

**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

**Kapitel:** 4: Resultate

**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>**

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  $-1.5$  MPa ( $= -15$  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.

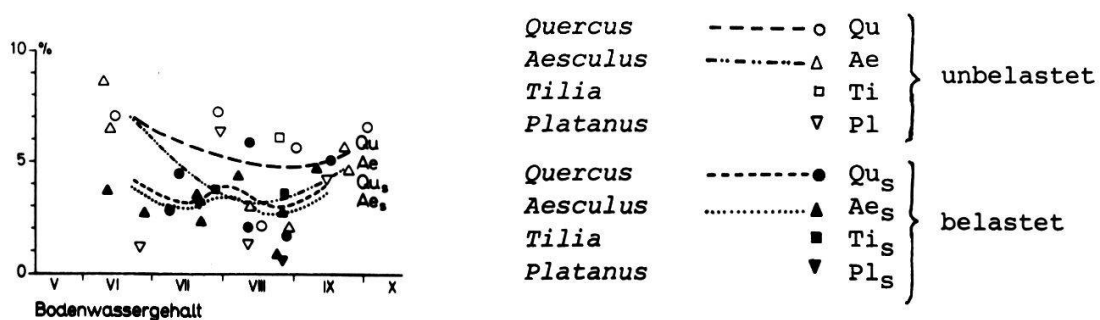


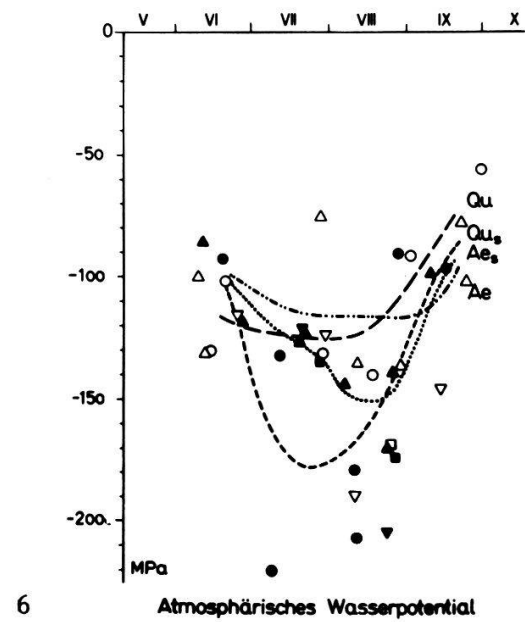
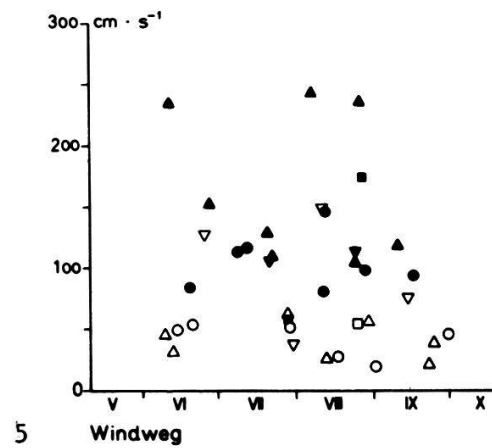
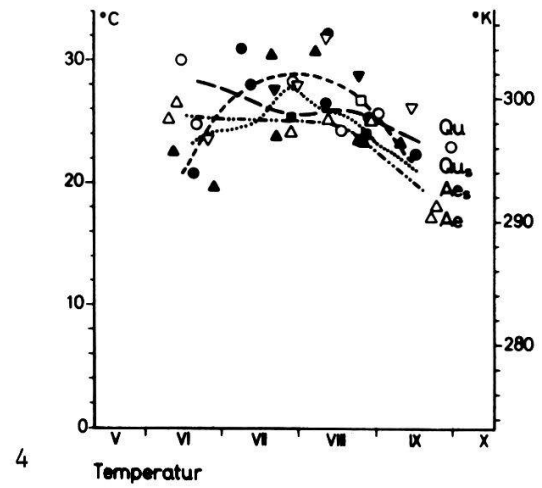
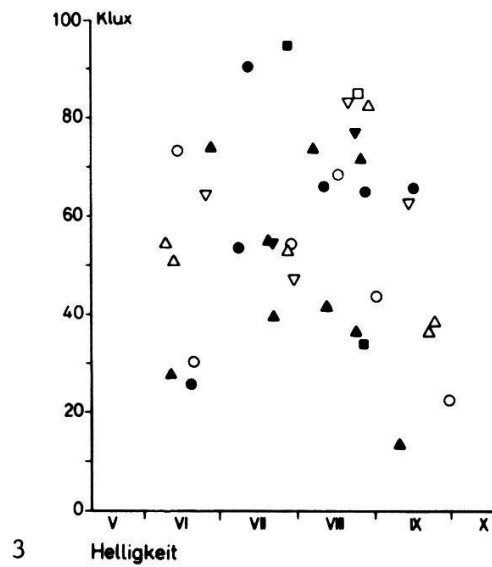
Abb. 2. Jahresgang des Bodenwassergehalts mit Ausgleichskurve in Gewichtsprozenten

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.

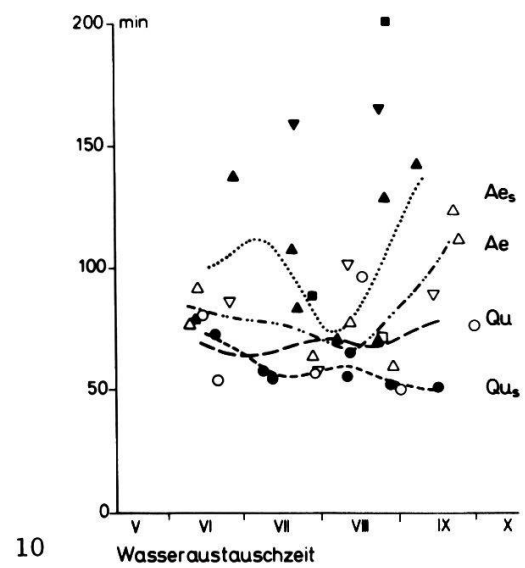
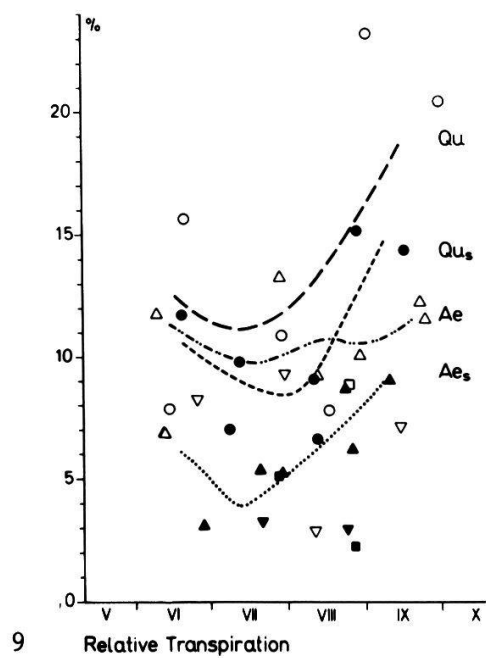
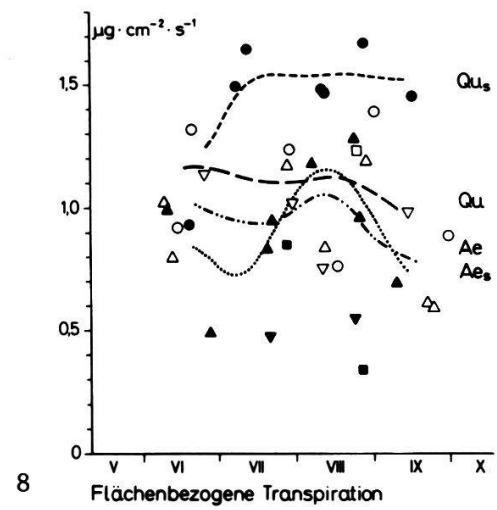
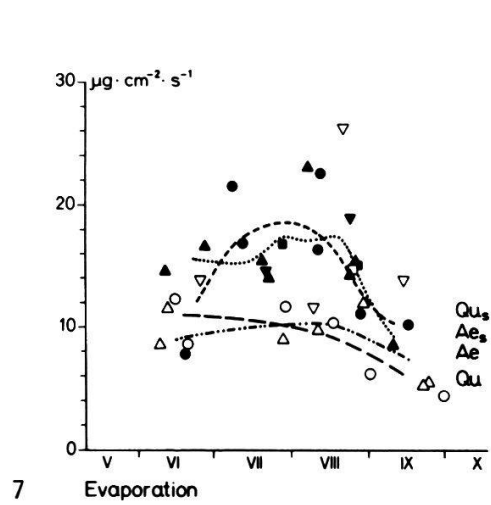
Die Auswirkungen der in Abb. 3-6 dargestellten Klimafaktoren auf den pflanzlichen Wasserhaushalt spiegelten sich in der PICHE-Evaporation (Abb. 7) wieder. An den salzbelasteten Standorten wurden - mit Ausnahme einzelner Werte im Frühjahr und Herbst - keine Evaporationsraten unter  $14 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  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\_s  
 ---▲ Ae\_s  
 ---■ Ti\_s  
 ---▼ Pl\_s

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

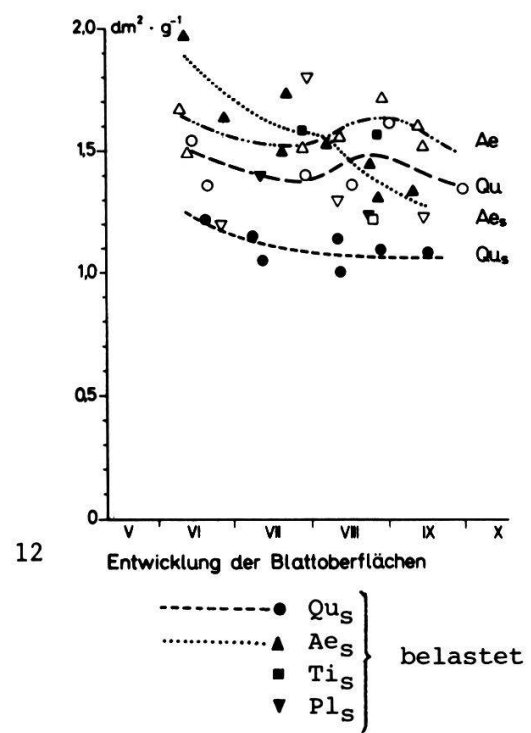
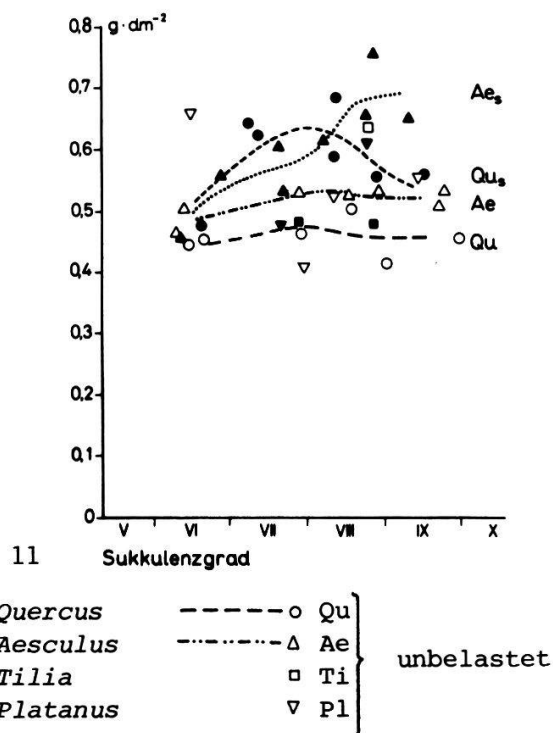
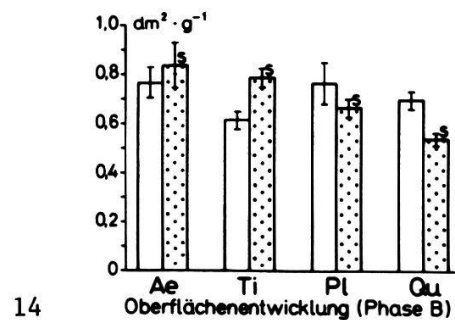
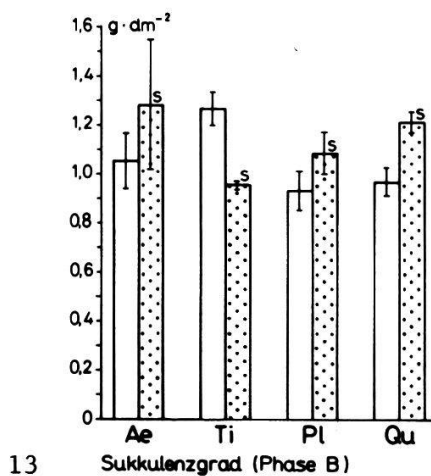


Abb. 11-12. Nachmittägliche Mittelwerte im Jahresgang mit Ausgleichskurve



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.

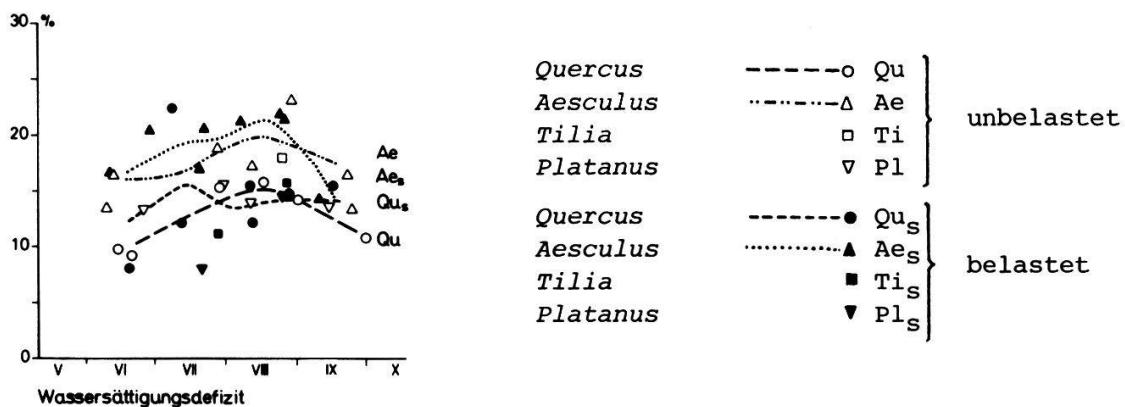


Abb. 15. Nachmittägliche Mittelwerte im Jahresgang mit Ausgleichskurve

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-

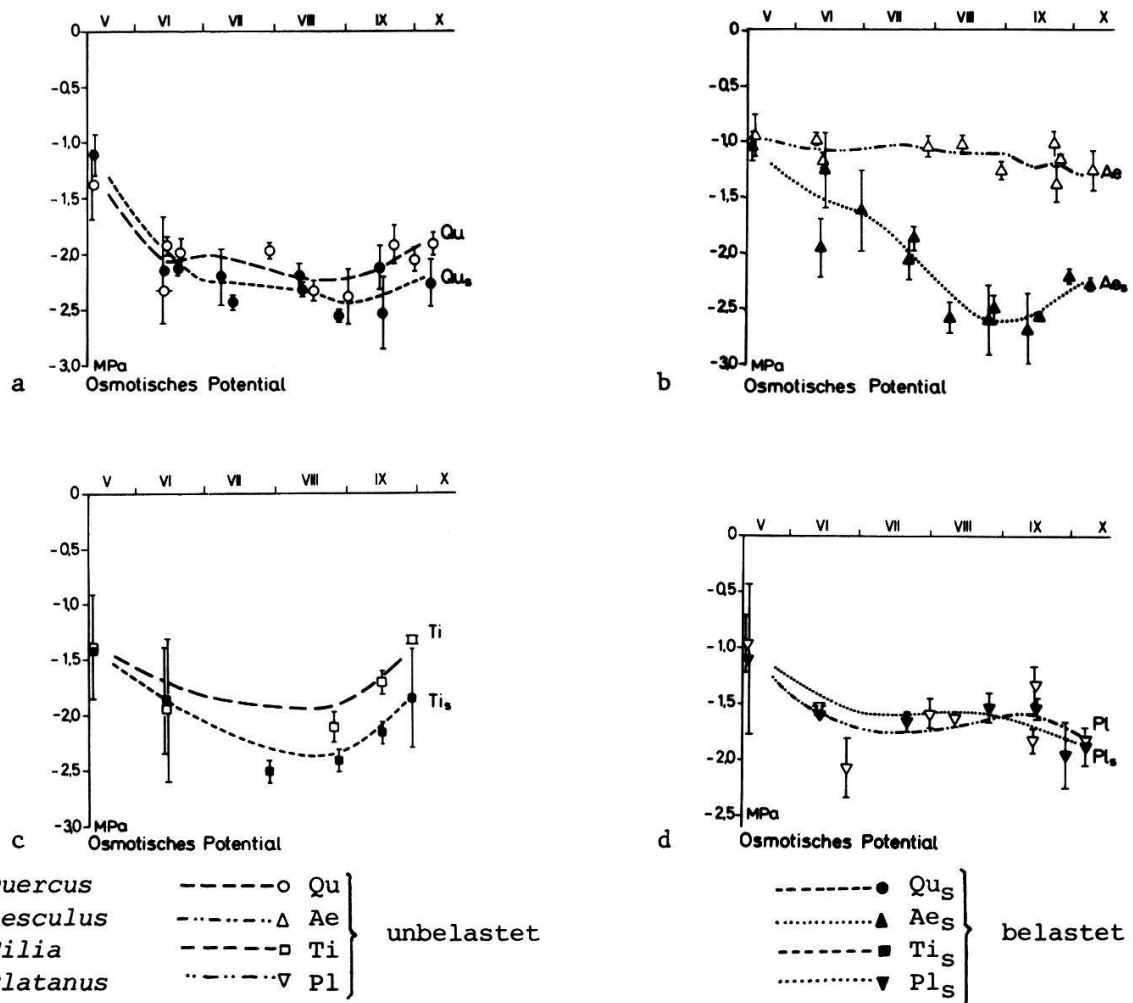


Abb. 16a-d. Nachmittägliche Mittelwerte mit Ausgleichskurve und 95 % Vertrauensgrenzen

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 Presssaft 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).

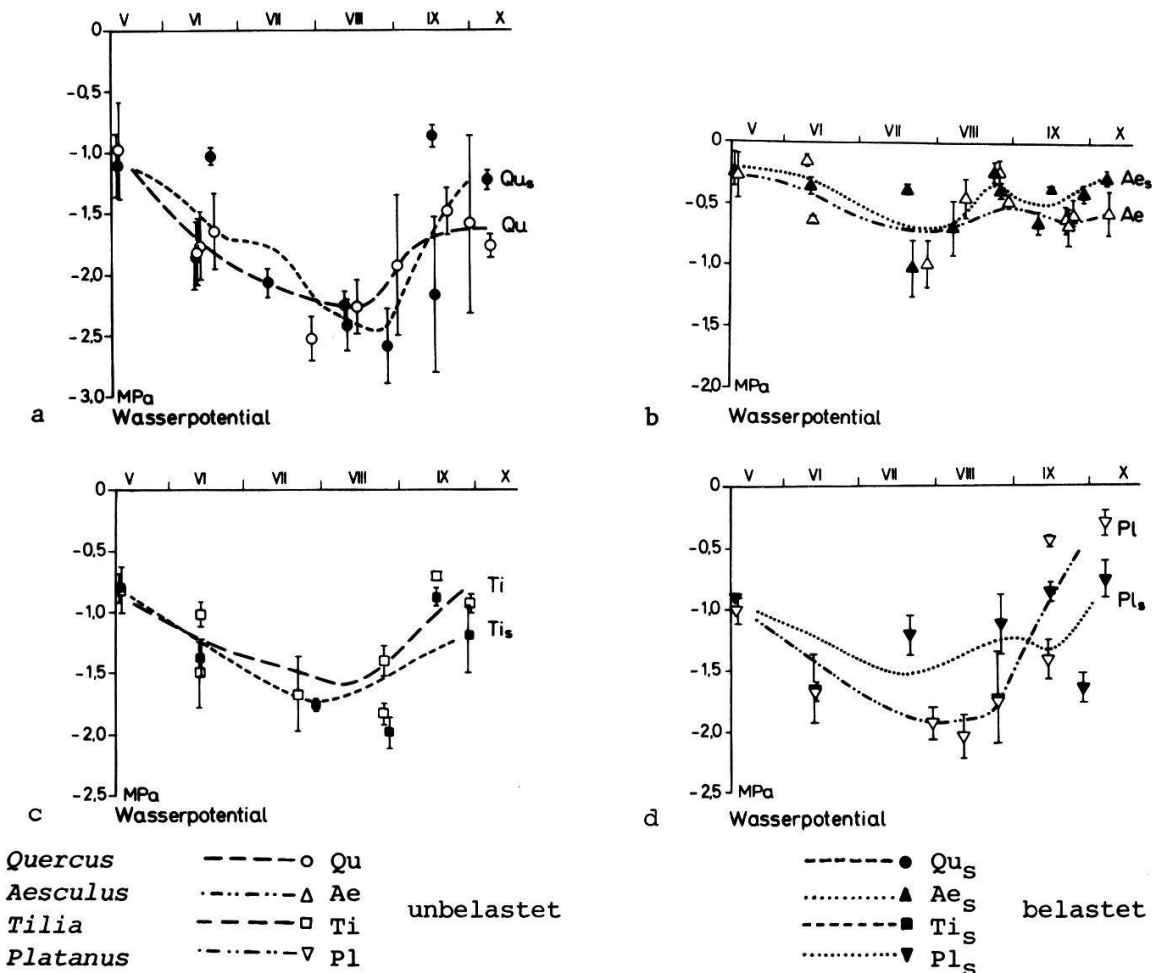


Abb. 17a-d. Nachmittägliche Mittelwerte mit Ausgleichskurve und 95 % Vertrauensgrenzen

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.

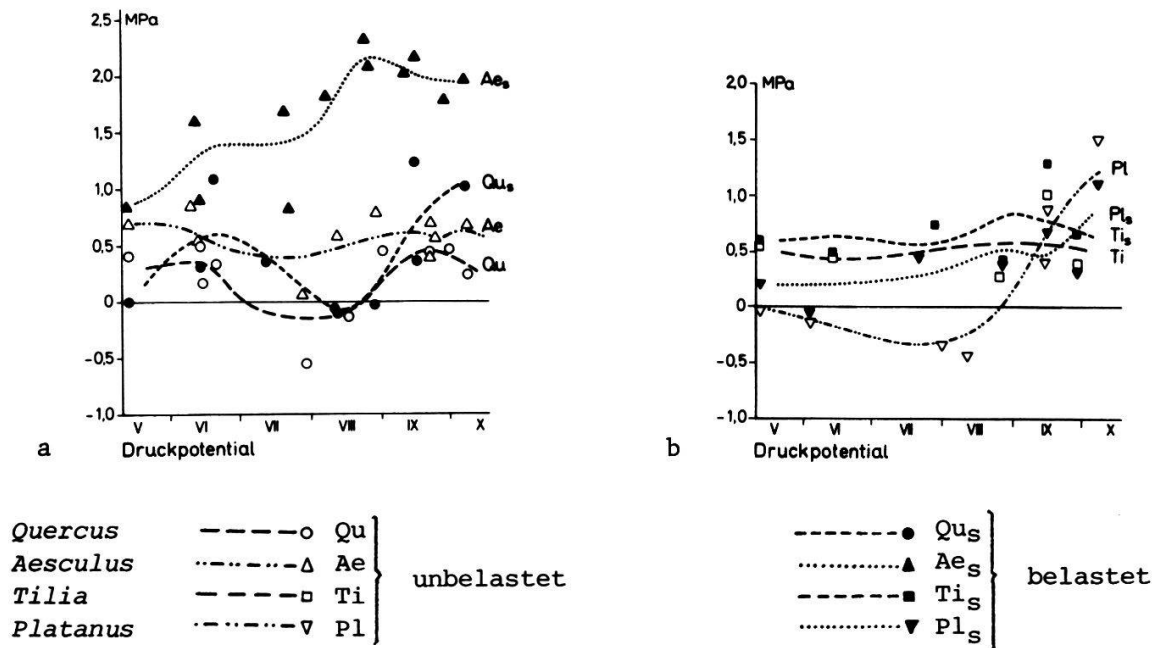


Abb. 18. Nachmittägliche Mittelwerte mit Ausgleichskurve. a: *Quercus* und *Aesculus*. b: *Tilia* und *Platanus*

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

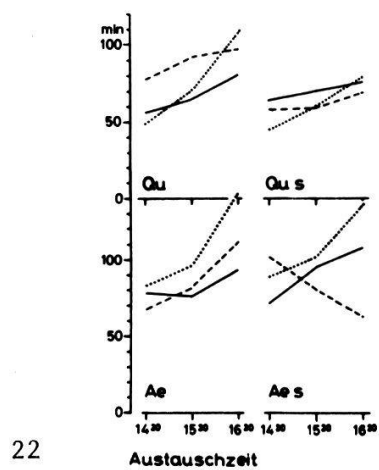
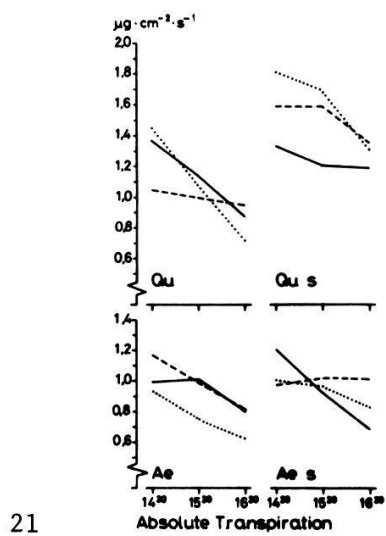
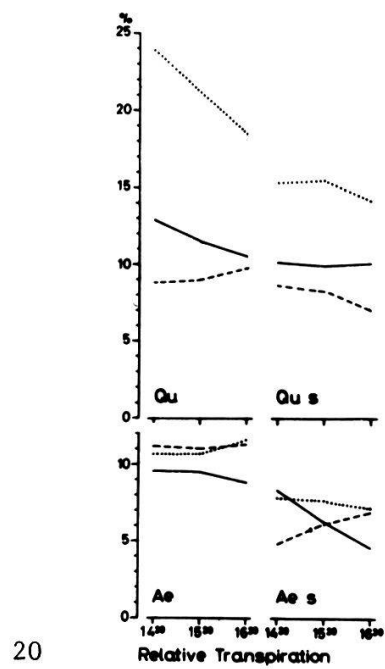
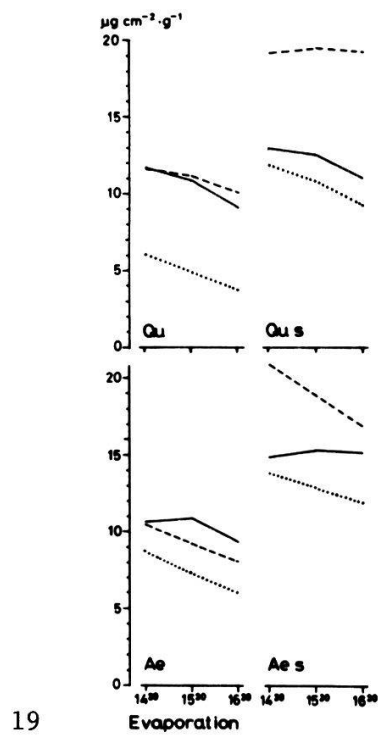
Einer Erklärung bedarf auch das Auftreten von negativen Druckpotentialen. In der Fachwelt herrscht keine Einigkeit über deren Existenz. In dieser Arbeit

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

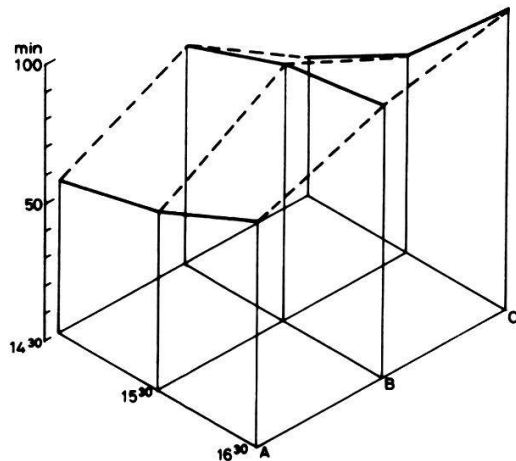
An allen Standorten nahm die klimatische Belastung des pflanzlichen Wasserhaushaltes charakterisierende PICHE-Evaporation (Abb. 19) gegen Abend ab, unabhängig von der Jahreszeit. An den belasteten Standorten wurden im Sommer fast doppelt so hohe Werte wie an den unbelasteten gemessen. Die Auswirkungen 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



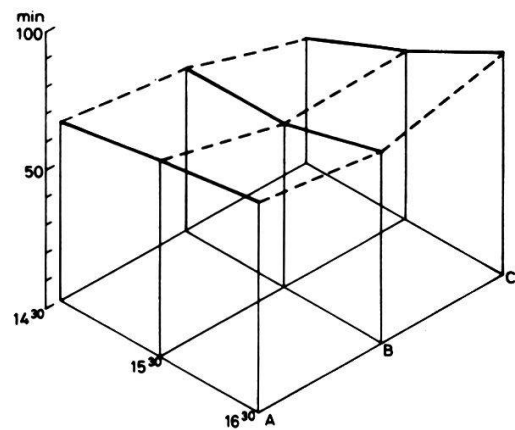
Qu = *Quercus*, Ae = *Aesculus*, s = belasteter Standort  
 Fröhling — Sommer - - - - - Herbst ······

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

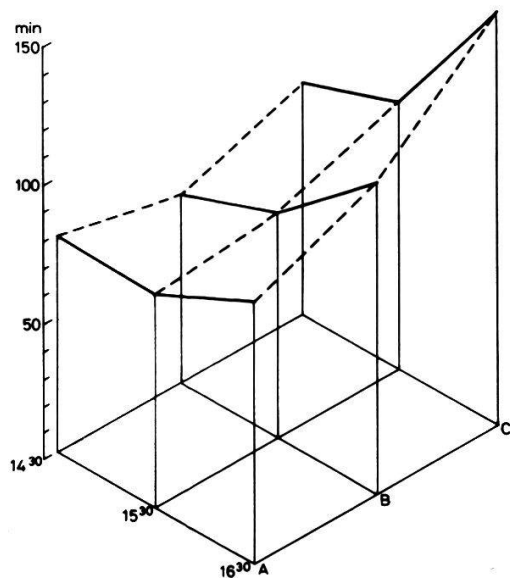
Wasserumsatz verlangsamt. Eine Ausnahme bildete wie schon vorher bei der relativen Transpiration *Aesculus* im Sommer am belasteten Standort: der Wasseraustausch wurde gegen Abend beschleunigt. In Abb. 23 wurde die Austauschzeit als dreidimensionale Graphik dargestellt, und auch so fiel das sommerliche 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)



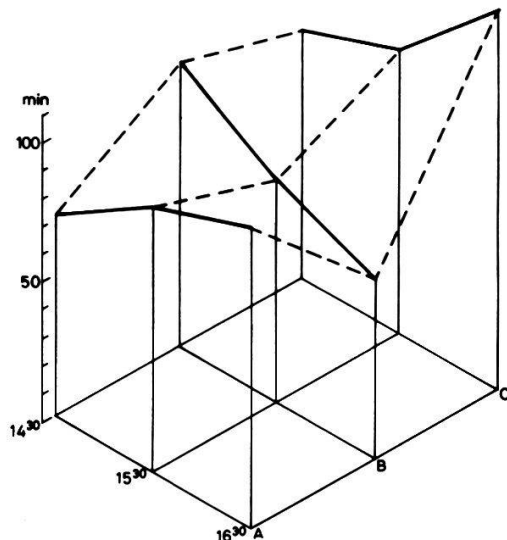
a. *Quercus*, unbelastet



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

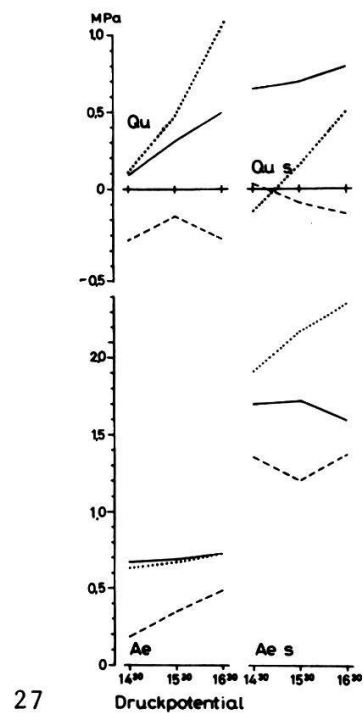
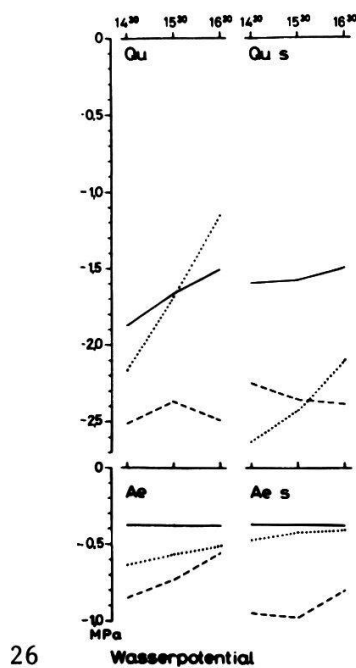
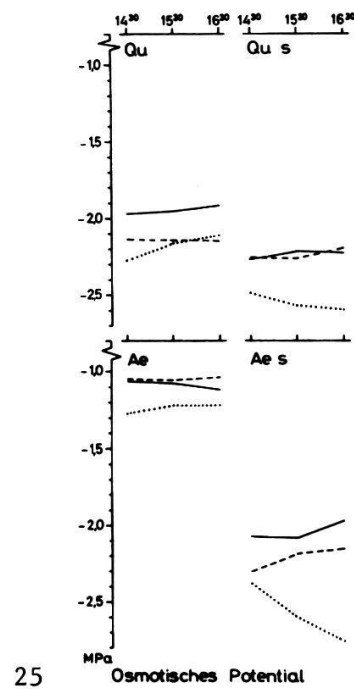
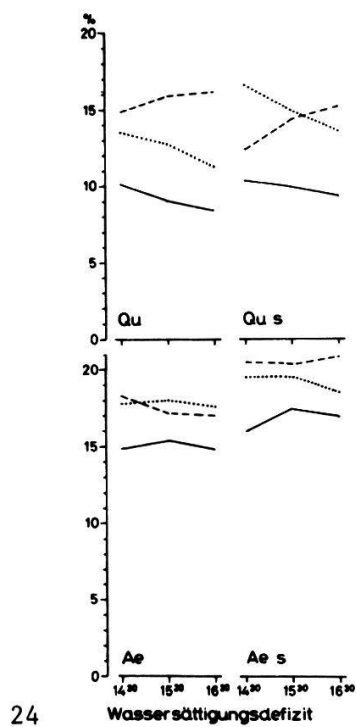


Auswirkungen von Wasserverlusten wurden zunächst über das Wassersättigungsdefizit (Abb. 24) erfasst. Im Sommer nahm bei *Quercus* an beiden Standorten der Wassermangel zu, obwohl die Transpiration abnahm. Im Frühjahr und im Herbst wurde gegen Abend eine Verbesserung der Wasserbilanz festgestellt. An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

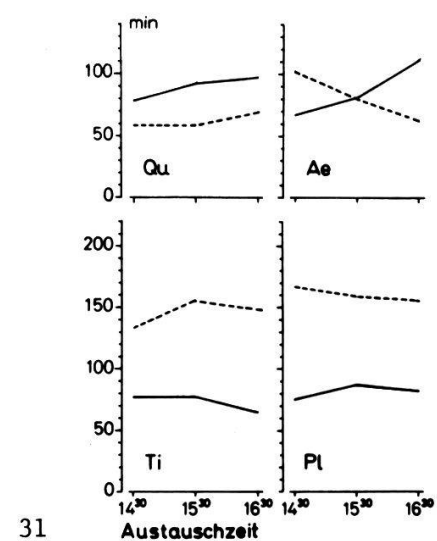
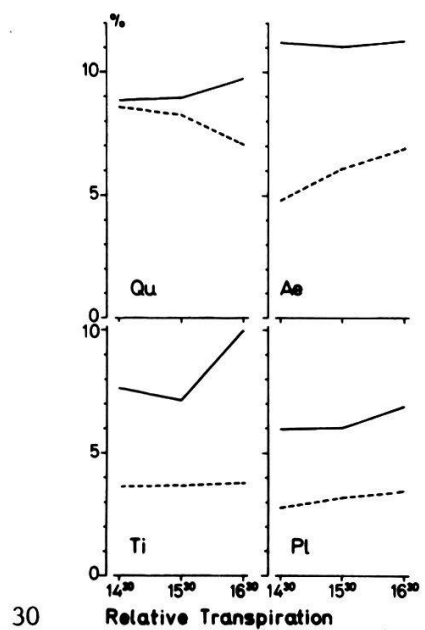
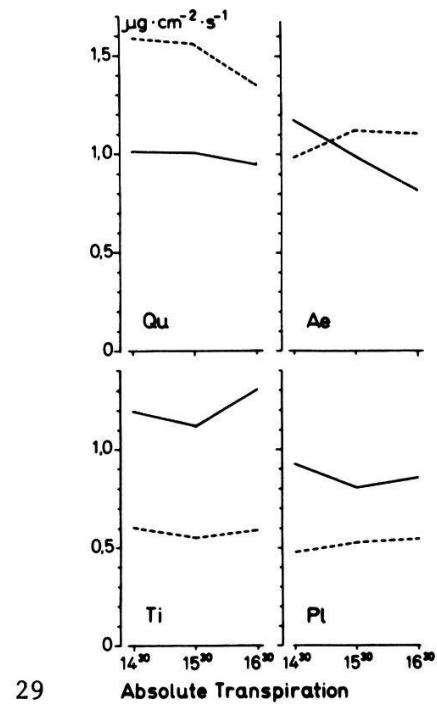
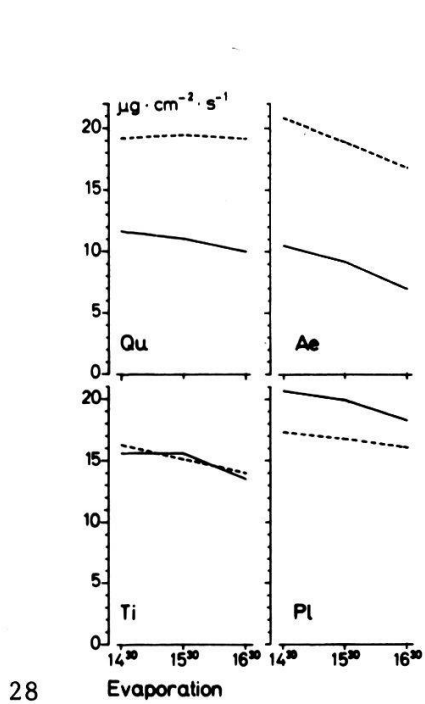
Die Evaporation (Abb. 28) war an den salzbelasteten Standorten von *Aesculus* und *Quercus* wesentlich höher als an den salzunbelasteten, die Werte lagen bei  $20 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  und  $10 \mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  respektive. Bei *Tilia* konnte kein Unterschied zwischen den 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.

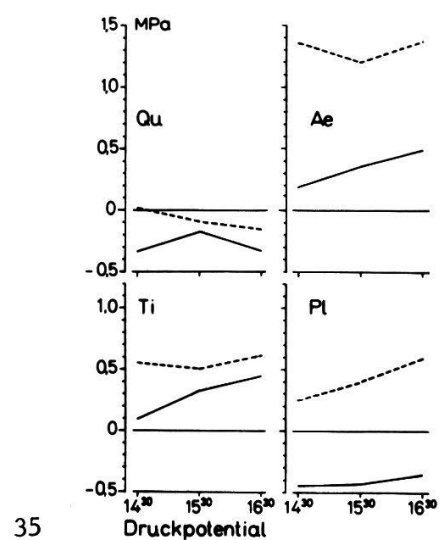
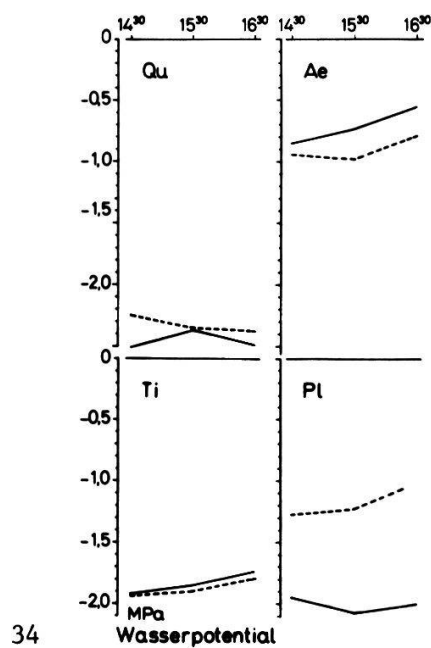
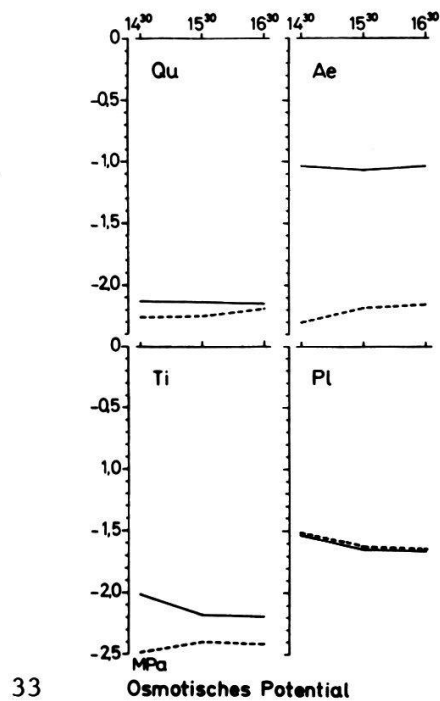
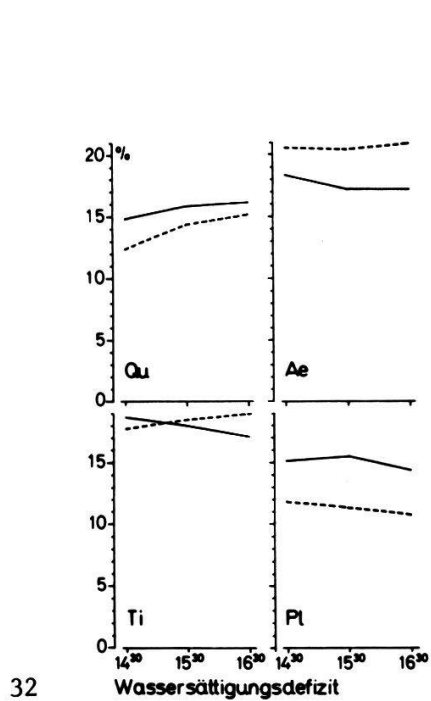


Qu = *Quercus*, Ae = *Aesculus*, Ti = *Tilia*, Pl = *Platanus*

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).