigkeit nachgewiesen.

Der salzinduzierte Stomatasschluss und die durch Natriumchlorid verringerte Löslichkeit von Kohlendioxid in wässrigen Lösungen (RATCLIFF und HOLDCROFT 1963) beeinträchtigen die Photosynthese, weil dadurch die Versorgung der Chloroplasten mit Kohlendioxid eingeschränkt wird. Ein reduzierter Turgor kommt als Ursache für den Spaltenschluss nicht in Frage (GALE et al. 1967).

Ob die Wirkungen von Natriumchlorid osmotischer oder toxischer Art sind ist ungeklärt. In der Literatur finden sich widersprüchliche Angaben (vgl. 2.5 und OERTLI 1976); es scheint allerdings, als ob sich die Annahme, dass die toxischen Wirkungen die osmotischen dominieren, in neuerer Zeit durchsetzt. Dazu sei auf die Arbeiten von SLATYER (1961), STROGOV und LAPINA (1964), GALE et al. (1967), KIRKHAM et al. (1974) und MÜLLER und SANTARIUS (1978) hingewiesen.

## 2.7. Salztoleranz von ausgewählten Gehölzen

Tabelle 1 gibt die Einstufung der untersuchten Baumarten, welche zu den in West-Berlin zahlenmäßig am stärksten vertretenen gehören (KLUIKE 1976, MAHLER 1976), nach ihrer Salztoleranz wieder. Die manchmal unterschiedliche Einstufung gleicher Arten könnte durch die unterschiedlichen Methoden der jeweiligen Autoren erklärbar sein. Die Salztoleranz wurde ermittelt durch Einlegen von Sprossstücken in Salzlösungen (BUSCHBOHM 1968), Literaturangaben (ZULAUF 1966b), Fragebögen an Gartenämter (RUGE 1975), Mineralstoffanalysen (LEH 1973) und Analysen anderer Inhaltsstoffe (vgl. 2.3 und ZOLG 1979).

Tab. 1. Salztoleranz ausgewählter Gehölze

	BUSCHBOHM	ZULAUF	RUGE	LEH	ZOLG
<i>Quercus robur</i>	-	+	+	+	+
<i>Aesculus hippocastanum</i>	+	+	-	-	-
<i>Tilia x euchlora</i>	-	-*	-	-	-
<i>Platanus acerifolia</i>	-	-	+	o	o

+ salztolerant  
o mässig tolerant  
- nicht salztolerant

\* Angaben nur für *Tilia cordata*

### 3. Material und Methoden

#### 3.1. Auswahl der Untersuchungsobjekte

Je ein Exemplar der in Tabelle 2 angegebenen Arten wurde an einem salzbelasteten und an einem unbelasteten Standort untersucht. Die ausgewählten Arten zählen zu den 5 häufigsten in West-Berlin (vgl. 2.7). Die Symbole in Tabelle 2 werden in den graphischen Darstellungen benutzt.

Tab. 2. Untersuchte Baumarten (s = salzbelastet)

Art	Symbole
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	Ae / Ae <sub>s</sub>
<i>Platanus acerifolia</i> (Ait.) Willd.	Pl / Pl <sub>s</sub>
<i>Quercus robur</i> L.	Qu / Qu <sub>s</sub>
<i>Tilia x euchlora</i> C. Koch	Ti / Ti <sub>s</sub>

Bei der Auswahl der Untersuchungsobjekte wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

1. Gute Zugänglichkeit der südlichen Kronenbasis (Probenahme)
2. Volle Strahlungsexposition während der Messperiode
3. Deutliche Ausprägung des eventuellen Schadbildes
4. Möglichkeit zum Aufstellen und Benutzen der Messgeräte ohne Verkehrsbehinderung
5. Vergleichbarkeit der Böden

Es erwies sich als vorteilhaft, die Untersuchungen auf zwei Arten zu konzentrieren. Als salzempfindliche Art wurde *Aesculus* und zum Vergleich die als relativ tolerant eingestufte *Quercus* gewählt. *Tilia* und *Platanus* wurden in geringerem Ausmass untersucht, konnten aber für einzelne Grössen und für den Vergleich der Baumarten herangezogen werden.

#### 3.2. Standorte

Die unbelasteten Standorte von *Aesculus* und *Quercus* befinden sich im Garten des Institutes für Oekologie der Technischen Universität Berlin in Berlin-



Steglitz, der von *Tilia* in einer kleinen Grünfläche neben der Westtangente der Berliner Stadtautobahn in Berlin-Friedenau und der von *Platanus* an der der Fahrbahn abgewandten Seite eines ca. 15 m breiten Grünstreifens an der Heerstrasse in Berlin-Charlottenburg.

Die belasteten Standorte sind im Winter einer intensiven Behandlung mit Streusalz ausgesetzt. *Aesculus* steht im Mittelstreifen der Lietzenburgerstrasse in Berlin-Wilmersdorf gegenüber einer Krankenhauseinfahrt, *Quercus* im Mittelstreifen der Berliner Strasse in Berlin-Zehlendorf an einem Busbahnhof der Berliner Verkehrsbetriebe, *Tilia* an der Südendstrasse in Berlin-Steglitz gegenüber einer Feuerwehrausfahrt und *Platanus* an der Gneisenaustrasse in Berlin-Tempelhof.

Die Böden sind als sandige Braunerde wechselnden Ursprungs einzustufen (BLUME et al. 1974). Sie sind anthropogen beeinflusst und an den salzbelasteten Standorten mit Ausnahme desjenigen von *Tilia* mit Ziegelschutt durchsetzt. Basierend auf einer scheinbaren Dichte von  $1.6 \text{ g/cm}^3$  und unter Verwendung einer für Sandböden typischen pF-Kurve lässt sich abschätzen, dass ein Bodenwassergehalt von 1.25 Gewichtsprozenten einem Bodenwasserpotential von  $-1.5 \text{ MPa}$  entspricht ( $1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$ ) und somit als trocken zu gelten hat (HORN, persönliche Mitteilung). Ein Bodenwasserpotential von  $0 \text{ MPa}$  wäre ab einem Wassergehalt von mehr als 5 Gewichtsprozenten zu erwarten.

### 3.3. Probennahme

Hauptmessperioden waren die Vegetationsperioden von 1975 und 1976. Einzelne Messungen wurden auch noch 1977 durchgeführt.

Messreihen wurden nur an Klartagen mit vorangegangener, mindestens zweitägiger niederschlagsfreier Periode durchgeführt.

Es wurden nur voll entfaltete Blätter ohne Blüten mit - falls vorhanden - deutlich ausgeprägten Schädigungssymptomen verwendet. Sie wurden mit einer Baumschere an einem 3 m langen Stiel von der südwestlichen Kronenbasis gepflückt und untersucht. Dabei wurde auf volle Strahlungsexposition geachtet. Bei *Aesculus* konnte für die Transpirationsmessung nur die kleinste Fieder des Blattes Verwendung finden.

Die Transpiration an der südlichen Kronenbasis wird bei Versorgungsschwierigkeiten schnell reduziert (PISEK und TRANQUILLINI 1951), so dass die Messwerte an dieser Stelle als Indikator für den Zustand des Baumes angesehen werden



können (vgl. 5.1).

Auswirkungen von Wasserstress zeigen sich in den Nachmittagsstunden sehr deutlich (vgl. 4.2). Weil die Messungen nur halbtags durchgeführt werden konnten, wurde über den Zeitraum von 1300 h bis 1730 h gemessen. Sie wurden im halbstündigen Abstand durchgeführt (Ausnahme: Die Helligkeit wurde jede Viertelstunde gemessen).

Ein Teil der Untersuchungsergebnisse wurde direkt am Messplatz in vorbereitete Normblätter eingetragen; weitere Daten wurden durch Laboruntersuchungen erarbeitet. Die Resultate wurden in Tabellen zusammengefasst und meist graphisch dargestellt. Aufgrund des Umfanges der Tabellen wurde auf eine Wiedergabe verzichtet und nur je ein Musterexemplar in diese Arbeit eingeschlossen (vgl. Tab. 3, 4, 5).

### 3.4. Messgrößen und Methodik

Die Helligkeit in kLux wurde mit einem Selenzellen-Luxmeter der Firma Lange über die ganze Breite des Spektrums gemessen. Die so erhaltenen Werte sind nur relativ miteinander vergleichbar und ermöglichen keine quantitative Aussage über die einfallende Strahlung (KREEB 1974).

Der Windweg in  $\text{m s}^{-1}$  wurde mit einem Schalenanemometer als Mittelwert für jede halbe Stunde bestimmt.

Die Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$  wurde am trockenen Thermometer eines Psychrometers nach ASSMANN, später auf dem Schreibstreifen eines Thermohygrographen abgelesen.

Das atmosphärische Wasserpotential in MPa ( $1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$ ) als Mass für das Wasserdampfdrucksättigungsdefizit der Luft wurde aus der mit einem Psychrometer nach ASSMANN oder dem Haarhygrometer eines Thermohygrographen bestimmten relativen Luftfeuchtigkeit berechnet.

Die Evaporation in  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  wurde mit einem Evaporimeter nach PICHE (STEUBING 1965) gemessen. Als Verdunstungsfläche wurde grünes Filterpapier mit einem Durchmesser von 5 cm benutzt.

Der Bodenwassergehalt in % (w/w) wurde durch Trocknen der Bodenproben (24 h bei  $105^{\circ}\text{C}$ ), welche mit einem Schlagbohrstock aus 50 cm Tiefe genommen worden waren, bestimmt.

Die Transpiration in  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  wurde nach der Schnellwägemethode von STOCKER (1929) gemessen. Das abgeschnittene Blatt wurde nach einer halben

Tab. 3. Ergebnis-Normblatt A: Grössen des pflanzlichen Wasserhaushaltes  
(ausser Transpiration) und klimatische Parameter

Datum ..... Zeit .....

Standort ..... Objekt .....

<u>Wasserpotential</u>	..... MPa
<u>Osmotisches Potential</u> Kryoskopskala	..... MPa
<u>Druckpotential</u>	..... MPa
<u>Wassersättigungsdefizit</u> frisch ..... mg gesättigt ..... mg trocken ..... mg Fläche ..... cm <sup>2</sup>	..... %
<u>Sukkulenzgrad</u>	..... g/dm <sup>2</sup>
<u>Oberflächenentwicklung</u>	..... dm <sup>2</sup> /g
<u>Helligkeit</u>	..... kLux
<u>Windweg</u> x <sub>0</sub> = ..... m    x <sub>t</sub> = ..... m    t = ..... min	..... cm/sec
<u>Temperatur</u>	..... °C
<u>Feuchtegradient</u>	..... µg/m <sup>3</sup>
<u>PICHE-Evaporation</u> x <sub>0</sub> = ..... ml    x <sub>t</sub> = ..... ml    t = ..... min	..... µg/cm <sup>2</sup> sec
<u>Atmosphärisches Wasserpotential</u> Relative Feuchtigkeit .....	..... MPa ..... %

Bemerkungen



Tab. 5. Ergebnis-Normblatt C: Nachmittägliche Mittelwerte mit Standardabweichung und Streuung (95 % Vertrauensgrenzen)

Datum ..... Standort ..... Objekt .....

Grösse	Dimension									Mittel	sdev	conf 95%
Helligkeit	kLux											
Windweg	cm/sec											
Temperatur	°C											
Feuchtegrad.	µg/m³											
PICHE-Evap.	µg/cm² sec											
Transpiration	µg/cm² sec											
cutic. Tsp	µg/cm² sec											
Austauschzeit	min											
relative Tsp	%											
Diff. Widerst.	sec/cm											
osmot. Pot.	MPa											
Wasserpot.	MPa											
Druckpot.	Mpa											
WSD	%											
Sukkulenz	g/dm²											
0. Flächenentw.	dm² /g											

Bemerkungen

Minute zum erstenmal, eine Minute später zum zweitenmal gewogen. Zwischen den Wägungen wurden die Blätter am Waagestandort in möglichst ähnlicher räumlicher Lage einer möglichst ähnlichen Einstrahlung wie am Baum ausgesetzt. Die Blattfläche in  $\text{cm}^2$  wurde nach Photokopien oder Zeichnungen der Blätter mit einem Planimeter bestimmt. Als Bezugsgrösse für die Transpiration wurde die Oberfläche genommen, d.h. die doppelte projizierte Fläche (SLAVÍK 1974). Der während der Vegetationsperiode ständig zunehmende nekrotische Flächenanteil wurde ebenfalls bestimmt und von der Oberfläche subtrahiert (vgl. Abb. 1).

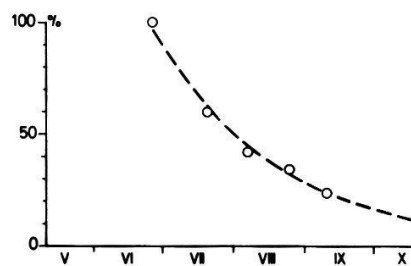


Abb. 1. Rückgang des Anteils der funktionsfähigen Blattfläche an der Oberfläche am salzbelasteten Standort von *Aesculus* im Verlauf der Vegetationszeit

Die cuticuläre Transpiration in  $\mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  wurde aus der Gewichtsabnahme der bei der Transpirationsmessung nach STOCKER (1929) verwendeten Blätter zwischen 20 und 30 Minuten nach der Probenahme berechnet.

Die relative Transpiration in % gibt den prozentualen Anteil der Transpiration an der PICHE-Evaporation wieder.

Der Diffusionswiderstand für Wasserdampf in  $\text{s cm}^{-1}$  wurde nach der folgenden Formel berechnet (SLAVÍK 1974):

$$R = \frac{C_b - C_l}{T_{sp}}$$

$R$  = Diffusionswiderstand für Wasserdampf in  $\text{s cm}^{-1}$

$C_b - C_l$  = Differenz der Wasserdampfkonzentration zwischen der verdunstenden Oberfläche im Blatt und der Luft bei den respektiven Temperaturen in  $\mu\text{g cm}^{-3}$

$T_{sp}$  = Transpiration in  $\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

Dabei wurden zwei Annahmen gemacht:

- Die Wasserdampfkonzentration an der verdunstenden Oberfläche des Blattes entspreche derjenigen bei einer relativen Feuchtigkeit von 100 %
- Die Blattemperatur sei gleich der Lufttemperatur

Zur zweiten Annahme ist zu bemerken, dass die Blattemperatur normalerweise über der Lufttemperatur liegt (LARCHER 1976). Eine Differenz von 1°C zwischen Blatt und Luft kann bereits signifikante Fehler bei der Berechnung des Diffusionswiderstandes verursachen, wenn der Fehler bei geschlossenen Stomata (= hohem Widerstand) auch kleiner wird (SLATYER 1971, MORROW und SLATYER 1971). Die Austauschzeit in min des Blattwassers wurde durch Division der Differenz zwischen Frischgewicht und Trockengewicht mit der entsprechenden Transpiration ermittelt.

Der Sukkulenzgrad in  $\text{g dm}^{-2}$  wurde als Quotient von Sättigungswassergehalt und Oberfläche bestimmt.

Die Oberflächenentwicklung in  $\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$  wurde als Quotient von Oberfläche und Frischgewicht berechnet.

Das Wassersättigungsdefizit in % wurde zunächst nach der "Floating-Disc"-Methode (WEATHERLY 1950), später nach CATSKY (1960, 1965) bestimmt. Um die Streuung zu vermindern, wurde die Anzahl der mit einem Korkbohrer ausgestanzten Blattscheibchen in Anlehnung an SPOMER (1972) auf 8 Stück und ihr Durchmesser auf 1.7 cm festgelegt. Ein Methodenvergleich ergab, dass die "Floating-Disc"-Methode um 25 % höhere Werte lieferte. Die Werte wurden entsprechend korrigiert. Im Spätsommer enthielten die Blattproben von *Aesculus* am salzbelasteten Standort einen überproportionalen Anteil an Mittelrippen, so dass diese Werte ebenfalls entsprechend korrigiert werden mussten.

Das osmotische Potential in MPa (1 MPa = 10 bar) wurde mit einem Kryoskop über die Berechnung der Konzentration osmotisch wirksamer Stoffe in einem aus Blattproben hergestellten Pressaft ermittelt. Das Abtöten der Gewebe vor dem Pressen erfolgte durch Einlegen (20 Minuten) der Probegefäße in kochendes Wasser (WALTER 1928, 1930); später durch Zugabe von 0.5 ml Chloroform sofort nach der Probenahme (WALTER 1931, KOZINKA 1960). Die nach der Chloroform-Methode bestimmten osmotischen Potentiale mussten wegen der Löslichkeit von Chloroform in wässrigen Lösungen um 0.13 MPa (= 1.3 bar) angehoben werden. Ein Parallelversuch zum Vergleich der beiden Methoden ergab, dass keine signifikanten Unterschiede im Ergebnis auftraten.

Das Wasserpotential in MPa (1 MPa = 10 bar) wurde nach SCHOLANDER et al. (1965) mit einer nach WARING und CLEARY (1967) modifizierten tragbaren Druckkammer gemessen. Der Druck wurde mit einer Rate von 0.05 MPa/s erhöht (RITCHIE und HINCKLEY 1975). Aufgrund der Schnelligkeit dieser in den letzten Jahren zur ökologischen Standardmethode gewordenen Technik war es möglich, das Wasserpotential und das osmotische Potential aller untersuchten Bäume an zusätzlichen Terminen zu bestimmen.

Das Druckpotential in MPa (1 MPa = 10 bar) ergab sich aus der Differenz von osmotischem Potential und Wasserpotential. Es wurde ein vernachlässigbar kleines matrikales Potential angenommen (vgl. SHEPHERD 1975).

Zur weiteren Auswertung wurden die Daten zu nachmittäglichen Tendenzen und Jahreskurven zusammengefasst.

Für die Jahreskurven wurden die Mittelwerte der jeweiligen Tagesmessungen (in der Regel 8), eventuell auch die Mittelwerte zusätzlicher Bestimmungen verwendet.

Eine Ausgleichskurve wurde durch die Schwerpunkte von je drei aufeinander folgenden Messwerten konstruiert (MC CRACKAN 1965). Dies konnte bei *Tilia* und *Platanus* nur für die Werte von Wasserpotential, Druckpotential und osmotischem Potential durchgeführt werden.

Die nachmittäglichen Tendenzen wurden ähnlich ausgewertet. Zuerst wurden die Messtage einzelnen jahreszeitlichen Phasen zugeordnet (Tab. 6) und zusammengefasst, danach die jeweiligen Mittelwerte aller Messungen zwischen 1330-1500 h, 1430-1600 h und 1530-1700 h berechnet. Die so erhaltenen 3 Werte ermöglichten Aussagen über Veränderungen der Messgrösse während des Nachmittags. Für einzelne Grössen wurde nur der Mittelwert aller nachmittäglichen Messungen in graphischer/tabellarischer Form dargestellt.

Die Vertrauensgrenzen der Mittelwerte wurden nach PARKER (1973) berechnet. Sie geben das Intervall an, innerhalb welchem der wahre Mittelwert der Messungen mit 95 % Wahrscheinlichkeit liegt.

$$\text{conf (95 \%)} = t \cdot \frac{\text{sdev}}{\sqrt{n}}$$

conf (95 %) = Vertrauensgrenzen

t = Student's t für (n-1) Freiheitsgrade

n = Anzahl der Werte

sdev = Standardabweichung vom Mittelwert

Tab. 6. Zuordnung der Messtage zu Phasen (die Zahlen bedeuten den jeweiligen Tag des Jahres)

Phase Baum	Vorstress Frühjahr	Stress Sommer	Nachstress Herbst
Qu	165 171	210 229	244 273
Qu <sub>s</sub>	170 189 193	223 224	240 259
Ae	160 163	209 224	241 265 267
Ae <sub>s</sub>	162 178 201	203 219	236 238 253
Pl	176	211 223	257
Pl <sub>s</sub>		202 236	
Ti		237	
Ti <sub>s</sub>		209 239	

Qu = *Quercus*  
 Ae = *Aesculus*  
 Pl = *Platanus*  
 Ti = *Tilia*  
 s = vom belasteten Standort

Die Signifikanz einer Differenz zwischen zwei Mittelwerten wurde nach PARKER (1973) durch einen t-Test ermittelt. Dabei wurden ungleiche Varianzen angenommen.

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{(sdev_1)^2}{n_1} + \frac{(sdev_2)^2}{n_2}}}$$

t = Student's t für  $(n_1 + n_2 - 2)$  Freiheitsgrade  
 $n_1, n_2$  = Anzahl der Werte in Gruppe 1, 2  
 $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  = Mittelwert der Gruppe 1, 2  
 $sdev_1, sdev_2$  = Standardabweichung der Gruppe 1, 2



Aus Tabellen kann für das jeweilige  $t$  abgelesen werden, wie gross die Wahrscheinlichkeit  $p$  ist, dass die beobachtete Differenz nicht signifikant ist.

Als Mass für die Streuung der Messwerte um den Mittelwert wurden die jeweiligen Vertrauensgrenzen (95 %) benutzt.

## 4. Resultate

### 4.1. Jahresgänge

Die Belastung des pflanzlichen Wasserhaushaltes durch die mangelnde Wasserversorgung, wie sie durch die Bodenwassergehalte (Abb. 2) dargestellt wurde, war an den salzbelasteten Standorten deutlich höher als an den unbelasteten. Das als Grenze für die Verfügbarkeit des Bodenwassers definierte Wasserpotential von  $-1.5 \text{ MPa}$  ( $= -15 \text{ bar}$ ), welches einem Bodenwassergehalt von 1,25 Gewichtsprozenten entspricht (HORN, persönliche Mitteilung), wurde nur in wenigen Fällen unterschritten, zweimal am unbelasteten Standort von *Platanus* und je einmal am belasteten Standort von *Aesculus* und *Tilia*.

Tage mit guter Wasserversorgung, d.h. einem Bodenwassergehalt von mehr als 5 Gewichtsprozenten (vgl. 3.2) waren fast ausschliesslich auf die unbelasteten Standorte begrenzt. An den beiden *Aesculus*-Standorten wurden im Sommer vergleichbare Wassergehalte gemessen.

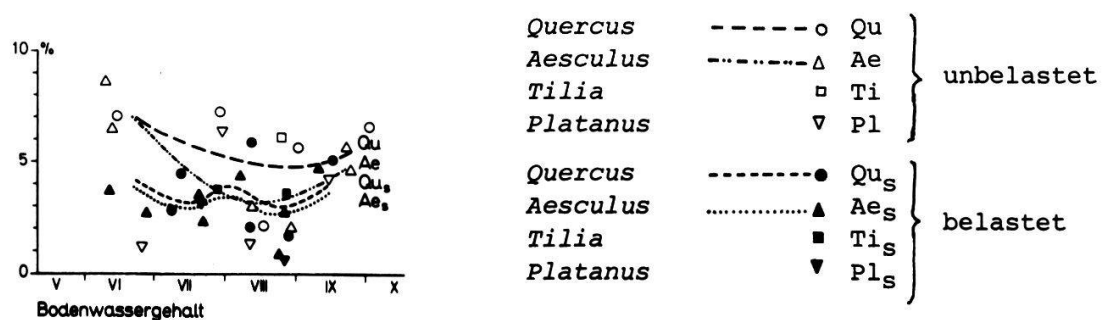


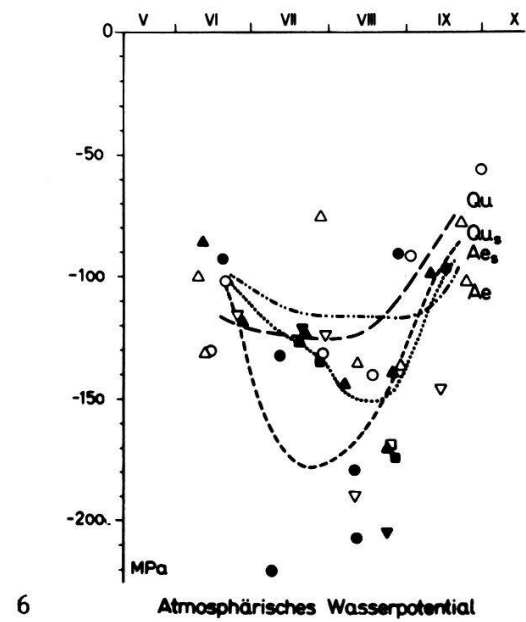
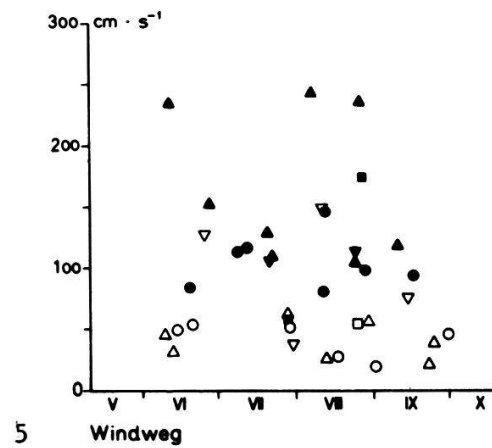
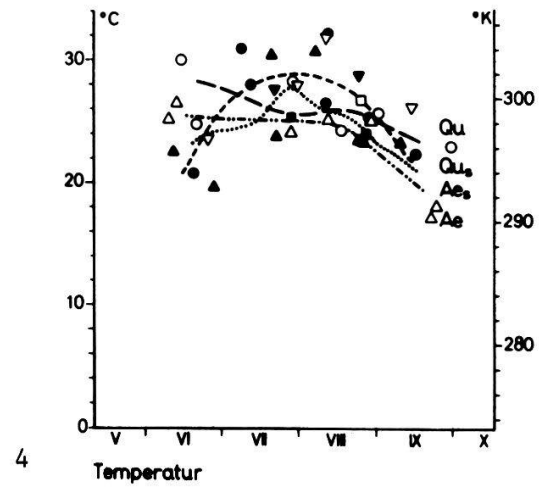
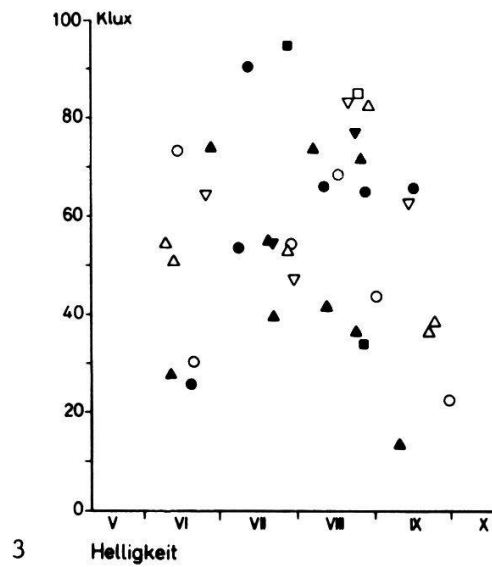
Abb. 2. Jahresgang des Bodenwassergehalts mit Ausgleichskurve in Gewichtsprozenten

Die untersuchten Klimafaktoren wiesen unterschiedliche Muster an den jeweiligen Standorten auf. Die Helligkeit (Abb. 3) erreichte an allen Standorten ein Maximum zu Anfang August, doch konnten keine Unterschiede zwischen den Standorten ausgemacht werden. Die Temperatur (Abb. 4) lag am belasteten Standort durchschnittlich um  $1-2^{\circ}\text{C}$  höher, im Frühjahr und Herbst dagegen oft geringfügig tiefer als am Kontrollstandort. Eine auffällig hohe Temperatur wurde an einem Messtag bei der unbelasteten *Platanus* gemessen.

Da die Helligkeit nicht als Mass für die Strahlung genommen werden darf (KREEB 1974), können trotz der relativen Äquivalenz der Werte qualitative und quantitative Unterschiede in der Einstrahlung nicht ausgeschlossen werden. Die durch Aerosole verursachte Trübung der Sonnenstrahlung ist zwar sicher auch an den Kontrollstandorten vorhanden (vgl. 1.2), doch könnten die veränderten Reflexionseigenschaften der Umgebung am belasteten Standort (Bebauung!) zu Veränderungen der Anteile der Strahlungsarten führen (MEYER 1978). So weist die erhöhte Temperatur an diesen Standorten auf einen erhöhten Anteil der langwelligen Strahlung am Gesamtspektrum hin.

Die Werte für den Windweg (Abb. 5), welche die Windgeschwindigkeit charakterisieren, lagen an den unbelasteten Standorten unter, an den belasteten Standorten über einer Grenzlinie bei ca.  $60\text{ cm s}^{-1}$ . Es handelt sich um die auffälligste Differenz, die bei den Klimafaktoren gefunden wurden. Als Ursache könnte die kanalisierende Wirkung der breiten Strassenzüge in Frage kommen. Wie schon bei der Temperatur, bildet der unbelastete Standort von *Platanus* eine Ausnahme, hier wurden in zwei von vier Fällen Windwege von mehr als  $120\text{ cm s}^{-1}$  gemessen.

Eine Aussage über den Effekt des erhöhten Windweges (evtl. durch den Verkehr bedingt) auf den pflanzlichen Wasserhaushalt zu machen ist aufgrund der komplexen Interaktionen mit der Energiebilanz kaum möglich. CAMPBELL (1977) postuliert eine Abnahme der Transpiration im Sonnenlicht mit zunehmender Windgeschwindigkeit, falls die Blattemperatur höher als die Lufttemperatur ist. Als Ursache nimmt er vermehrte Kühlung durch Konvektion an, welche die Zunahme der Wasserverluste aufgrund des verringerten Grenzschichtwiderstandes für Wasserdampf mehr als kompensieren soll. Die erhöhte Windgeschwindigkeit könnte demnach als positiver Faktor für eine ausgewogene Wasserbilanz gewertet werden.



*Quercus*      ---○ Qu  
*Aesculus*    -.-.-△ Ae  
*Tilia*        □ Ti  
*Platanus*    ▽ Pl

unbelastet

---● Qu<sub>S</sub>  
 -.-.-▲ Ae<sub>S</sub>  
 -.-.-■ Ti<sub>S</sub>  
 -.-.-▼ Pl<sub>S</sub>

belastet

Abb. 3-6. Nachmittägliche Mittelwerte im Jahresgang mit Ausgleichskurve

Analog zum Jahresgang der Temperatur wurden im Frühjahr und im Herbst an belasteten wie unbelasteten Standorten ähnliche atmosphärische Wasserpotentiale gemessen (Abb. 6). Im Sommer lagen sie an den salzbelasteten Standorten wesentlich tiefer, nur am unbelasteten Standort von *Platanus* wurde ebenfalls ein sehr negatives Potential festgestellt.

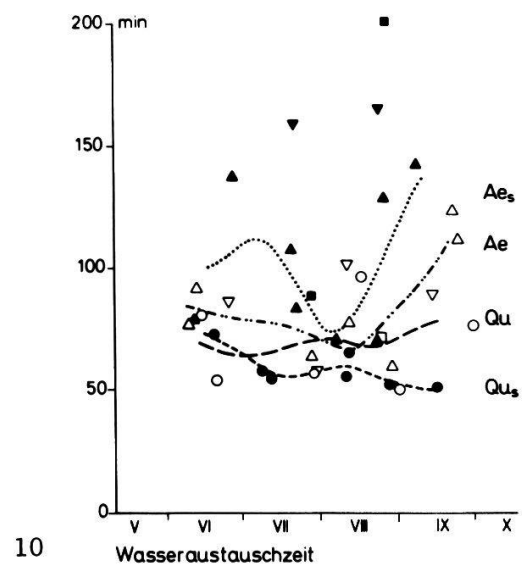
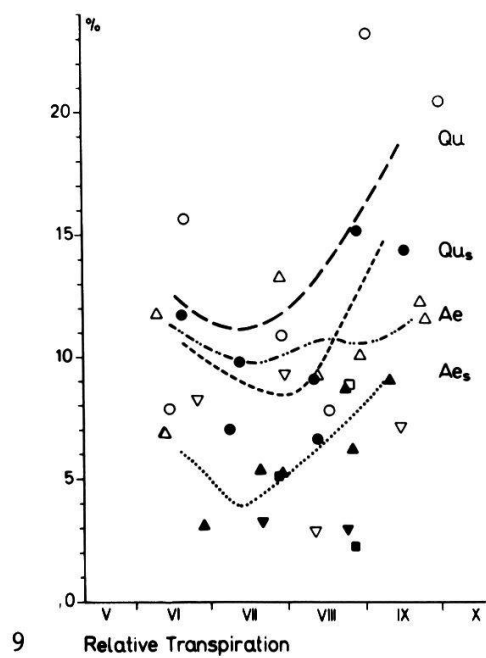
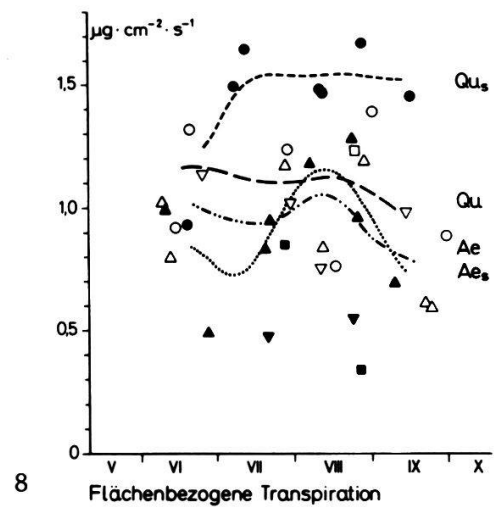
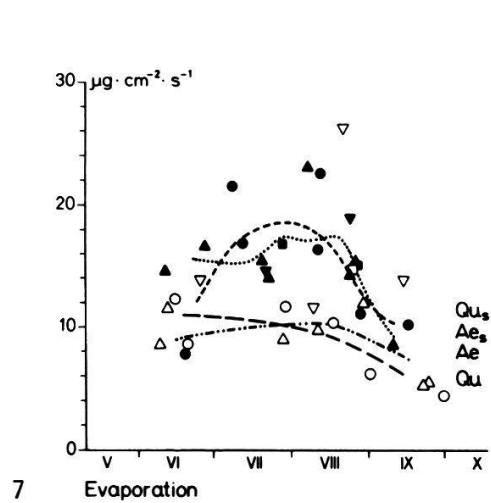
Die Auswirkungen der in Abb. 3-6 dargestellten Klimafaktoren auf den pflanzlichen Wasserhaushalt spiegelten sich in der PICHE-Evaporation (Abb. 7) wieder. An den salzbelasteten Standorten wurden - mit Ausnahme einzelner Werte im Frühjahr und Herbst - keine Evaporationsraten unter  $14 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  gemessen; an den salzunbelasteten Standorten wies nur *Platanus* einmal einen deutlich höheren Wert auf.

Zusammenfassend ergibt sich, dass die den pflanzlichen Wasserhaushalt bestimmenden klimatischen Umweltfaktoren, deren kombinierte Wirkung auf die physikalische Verdunstung durch die PICHE-Evaporation erfasst wird, eine stark erhöhte Belastung der Strassenbäume an den salzbelasteten Standorten andeuten.

Einzige Ausnahme ist der unbelastete Standort von *Platanus*, wo die höchste PICHE-Evaporation überhaupt gemessen wurde. Es besteht die Möglichkeit, dass durch Streusalz verursachte Veränderungen der Wasserbilanz durch Wasserstress-Effekte verschleiert worden sein könnten. Die grössere Trockenheit der innerstädtischen Standorte entspricht den in 1.2 beschriebenen Bedingungen.

Zur Zeit der grössten Belastung des Wasserhaushaltes (Abb. 2, 7) im August wies die Transpiration (Abb. 8) von *Aesculus* ein Maximum auf. Es hatte den Anschein, als ob die - zunächst niedrigen - Verluste am salzbelasteten Standort Werte von  $1.0 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , wie sie am unbelasteten Standort gemessen wurden, erreichen würden. Da die Einzelmessung aber teilweise einen Verlauf zeigte, der als "Iwanoff-Sprung" bezeichnet wird (anfänglich geringe Wasserverluste nehmen rasch zu, was auf ein Verschwinden der regulierenden Kohäsionsspannung in den durchtrennten Leitgefässen zurückzuführen sein soll), muss angenommen werden, dass nicht die wahre Transpiration gemessen wurde (KREEB 1974, EGER 1958, IWANOFF 1928). Die realen Wasserverluste müssten niedriger angesetzt werden.

Die Transpiration von *Quercus* am unbelasteten Standort lag nur wenig höher als die von *Aesculus* am unbelasteten Standort und blieb im Verlauf der Vegetationsperiode ziemlich konstant. Am belasteten Standort reagierte *Quercus* mit einer Erhöhung der Transpiration auf  $1.5 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , welche trotz sinkender PICHE-



*Quercus*    ---○ Qu  
*Aesculus*    -.-△ Ae  
*Tilia*        □ Ti  
*Platanus*    ▽ Pl

unbelastet

---● Qu<sub>s</sub>  
 -.-▲ Ae<sub>s</sub>  
 ■ Ti<sub>s</sub>  
 ▽ Pl<sub>s</sub>

belastet

Abb. 7-10. Nachmittägliche Mittelwerte im Jahresgang mit Ausgleichskurve

Evaporation im Herbst nicht abfiel.

Die relative Transpiration (Abb. 9), welche die Relation der pflanzlichen zur physikalischen Verdunstung zeigt, wies für alle Bäume dasselbe Muster auf. Im Sommer wurde ein Minimum erreicht, d.h. die Pflanze leistet den grössten Widerstand gegen Wasserverluste. Es war auffällig, dass *Aesculus* bereits im August eine zunehmende relative Transpiration am belasteten Standort aufwies. Dadurch wird ein Öffnen der Stomata angedeutet, doch muss dies unter den oben diskutierten Gesichtspunkten gesehen werden.

Die Wasseraustauschzeit (Abb. 10) stellt den Zusammenhang zwischen den Wasservorräten im Blatt und den Wasserverlusten her. *Quercus* wies an beiden Standorten nur geringe Variationen im Verlauf der Vegetationsperiode auf. Am belasteten Standort erfolgte der Austausch etwas schneller. *Aesculus* erreichte im Sommer am unbelasteten Standort Werte, die sich mit denjenigen von *Quercus* am unbelasteten Standort vergleichen liessen, im Frühjahr und im Herbst erfolgte der Austausch eher langsamer. Am belasteten Standort wurde ein grosser Umsatz errechnet, doch muss dies im Zusammenhang mit der vermutlich zu hohen Transpiration gesehen werden (vgl. oben). Ansonsten war hier ein sehr langsamer Austausch zu vermerken.

Die Resultate für *Tilia* und *Platanus* werden in 4.3 ausführlich besprochen. Es sei nur kurz erwähnt, dass diese beiden Arten mit einer enormen Verlangsamung ihres Wasserumsatzes auf die Salzbelastung reagieren.

Der Sukkulenzgrad (Abb. 11) aller Arten und Standorte lag im Frühjahr zwischen  $0.45 - 0.50 \text{ g dm}^{-2}$  und blieb an den unbelasteten Standorten ziemlich konstant. An den salzbelasteten Standorten stieg er zunächst auf ca.  $0.60 \text{ g dm}^{-2}$  an, doch während er dann bei *Quercus* wieder auf die Frühjahrswerte absank, nahm er bei *Aesculus* weiter zu.

Die Oberflächenentwicklung (Abb. 12) wies ein ähnliches Muster wie der Sukkulenzgrad für die unbelasteten Standorte auf, die Werte schwankten um  $1.5 \text{ dm}^2 \text{ g}^{-1}$ . Am belasteten Standort verringert *Aesculus* sie im Verlauf der Vegetationsperiode um ca. 40 %, bei *Quercus* konnte ein konstant niedriger Wert gemessen werden.

Die Jahresgänge ermöglichen eine Relativierung der in Abb. 13 und 14 dargestellten Mittelwerte von Sukkulenzgrad und Oberflächenentwicklung. So wies *Aesculus* im Jahresgang sehr deutliche Unterschiede zwischen den beiden Standorten auf, obwohl sich in der sommerlichen Stressphase keine signifikanten

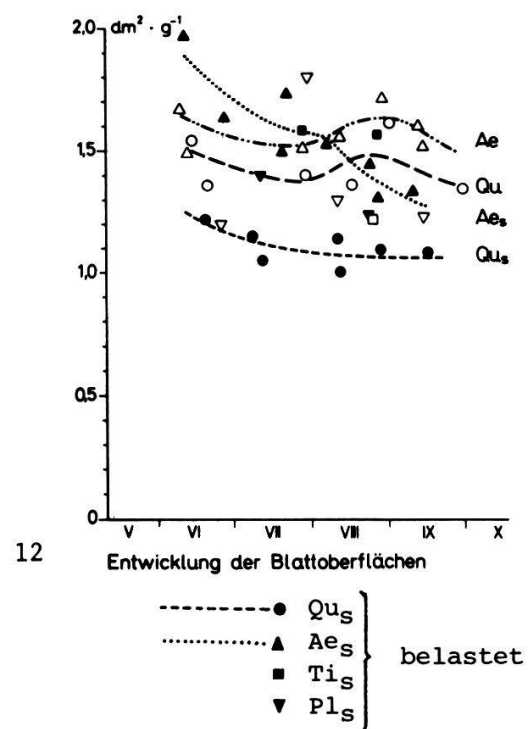
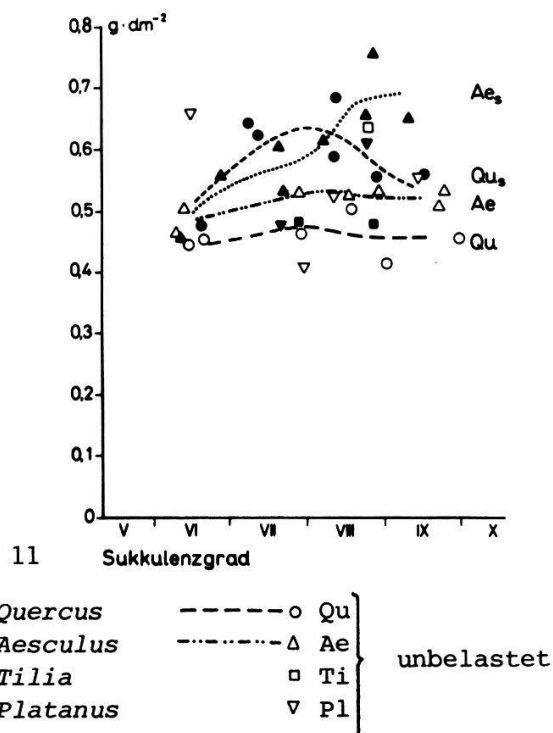
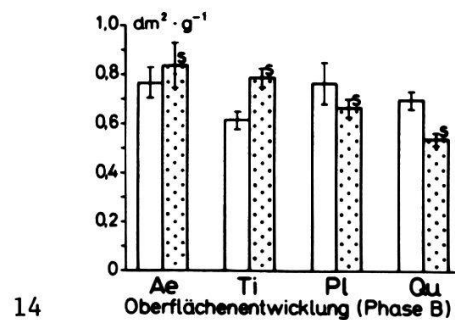
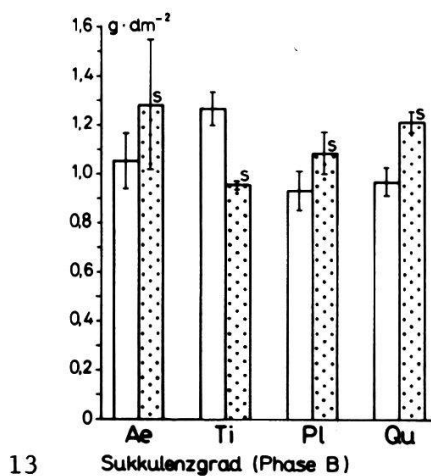


Abb. 11-12. Nachmittägliche Mittelwerte im Jahresgang mit Ausgleichskurve



s über gepunkteter Säule = belasteter Standort

Abb. 13-14. Mittelwert in der sommerlichen Stressphase mit 95 % Vertrauensgrenzen

Unterschiede zeigten. *Quercus* und *Platanus* reagieren auf die Salzbelastung mit einer Erhöhung des Succulenzgrades und einer Verringerung der Oberflächenentwicklung. Dabei handelt es sich bei *Quercus* aber um einen reversiblen Vor-

gang. *Tilia* reagierte umgekehrt: Im Sommer wurden unter Salzeinfluss xeromorphe Merkmale, d.h. ein verringerter Sukkulenzgrad und eine vergrösserte Oberfläche, gefunden.

Bei den Wassersättigungsdefiziten (Abb. 15) konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Standorten entdeckt werden. *Aesculus* hatte allgemein höhere Defizite (15-20 %) als *Quercus* (10-15 %). Mit Ausnahme von *Quercus* am salzbelasteten Standort wiesen die Bäume ein maximales Wassersättigungsdefizit im August auf.

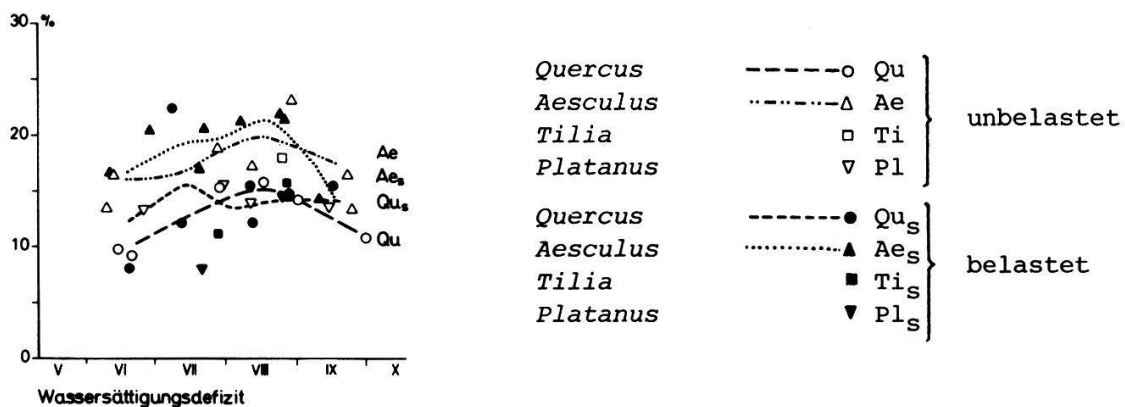


Abb. 15. Nachmittägliche Mittelwerte im Jahresgang mit Ausgleichskurve

Bei den unbelasteten Bäumen konnten zwei verschiedene Grundmuster in den Jahresgängen des osmotischen Potentials (Abb. 16a-16d) beobachtet werden:

1. Im Sommer wurde ein Minimum erreicht (*Quercus*, *Tilia*).
2. Das osmotische Potential sank kontinuierlich (*Aesculus*, *Platanus*).

*Quercus* und *Platanus* wiesen nur geringe Differenzen zwischen den Standorten auf. *Quercus* erreichte ein Minimum zwischen -2.0 und -2.5 MPa, *Platanus* senkte sein osmotisches Potential von -1.2 auf -1.8 MPa ab; es müssten niedermolekulare Stoffe in grösserer Menge auftreten.

Bei *Aesculus* und *Tilia* konnten signifikante Unterschiede zwischen den Standorten festgestellt werden. Während *Aesculus* am unbelasteten Standort das osmotische Potential von -1.0 auf -1.4 MPa absenkte, wurde ein Schlusswert von -2.5 MPa am belasteten Standort gefunden. Bei *Tilia* war der Unterschied weniger massiv, doch wurde im Sommer immerhin eine Differenz von 0.5 MPa zwischen den beiden osmotischen Potentialen erreicht (-1.8 und -2.3 MPa). Sowohl *Aesculus* wie *Tilia* nehmen in grossen Mengen Chlorid und Natrium an den salz-



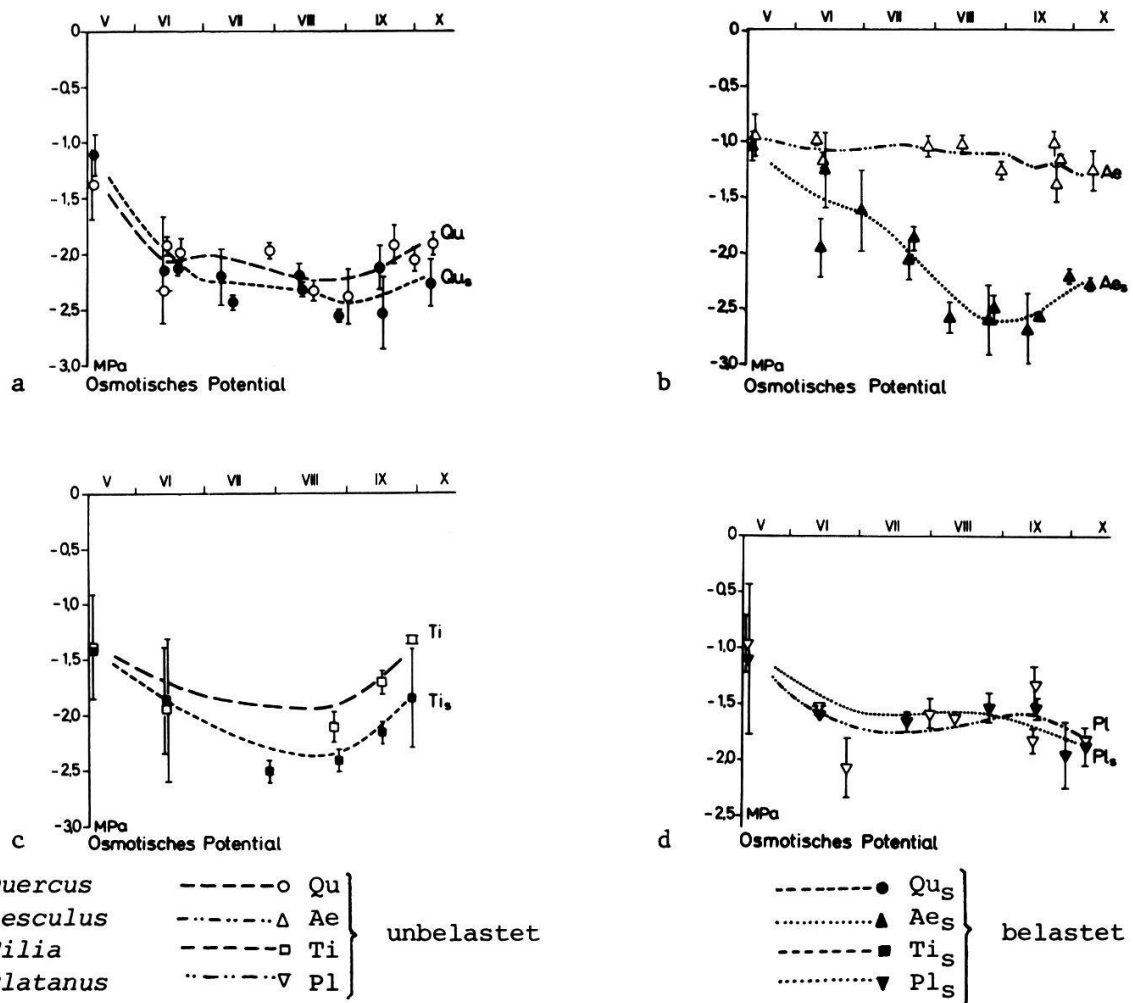


Abb. 16a-d. Nachmittägliche Mittelwerte mit Ausgleichskurve und 95 % Vertrauensgrenzen

belasteten Standorten auf (ZOLG 1979, vgl. auch LEH 1973, RUGE 1978), so dass diese Ionen als wahrscheinliche Ursache der Unterschiede zwischen den Standorten in Frage kommen.

KAPLAN und GALE (1974) wiesen auf die Möglichkeit von methodischen Artefakten bei der Bestimmung des osmotischen Potentials von Halophyten hin. RUGE (1974) postulierte eine Bindung von Chlorid an Proteine in salzgeschädigten *Aesculus*-Blättern. Aufgrund der Ergebnisse von BENNERT (persönliche Mitteilung) wurden 1979 Testversuche mit Druck-Volumen-Kurven (vgl. ROBERTS und KNOERR 1977) durchgeführt. Die Kurve für einen salzgeschädigten *Aesculus*-Zweig unterschied sich zunächst nicht von derjenigen eines gesunden Zweiges. Durch Verlängern des linearen Teils der beiden Kurven bis zum Schnittpunkt mit der Abszisse

konnte das gleiche osmotische Potential für einen optimalen Wasserzustand ermittelt werden. Bei einem bestimmten Druck in der SCHOLANDER-Apparatur begann die Kurve des salzgeschädigten Zweiges von der des gesunden abzuweichen. Wurde der lineare Teil nach der Abweichung verlängert, so ergab sich ein osmotisches Potential, welches dem kryoskopisch bestimmten entsprach (unveröffentlichte Ergebnisse).

Eine intensivere Untersuchung dieses Phänomens könnte Aufschluss über den Mechanismus der Salztoleranz erbringen und scheint mir ein vielversprechendes Arbeitsthema zu sein. Es bleibt die Schlussfolgerung, dass es sich bei den kryoskopisch an Pressaft bestimmten osmotischen Potentialen durchaus um Artefakte handeln kann, und die aufgenommenen Salzionen in osmotisch inaktiver, gebundener Form im Cytoplasma vorliegen (vgl. RUGE 1974, BULL und BREESE 1970).

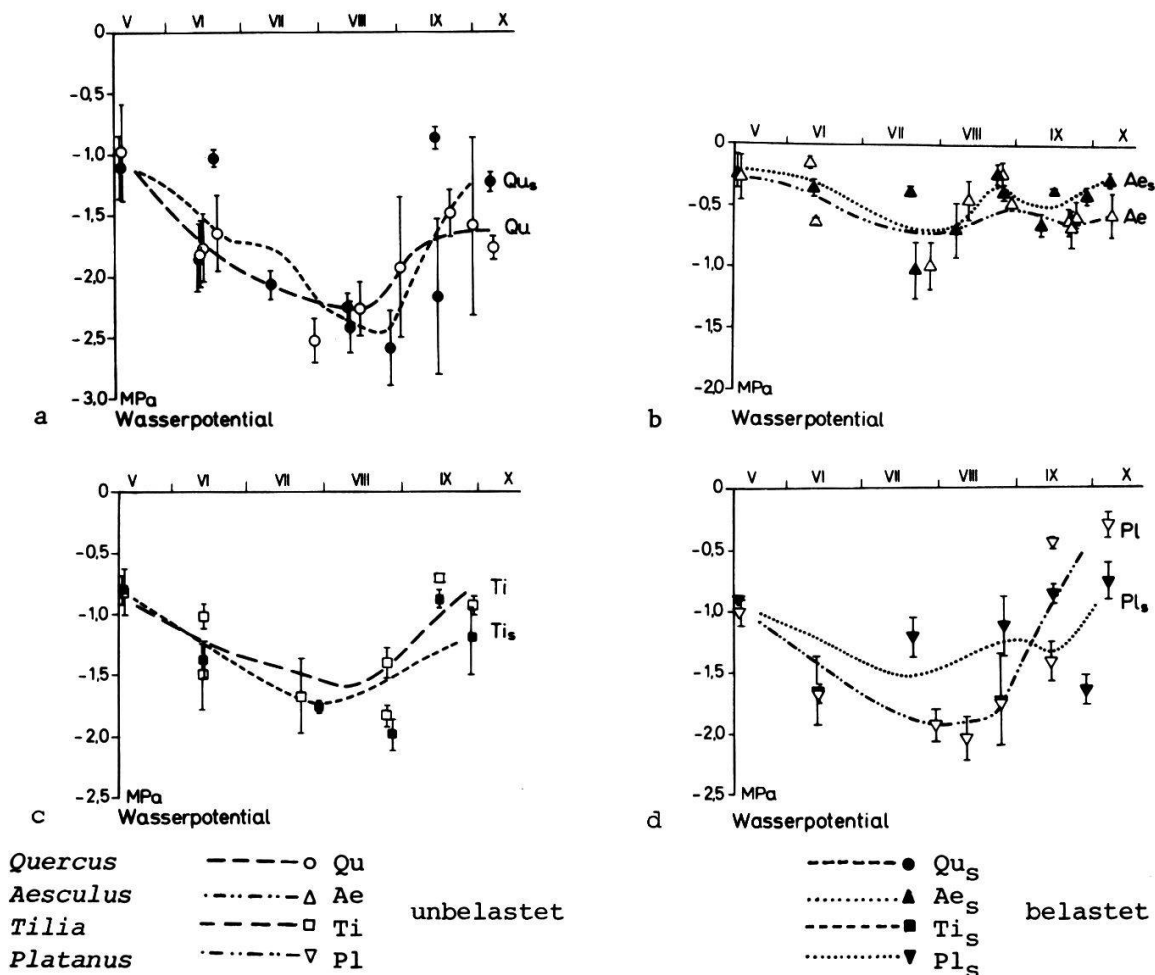


Abb. 17a-d. Nachmittägliche Mittelwerte mit Ausgleichskurve und 95 % Vertrauensgrenzen

Das Wasserpotential (Abb. 17a-d) kann als Index für die Wasserversorgung der Pflanze genommen werden. Die untersuchten Bäume wiesen ein einheitliches Muster auf, welches einer typischen Minimum-Kurve entsprach. Die tiefsten Werte wurden im Sommer gemessen, -2.3 MPa für *Quercus*, -1.7 MPa für *Tilia* und -0.8 MPa für *Aesculus*, -1.5 MPa (am salzbelasteten Standort) und -2.2 MPa (am Kontrollstandort) für *Platanus*. Als einzige der Baumarten wies *Platanus* einen Unterschied zwischen den Standorten auf. Da die Salzbelastung zu einem höheren Wasserpotential, d.h. einem geringeren Wasserstress, führt, muss entweder ein positiver Effekt der verringerten Transpiration (vgl. oben) oder ein Unterschied der abiotischen Bedingungen für den Wasserhaushalt vorliegen.

Das Druckpotential (Abb. 18a+b), oft auch als Turgor bezeichnet, erlaubt Rückschlüsse auf Beeinträchtigungen der Wachstumsprozesse durch Wasserstress (vgl. GALE et al. 1967, OERTLI 1975). *Quercus* erreichte im Sommer an beiden Standorten vergleichbar negative Druckpotentiale, die Kurven wiesen grosse Schwankungen auf. Bei *Tilia* konnte ebenfalls kein Unterschied in den Turgorwerten während der Vegetationsperiode gefunden werden, doch waren die Schwankungen nur gering. *Platanus* hielt am salzbelasteten Standort nur ein relativ geringes, aber immer positives Druckpotential, im Herbst erfolgte dann ein Anstieg auf +0.8 MPa. Am salzunbelasteten Standort wurden bereits am Beginn der Messperiode negative Druckpotentiale ermittelt, die erst im Herbst verschwanden. Der Turgor von *Aesculus* am unbelasteten Standort blieb ziemlich konstant, negative Werte wurden nicht annähernd erreicht. Ein völlig abweichender Verlauf wurde am salzbelasteten Standort gefunden.

Das Druckpotential nahm im Verlauf der Vegetationsperiode auf den beinahe dreifachen Wert zu! Eine Zunahme des Turgor durch Salzeinwirkung ist zwar bekannt (GALE et al. 1967, BERNSTEIN 1961, 1963), doch erscheint die hier gefundene etwas zu gross. Mittels einer linearen Regression wurde die Korrelation des Druckpotentials mit dem Wasserpotential und dem osmotischen Potential untersucht (Tab. 7 und 8). Es ergab sich, dass der Turgor in der Mehrzahl der Fälle mit dem Wasserpotential und nur bei der salzbelasteten *Aesculus* mit dem osmotischen Potential korreliert war. Es muss darauf hingewiesen werden, dass das Druckpotential aus der Differenz zwischen dem osmotischen und dem Wasserpotential berechnet worden war. Fehler bei der Bestimmung einer dieser beiden Grössen würden sich also unmittelbar auswirken. Bereits bei der Besprechung des osmotischen Potentials von *Aesculus* wurde auf die Möglichkeit methodischer

Artefakte hingewiesen (vgl. oben), so dass der hohe Turgor als Folge einer Fehlerfortpflanzung anzusehen wäre.

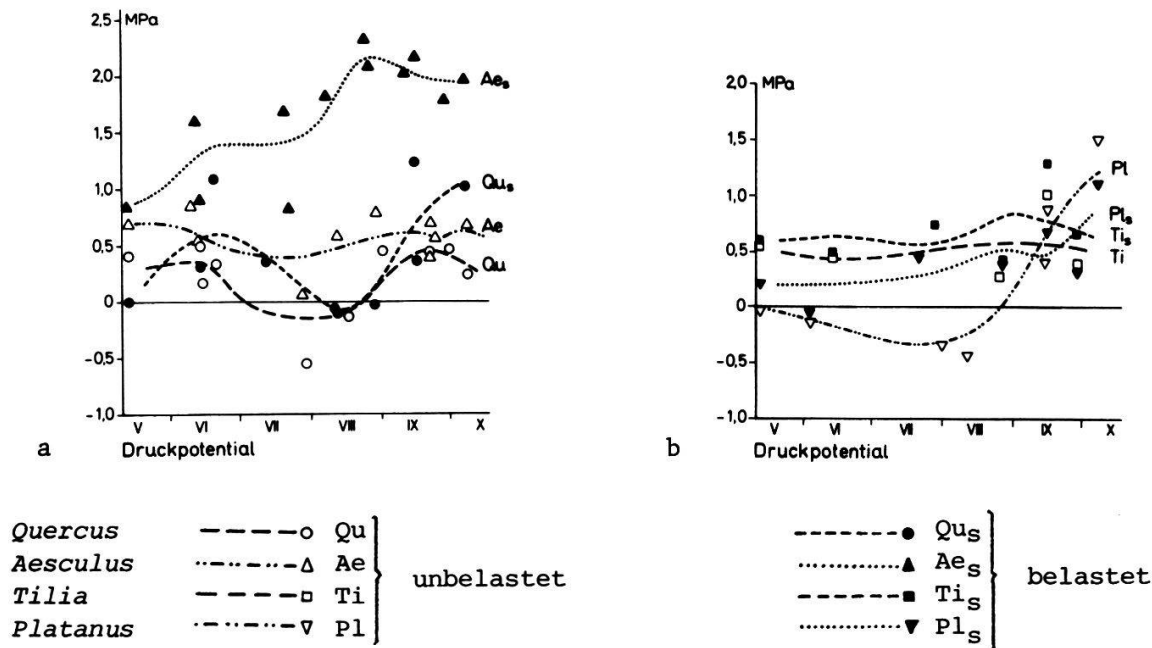


Abb. 18. Nachmittägliche Mittelwerte mit Ausgleichskurve. a: *Quercus* und *Aesculus*. b: *Tilia* und *Platanus*

Tab. 7. Korrelation des Turgor mit dem Wasserpotential

Art	r	p
Ae	0.81	0.01
Ae <sub>S</sub>	0.26	-
Qu	0.77	0.01
Qu <sub>S</sub>	0.76	0.02
Ti	0.72	-
Ti <sub>S</sub>	0.53	-
Pl	0.91	0.01
Pl <sub>S</sub>	0.72	0.1

Tab. 8. Korrelation des Turgor mit dem osmotischen Potential

Art	r	p
Ae	0.25	-
Ae <sub>S</sub>	-0.90	0.001
Qu	0.05	-
Qu <sub>S</sub>	0.07	-
Ti	0.21	-
Ti <sub>S</sub>	-0.14	-
Pl	-0.27	-
Pl <sub>S</sub>	-0.38	-

r = Korrelationskoeffizient

p = Wahrscheinlichkeit, dass die Korrelation nicht signifikant ist

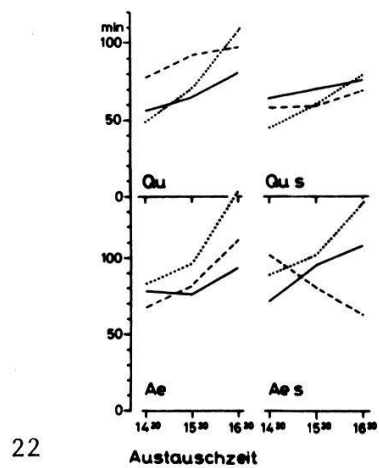
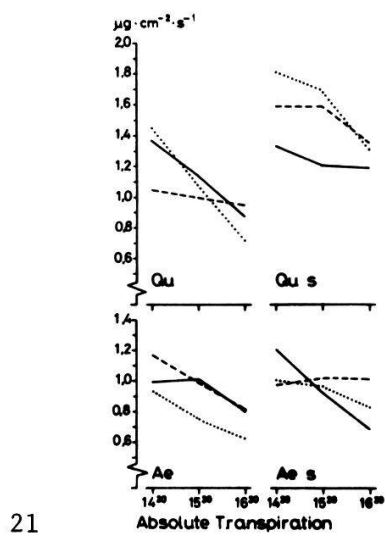
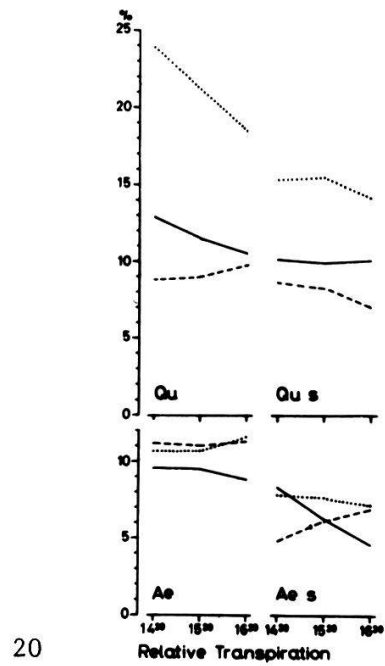
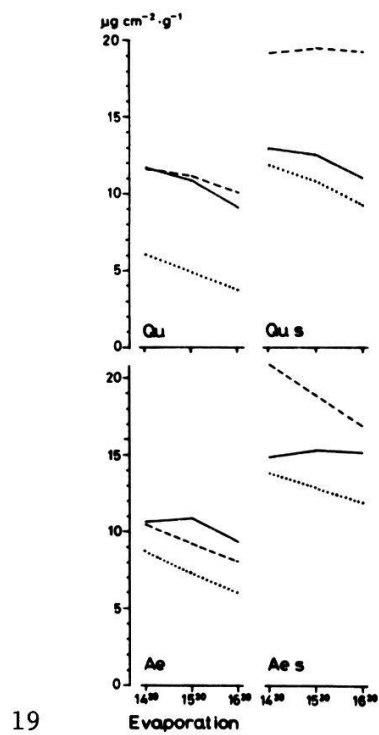
Einer Erklärung bedarf auch das Auftreten von negativen Druckpotentialen. In der Fachwelt herrscht keine Einigkeit über deren Existenz. In dieser Arbeit

dürfte der berechnete negative Turgor methodisch bedingt sein und nicht den realen Verhältnissen entsprechen. BOYER (1967) fand, dass die mit der SCHOLANDER-Bombe bestimmten Wasserpotentiale oft zu positiv sind. WALTER (1963) wies ein Absinken des osmotischen Potentials nach, wenn bei der Herstellung des Pressaftes ein höherer als der hier verwendete Druck von 5 MPa verwendet wurde.

KYRIAKOPOULOS und RICHTER (1977) bezeichneten die Existenz eines negativen Turgors aufgrund eines methodischen Vergleichs als zweifelhaft. TYREE (1976) besprach weitere Fehlerquellen bei der Bestimmung des osmotischen Potentials: Wenn das für den Turgor massgebliche osmotische Potential im Symplast während der Messung durch die Zufuhr von - fast reinem - apoplastischem Wasser verdünnt wird, ergibt sich ein Fehler in der Größenordnung von 20 % bei einem Wasserpotential von -2.0 MPa und einem Wassersättigungsdefizit von 12.3 %. Die Rahmenbedingungen entsprechen etwa denen in dieser Arbeit, so dass hier die gleiche Korrektur verwendet werden müsste, worauf keine negativen Druckpotentiale mehr berechnet würden. Die negativen Druckpotentiale werden in der vorliegenden Arbeit nur als Indikator eines angespannten Wasserhaushaltes verwendet.

#### 4.2. Jahreszeitliche Abhängigkeit der nachmittäglichen Tendenzen

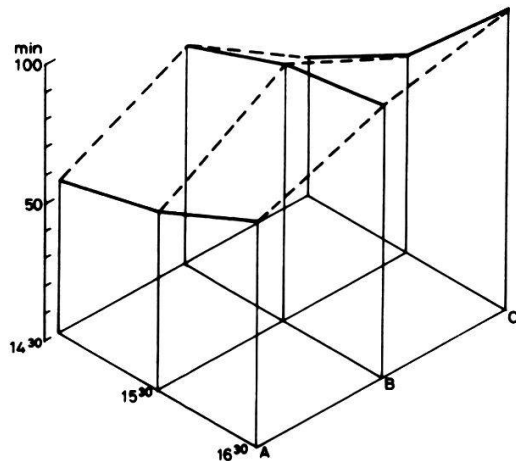
An allen Standorten nahm die klimatische Belastung des pflanzlichen Wasserhaushaltes charakterisierende PICHE-Evaporation (Abb. 19) gegen Abend ab, unabhängig von der Jahreszeit. An den belasteten Standorten wurden im Sommer fast doppelt so hohe Werte wie an den unbelasteten gemessen. Die Auswirkungen der klimatischen Belastung zeigen sich in der pflanzlichen Transpiration (Abb. 21). Sie nahm an allen Standorten in jeder Jahreszeit gegen Abend um etwa ein Drittel ab. Einzige Ausnahme war *Aesculus* im Sommer am salzbelasteten Standort, wo die Wasserverluste gegen Abend zunahmen. Das wirkte sich in den Werten der relativen Transpiration (Abb. 20) aus, wo einzig eine Zunahme zu verzeichnen war. *Quercus* am unbelasteten Standort wies im Herbst eine sehr hohe relative Transpiration auf. Dass es sich dabei um einen Effekt der geringen herbstlichen PICHE-Evaporation handelte, wurde belegt, indem die Wasserverluste auf den Wassergehalt der Blätter bezogen wurden, was in Abb. 22 als Austauschzeit dargestellt wurde. Hier fiel der herbstliche Verlauf von *Quercus* am unbelasteten Standort nicht mehr aus dem Rahmen. An allen Standorten und in jeder jahreszeitlichen Phase wurde der



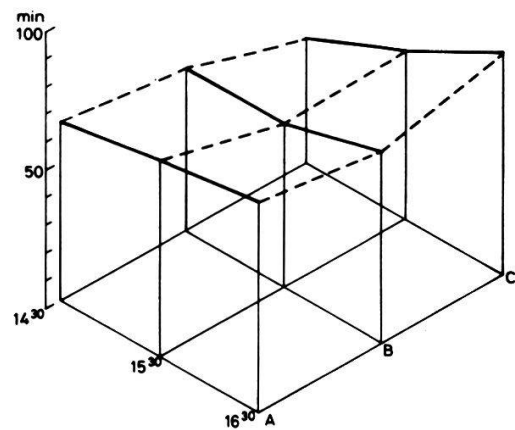
Qu = *Quercus*, Ae = *Aesculus*, s = belasteter Standort  
 Fröhling — Sommer - - - - - Herbst ······

Abb. 19-22. Nachmittägliche Tendenzen und ihre Abhängigkeit von der Jahreszeit

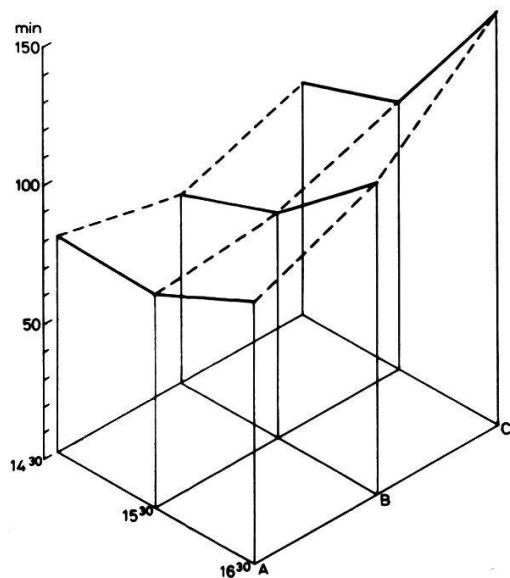
Wasserumsatz verlangsamt. Eine Ausnahme bildete wie schon vorher bei der relativen Transpiration *Aesculus* im Sommer am belasteten Standort: der Wasseraustausch wurde gegen Abend beschleunigt. In Abb. 23 wurde die Austauschzeit als dreidimensionale Graphik dargestellt, und auch so fiel das sommerliche Verhalten der salzbelasteten *Aesculus* auf: Während um 1430 h noch die höchsten Werte des Jahres, d.h. der langsamste Wasseraustausch festgestellt wurde, erfolgte dieser um 1630 h am schnellsten! (Vgl. S. 31, 33)



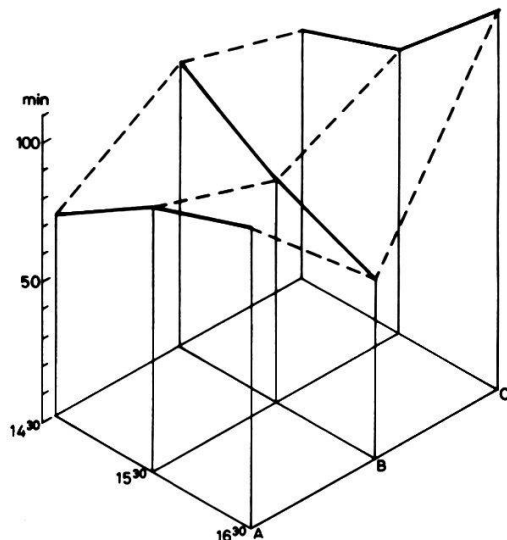
a. *Quercus*, unbelastet



b. *Quercus*, belastet



c. *Aesculus*, unbelastet



d. *Aesculus*, belastet

Frühling (A)

Sommer (B)

Herbst (C)

Abb. 23a-d. Nachmittägliche Tendenzen und ihre Abhängigkeit von der Jahreszeit; Jahresgänge und ihre Abhängigkeit von der Tageszeit

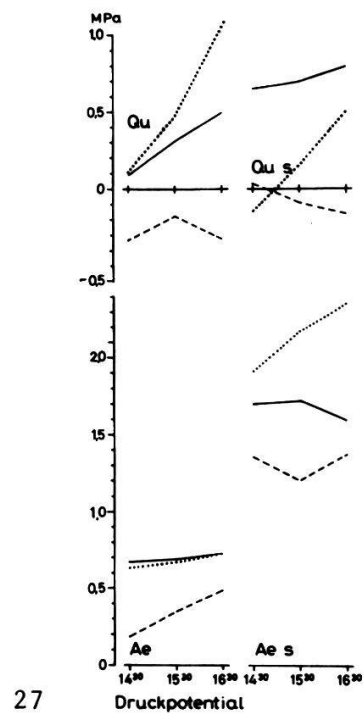
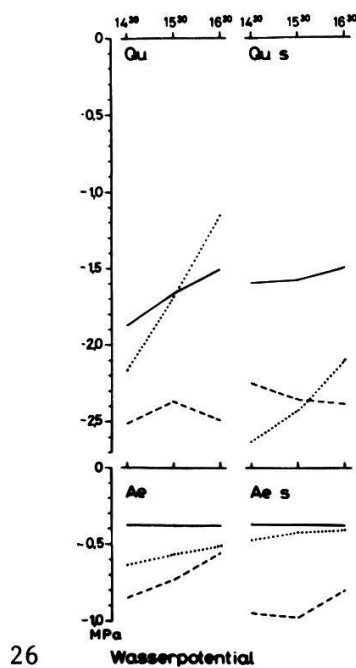
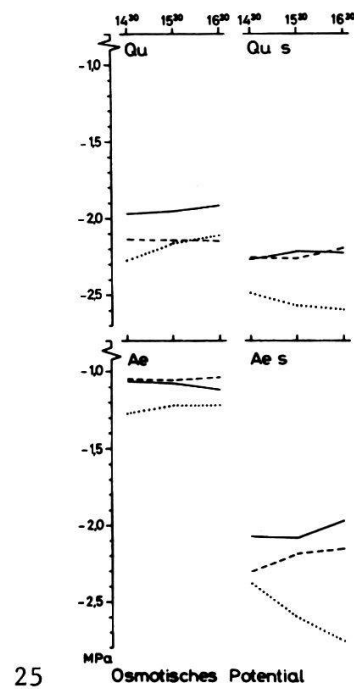
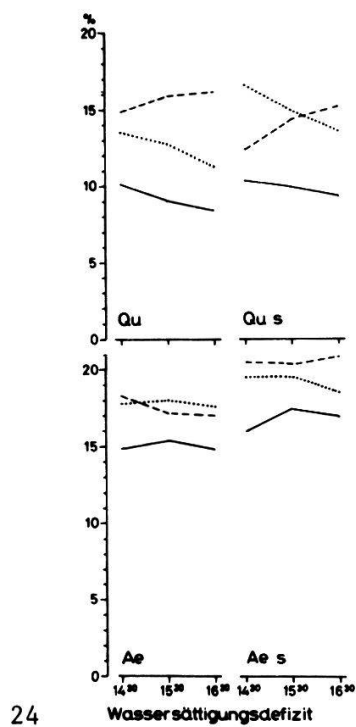
Auswirkungen von Wasserverlusten wurden zunächst über das Wassersättigungsdefizit (Abb. 24) erfasst. Im Sommer nahm bei *Quercus* an beiden Standorten der Wassermangel zu, obwohl die Transpiration abnahm. Im Frühjahr und im Herbst wurde gegen Abend eine Verbesserung der Wasserbilanz festgestellt. An allen Standorten wurden die geringsten Defizite im Frühjahr gemessen.

Die täglichen Variationen des osmotischen Potentials blieben - mit Ausnahme von *Aesculus* am salzbelasteten Standort - gering (Abb. 25). Die Werte im Frühjahr unterschieden sich nur wenig von denen im Sommer, erst im Herbst wurden tiefere osmotische Potentiale gemessen. *Aesculus* am salzbelasteten Standort zeigte im Frühjahr und Sommer eine abendliche Abnahme der Konzentration osmotisch wirksamer Stoffe. Im Herbst wurde dann das Gegenteil gemessen, nämlich ein schnelles Absinken des osmotischen Potentials.

Wesentlich ausgeprägter sind die täglichen Variationen des Wasserpotentials (Abb. 26). *Quercus* erhöhte ihr Wasserpotential im Frühjahr und Herbst gegen Abend in einem beträchtlichen Ausmass, aber im Sommer sank das Potential gegen Abend leicht ab. Eine deutliche Zunahme des Wasserpotentials gegen Abend sind nach WARING und CLEARY (1967) als Zeichen eines ausgewogenen Wasserhaushaltes zu betrachten, wogegen ein Plateau oder gar ein Absinken als Merkmal von Wasserstress gilt. *Aesculus* hatte in allen Jahreszeiten ein steigendes Wasserpotential aufzuweisen, ausser im Frühjahr, wo aber die Werte so hoch waren, dass ein Plateau keinen Stress bedeuten konnte. Im Sommer wurden die tiefsten Wasserpotentiale gemessen, aber der abendliche Anstieg deutete trotzdem einen ausgeglichenen Wasserhaushalt an.

Für das Druckpotential (Abb. 27) gilt eine ähnliche Argumentation. Im Sommer wurde bei *Quercus* an beiden Standorten ein negativer Turgor gemessen, welcher eine angespannte Wasserbilanz indizierte. Im Frühjahr und Herbst stieg der Turgor gegen Abend, wenn tagsüber auch sogar negative Werte erreicht worden waren, so dass der Wasserhaushalt ausgewogen erschien. Bei *Aesculus* wurde die grösste Variation des Turgor im Sommer am unbelasteten Standort gemessen, wogegen im Frühjahr und Herbst eine relative Konstanz der Werte festzustellen war. Am salzbelasteten Standort wurden - überlagert von einer jahreszeitlichen Zunahme - ebenfalls die niedrigsten Druckpotentiale festgestellt. Ein abendlicher Anstieg war nur im Herbst deutlich zu erkennen.





Qu = *Quercus*, Ae = *Aesculus*, s = belasteter Standort

Frühling —————

Sommer - - - - -

Herbst ········

Abb. 24-27. Nachmittägliche Tendenzen und ihre Abhängigkeit von der Jahreszeit

#### 4.3. Verhalten der Arten während der sommerlichen Stressphase

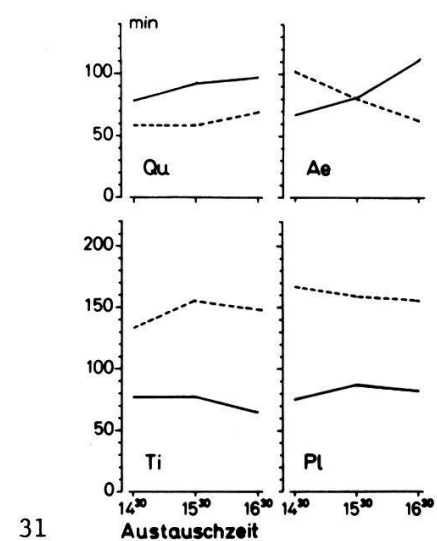
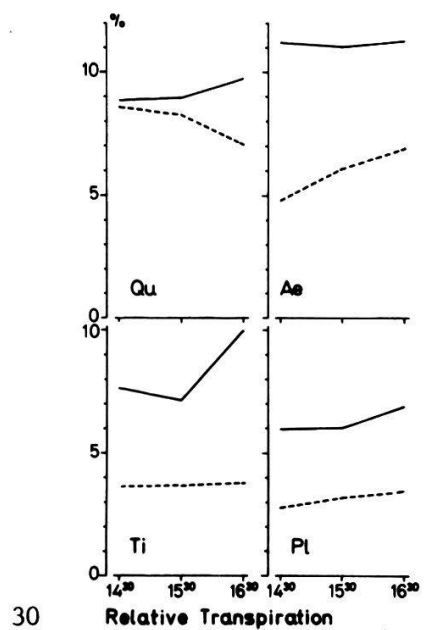
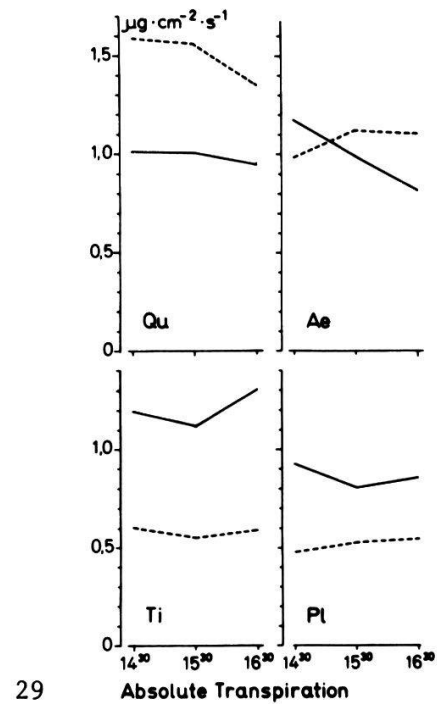
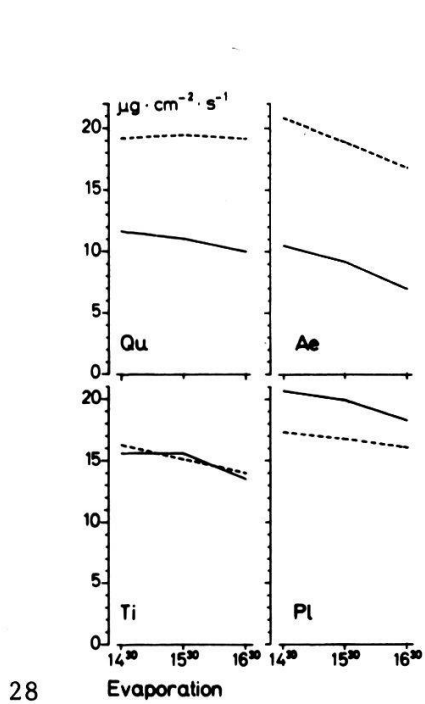
Die Evaporation (Abb. 28) war an den salzbelasteten Standorten von *Aesculus* und *Quercus* wesentlich höher als an den salzunbelasteten, die Werte lagen bei  $20 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  und  $10 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  respektive. Bei *Tilia* konnte kein Unterschied zwischen den Standorten gefunden werden, bei *Platanus* wurde am unbelasteten Standort eine etwas höhere Evaporation gemessen, welche sich den Werten der Evaporation an den belasteten Standorten von *Aesculus* und *Quercus* näherte. Die Werte für *Tilia* und *Platanus* lagen zwischen denen der andern Bäume.

Die absolute oder flächenbezogene Transpiration (Abb. 29) zeigte, dass die Arten unterschiedlich reagierten. *Quercus* riskierte höhere, *Aesculus* geringere Wasserverluste am salzbelasteten Standort. *Tilia* und *Platanus* verringerten ihre Transpiration auf 50 % derjenigen am unbelasteten Standort. Die absoluten Werte aller Arten an den unbelasteten Standorten waren vergleichbar und lagen im Bereich von  $0.8$  bis  $1.2 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Wurden die Transpirationswerte auf die Evaporation bezogen, was als relative Transpiration in Abb. 30 dargestellt wurde, konnte beobachtet werden, dass an den salzbelasteten Standorten die pflanzliche Verdunstung nicht in einem der physikalischen Verdunstung entsprechenden Ausmass erhöht worden war. *Aesculus* wies am unbelasteten Standort die höchste, *Platanus* die niedrigste relative Transpiration auf.

Der als Austauschzeit (Abb. 31) dargestellte Wasserumsatz war an den unbelasteten Standorten für alle Arten ähnlich. Auf die Salzbelastung reagierten *Tilia* und *Platanus* mit einer drastischen Verlangsamung ihres Wasseraustausches; *Quercus* beschleunigte den Umsatz und *Aesculus* wies mittags einen schnelleren und abends einen langsameren Wasseraustausch auf (die Mittelwerte der beiden Standorte unterschieden sich nicht).

Die in Tabelle 9 angegebenen Diffusionswiderstände ergaben für die unbelasteten Standorte typische Werte, welche zwischen  $11$  und  $16 \text{ s cm}^{-1}$  schwankten. *Platanus* lag mit  $25 \text{ s cm}^{-1}$  allerdings weit darüber. Als Reaktion auf die Salzbelastung war eine Reduktion bei *Quercus*, eine leichte Zunahme bei *Aesculus* und eine deutliche bei *Platanus* und *Tilia* zu verzeichnen.

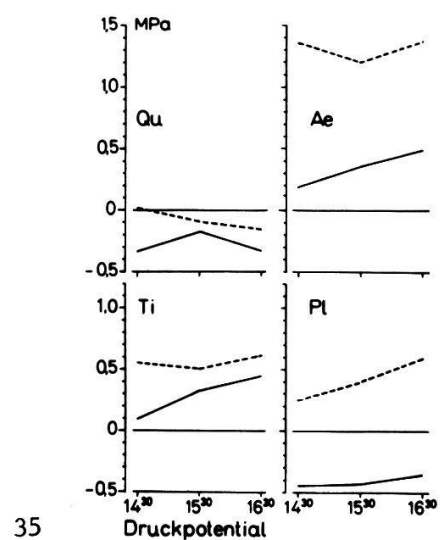
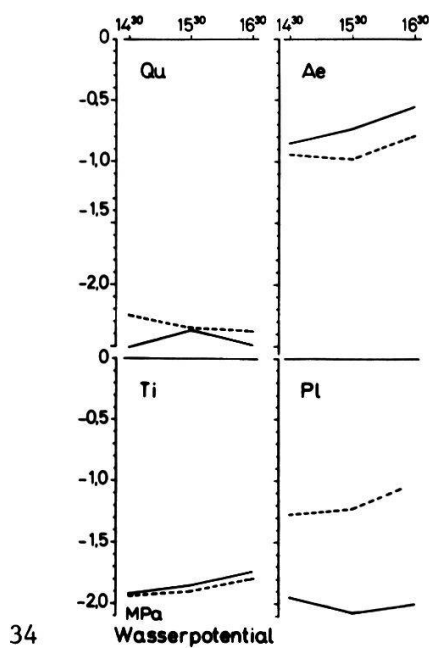
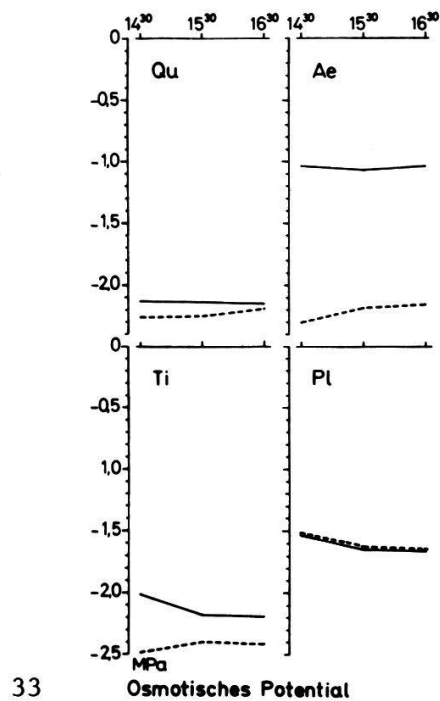
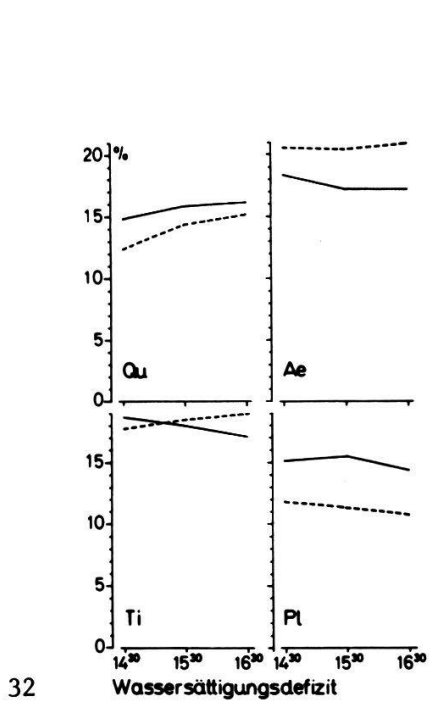


Qu = *Quercus*, Ae = *Aesculus*, Ti = *Tilia*, Pl = *Platanus*

unbelasteter Standort ———

belasteter Standort - - - - -

Abb. 28-31. Nachmittägliche Tendenzen in der sommerlichen Stressphase



Qu = *Quercus*, Ae = *Aesculus*, Ti = *Tilia*, Pl = *Platanus*

unbelasteter Standort ———

belasteter Standort - - - - -

Abb. 32-35. Nachmittägliche Tendenzen in der sommerlichen Stressphase

In Tabelle 9 sind die für die pflanzlichen Wasserverluste wichtigen Messungen zusammengefasst. Die Unterschiede zwischen den Standorten erwiesen sich im allgemeinen als signifikant. Typisch für die cuticuläre Transpiration (Tab. 9) waren Werte zwischen 0.1 und 0.3  $\mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Nur zweimal wurden höhere Werte gefunden, einmal bei *Aesculus* am belasteten Standort und einmal bei *Tilia* am unbelasteten Standort.

Das Wassersättigungsdefizit (Abb. 32) an den unbelasteten Standorten lag bei 15 % für *Platanus* und *Quercus*, bei 18 % für *Aesculus* und *Tilia*. Am belasteten Standort wurden bei *Quercus* und *Platanus* geringere Werte, aber nie weniger als 10 % gemessen. Bei *Tilia* konnte kein Unterschied zwischen den Standorten gefunden werden, bei *Aesculus* wurden am salzbelasteten Standort Werte von mehr als 20 % festgestellt.

Das osmotische Potential (Abb. 33) zeigte bei *Platanus* keinen Unterschied zwischen den beiden Standorten und lag bei -1.6 MPa. Auch bei *Quercus* war die Differenz nur gering, die Werte lagen bei -2.2 MPa. Anders war die Situation bei *Tilia*. Hier sank das osmotische Potential am unbelasteten Standort gegen Abend von -2.0 MPa auf -2.2 MPa ab, wogegen es am salzbelasteten Standort von -2.5 MPa aus geringfügig zunahm. Der deutlichste Unterschied zwischen den Standorten wurde bei *Aesculus* gefunden, hier lag das osmotische Potential am salzbelasteten Standort um -1.2 MPa tiefer!

Das Wasserpotential (Abb. 34) wies bei *Quercus* und *Tilia* nur kleine Unterschiede zwischen den Standorten auf und lag bei *Tilia* um -1.8 MPa, bei *Quercus* um -2.4 MPa. *Aesculus* erreichte am salzbelasteten Standort um 0.2 MPa tiefere Wasserpotentiale als am unbelasteten. Sie wies das höchste Wasserpotential aller untersuchten Arten auf (-0.8 MPa). Bei *Platanus* fand sich ein markanter Unterschied zwischen den beiden Standorten, am salzbelasteten lag das Wasserpotential mit -1.2 MPa durchschnittlich um 0.8 MPa höher als am unbelasteten Standort. Die Schwankungen der Messwerte waren bei *Quercus* und *Tilia* geringer als bei *Platanus* und *Aesculus* (Ausnahme: *Platanus* am unbelasteten Standort). Das Druckpotential (Abb. 35) erreichte an drei Standorten negative Werte, nämlich bei den beiden von *Quercus* und dem unbelasteten von *Platanus*. Ausser bei *Quercus* war die allgemeine Tendenz gegen Abend eine Zunahme des Druckpotentials. In allen Fällen war das Druckpotential am salzbelasteten Standort höher, was vor allem bei *Aesculus* und *Tilia* auffällt und an die bei diesen

Tab. 9. Nachmittägliche Mittelwerte der Transpiration und abgeleiteter Grössen mit Vertrauensgrenzen (95 %) während der sommerlichen Stressphase

	Transpiration			cuticuläre Transpiration			relative Transpiration			Diffusionswiderstand			Austauschzeit		
	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$		p	$\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$		p	%		p	$\text{s cm}^{-1}$		p	min		p
	x	conf		x	conf		x	conf		x	conf		x	conf	
Qu	1.06	0.21	0.001	0.133	0.035	0.01	9.3	1.9	---	16.0	2.5	0.001	76	15	0.01
Qu <sub>S</sub>	1.47	0.20		0.247	0.076		7.8	1.3		10.8	1.5		60	8	
Ae	1.01	0.18	---	0.197	0.038	0.001	11.2	1.7	0.001	11.3	2.3	0.001	70	9	---
Ae <sub>S</sub>	1.06	0.13		0.480 <sup>+</sup>	0.560		6.1	1.1		16.3	2.3		77	16	
Ti	1.25	0.20	0.001	0.502	0.084	0.001	8.8	2.1	0.001	15.0	2.3	0.001	71	11	0.001
Ti <sub>S</sub>	0.59	0.17		0.122	0.021		3.7	0.9		31.3	9.5		140	40	
Pl	0.88	0.11	0.001	0.275	0.068	---	6.1	2.1	0.01	25.1	5.1	0.001	80	14	0.001
Pl <sub>S</sub>	0.51	0.06		0.257	0.106		3.1	0.4		37.7	4.6		162	18	

x = Mittelwert

conf = 95 % Vertrauensgrenzen

p = Wahrscheinlichkeit, dass die beobachtete Differenz nicht signifikant ist

0.480<sup>+</sup> : Mittelwert von zwei Messungen

Bäumen am salzbelasteten Standort niedrigeren osmotischen Potentiale erinnert. Das negative Druckpotential am unbelasteten Standort von *Platanus* hingegen ist durch das tiefe Wasserpotential verursacht, da die osmotischen Potentiale sich nicht unterscheiden.

Bei *Platanus* wurde eine komplexe Situation vorgefunden. Die klimatische Belastung war am salzbelasteten Standort eher geringer. Dieser Unterschied erschien aber nicht gross genug, um die Differenzen im Wasserhaushalt zu erklären: bei praktisch gleichem osmotischem Potential ein sehr viel positiveres Wasserpotential (und Druckpotential) am salzbelasteten Standort. Dazu müsste die dort verringerte Transpiration beigetragen haben, so dass geringere Belastung in Kombination mit verringerten Verlusten für diese unerwarteten Ergebnisse verantwortlich zu machen wäre.

## 5. Diskussion

### 5.1. Sind die Ergebnisse repräsentativ?

Zunächst muss geklärt werden, ob die Ergebnisse im Hinblick auf Art wie Einzelexemplar typisch und charakteristisch sind. In Vergleichsmessungen an verschiedenen Bäumen der gleichen Art wurden nur geringe Variationen gefunden. Sie waren im Gegensatz zu den täglichen und saisonalen Schwankungen der Messgrössen nicht signifikant, wie dies auch andere Autoren bestätigen (z.B. WARING und CLEARY 1967).

Innerhalb einer Baumkrone herrschen unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen, welche zum Teil auch durch den Baum selber modifiziert werden können. Dem entsprechen anatomische, morphologische und physiologische Differenzen der Einzelblätter als Anpassung an die unterschiedlichen Umweltbedingungen. So sind Wipfelblätter xeromorpher, einem grösseren relativen Wassermangel ausgesetzt (SCHNOCK und GALOUX 1974) und haben eine grössere Anzahl von Spaltöffnungen pro Flächeneinheit (YOCUM 1935, HUZULAK und ELIAS 1975). Die Stomata schliessen bei einem geringeren Turgor - also später - und bleiben auch weniger lang geschlossen als diejenigen der Blätter an der Kronenbasis (HALBWACHS 1971, BEADLE et al. 1978).

Das Wasserpotential an jeder Stelle einer Pflanze ergibt sich nach RICHTER et al. (1972) aus einem hydrostatischen (bedingt durch die Gravitation) und einem hydrodynamischen (bestimmt durch das Produkt aus Wasserflux und hydraulischem Widerstand) Teilwasserpotential sowie dem Bodenwasserpotential (vgl. auch RITCHIE und HINCKLEY 1975). Ist die Transpiration gleich Null, so bleibt als Differenz zwischen Zweigen verschiedener Insertionshöhen nur noch das hydrostatische Teilwasserpotential erhalten, welches ca. 0.01 MPa (= 0.1 bar) pro Meter beträgt.

In einem Teil der Arbeiten zu diesem Fragenkomplex wurden in Abhängigkeit von den Klimabedingungen grössere als die oben genannten Gradienten bestimmt (RICHTER et al. 1972, HALBWACHS 1971, WARING und CLEARY 1967). Andere Autoren fanden trotz stattfindender Transpiration Werte, welche nur knapp dem hydrostatischen Gradienten entsprachen, wenn nicht sogar ein umgekehrter Gradient gemessen wurde (TOBIESSEN 1971, SUCOFF 1972, HINCKLEY und RITCHIE 1970, SCHOLLANDER et al. 1965). Zur Erklärung wird für diese Fälle ein geringerer hydraulischer Widerstand und eine effizientere Transpirationsregelung postuliert (HALBWACHS 1971, HELLKVIST et al. 1974, HINCKLEY und RITCHIE 1970, RICHTER et al. 1972).

KLEPPER (1968) fand eine zeitliche Verschiebung ansonsten vergleichbarer Wasserpotentiale im Tagesgang von ost- zu westexponierten Blättern. HINCKLEY und RITCHIE (1970) geben an, dass das Wasserpotential der nördlichen Kronenpartie kaum mit dem entsprechenden Mikroklima, sondern vielmehr mit den Wasserpotentialen der Blätter der südlichen Kronenpartie korreliert war.

Welche Auswirkungen könnten diese nun doch beträchtlichen Schwankungen innerhalb des Kronenbereiches eines Baumes auf die Ergebnisse dieser Arbeit haben? Alle Proben wurden von der südlichen Kronenbasis genommen. An der nördlichen Kronenbasis muss mit einer vergleichbaren oder besseren Wasserbilanz gerechnet werden, da die klimatische Belastung des Wasserhaushaltes aufgrund der geringeren Einstrahlung vermindert ist. Zwar wurden interne Umverteilungsprozesse nachgewiesen (HINCKLEY und RITCHIE 1970), doch an der Nordseite keine negativen Wasserpotentiale als an der Südseite gemessen.

In der Wipfelregion ist die stärkste Belastung des Wasserhaushaltes zu erwarten, doch werden diese Blätter unter Stressbedingungen bevorzugt mit Wasser versorgt (vgl. oben). Nach LARCHER (1976) erfolgt die Einschränkung der Transpiration unter Wasserstress zuerst an der nördlichen, dann an der südlichen



Kronenbasis, zuletzt in der Wipfelregion. Die Proben von der südlichen Kronenbasis müssten also in ihren Werten zwischen denen der Wipfelregion und denen der nördlichen Kronenbasis liegen und damit einen mittleren, typischen Wert für den Baum ergeben.

Die belasteten Standorte liegen in breiten Mittelstreifen mit gutem Luftaustausch (Ausnahme: *Tilia*). Diese Standortbedingungen entsprechen nicht den von MEYER (1978) als typisch für innerstädtische Standorte beschriebenen. Normalerweise sind Strassenbäume nur geringen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt und ihr Wurzelraum ist durch einen luft- und wasserundurchlässigen Strassenbelag abgedeckt. Eine wesentlich stärkere Belastung des Wasserhaushaltes an solchen Standorten muss deshalb als wahrscheinlich gelten.

Die breiten Hauptstrassen mit öffentlichem Verkehr sind als Streustufe I eingestuft. Sie werden als erste und am häufigsten bestreut, so dass die Salzbelastung besonders gross ist. Neben dem Mittelstreifen stehen keine parkierten Autos, welche einen Teil der aufgewirbelten Salzlösung abfangen, so dass auch auf diesem Weg zusätzlich eine grosse Menge Salz in den Wurzelbereich der untersuchten Bäume getragen wird.

Die hier untersuchten Strassenbäume des Mittelstreifens sind also typisch für sehr starke Salzbelastung. Die Probennahme an der südlichen Kronenbasis ergibt mittlere Messwerte für den gesamten Kronenbereich und ermöglicht somit Aussagen über den Wasserhaushalt des Baumes.

## 5.2. Vergleich der Baumarten

Alle Arten, die Chlorid anreicherten (vgl. ZOLG 1979), wiesen eine Reduktion der Transpiration auf. Bei *Aesculus* war sie nur schwer zu erkennen, bei *Platanus* und *Tilia* waren die Ergebnisse jedoch eindeutig. Diese Reduktion der Wasserverluste wirkte sich positiv auf die Wasserbilanz aus. Das Wassersättigungsdefizit, das Wasserpotential und das Druckpotential nahmen günstigere oder gleiche Werte wie am unbelasteten Standort an.

Diese Aussage gilt für *Aesculus* nur bedingt, aber die Verschlechterung ist - unter Berücksichtigung der enormen Mehrbelastung des Wasserhaushaltes durch klimatische Faktoren - als sehr gering anzusehen.

Die Differenzen im osmotischen Potential, welche bei *Aesculus* und *Tilia* gefunden wurden, müssten wegen der bereits erwähnten Argumente (vgl. 4.1, S. 31) als methodische Artefakte angesehen werden, welche nicht die tatsächlichen

Zustände im Cytoplasma widerspiegeln. Die Existenz einer "salt-avoidance" (Entfernen der Ionen aus dem Cytoplasma durch adsorbierende Proteine) oder einer "salt-tolerance" (Tolerieren der Ionen in gebundener, inaktiver Form) ist wahrscheinlich (vgl. RUGE 1974).

Wurden die Wasserverluste auf den Blattwassergehalt bezogen, so zeigte sich, dass der Austausch des Wassers an den unbelasteten Standorten bei allen Arten etwa gleich schnell, d.h. in ca. 70-80 Minuten erfolgte, obwohl die klimatischen Bedingungen sich unterschieden. Die Belastung der Bäume durch Streusalz wirkte sich je nach Art unterschiedlich aus. *Tilia* und *Platanus* erneuerten nur noch die Hälfte ihres Wasservorrates in dieser Zeit. *Aesculus* veränderte den Umsatz nicht (doch muss hier wieder an die durch den Iwanoff-Sprung erschwerten Umstände bei der Bestimmung der Transpiration erinnert werden), *Quercus* beschleunigte ihn. Dies entsprach den verschärften Bedingungen am salzbelasteten Standort, doch die Gesamtwasserbilanz von *Quercus* zeigte kaum Unterschiede zwischen den Standorten, so dass es schien, als ob *Quercus* auch mit der grösseren Belastung fertig würde.

Die Transpiration schwankte an den unbelasteten Standorten zwischen 0.88 und  $1.25 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $\sim 3$  und  $4.5 \text{ mg cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ), die cuticuläre Transpiration erreichte Werte um  $0.2 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Tab. 9). LARCHER (1976) berechnete nach Daten von PISEK Werte von  $4-8 \text{ mg cm}^{-2}\text{h}^{-1}$  für Laubbäume mit geöffneten Stomata und eine cuticuläre Transpiration um  $1 \text{ mg cm}^{-2}\text{h}^{-1}$  ( $\sim 0.25 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Wird berücksichtigt, dass die Messungen während der Stressphase im Sommer bei zumindest teilweise geschlossenen Stomata erfolgten, so muss die Uebereinstimmung der Angaben von LARCHER (1976) mit denen in Tabelle 9 als gut bezeichnet werden. Die hohe cuticuläre Transpiration von *Tilia* am belasteten Standort kann vorerst nicht erklärt werden. Der andere hohe Wert in der Tabelle 9, *Aesculus* am belasteten Standort, ist auf die schon erwähnten Schwierigkeiten bei den Messungen zurückzuführen; von 16 Messungen konnten hierzu nur 2 verwendet werden.

Auch für die Diffusionswiderstände von Laubbäumen werden von anderen Autoren ähnliche Werte wie in Tabelle 9 angegeben, so von KÖRNER (1979)  $2-5 \text{ s cm}^{-1}$  für geöffnete Stomata; FEDERER (1976) und CLINE und CAMPBELL (1976) machen Angaben, aus welchen sich ein Diffusionswiderstand von  $20-25 \text{ s cm}^{-1}$  bei geschlossenen Stomata berechnen lässt.

Die an den salzbelasteten Standorten von *Tilia* und *Platanus* gefundenen Diffu-

sionswiderstände sind ungewöhnlich hoch ( $> 30 \text{ s cm}^{-1}$ ). Dazu ist zu bemerken, dass der berechnete Diffusionswiderstand nicht nur eine stomatäre, sondern auch eine interzelluläre (Mesophyll-) Komponente enthält, welche im allgemeinen als vernachlässigbar klein betrachtet wird. KAPLAN und GALE (1972), SLATYER (1970) und DE JONG (1978) wiesen aber eine Zunahme des interzellulären Widerstandes durch Salz nach. Doch auch der stomatäre Diffusionswiderstand nimmt bei Salinität zu (KIRKHAM et al. 1972b, 1974, SHALHEVET und BERNSTEIN 1968, ACEVES-NAVARRO et al. 1975).

Ein reduzierter Turgor muss als Ursache ausgeschlossen werden (vgl. auch GALE et al. 1967, BOYER 1965, ACEVES-NAVARRO et al. 1975). Indirekte Hinweise auf einen möglichen Wirkungsmechanismus lieferten MIZRAHI et al. (1971), welche eine Zunahme der Abscisinsäurekonzentration als Reaktion auf Natriumchlorid nachwiesen. Dieses pflanzliche Hormon kann einen Stomataschluss bewirken (COOPER et al. 1972, KRIEDEMANN et al. 1972).

Am salzunbelasteten Standort von *Platanus*, wo im Sommer ein extremer Wasserstress gemessen wurde, betrug der Diffusionswiderstand nur 2/3 desjenigen von *Platanus* am salzbelasteten Standort, wo für den Wasserhaushalt günstigere Bedingungen herrschten. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf eine Zunahme eines nicht stomatären Diffusionswiderstandes bei *Platanus*. Für *Tilia* erscheint dies aufgrund ähnlicher Argumentation wahrscheinlich, bei *Aesculus* muss einmal mehr auf die Schwierigkeiten bei der Transpirationsmessung verwiesen werden. Zumindest kann aber auch für diese Art eine Zunahme des interzellulären Widerstandes nicht ausgeschlossen werden (vgl. 2.6).

Aufgrund der hohen Diffusionswiderstände für Wasserdampf muss ausgeschlossen werden, dass Strassenstaubkörner und in Auspuffgasen enthaltene Substanzen die Spaltöffnungen lähmten und sie offen hielten, wie dies OERTLI et al. (1979) nachgewiesen haben.

Die Wassersättigungsdefizite waren bei allen Arten ähnlich; typisch für die unbelasteten Standorte waren Werte zwischen 15 und 18 %. An den salzbelasteten Standorten fanden sich niedrigere Werte (Ausnahme: *Aesculus*). Bei *Tilia* und *Platanus* bieten sich die unter Salzeinfluss reduzierten Wasserverluste als Erklärung an, bei *Quercus* dürften morphologische Anpassungen die Ursache sein (vgl. unten). Es wurde bereits erwähnt, dass die Wasserverluste von *Aesculus* wegen des "Iwanoff-Sprungs" überschätzt wurden. Trotzdem muss die angenommene - durch Salzionen verursachte - Reduktion der Transpiration

geringer sein als die bei *Platanus* und *Tilia* gefundene, da am salzbelasteten Standort ein grösseres Wassersättigungsdefizit und damit eine schlechtere Wasserbilanz festgestellt wurde; diese muss durch erhöhte Wasserverluste bedingt sein.

ROBERTS und KNOERR (1977) untersuchten die Zusammenhänge der Grössen des Wasserhaushaltes bei verschiedenen Baumarten mittels Druck-Volumen-Kurven und geben an, dass erst bei einem Wassersättigungsdefizit von ca. 20 % ein dem osmotischen Potential äquivalentes Wasserpotential erreicht wird, d.h. kein Turgor mehr auftritt. Unveröffentlichte Untersuchungen ergaben 1977, dass für die untersuchten Arten ähnliche Kurven erstellt werden können. Die Wassersättigungsdefizite erreichten also nur bei *Aesculus* am belasteten Standort kritische Werte.

Der Vergleich der Ergebnisse von CLINE und CAMPBELL (1976) mit den osmotischen Potentialen zeigt, dass die von ihnen untersuchte *Alnus* wie *Aesculus* im Bereich hoher osmotischer Potentiale operiert (-1.0 bis -1.5 MPa). *Platanus* mit osmotischen Potentialen um -1.6 MPa wäre auch diesem Bereich zuzuordnen. LANDOLT (1977) weist die nach KLEIN (1926) in schattigen, feuchten Schluchten des Balkan beheimatete *Aesculus* mässig trockenen bis feuchten, *Platanus* feuchten bis sehr feuchten Standorten zu. Beide Arten weisen relativ grosse Stomata (PISEK et al. 1970) und zerstreutporiges Holz (CARPENTER und SMITH 1975) auf. Da am natürlichen Habitat dieser Arten offensichtlich kaum grössere Belastungen des Wasserhaushaltes auftreten dürften, genügen relativ hohe Wasserpotentiale und damit ebensolche osmotische Potentiale, um die Wasserversorgung der beiden Arten zu garantieren.

Werden die Ergebnisse von CLINE und CAMPBELL (1976) für *Physiocarpus* mit den osmotischen Potentialen von *Tilia* und *Quercus* (um -2.1 MPa) verglichen, so zeigt sich auch hier gute Uebereinstimmung. *Quercus* wird von LANDOLT (1977) als Pflanze mässig trockener bis feuchter Standorte angegeben (Einstufung wie *Aesculus*!), wobei er vermerkt, dass sie auch längere Trockenperioden überstehen kann. *Tilia* wird trockenen Böden zugeordnet. Dieser ökologischen Einschätzung entspricht, dass die beiden Arten relativ kleine Stomata besitzen (PISEK et al. 1970). *Quercus* verfügt über ringporiges Holz, welches einen schnelleren Wassertransport ermöglichen soll (HUBER 1935), wenn auch die langen Wassersäulen in den Leitgefässen unter starker Spannung (Trockenzeiten!) reißen können. PISEK et al. (1970) geben für *Aesculus* und *Platanus* 300-350

Stomata/mm<sup>2</sup> und für *Quercus* und *Tilia* um 450 Stomata/mm<sup>2</sup> an. Es ist leicht einzusehen, dass die vielen kleinen Stomata ein effektiveres System zur Verhütung übermässiger Wasserverluste und damit der Erhaltung einer ausgewogenen Wasserbilanz darstellen als die wenigen grossen von *Aesculus* und *Platanus*.

WALTER (1930) führte die Hydratur als Mass für den Quellungsgrad des Protoplasmas ein. Sie ist ein wichtiger physiologischer Indikator und entspricht dem osmotischen Potential (KREEB 1974). In Anlehnung an dieses Konzept vermuteten CLINE und CAMPBELL (1976), dass *Alnus* aufgrund des relativ hohen osmotischen Potentials einen aktiveren Metabolismus als *Physiocarpus* mit seinem tieferen osmotischen Potential aufweise.

Würde diese Argumentation übernommen, so wären *Aesculus* und *Platanus* bei ausreichender Wasserversorgung gegenüber *Quercus* und *Tilia* konkurrenzfähiger (vgl. auch WIEBE et al. 1970). Im Falle von Wasserstress wäre es *Aesculus* und *Platanus* nicht möglich, ihr Wasserpotential abzusenken, so dass sie in eine kritische Phase geraten würden. Unter denselben Bedingungen könnten *Tilia* und *Quercus* immer noch Wasser aufnehmen, ihre Stomata wären mindestens teilweise offen und die Kohlendioxidversorgung und damit die Photosynthese weiterhin gesichert.

Die täglichen Variationen der Transpirationsgrössen und des Wasserpotentials sowie ihre Veränderungen im Verlauf der Vegetationsperiode entsprechen bei allen untersuchten Arten dem in der Literatur beschriebenen Muster: Nach Sonnenaufgang nimmt die klimatische Belastung des pflanzlichen Wasserhaushaltes wegen der erhöhten Einstrahlung und des zunehmenden Wasserdampfdrucksättigungsdefizites rasch zu. Die Bäume erhöhen ihren Diffusionswiderstand mit zeitlicher Verzögerung, bis nach Mittag maximale Werte erreicht werden. Gegen Abend nimmt die klimatische Belastung und mit ihr der Diffusionswiderstand ab (HINCKLEY und BRUCKERHOFF 1975). Das Wasserpotential ist mit dem Wasserflux korreliert (RICHTER et al. 1972, PEREIRA und KOZLOWSKI 1978), es erreicht in den Mittagsstunden ein Minimum (KLEPPER 1968, HINCKLEY und BRUCKERHOFF 1975, HELLKVIST et al. 1974, RITCHIE und HINCKLEY 1975, CLINE und CAMPBELL 1976).

Mit zunehmendem edaphischem und klimatischem Wasserstress während der Vegetationsperiode verändert sich das Muster des Tagesganges. Das Bodenwasserpotential nimmt in wachsendem Ausmass Einfluss auf das pflanzliche Wasserpotential (HINCKLEY und RITCHIE 1975, SUCOFF 1972). Der Morgenwert des Wasser-

potentials nimmt immer mehr ab, die tägliche Amplitude verschwindet, ein Plateau-Wert wird erreicht und die Erholung während der Nacht wird geringer (WARING und CLEARY 1967, SUCCOFF 1972, PEREIRA und KOZLOWSKI 1978, RITCHIE und HINCKLEY 1975, HELLKVIST und PARSEBY 1976, 1977).

*Tilia* und *Aesculus* erreichten im Gegensatz zu *Quercus* auch während der sommerlichen Stressphase kein eindeutiges Plateau. Dies gilt auch für *Platanus* am salzbelasteten Standort, am salzunbelasteten Standort blieb das Wasserpotential im Sommer konstant und tief, was auf grossen Wasserstress schliessen lässt. Weitere Hinweise auf das unterschiedliche Verhalten der Arten lieferte der Sukkulenzgrad. Im Sommer wies *Quercus* Maximalwerte bei konstantem osmotischem Potential am salzbelasteten Standort auf. Da ein hoher Sukkulenzgrad die Wasservorräte schonen soll (LARCHER 1976), könnte dies als Anzeichen einer morphologischen Anpassung an die sommerliche Wasserstressphase gesehen werden, welche im Herbst wieder rückgängig gemacht wird. Bei *Aesculus* stieg der Sukkulenzgrad kontinuierlich, und das osmotische Potential sank, was den Schluss einer salzinduzierten Sukkulenz, durch welche die Ionenkonzentrationen verdünnt werden soll (KREEB 1974), nahelegt. Die Blätter von *Tilia* am salzbelasteten Standort waren xeromorpher, *Tilia* reagierte auf die Salzbelastung entgegengesetzt wie *Aesculus* (vgl. 2.4).

Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich zwei Wasserhaushaltstypen unterscheiden: *Aesculus* und *Platanus* verfügen über einen relativ schlechten Regelkreis zur Regulation ihrer Wasserverluste und ein hohes Wasserpotential, so dass sie Wasserstress-Situationen schlecht bewältigen können. Ihr relativ hohes osmotisches Potential würde ihnen unter günstigen Versorgungsbedingungen gemäss CLINE und CAMPBELL (1976) eine hohe Stoffwechselaktivität ermöglichen; *Quercus* und *Tilia* weisen dagegen ein angeblich tiefes, metabolisch nachteiliges osmotisches Potential auf, welches ihnen jedoch ebenso negative Wasserpotentiale ermöglicht. Dank dieser guten Wasseraufnahmefähigkeit und ihrem effizienten Spaltöffnungs-Regelsystem können sie die Photosynthese während Stressphasen länger aufrecht erhalten.

Ein Zusammenhang zwischen Salztoleranz und Wasserhaushaltstyp konnte in dieser Arbeit nicht hergestellt werden. In jeder der beiden Gruppen befand sich je eine tolerante und eine nicht-tolerante Art.

Bei krautigen Pflanzen wurde oft eine osmotische Anpassung an die Ionenkonzentration im Substrat gefunden (MEIRI und POLJAKOFF-MAYBER 1967, GALE et al.



1967, BERNSTEIN 1961, SLATYER 1970). Dabei handelt es sich um Laborexperimente mit kontrollierbaren Umweltbedingungen und osmotischen Potentialen von -0.3 bis -1.5 MPa im Substrat. Es stellt sich nun die Frage, welche osmotischen Potentiale in der Bodenlösung an den salzbelasteten Standorten vorhanden sein könnten. Da der Salzgehalt der Bodenproben nicht bestimmt wurde, muss eine grobe Abschätzung vorgenommen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass das eingetragene Natriumchlorid im Frühjahr zu 99 % ausgewaschen worden ist (vgl. 2.1). Nach den Angaben von KREUTZER (1974) wären noch ca.  $8 \text{ g/m}^2$  Salz im Boden vorhanden. Diese Menge wäre in etwa 50 l Wasser zu lösen (Wassergehalt von 3 % (w/w) des Bodens am belasteten *Aesculus*-Standort), was einem osmotischen Potential der Grössenordnung -10 KPa (-0.1 bar) entspricht. Osmotische Anpassung dürfte deswegen kaum notwendig sein.

Kann diese geringe Salzmenge ( $8 \text{ g/m}^2$ ) denn zu den beobachteten Chloridkonzentrationen in den Blättern führen? Nach LEH (1973) muss davon ausgegangen werden, dass die im Baum vorhandenen Salzionenmengen nicht in einer Vegetationsperiode aufgenommen wurden. Im Herbst soll der grösste Teil der Ionen ins Holz zurückverlagert und dann im nächsten Frühjahr wieder in die Blätter transferiert werden. Die unter Annahme eines Blattflächenindex von 5 ( $= \text{m}^2$  Blattfläche über  $\text{m}^2$  Bodenfläche) (WALTER 1973) aus den Angaben von ZOLG (1979) berechnete Natriumchloridmenge von weniger als 8 g wäre im Verlaufe mehrerer Jahre sukzessive angehäuft worden, so dass obige Frage bejaht werden muss.

Diese Ueberlegungen machen es unwahrscheinlich, dass die Salzionen zur osmotischen Anpassung aufgenommen wurden. Es wäre auch nur schwer einzusehen, warum *Tilia* (Wasserpotential = -1.8 MPa) sich osmotisch anpassen muss, *Platanus* (Wasserpotential = -1.2 MPa) hingegen nicht. Bei *Aesculus* könnte eine geringe osmotische Anpassung nötig sein, ihr Wasserpotential von -1.0 MPa liegt höher als das von *Platanus*. Die gefundene Absenkung um -1.6 MPa ist aber doch wohl etwas zu gross. Es erscheint wahrscheinlich, dass die als Folge des Streusalzeinsatzes beschriebenen schweren Folgen für *Aesculus* und *Tilia* nicht auf die wegen der Notwendigkeit einer osmotischen Anpassung aufgenommenen Ionen, sondern vielmehr auf solche zurückzuführen sind, die nicht ausgeschlossen werden konnten. Da die Inaktivierung dieser Ionen nicht immer in ausreichendem Ausmass möglich ist, oder weil die hierfür notwendigen Stoffwechselumstellungen zu gross sind, kommt es zu den beschriebenen pathologischen Effekten (ZOLG

1979, LEH 1975, vgl. auch 2.3, 2.5).

RUGE (1974) wies in geschädigten *Aesculus*-Blättern in der Blattmitte eine höhere Chloridkonzentration trotz höherem osmotischem Potential als am Blatt-  
rand nach. Er kommt zum Schluss, dass die Ionen an Proteine gebunden und damit  
inaktiviert sein könnten (vgl. BULL und BREESE 1970).

Es scheint, dass die hier untersuchten Baumarten anders als krautige Pflanzen  
auf Salzbelastung reagieren. Die in 2.6 beschriebenen Auswirkungen konnten nur  
zum Teil bestätigt werden; es muss allerdings berücksichtigt werden, dass unter-  
schiedliche Salzkonzentrationen im Substrat vorlagen. *Aesculus*, *Tilia* und *Pla-  
tanus*, welche im Gegensatz zu *Quercus* Chloridionen, evtl. auch Natriumionen,  
aufnehmen, wiesen wie krautige Pflanzen einen erhöhten Diffusionswiderstand und  
damit eine reduzierte Transpiration auf. Bei *Aesculus* und *Tilia* wurde zwar  
wie bei krautigen Pflanzen ein Absinken des osmotischen Potentials gemessen,  
doch handelt es sich höchstwahrscheinlich um ein Artefakt. Es folgt, dass die  
beiden Arten Salzionen nicht oder nur zum kleinsten Teil zur osmotischen  
Anpassung aufnehmen; ihre Wasseraufnahmefähigkeit wurde nicht verbessert, was  
durch die ähnlichen Wasserpotentiale belegt wird.

Das winterliche Salzen beeinflusst den Wasserhaushalt von *Quercus* nicht, den  
von *Tilia* und *Platanus* eher positiv. Die bei *Aesculus* festgestellte geringe  
Verschlechterung muss wohl durch eine erhöhte klimatische und edaphische  
Belastung erklärt werden; wahrscheinlich wäre ohne Salzeinwirkung die Wasser-  
bilanz sogar wesentlich ungünstiger ausgefallen. Beobachtete negative Auswir-  
kungen von Streusalz auf die vier untersuchten Strassenbaumarten müssten ent-  
sprechend den in dieser Arbeit dargestellten Bedingungen und Ergebnissen nicht  
als Effekte osmotischer, sondern vielmehr als solche toxischer Art von Salz-  
ionen eingestuft werden.

### Zusammenfassung

Vier Strassenbaumarten (*Aesculus hippocastanum*, *Quercus robur*, *Tilia x euchlo-  
ra* und *Platanus acerifolia*) wurden in Bezug auf die Auswirkungen der winter-  
lichen Streusalzgaben auf ihren Wasserhaushalt untersucht. Dazu wurden die  
Transpiration, das Wassersättigungsdefizit, das osmotische Potential und das  
Wasserpotential gemessen; andere Grössen des Wasserhaushaltes wurden daraus  
abgeleitet. Die untersuchten salzbelasteten Bäume sind repräsentativ für ihre  
Art am Standort Mittelstreifen mit starker Streusalzbelastung.  
Die Böden der salzbelasteten Standorte waren im Sommer als trockener einzu-  
stufen als diejenigen am unbelasteten; die Bodentypen waren an allen Stand-



orten vergleichbar. Die klimatische Belastung des pflanzlichen Wasserhaushalts war an den salzbelasteten Standorten stärker (*Quercus*, *Aesculus*), gleich (*Tilia*) oder geringer (*Platanus*).

Die Baumarten reagierten sehr unterschiedlich auf die Belastung durch Streusalz sowie die veränderten klimatischen und edaphischen Bedingungen. *Quercus* erhöhte den Wasserumsatz, ohne dass nachteilige Folgen für die Wasserbilanz nachgewiesen werden konnten. Dies würde durch die Standortansprüche der Art und Anpassungen morphologisch-anatomischer Art erklärt werden können: *Quercus* verfügt über ein effizientes Regelsystem für die Stomata; ein niedriges osmotisches Potential ermöglicht sehr negative Wasserpotentiale, so dass die Wasserversorgung gesichert ist. Salzionen wurden nicht aufgenommen.

Die relative Ausgewogenheit der Wasserbilanz von *Aesculus* am salzbelasteten Standort wurde als Folge einer - wegen des "Iwanoff-Sprungs" nur undeutlich gemessenen - Reduktion der Transpiration interpretiert. Eine Verbesserung der Wasserversorgung durch Absenken des Wasserpotentials konnte nicht festgestellt werden, obwohl wegen der Aufnahme von Salzionen eine osmotische Anpassung stattzufinden schien.

Bei *Tilia* konnte eine drastische Reduktion der Transpiration nachgewiesen werden, welche zur Hypothese eines durch die Aufnahme von Salzionen veränderten stomatären und interzellulären Diffusionswiderstandes für Wasserdampf führte. Die anderen Grössen des Wasserhaushaltes unterschieden sich nur geringfügig.

Ungünstige Bedingungen am Kontrollstandort von *Platanus* und eine Erhöhung des Diffusionswiderstandes am salzbelasteten Standort bewirkten, dass an diesem die Wasserbilanz des Baumes im Vergleich zum unbelasteten Standort positiver ausfällt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die drei Baumarten, welche nicht über die Fähigkeit zum selektiven Ionenausschluss verfügen und Salzionen aufnehmen, ihre Transpiration reduzieren. Die aufgrund der Erhöhung der Konzentration von Chlorid- und Natriumionen gemessenen negativen osmotischen Potentiale sind mit hoher Wahrscheinlichkeit methodische Artefakte, da kein entsprechendes Absinken des Wasserpotentials gefunden wurde.

An den salzbelasteten Mittelstreifenstandorten konnten nur geringe Abweichungen in der Wasserbilanz gegenüber den Kontrollen gemessen werden. Es folgt, dass die Hypothese einer "physiologischen Trockenheit" im Schimper'schen Sinne durch Streusalzanwendung für die untersuchten Strassenbaumarten nicht zutrifft. Die negativen Auswirkungen von Natriumchlorid müssen ausschliesslich der toxischen Wirkung der aufgenommenen Ionen zugeschrieben werden.

### Summary

The effects of de-icing salt on the waterbalance of four roadside tree species (*Quercus robur*, *Aesculus hippocastanum*, *Tilia x euchlora* and *Platanus acerifolia*) were investigated. Transpiration, water saturation deficit, osmotic potential and waterpotential were measured in two vegetation periods; other variables were deduced from them. The results are characteristic for salt-stressed trees of the respective species on the dividing strip of a road.

The soil types were comparable for all sites, the saltstressed sites had to be classified as drier. Atmospheric waterstress was greater (*Aesculus*, *Quercus*), equal (*Tilia*) or smaller (*Platanus*) than measured for controls. Salinity and climatic and edaphic conditions produced a different reaction in each species. *Quercus* increased its waterturnover at the saltstressed site without disadvantageous consequences for its waterbalance. This could be explained by the ecophysiological possibilities and anatomical - morphological adaptations of the species. *Quercus* has an efficient stomata-regulation system, and its low osmotic potential allows for a low waterpotential, which in turn provides sufficient water supply. Salt ions were excluded. The relatively balanced water relations of *Aesculus* at the saltstressed site were interpreted as a consequence of a decreasing transpiration rate that was veiled by the so-called Iwanoff-shock. An improved water supply caused by a decreasing waterpotential could not be found, although the uptake of salt ions seemed to indicate osmotic adaptation and resulted in an apparently low osmotic potential and a surprisingly high turgor. *Tilia* reduced drastically its transpirational water loss at the saltstressed site. It was concluded that the incorporated salt ions changed the stomatal and intercellular diffusion resistance to water vapour. The other measured parameters indicated small if any variation in waterbalance. The unfavourable environmental conditions at the control site of *Platanus* together with the increased diffusion resistance - probably also due to incorporated chloride - at the saltstressed site caused a more balanced water regime of the specimen at the saltstressed site. In this paper it was found that the three species unable to exclude salt ions selectively and taking up chloride - eventually sodium - ions showed an increased resistance and a decreased transpiration rate. This led to an improved water balance at the saltstressed sites. Due to the increasing concentration of salt ions more negative osmotic potentials were measured at the saltstressed sites what seemed to indicate osmotic adaption. It however must be considered that this probably does not reflect the cytoplasmatic reality, since the waterpotential did not decrease correspondingly. As a consequence of the in general negligible changes in overall waterbalance the hypothesis that the use of de-icing salt would cause a "physiological dryness" in the sense of SCHIMPER had to be abandoned. Conclusively, de-icing salt seems to affect the investigated roadside trees rather by the toxicity of its components than by their osmotic effects.

## Literatur

- ACEVES-NAVARRO E., STOLZY L.H. und MEHUYS G.R., 1975: Effects of Soil Osmotic Potential Produced with two Salt Species on Plant Water Potential, Growth and Grain Yield of Wheat. *Plant and Soil* 42, 619-627.
- ADOLPHI K., 1980: *Puccinella distans* (Jacq.) Parl. (Poaceae) an einem Wegrand in der Eifel. *Decheniana* 133, 26.
- AHLBRECHT H., 1966: Glatteisbekämpfung auf Autobahnen - Glatteisbekämpfung auf Strassen. *Strasse und Verkehr* 2, 63-66.
- ASLANBOGA I., HÖSTER H.R. und MEYER F.H., 1978: Umweltschäden an Strassenbäumen in Hannover. *Mitt. Deutsch. Dendrol. Ges.* 70, 31-57.

- BEADLE C.L. et al., 1978: Critical Water Potential for Stomatal Closure in Sitka Spruce. *Physiol. Plant.* 43, 160-165.
- BEHM R. und KESSLER W., 1971: Schäden an Fichten und Kiefern infolge der Winterbehandlung von Strassen mit Chloridlösung. *Nachrichtenblatt d. Deutschen Pflanzenschutzdienstes* (Berlin) 25, 211-216.
- BEN-ZIONI A., ITAI C. und VAADIA Y., 1967: Water and Salt Stress, Kinetin and Proteinsynthesis in Tobacco leaves. *Plant Physiol.* 42, 361-365.
- BERNATZKY A., 1969: Stadtklima und Bäume. *Baumzeitung* 3, 43-47.
- BERNSTEIN L., 1961: Osmotic Adjustment of Plants to Saline Media: I. Steady State. *Am. J. Bot.* 48, 909-918.
- 1963: Osmotic Adjustment of Plants to Saline Media: II. Dynamic Phase. *Am. J. Bot.* 50, 360-370.
- und PEARSON G.A., 1956: Influence of Exchangeable Sodium on the Yield and the Chemical Composition of Plants: I. Green Beans, Garden Beens, Clover and Alfalfa. *Soil Science* 82, 247-258.
- BLUME H.-P., DÜMMLER H. und RÖPER H.-P., 1974: Böden und Gewässer West-Berlins. *Landwirtschaftliche Forschung* (I. Sonderheft), 31.
- BOYER J.S., 1965: Effects of Osmotic Stress on Metabolic Rates of Cotton Plants with Open Stomata. *Plant Physiol.* 40, 229-234.
- BUKOWIECKI A., 1966: Praktische Versuche zur Erforschung der Korrosionseigenschaften von zur Enteisung von Strassen verwendeten Streusalzen (Tausalzen). *Strasse und Verkehr* 8, 435-446.
- BULL B.B. und BREESE K., 1970: Water and Solute Binding by Proteins: I. Electrolytes. *Arch. Biochim. Biophys.* 137, 299-305.
- BUSCHBOHM U., 1968: Salzresistenz oberirdischer Sprosssteile von Holzgewächsen: I. Chlorideinwirkungen auf Sprossoberflächen. *Flora* 157, 527-561.
- CAMPBELL G.S., 1977: An Introduction to Environmental Biophysics. Springer Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 115-126.
- CARPENTER S.B. und SMITH N.D., 1975: Stomatal Distribution and Size in Southern Appalachian Hardwoods. *Can. J. Bot.* 53, 1153-1156.
- CARLIER A., 1966: Die winterlichen Strassenverhältnisse und die Streusalze. *Strasse und Verkehr* 2, 57-62.
- CATSKY J., 1960: Determination of Water Deficit in Disks Cut Out from Leaf Blades. *Biologia Plantarum* 2, 76-78.
- 1965: Leaf-Disk Method for Determining Water Saturation Deficit. In: ECKHARDT F.E. (ed.), *Methodology of Plant Eco-Physiology*. Arid Zone Research (UNESCO, Paris) 25, 353-360.
- CLINE R.G. und CAMPBELL G.S., 1976: Seasonal and Diurnal Water Relations of Selected Forest Species. *Ecology* 57, 367-373.
- COOPER A.W. und DUMBROFF E.B., 1973: Plant Adjustment to Osmotic Stress in Balanced Mineral-Nutrient Media. *Can. J. Bot.* 51, 763-773.
- COOPER M.J., DIGBY J. und COOPER P.J., 1972: Effects of Plant Hormones on the Stomata of Barley: A Study of the Interaction between Abscissic Acid and Kinetin. *Planta* 105, 43-49.
- DAVISON A.W., 1971: The Effects of De-icing Salt on Roadside Verges: I. Soil and Plant Analysis. *J. Appl. Ecol.* 8, 555-561.
- DE JONG T.M., 1978: Comparative Gas Exchanges and Growth Responses of C-3 and C-4 Beach Species Grown at Different Salinities. *Oecologia* 36, 59-68.
- DÖRFFLING K., STREICH J., KRUSE W. und MUXFELDT B., 1977: Abscissic Acid and the After-Effect of Water Stress on Stomatal Opening Potential. *Zeitschr. Pflanzenphys.* 81, 43-56.

- ECKSTEIN D., FRISSE E. und LIESE W., 1974: Holzanatomische Untersuchungen an umweltgeschädigten Strassenbäumen der Hamburger Innenstadt. Eur. J. For. Path. 4, 232-244.
- EDER A., 1977: Interaction Between Salinity and Ethylene in Nitrogen Metabolism of *Pennisetum typhoides* Seedlings. Biochem. Phys. Pflanzen 171, 93-100.
- EGER G., 1958: Untersuchungen zur Methode der Transpirationsbestimmung durch kurzfristige Wägung abgeschnittener Pflanzenteile, besonders an Wiesenpflanzen. Flora 145, 374-420.
- ELLER B.M. und BRUNNER U., 1975: Der Einfluss von Strassenstaub auf die Strahlungsabsorption durch Blätter. Archiv für Meteorologie, Geographie und Bioklimatologie (Ser. B) 23, 137-146.
- und WILLI P., 1977: Globalstrahlungsabsorption von *Hedera helix* L. unter Strassenstaubimmissionen. Gartenbauwissenschaft 42, 49-53.
- ERNST W. und FELDERMANN D., 1975: Auswirkungen der Wintersalzstreuung auf den Mineralstoffwechsel von Linden. Zeitschr. Pflanzenernährung und Bodenkunde 6, 629-640.
- EVERS F.-H., 1971: Ueber Schäden in Fichtenbeständen durch abgeschwemmte Auftausalze. Forstwissenschaft. Centralbl. 90, 363-369.
- 1976: Zur Ausbreitung von Streusalzschäden im Innern von Waldbeständen. Forstwissenschaft. Centralbl. 95, 251-264.
- FEDERER C.A. und GEE G.W., 1976: Diffusion Resistance and Xylem Potential in Stressed and Unstressed Northern Hardwood Trees. Ecology 57, 975-984.
- FIELD C.D., 1976: Salt Tolerance in Halophytes. Nature 264, 510-511.
- GALE J., 1975: Water Balance and Gas Exchange of Plants under Saline Conditions. In: POLJAKOFF-MAYBER A. und GALE J. (eds.), Plants in Saline Environment. Ecological Studies 15, Springer Verlag, Berlin. Heidelberg, New York. 168-185.
- KOHL C. und HAGAN R.M., 1967: Changes in the Water Balance and Photosynthesis of Onion, Bean and Cotton Plants under Saline Conditions. Physiol. Plant. 20, 408-420.
- HALBWACHS G., 1971: Physiologische Probleme der Vegetationsschädigung durch gasförmige Immissionen. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 84, 507-514.
- HECHT-BUCHHOLZ C., PFLÜGER R. und MARSCHNER H., 1971: Einfluss von Natriumchlorid auf Masiwurzelspitzen. Zeitschr. Pflanzenphys. 65, 410-417.
- HELLKVIST J., 1970: The Water Relations of *Pinus silvestris*: I. Comparative Field Studies of Transpiration and Drying Transpiration. Physiol. Plant. 23, 631-646.
- RICHARDS G.P. und JARVIS P.G., 1974: Vertical Gradients of Water Potential and Tissue Water Relations in Sitka Spruce Trees Measured with the Pressure Chamber. J. Appl. Ecol. 11, 637-667.
- und PARSEBY J., 1976: The Water Relations of *Pinus silvestris*: III. Diurnal and Seasonal Patterns of Water Potential. Physiol. Plant. 38, 61-68.
- 1977: The Water Relations of *Pinus silvestris*: IV. Diurnal and Seasonal Patterns of Water Potential in Pine Trees from Different Latitudinal Provenances. Physiol. Plant. 41, 211-216.
- HINCKLEY T.M. und BRUCKERHOFF D.N., 1975: The Effects of Drought on Water Relations and Stem Shrinkage of *Quercus alba*. Can. J. Bot. 53, 62-72.
- und RITCHIE G.R., 1970: Within-Crown Patterns of Transpiration, Water Stress and Stomatal Activities in *Abies amabilis*. Forest Science 16, 490-492.

- HOFFMANN G.J. und RAWLINS S.L., 1971: Growth and Water Potential of Root Crops as Influenced by Salinity and Relative Humidity. *Agronomy J.* 63, 877-880.
- HOFSTRA G. und HALL R., 1971: Injury on Roadside Trees: Leaf Injury on Pine and White Cedar in Relation to Foliar Levels of Sodium and Chloride. *Can. J. Bot.* 49, 613-622.
- und LUMIS G.P., 1975: Levels of De-icing Salt Producing Injury on Apple Trees. *Can. J. Plant Sci.* 55, 113-115.
- HOLMES F.W., 1961: Salt Injury to Trees. *Phytopathology* 51, 712-718.
- und BAKER J.H., 1966: Salt Injury to Trees: II. Sodium and Chloride in Roadside Sugar Maples in Massachusetts. *Phytopathology* 56, 633-636.
- HUBER B., 1935: Die physiologische Bedeutung der Ring- und Zerstreuungporigkeit. *Ber. Deutsch. Bot. Ges.* 53, 711-719.
- HUBER W., 1974: Ueber den Einfluss von NaCl oder Abscisinsäurebehandlung auf den Proteinmetabolismus und einige weitere Enzyme des Aminosäurestoffwechsels in Keimlingen von *Pennisetum typhoides*. *Planta* 121, 225-235.
- HUTCHINSON F.E., 1970: Environmental Pollution from Highway De-icing Compounds. *J. Soil Water Cons.* 25, 144-146.
- HUZULAK J. und ELIAS P., 1975: Within-Crown Pattern of Ecophysiological Features in Leaves of *Acer campestre* and *Carpinus betulus*. *Folia Geobot. Phytotax.* (Praha) 10, 337-350.
- IWANOFF L., 1928: Zur Methodik der Transpirationsbestimmung am Standort. *Ber. Deutsch. Bot. Ges.* 46, 306-310.
- JÄGER H.-J. und PRIEBE A., 1975: Zum Problem der durch Salinität induzierten Putrescinebildung in Pflanzen. *Oecol. Plant.* 10, 267-279.
- JENNINGS D.H., 1976: The Effects of Sodium Chloride on Higher Plants. *Biological Review* 51, 453-486.
- JONES M.M. und TURNER N.C., 1978: Osmotic Adjustment of *Sorghum* in Response to Water Deficits. *Plant Physiol.* 61, 122-126.
- KAHANE I. und POLJAKOFF-MAYBER A., 1968: Effect of Substrate Salinity on the Ability for Proteinsynthesis in Pea Roots. *Plant Physiol.* 43, 1115-1116.
- KAPLAN A. und GALE J., 1972: Effect of Sodium Chloride Salinity on the Water Balance of *Atriplex halimus*. *Axstr. J. Biol. Sci.* 25, 895-903.
- 1974: Modification of the Pressure-Bomb Technique for Measurement of Osmotic Potential in Halophytes. *J. Exp. Bot.* 25, 663-668.
- KIRKHAM M.B., GARDNER W.R. und GERLOFF G.C., 1969: Leaf Water Potential of Differentially Salinized Plants. *Plant Physiol.* 44, 1378-1382.
- 1972a: Stomatal Conductance in Differentially Salinized Plants. *Plant Physiol.* 49, 345-347.
- 1972b: Regulation of Cell Division and Cell Enlargement by Turgor Pressure. *Plant Physiol.* 49, 961-962.
- 1974: Internal Water Status of Kinetin-treated, Salt-stressed Plants. *Plant Physiol.* 53, 241-243.
- KLEIN L., 1926: Forstbotanik. In: WEBER H. (ed.), *Handbuch der Forstwissenschaft*, I. Band. Paul Parey Verlag, Berlin. 797-798.
- KLEPPER B., 1968: Diurnal Patterns of Water Potential in Woody Plants. *Plant Physiol.* 43, 1931-1934.
- KLUIKE T., 1976: Strassenbäume und ihre Standortbedingungen, dargestellt am Beispiel von Berlin (West). Diplomarbeit Techn. Univ. Berlin.
- KOCH W., 1978: Gehölzwertermittlung. In: MEYER F.H., *Bäume in der Stadt*. Ulmer Verlag, Stuttgart. 291-308.



- KÖRNER C., JUDITH A., SCHEEL A. und BAUER H., 1979: Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants. *Photosynthetica* 13, 45-82.
- KOZINKA V., 1960: Die Gewinnung von Pressaft für kryoskopische Bestimmungen des osmotischen Wertes bei Pflanzen. *Biologia (Bratislava)* 15, 567-583.
- KRACH E. und KOEPFF B., 1980: Beobachtungen an Salzschwaden in Südfranken und Nordschwaben. *Göttinger Floristische Rundbriefe* 13, 61-75.
- KREEB K.-H., 1965: Die ökologische Bedeutung der Bodenversalzung. *Angewandte Botanik* 39, 1-15.
- 1974: *Oekophysiologie der Pflanzen*. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena. 53-111.
- 1974a: Pflanzen an Salzstandorten. *Naturwissenschaften* 61, 337-343.
- KREUTZER K., 1974: Bodenkundliche Aspekte der Streusalzanwendung. *Eur. J. Forest Path.* 4, 39-41.
- KRIEDEMANN P.E., LOVEYS B.R., FULLER G.L. und LEOPOLD A.C., 1972: Absciscic Acid and Stomatal Regulation. *Plant Physiol.* 48, 842-847.
- KYRIAKOPOULOS E. und RICHTER H., 1977: A Comparison of Methods for the Determination of Water Status in *Quercus ilex* (L.). *Zeitschr. Pflanzenphys.* 82, 14-27.
- LAGERWERFF J.V., 1969: Osmotic Growth Inhibition and Electrometric Salt-Tolerance Evaluation in Plants: A Review and Experimental Assessment. *Plant and Soil* 31, 77-96.
- LANDOLT E., 1977: Oekologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. *Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel*, 64, 83-169.
- LARCHER W., 1976: *Oekologie der Pflanzen* (2. Aufl.). Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 174-240.
- LEH H.-O., 1972: Schäden an Strassenbäumen durch Auftausalze. *Das Gartenamt* 11, 627-629.
- 1973: Untersuchungen über die Auswirkungen der Anwendung von Natriumchlorid als Auftaumittel auf die Strassenbäume in Berlin. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes (Braunschweig)* 25, 163-170.
- 1975: Die Gefährdung der Strassenbäume durch Auftausalz. *Deutsche Baumschule* 27, 250-253.
- MAHLER E., 1976: Das öffentliche Grün - eine Bilanz 1976. *Berliner Bauwirtschaft* 13, 291-298.
- MC CRACKAN D.D., 1965: *A Guide to FORTRAN IV Programming* (2nd ed.). John Wiley and Sons, New York, London, Sydney, Toronto. 93-123.
- MEIRI A. und POLJAKOFF-MAYBER A., 1967: The Effect of Chlorine Salinity on Growth of Bean Leaves in Thickness and in Area. *Isr. J. Bot.* 16, 115-123.
- MEYER F.H., 1978: *Bäume in der Stadt*. Ulmer Verlag, Stuttgart. 83-120.
- MICHELSSEN E., 1972: Die Wirkungen von Streusalz auf die Umwelt. *Plan* 29, 14-16.
- MILLER J.E., KOEPPE D.E. und MILLER R.J., 1975: Effects of Anions on Swelling, Respiration and Phosphorylation of Isolated Corn Mitochondria. *Physiol. Plant.* 34, 153-156.
- MIZRAHI Y., BLUMENFELD A., BITTNER S. und RICHMOND A.E., 1971: Absciscic Acid and Cytokinin Contents of Leaves in Relation to Salinity and Relative Humidity. *Plant Physiol.* 48, 752-755.
- MORROW P.A. und SLATYER R.O., 1971: Leaf Temperature Effects on Measurement of Diffusive Resistance to Water Vapour Transfer. *Plant Physiol.* 47, 559-561.

- MÜLLER M. und SANTARIUS K.A., 1978: Changes in Chloroplast Membrane Lipids during Adaptation of Barley to Extreme Salinity. *Plant Physiol.* 62, 326-329.
- NIEMANN R.H. und POULSEN L.L., 1967: Interactive Effects of Salinity and Atmospheric Humidity on the Growth of Bean and Cotton Plants. *Botanical Gazette* 128, 69-73.
- 1971: Plant Growth Suppression on Saline Media: Interactions with Light. *Botanical Gazette* 132, 14-19.
- OERTLI J.J., 1976: The Physiology of Salt Injury in Plant Production. *Zeitschr. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde* 139, 195-208.
- FLÜCKIGER W. und FLÜCKIGER-KELLER H., 1979: Wie der Autobahnverkehr Pflanzen schädigt. *Umschau* 21, 679-680.
- PARKER R.E., 1973: *Introductory Statistics for Biology*. E. Arnold Ltd., London. 16-22.
- PEREIRA J.S. und KOZLOWSKI T.T., 1978: Diurnal and Seasonal Changes in Water Balance of *Acer saccharum* and *Betula papyrifera*. *Physiol. Plant.* 43, 19-30.
- PISEK A., KNAPP H. und DITTERSDORFER J., 1970: Maximale Oeffnungsweite und Bau der Stomata mit Angaben über ihre Grösse und Zahl. *Flora* 159, 459-479.
- und TRANQUILLINI W., 1951: Transpiration und Wasserhaushalt der Fichte (*Picea excelsa* Link.) bei zunehmender Luft- und Bodentrockenheit. *Physiol. Plant.* 4, 1-27.
- POLJAKOFF-MAYBER A., 1975: Morphological and Anatomical Changes in Plants as a Response to Salinity Stress. In: POLJAKOFF-MAYBER A. und GALE J. (eds.), *Plants in Saline Environment, Ecological Studies 15*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 97-117.
- PRIEBE A. und JÄGER H.-J., 1978: Response of Amino Acid Metabolizing Enzymes from Plants Differing in Salt Tolerance to NaCl. *Oecologia* 36, 307-315.
- RASCHKE K. und SCHNABL H., 1978: Availability of Chloride affects the Balance between Potassium Chloride and Potassium Malate in Guard Cells of *Vicia faba* (L.). *Plant Physiol.* 62, 84-87.
- RATCLIFF G.A. und HOLDCROFT J.G., 1963: Diffusivities of Gases in Aqueous Electrolyte Solutions. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers* 41, 315-319.
- RHEINHEIMER G., 1959: Beobachtungen über Trocken- und Hitzeschäden im Sommer 1959 an den wichtigsten Wald- und Strassenbäumen in der Umgebung von Hamburg. *Forst- und Holzwirt* 14, 490-495.
- RICHTER H., HALBWACHS G. und HOLZNER W., 1972: Saugspannungsmessungen in der Krone eines Mammutbaumes (*Sequoiadendron giganteum*). *Flora* 161, 401-420.
- RITCHIE G.A. und HINCKLEY T.M., 1975: The Pressure Chamber as an Instrument for Ecological Research. *Adv. Ecol. Res.* 9, 165-254.
- ROBERTS S.W. und KNOERR K.R., 1977: Components of Water Potential Estimated from Pressure Measurements in Five Tree Species. *Oecologia* 28, 191-202.
- ROZEMA J., 1976: An Ecophysiological Study on the Response to Salt of Four Halophytic and Glycophytic *Juncus*-Species. *Oecologia* 34, 329-341.
- ROZEMA-DIJST E., FREIJSEN A.H.J. und HUBER J.J.L., 1978: Population Differentiation within *Festuca rubra* L. with Regard to Soil Salinity and Soil Water. *Oecologia* 34, 329-341.
- RUGE U., 1968: Die Gefährdung der Strassenbäume in Grossstädten. *Gartenwelt* 68, 284-286.

- 1971: Erkennen und Verhüten von Auftausalzschäden an Strassenbäumen der Grossstädte. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes (Braunschweig) 23, 133-137.
  - 1974: Verteilung des osmotischen Wertes und des Chlorids in streusalzgeschädigten Rosskastanienblättern. Angewandte Botanik 48, 257-265.
  - 1975: Erfahrungen mit Strassenbaumarten in Städten. Das Gartenamt 24, 127-131.
  - 1978: Physiologische Schäden durch Umweltfaktoren. In: MEYER F.H., Bäume in der Stadt. Ulmer Verlag, Stuttgart. 121-181.
  - und STACH W., 1968: Ueber die Schädigung von Strassenbäumen durch Auftausalze. Angewandte Botanik 42, 69-77.
- SCHIMPER A.F.W., 1898: Pflanzengeographie auf physiologischer Grundlage. G. Fischer Verlag, Jena. 93-131.
- SCHNOCK G. und GALOUX A., 1974: Rhythme circadiens du déficit de saturation des feuilles de *Fagus silvatica* (L.). Oecol. Plant. 9, 287-292.
- SCHOLANDER P.F., HAMMEL H.T., BRADSTREET E.D. und HEMMINGSEN E.A., 1965: Sap Pressure in Vascular Plants. Science 148, 339-346.
- SHALHEVET J. und BERNSTEIN L., 1968: Effects of Vertically Heterogeneous Soil Salinity on Plant Growth and Water Uptake. Soil Sci. 106, 85-93.
- SHEPHERD W., 1975: Matric Water Potential of Leaf Tissue-Measurement and Significance. J. Exp. Bot. 26, 465-468.
- SLATYER R.O., 1961: Effects of Several Osmotic Substrates on the Water Relationship of Tomato. Austr. J. Biol. Sci. 14, 519-540.
- 1970: Comparative Photosynthesis, Growth and Transpiration of Two Species of *Atriplex*. Planta 93, 175-189.
  - 1971: Effects of Errors in Measuring Leaf Temperatures and Ambient Gas Concentration on Calculated Resistances to CO<sub>2</sub> and Water Vapour Exchanges in Plant Leaves. Plant Physiol. 47, 269-274.
- SLAVIK B., 1974: Methods of Studying Plant Water Relations. Ecological Studies 9, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 252-292.
- SPOMER L.A., 1972: Evaluation of Edge Injection Errors in the Floating Leaf Disk Method of Measuring Leaf Tissue Water Deficit. Plant Physiol. 49, 1027-1028.
- STEBING L., 1965: Pflanzenökologisches Praktikum. Biologische Arbeitsbücher 11, Quelle & Meyer Verlag, Berlin, 75-174.
- STOCKER O., 1929: Eine Feldmethode zur Bestimmung der momentanen Transpirations- und Evaporationsgrösse. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 47, 126-136.
- STUIVER C.E.E., KUIPER P.J.C. und MARSCHNER H., 1978: Lipids from Bean, Barley and Sugar Beet in Relation to Salt Resistance. Physiol. Plant. 42, 124-128.
- SUCOFF E., 1972: Water Potential in Red Pine: Soil Moisture, Evapotranspiration, Crown Position. Ecology 53, 681-686.
- TOBIESSEN P., 1971: Water Potential Gradient in a Tall *Sequoiadendron*. Plant Physiol. 48, 303-304.
- TYREE M.T., 1976: Negative Turgor Pressure in Plant Cells: Fact or Fallacy? Can. J. Bot. 54, 2738-2746.
- UDOVENKO G.V., MASHANSKY U.F. und SINITZKAYA I.A., 1970: Changes of the Root Cell Ultrastructure in Plants with Different Salt Tolerance, during Salinization (russ.). Fisiologia Rastenii 17, 975-981.
- WALTER H., 1928: Ueber die Pressaftgewinnung für kryoskopische Messungen des osmotischen Wertes bei Pflanzen. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 46, 539-549.
- 1930: Saugkraft oder osmotischer Wert? Zeitschr. Bot. 23, 74-93.



- 1931: Die Hydratur der Pflanze und ihre physiologische-ökologische Bedeutung (Untersuchungen über den osmotischen Wert). G. Fischer Verlag, Jena. 26-158.
  - 1963: Zur Klärung des spezifischen Wasserzustandes im Plasma und in der Zellwand bei der höheren Pflanze und seine Bestimmung: I. Allgemeines, II. Methodisches. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 76, 40-53 und 54-71.
  - 1973: Vegetationszonen und Klima (2. Aufl.). Ulmer Verlag, Stuttgart. 149-154.
- WALTON G.S., 1969: Phytotoxicity of NaCl and CaCl<sub>2</sub> to Norway Maples. Phytopathology 59, 1412-1415.
- WARING R.H. und CLEARY B.D., 1967: Plant Moisture Stress: Evaluation by Pressure Bomb. Science 135, 1248-1254.
- WEATHERLY P.E., 1950: Studies in the Water Relations of the Cotton Plant: I. The Field Measurement of Water Deficits in Leaves. New Phytol. 49, 81-97.
- WEIMBERG R., 1970: Enzyme Levels in Pea Seedlings Grown on Highly Salinized Media. Plant Physiol. 46, 466-470.
- WESTING A.H., 1966: Sugar Maple Decline: An Evaluation. Economical Botany 20, 196-212.
- 1969: Plants and Salt in the Roadside Environment. Phytopathology 59, 1174-1181.
- WIEBE H.H., BROWN R.W., DANIEL T.W. und CAMPBELL E., 1970: Water Potential Measurements in Trees. Bioscience 20, 225-226.
- WILLMER C.M., DON R. und PARKER W., 1978: Levels of Short-Chain Fatty Acids and of Abscissic Acid in Water-stressed and Non-stressed Leaves and their Effects on Stomata in Epidermal Strips and Excised Leaves. Planta 139, 281-287.
- YEO A.R., KRAMER D., LÄUCHLI A. und GULLASCH J., 1977: Ion Distribution in Salt-stressed Mature *Zea mays* Roots in Relation to Ultrastructure and Retention of Sodium. J. Exp. Bot. 28, 17-29.
- YOCUM E.L., 1935: The Stomata and Transpiration of Oaks. Plant Physiol. 10, 795-801.
- ZOLG M., 1979: Oekologisch-chemische Untersuchungen der Auswirkung der Streusalzanwendung auf einige Blatinhaltsstoffe verschiedener Strassenbäume. Diss. Techn. Univ. Berlin.
- ZULAUF R., 1966a: Pflanzenschäden durch Streusalzverwendung im Winterdienst. Strasse und Verkehr 10, 519-526.
- 1966b: Die Pflanzen und ihre Salztoleranzstufen. Strasse und Verkehr 12, 601-605.