

**Numerische Simulation des hydraulischen Systems Baum-Boden  
bei der Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.)**

**Az.: SL 11/8-3**

B. Sloboda, Ch. Leuschner

**Abschlußbericht zum Forschungsprojekt**

**Projektzeitraum: 1.4. 1999 – 31. 8. 2002**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Allgemeine Angaben</b>	<b>3</b>
<b>2 Einführung</b>	<b>5</b>
<b>3 Arbeits- und Ergebnisbericht</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projektes</b>	<b>7</b>
<b>3.2 Realisierung der Projektziele, Abweichungen vom Konzept und Probleme</b>	<b>8</b>
3.2.1 Empirische Datenerhebungen	8
3.2.2 Erstellung von Baumkarten	9
3.2.3 Messungen des Xylemsaftflusses und des Mikroklimas	9
3.2.4 Multiplikatives Blattleitfähigkeits-Modell	9
3.2.5 Verwendung von Literaturdaten	9
3.2.6 Erfassung der Wurzelverteilung und HYDRA-silVlow-Koppelung	9
3.2.7 Parametrisierung des gekoppelten HYDRA-silVlow-Modells	10
3.2.8 Vergleich von HYDRA mit anderen Wasserflußmodellen	11
3.2.9 Weiterentwicklung der Simulationswerkzeuge (GROGRA, DISC und HYDRA)	11
<b>3.3 Datenmaterial und Methodik</b>	<b>12</b>
<b>3.3.1 Empirische Feldmessungen</b>	<b>12</b>
3.3.1.1 Strukturkartierung	12
3.3.1.2 Bestimmung der axialen hydraulischen Leitfähigkeit	12
3.3.1.3 Messungen des Xylemsaftflusses	14
3.3.1.4 Abschattungsversuche zur Ermittlung der Zeitkonstanten	16
3.3.1.5 Erfassung des Mikroklimas	18
3.3.1.6 Transmittierte Strahlung	19
3.3.1.7 Transpirationsrate, Blattleitfähigkeit und Blattwasserpotential	20
3.3.1.8 Parametrisierung des Blattleitfähigkeit-Teilmodells	21
3.3.1.9 Verteilung der Feinwurzellängendichte	24
<b>3.3.2 Datenerhebung aus anderen Quellen</b>	<b>26</b>
3.3.2.1 Verwundbarkeitskurven ( <i>cavitation functions</i> )	26
3.3.2.2 Hydraulische Kapazitäten	28
<b>3.4 Baumwasserfluß-Modell HYDRA: Parametrisierung und Simulation</b>	<b>29</b>
<b>3.4.1 Parametrisierung</b>	<b>29</b>
3.4.1.1 Umsetzung der hydraulischen Struktur mit GROGRA	29
3.4.1.2 Eingabeparameter zur Steuerung von HYDRA	31
3.4.1.3 Artspezifische Eingabeparameter	33
3.4.1.4 Pfad- und Knotenauswahl	34

<b>3.4.2 Ankoppelung von silVlow an HYDRA</b>	<b>35</b>
3.4.2.1 Senkenmodellierung	35
3.4.2.2 Globalparameter in silVlow	36
3.4.2.3 Ausdehnung des Gesamtbodenraumes	38
3.4.2.4 Randbedingungen	39
3.4.2.5 Ausgangszustand	40
3.4.2.6 Wassergehalts- und Leitfähigkeitsfunktionen	41
3.4.2.7 Unterschiede zur HYDRA-Simulation ohne silVlow	41
<b>3.4.3 Ergebnisse der Simulationsläufe und Sensitivitätstests</b>	<b>42</b>
3.4.3.1 Simulationsläufe und Sensitivitätstests <u>ohne</u> Bodenwassermodell	42
3.4.3.2 Simulationsläufe und Sensitivitätstests <u>mit</u> Bodenwassermodell	47
<b>4 Schlußfolgerungen</b>	<b>51</b>
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>52</b>
<b>6 Literatur</b>	<b>53</b>
Verwendete Symbole und Abkürzungen	56
ANHANG [1]: Basisgleichungen von HYDRA	57
ANHANG [2]: Repräsentation mit GROGRA und AMAP	58

## 1 Allgemeine Angaben

### DFG-Geschäftszeichen

Az.: SL 11/8-1/2/3

### Antragsteller

(1) Prof. Dr. Dr. h.c. B. Sloboda, Institut für Forstliche Biometrie und Informatik der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Universität Göttingen

(2) Prof. Dr. Ch. Leuschner, Abteilung Ökologie und Ökosystemforschung im Albrecht-von-Haller Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Göttingen

### Thema des Projektes

Numerische Simulation des hydraulischen Systems Baum-Boden bei der Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.)

### Kennwort

Hydraulisches System Baum-Boden

### Berichts- und Förderungszeitraum

1.4. 1999 – 31.8. 2002

(Das Projekt war ab Januar 2000 für 5 Monate unterbrochen und wurde im Juni 2000 wieder aufgenommen.)

### Kooperationen

- Arbeitsgruppe Prof. Dr. Christoph Leuschner, Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften, Universität Göttingen
- Dr. Christoph Blendinger, TLC Frankfurt, BZD Integrationsmanagement (vormals SFB 350, Institut für Angewandte Mathematik der Universität Bonn)
- Prof. Dr. W. Kurth, Lehrstuhl für Graphische Systeme, Brandenburgische Technische Universität Cottbus
- Prof. Dr. G. Gravenhorst, Institut für Bioklimatologie, Universität Göttingen
- Prof. Dr. Jan Cermák, Institute of Forest Ecology at the University of Brno, Czech Republic
- Dr. Jean Dausat, CIRAD-amis, Plant Modelling Programme, Montpellier, France

### **Projektbezogene Publikationen**

Früh, T. (1995): Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung des Wasserflusses in der verzweigten Baumarchitektur. Bericht des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 131, 192 S.

Früh, T. (1997): Simulation of water flow in the branched tree architecture. *Silva Fennica* 31: 275-284.

Früh, T., Kurth, W. (1999): The hydraulic system of trees: Theoretical framework and numerical simulation. *Journal of Theoretical Biology* 201: 251-270.

Kurth, W. (1999): Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken. Wissenschaftlicher Verlag, Berlin, pp 327.

Lanwert, D., Dauzat, J., Früh, T. (1997): Water use of forest trees: a possibility of combining structural and functional models. *Bayreuther Forum Ökologie* 52: 117-128.

Weitere Publikationen sind geplant bzw. in Vorbereitung.

### **Teilnahme an Workshops und präsentierte Poster**

Winfried Kurth, Gustavo Anzola Jürgenson, Helge Dzierzon, Armin L. Oppelt & Michael Schulte: **„Digital reconstruction of tree architecture as a tool for assessing growth and functional performance“**

Poster on the EUROSILVA workshop "Development and Ageing in Forest Trees", Florence (Italy), 20.-24. September 2000.

Poster on the workshop „Water transport in woody plants and linkages to plant structure and productivity“, Hyytiälä Forest Station, University of Helsinki (Finland), 14.-16. März 2001.

Michael Schulte, Winfried Kurth, Gustavo Anzola Jürgenson, Helge Dzierzon: **„Simulation of water flow in young *Quercus petraea* trees using architectural data“**

Poster on the workshop „Water transport in woody plants and linkages to plant structure and productivity“, Hyytiälä Forest Station, University of Helsinki (Finland), 14.-16. März 2001.

Michael Schulte, Winfried Kurth, Gustavo Anzola Jürgenson, Helge Dzierzon: **„Simulation des Wasserflusses in jungen Traubeneichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) unter Verwendung von Architekturdaten“**

Poster bei der 6. Jahrestagung des GfÖ-Arbeitskreises „Experimentelle Ökologie“, Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Göttingen, 1.-3. April 2001.

## 2 Einführung

Der Prozeß der pflanzlichen Wasserabgabe (Transpiration) beginnt mit der Wasserabsorption der Wurzeln und führt über den Ferntransport durch die Leitgewebe (Xylem) in Sproß und Blättern schließlich zur stomatären Wasserdampfabgabe in die umgebende Luft. Die antreibende Kraft dieses Prozesses ist die Wasserpotentialdifferenz ( $\Delta\Psi = \Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{air}}$ ) zwischen Boden und Atmosphäre (Grace 1983). Das Wasser bewegt sich durch ein Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC) entlang eines Gradienten abnehmenden Wasserpotentials.

Die Bewegung von Wasser (Fluß) durch die Pflanzen und ihre unmittelbare Umgebung (Boden, Atmosphäre) basiert auf dem physikalischen Flußprinzip und folgt der Allgemeinen Transportgleichung: Fluß = Potentialgradient / Transportwiderstand (Grace 1983). Unter *steady-state*-Bedingungen (d.h. im Fließgleichgewicht) ist der Fluß durch jedes Teilsystem des SPAC, also durch den durchwurzelten Bodenteil (*soil*), die Wurzeln (*root*), den Sproß (*xylem*), die Blätter (*leaf*) und durch die unmittelbare Umgebungsluft (*air*) gleich und kann im Falle des Baumwasserflusses beschrieben werden als:

$$\text{Fluß} = (\Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{air}}) / R_{\text{soil-air}}, \quad \text{oder, unter Berücksichtigung der Teilsysteme, als:}$$

$$\begin{aligned} \text{Fluß} &= (\Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{root}}) / R_{\text{soil-root}} = (\Psi_{\text{root}} - \Psi_{\text{xylem}}) / R_{\text{root-xylem}} \\ &= (\Psi_{\text{xylem}} - \Psi_{\text{leaf}}) / R_{\text{xylem-leaf}} = (\Psi_{\text{leaf}} - \Psi_{\text{air}}) / R_{\text{leaf-air}} \end{aligned}$$

mit  $\Psi$  = Wasserpotential, R = hydraulischer Widerstand.

Den größten Widerstand im SPAC stellt der Blatt-Luft-Widerstand ( $R_{\text{leaf-air}}$ ) dem Fluß entgegen, und die Wasserpotentialdifferenz zwischen Blatt und Umgebungsluft ( $\Psi_{\text{leaf}} - \Psi_{\text{air}}$ ) ist der steilste Gradient im SPAC. Bei 99% relativer Luftfeuchte beträgt  $\Psi_{\text{air}} -1.4$  MPa, bei 95% bereits  $-7$  MPa und bei 50% sinkt  $\Psi_{\text{air}}$  auf etwa  $-100$  MPa (jeweils bei  $T_{\text{air}} = 20^\circ\text{C}$ ). Bei 50% rel. Luftfeuchte und gut wasserversorgtem Boden (z.B.  $\Psi_{\text{soil}} = -0.05$  MPa) ist der Widerstand an der Grenzfläche Blatt-Luft etwa 20-fach höher als der interne Pflanzenwiderstand (Weatherley 1970). Daraus folgt, daß der bei der Transpiration der Blätter zu überwindende Widerstand an dieser Grenzfläche wesentlich höher ist als der Widerstand beim Transport innerhalb der flüssigen Phase. Eine wirksame Kontrolle der Transpirationsrate ist also nur durch die Änderung des Widerstandes an der Grenzfläche zwischen gasförmiger Phase und der Atmosphäre möglich. Ideal geeignet für die Transpirationskontrolle sind deshalb die Stomata, die an eben dieser Grenzfläche positioniert sind (Whitehead 1998).

Da das Blattwasserpotential ( $\Psi_{\text{leaf}}$ ) kaum Werte kleiner als  $-5$  MPa unterschreiten kann, und als notwendige Bedingung für das Überleben der Pflanze  $\Psi_{\text{soil}}$  größer sein muß als  $\Psi_{\text{leaf}}$ , können Änderungen von  $\Psi_{\text{leaf}}$  oder von  $\Psi_{\text{soil}}$  bei konstantem hydraulischen Widerstand über den Flußpfad die Transpirationsrate höchstens um wenige Prozent verändern. Im Wasserpotentialgefälle ( $\Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{air}}$ ) stellt somit der atmosphärische Antrieb den für die Transpirationsrate entscheidenden Faktor dar.

Das detaillierte Wissen über die Seite der Wasserabgabe im SPAC steht in deutlichem Gegensatz zum mangelhaften Verständnis der Aufnahme Seite (Landsberg & Fowkes 1978, Coners 2001, Sperry et al. 2002). Die Wasseraufnahme durch die Wurzeln ist jedoch als einzige Nachlieferungsquelle für das durch die Transpiration abgegebene Wasser von entscheidender Bedeutung.

In neuerer Zeit werden Miniatur-Saftflußmeßsysteme eingesetzt, um am natürlichen Standort, d.h. unter *in situ*-Bedingungen, Wasseraufnahmeraten von Baumwurzeln zu bestimmen. Coners (2001) dekapitierte einzelne 3-4 mm starke Wurzeln von *Quercus petraea* und *Fagus sylvatica* und schaltete so den radialen Wurzelwiderstand aus. Der dadurch induzierte rasche Anstieg der Flußrate um etwa das 10-fache läßt darauf schließen, daß der radiale Wurzelwiderstand bedeutend größer ist als der axiale hydraulische Widerstand (Steudle & Meshcheryatov, Sperry et al. 2002). Deshalb wird der radiale Wurzelwiderstand vielfach als wichtigste Größe zur Charakterisierung der Wasseraufnahme herangezogen, während der axiale Widerstand dagegen fast vernachlässigbar erscheint.

Weiterführende Berechnungen haben ergeben, daß die Widerstände von Boden und Wurzelsystem zusammen genommen allein etwa 50% zum gesamten hydraulischen Widerstand im SPAC beitragen können (Coners 2001).

Der Prozeß der pflanzlichen Wasserabgabe (Transpiration) beginnt mit der Wasserabsorption der Wurzeln und führt über den Ferntransport durch die Leitgewebe (Xylem) in Sproß und Blättern schließlich zur stomatären Wasserdampfabgabe in die umgebende Luft. Die primäre antreibende Kraft dieses Prozesses ist die Wasserpotentialdifferenz ( $\Delta\Psi = \Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{air}}$ ) zwischen Boden und Atmosphäre (Grace 1983). Das Wasser bewegt sich durch ein Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC) entlang eines Gradienten abnehmenden Wasserpotentials.

Die theoretische Beschreibung von biologischen, "lebenden" Systemen unterscheidet sich i.d.R. deutlich von der von physikalischen, "nichtlebenden" Systemen (Wirtz 1997). Der Ferntransport von Wasser im Inneren eines Baumes hängt jedoch sowohl von der biologischen Struktur seiner leitenden Xyleme und Speicherräume als auch von der physikalischen Natur der antreibenden Kräfte ab. Für die Simulation des Baumwasserflusses durch seine verzweigte Architektur sind deshalb solche Modelle besonders geeignet, in denen die Morphologie (Kurth 1994, 1999) und dessen hydraulische Eigenschaften (Dauzat & Rapidel 1998) funktionell mit der Physik seiner ihn bewirkenden Kräfte verbunden sind (s. z.B. Tyree 1988, Früh 1995). Die Ankoppelung der physikalisch fundierten Flußsimulation an ein morphobiologisch begründetes Strukturmodell stellt also eine notwendige Bedingung für ein integriertes, realistisches Systemverhalten solcher Modelle dar.

Die Entwicklung des Simulationsmodells HYDRA wurde im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes "Stabilitätsbedingungen von Waldökosystemen" begonnen und im BMBF-Nachfolgeprojekt "Veränderungsdynamik von Waldökosystemen" weitergeführt (Früh 1995, Früh & Kurth 1999). Zur Erzeugung morphologischer Strukturmodelle wurde - und wird - das von Kurth (1994) entwickelte Programmsystem GROGRA (Growth Grammar Interpreter) verwendet, das die systematische Erzeugung von Baumarchitekturvarianten ermöglicht (s. auch Kurth 1999).

Die von Früh (1995) mit HYDRA an Koniferen vorgenommenen Modelltests zur räumlichen und zeitlichen Konvergenz, zur numerischen Stabilität, zur Sensitivität gegenüber Änderungen der hydraulischen Parameter, zur Massenbilanz und zur Fehleranalyse sprechen eindeutig dafür, daß die biophysikalischen und physiologischen Grundannahmen durch das numerische Simulationsverfahren korrekt und fundiert umgesetzt werden. Damit wird unserer Meinung nach ein wesentlicher Fortschritt gegenüber bisherigen Modellen des Baumwasserflusses erzielt. So zeigten Simulationsläufe mit einer von Tyree (1988) kartierten und durch entsprechende Daten umfassend beschriebenen Konifere (*Thuja occidentalis* L.) im oberirdischen Teil der verzweigten Struktur ähnliche Muster der Wasserpotentialgradienten, wie sie nach empirischen Meßergebnissen aus der Literatur zu erwarten waren.

Im Rahmen des hier behandelten Projektes bestand die Aufgabe, die von Früh (1995) entwickelte HYDRA-Version unter Berücksichtigung der veränderten Anforderungen an die Laubbaumart Traubeneiche (*Quercus petraea*) programmtechnisch anzupassen und neu zu parametrisieren. Hierzu war erstmals die Modellierung von Blättern (Blattspreiten, Blattstiele) als eigenständige Strukturelemente notwendig, deren transpirierende Oberfläche in der Koniferenversion von HYDRA noch Segmenten der sie tragenden Sproßachse zugeordnet war. Auch das Wurzelsystem war in der alten Version noch unberücksichtigt geblieben, weil aufgrund der Rückkoppelung zwischen Wurzelwasseraufnahme und den hydraulischen Variablen der Bodenumgebung der Weg einer verzweigungsorientierten Modellierung als zu aufwendig erschien. Deshalb war es sinnvoll, die Komplettierung eines bereits begonnenen Ansatzes zur Koppelung von HYDRA mit einem Bodenwasserfluß-Modell (silVlow, s. Blendinger 1994) in die Planung einzubeziehen.

Zur Parametrisierung der Laubbaumversion von HYDRA für die Traubeneiche wurden umfangreiche empirische Datenerhebungen für notwendig gehalten. Diese sollten aufwendige Kartierungsarbeiten zur Kronen- und Wurzelarchitektur und Laboruntersuchungen zur axialen hydraulischen

Leitfähigkeit von Stamm-, Ast-, Zweig- und Blattsegmenten sowie an Wurzeln von jungen Traubeneichen umfassen. Um eine Konsistenzprüfung des Modells zu ermöglichen, waren lt. Projektplanung einerseits ergänzende Freilandmessungen des Mikroklimas, der Xylemsaftflüsse, Blattleitfähigkeiten, Transpirationsraten, Blattwasserpotentiale, und andererseits die Neuentwicklung und Parametrisierung eines Teilmodells zur Berechnung von Blattleitfähigkeiten und Transpirationsraten vorgesehen.

### 3 Arbeits- und Ergebnisbericht

#### 3.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projektes

Das Vorhaben sollte die Theoriebildung (Kap. 2) zum hydraulischen System von Bäumen in enger Verknüpfung mit der Empirie konsistent in einem physikalisch fundierten Modell bündeln, um dadurch das Verständnis der hydraulischen Integration des Baumorganismus zu verbessern. Der wechselseitigen Abhängigkeit zwischen den nichtlinearen hydraulischen Systemen von Baum und Boden sollte erstmals durch eine raum-zeitliche Koppelung der numerischen Simulation von Wasserflüssen in Baum und Boden Rechnung getragen werden.

Nach der Gutachterempfehlung sollte die Parametrisierung des bisher nur an Nadelbaumarten erprobten Baumwasserfluß-Simulationsmodells HYDRA exemplarisch für die als forstlich wichtig eingestufte, ringporige Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) erfolgen. Dazu war vorgesehen, Daten zur Kronen- und Wurzelarchitektur und zur axialen hydraulischen Leitfähigkeit von Stamm-, Ast- und Wurzelsegmenten an Eichen verschiedener Altersstufen auf Probeflächen in der Lüneburger Heide zu ermitteln.

Ergänzende Messungen von Xylemsaftfluß, Blatt-Leitfähigkeit, Transpirationsraten, Boden- und Blattwasserpotential und Mikroklima im Freiland sollten eine Konsistenzprüfung des Modells und eine Einschätzung der Anwendbarkeit auf forstlich relevante Situationen ermöglichen. Schließlich sollten umfangreiche Sensitivitätstests und Computerexperimente zur stomatären Regelung des Wasserflusses und zur Komplexitätsreduktion des Modells einen Beitrag zur Hypothesenprüfung auf dem Gebiet des Baumwasserflusses leisten.

Konkret sollten folgende Forschungslücken geschlossen werden:

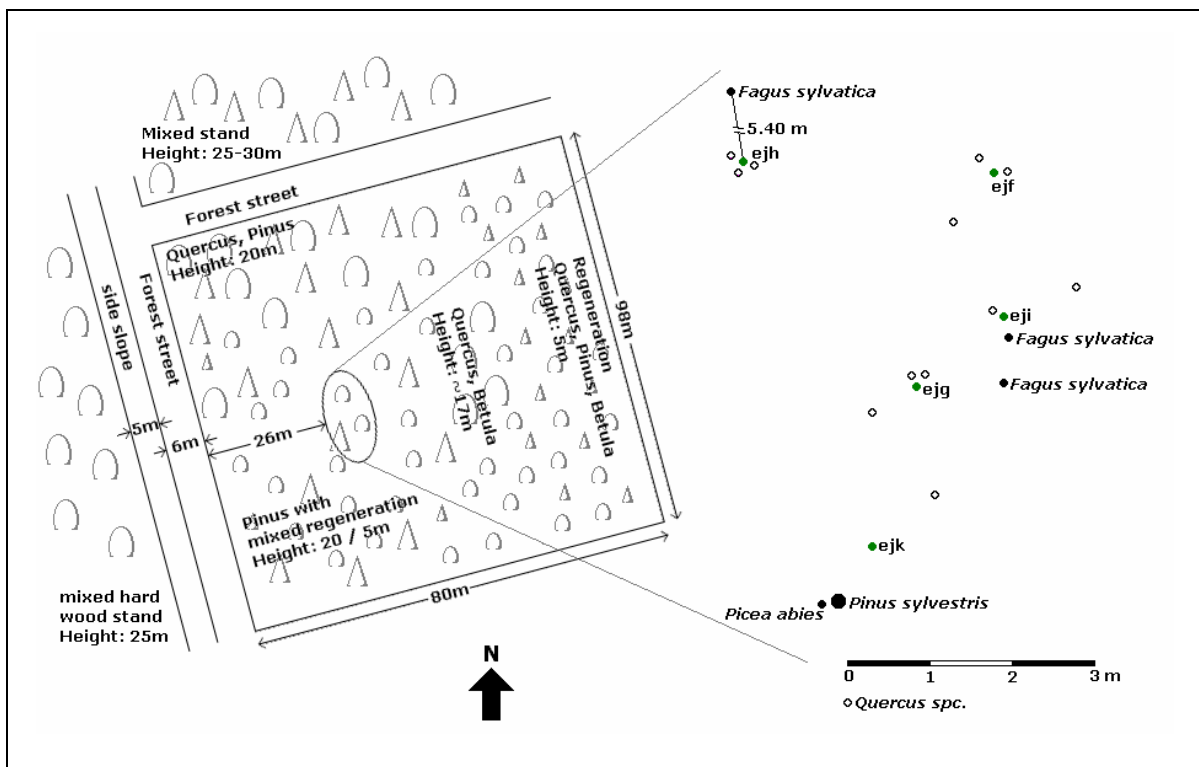
- (1) Mit dem Simulationsmodell HYDRA sollten Aussagen darüber entwickelt werden, welchen Mustern die nichtlineare Wasserflußdynamik in Baum und Boden folgt und wie das Verhalten des hydraulischen Systems von den Eigenschaften der baumartspezifischen Architektur bestimmt wird.
- (2) Das für Koniferen (*Picea abies*, *Thuja occidentalis*) entwickelte Wasserfluß-Simulationsmodell HYDRA sollte für die Laubbaumart Traubeneiche (*Quercus petraea*) angepaßt und neu parametrisiert werden. Hierzu war die Modellierung der Blätter als eigenständige Elemente vorgesehen, weil die Widerstände im axialen Leitsystem der Blattstiele und Blattspreiten das hydraulische Systemverhalten des Baumes wesentlich mitbestimmen.
- (3) Die numerische Wasserfluß-Simulation des Baumes sollte mit der Simulation des Wasserflusses im Boden gemeinsam erfolgen. Dadurch sollte der wechselseitigen Abhängigkeit zwischen diesen beiden nichtlinearen hydraulischen Systemen Rechnung getragen werden. Hierzu sollten bestehende Flußmodelle (HYDRA, silVlow) und ein bereits entwickeltes Konzept der Modellkoppelung als Basis dienen. Erstmals sollte sich damit eine auf dem Fließwege-Konzept basierende Theorie ableiten lassen, die Baum und Boden gemeinsam abbildet.



## 3.2 Realisierung der Projektziele, Abweichungen vom Konzept und Probleme

### 3.2.1 Empirische Datenerhebungen

Die in der zweiten, ergänzten Fassung des Projektantrages formulierten Aufgaben im Arbeitsprogramm mit einer veränderten Schwerpunktsetzung im experimentellen Bereich konnten mit wenigen Ausnahmen realisiert werden. So erforderte die Anpassung des für Koniferen entwickelten Wasserflußmodelles HYDRA (Früh 1995, Früh & Kurth 1999) an Laubbäume (Traubeneichen) einen empirischen Vorlauf zur Parametrisierung (Kap. 3.3.1). Hierzu wurden umfangreiche Datenerhebungen an der Traubeneiche (*Quercus petraea*) auf Versuchsflächen in der südlichen Lüneburger Heide bei Unterlüß (Leuschner 1993; Abb. 1) durchgeführt. Hierbei sind die mit hohem Aufwand durchgeführten Strukturkartierungen (Kap. 3.3.1.1), die empirischen Datenerhebungen zur axialen hydraulischen Leitfähigkeit (Kap. 3.3.1.2), die Messungen der Transpirationsrate, der Blatt-Leitfähigkeit und des Blattwasserpotentials (Kap. 3.3.1.7) sowie des Mikroklimas (Kap. 3.3.1.5) und des Xylemsaftflusses (Kap. 3.3.1.3) besonders hervorzuheben.



**Abb. 1:** Lage der Probebäume auf der Versuchsfläche in der südlichen Lüneburger Heide bei Unterlüß (nach Anzola 2002). Es handelt sich um einen Mischbestand aller Altersstufen aus Rotbuchen (*Fagus sylvatica*), Traubeneichen (*Quercus petraea*), Hängebirken (*Betula pendula*), Waldkiefern (*Pinus sylvestris*) und Rotfichten (*Picea abies*) mit eingestreuten Eschen (*Fraxinus excelsior*). Die Bodenbedeckung besteht größtenteils aus Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*), Preiselbeere (*Vaccinium vitis-idaea*) und diversen Moosen und Gräsern.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag - aufgrund der leichteren Zugänglichkeit und der Möglichkeit der Totalkartierung - auf ca. 5- bis 10-jährigen Jungeichen. Zusätzlich wurden stichprobenartig Zweig- und Astproben von ca. 10- bis 20-jährigen Traubeneichen eines Stangenholzbestandes entnommen. Die Struktur dieser Proben wurde partiell kartiert und ihre hydraulische Leitfähigkeit (Kap. 3.3.1.2, Abb. 2) zur späteren Verwendung in HYDRA bestimmt.

### 3.2.2 Erstellung von Baumkarten

Die Umsetzung der oberirdischen, hydraulischen Struktur von 7 Traubeneichen in Baumkarten (*map files*) mit Hilfe von GROGRA und damit die strukturelle Parametrisierung von HYDRA (Kap. 3.4.1.1) konnte erfolgreich realisiert werden. Die Blätter sind - im Gegensatz zur Koniferenversion von HYDRA - nun als eigenständige Elemente innerhalb der Gesamtstruktur etabliert. Die hydraulische Leitfähigkeit der Blattstiele wurde gesondert als blattflächenabhängiger Parameter nach der Methode von Cochard et al. (1992) bestimmt. Um das fehlende Bodenwasseraufnahme-Modell (s.u.) zu ersetzen, wurde - in erster Näherung - ein Hilfskonstrukt (Wurzelsegment) eingesetzt (Abb. 19), das die hydraulischen Eigenschaften des Wurzelsystems formell repräsentiert (s. auch Tab. 3).

### 3.2.3 Messungen des Xylemsaftflusses und des Mikroklimas

Die 8-tägigen Messungen des Xylemsaftflusses an 5 Jung- und 4 Stangenholzeichen (Kap. 3.3.1.3) nach der *heat-balance*-Methode (Cermák et al. 1973) geschahen in Zusammenarbeit mit Prof. J. Cermák und Frau N. Nadezhdina von der Universität Brno (Tschechische Republik) sowie mit Dr. Heinz Coners vom Göttinger Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften. Dafür gebührt ihnen an dieser Stelle ein ganz besonderer Dank.

Zeitgleich wurden mit einer mobilen Wetterstation, für deren Überlassung wir dem Institut für Bioklimatologie der Univ. Göttingen sehr dankbar sind, Daten zum Mikroklima (Globalstrahlung, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte) erfaßt (Kap. 3.3.1.5).

### 3.2.4 Multiplikatives Blattleitfähigkeits-Modell

In der Koniferenversion von HYDRA wurde die Transpirationsrate entweder als Konstante (Maximalwert) vorgegeben oder aus einer empirischen Zeitreihendatei ausgelesen. In der neuen, für Laubbäume parametrisierbaren HYDRA-Version werden die Transpirationsflußdichten dagegen mit einem multiplikativen Leitfähigkeitsmodell nach Jarvis (1976) aus vorgegebenen Zeitreihen der Blattleitfähigkeit und des Mikroklimas nach der *boundary-line-analysis*-Methode berechnet (Kap. 3.3.1.8). Die Transpirationsflußdichte wird anschließend den Blättern höhenabhängig zugeordnet (Kap. 3.3.1.6). HYDRA erkennt den Wasserentzug (*sink*) an jeder Blattinsertion und berechnet daraus numerisch nach dem *Darcy*-Prinzip (Details s. Früh 1995 und Früh & Kurth 1999) die resultierenden Wasserpotentialgradienten und -flüsse des verzweigten Systems. Die Verwendung eines multiplikativen Leitfähigkeitmodells hat - z.B. gegenüber den Energiebilanzmodellen, s. unten - den Vorteil, daß es relativ leicht mit Hilfe von Porometermessungen parametrisiert werden kann.

### 3.2.5 Verwendung von Literaturdaten

Zum Teil mußte auf Datenquellen in der Literatur zurückgegriffen werden. So konnten aufgrund des hohen apparativen Aufwandes die Kavitationsfunktionen (Kap. 3.3.2.1) und die hydraulischen Kapazitäten (Kap. 3.3.2.2) nicht selbst bestimmt werden.

### 3.2.6 Erfassung der Wurzelverteilung und HYDRA-silVlow-Koppelung

Erheblich unterschätzt worden war im ursprünglichen Arbeitsprogramm der Arbeitsaufwand zur Erfassung der Wurzelverteilung im Bodenkörper zur Parametrisierung des Bodenwasseraufnahme-Modells (silVlow). Hier konnte nur ein geringer, statistisch nicht relevanter Teil der vorgesehenen Daten erhoben werden.

Zur Ausdehnung der Wasserflußsimulation auf den durchwurzelter Bodenraum war bei der Projektplanung für dieses Vorhaben die Koppelung von HYDRA mit dem Bodenwassermodell silVlow (Blendinger 1994) vorgesehen. Das Modell HYDRA allein berücksichtigt den Boden-Wurzel-Raum und die Wurzelwasseraufnahme nicht (Früh 1995), bzw. erwartet als Randbedingung am untersten Stammfußsegment lediglich ein konstant vorgegebenes Bodenwasserpotential.

Bei der lt. Arbeitsprogramm vorgesehenen Ankoppelung von silVlow, das ursprünglich von J. Schmidt (ehemals Institut für Bodenkunde und Waldernährung, Univ. Göttingen), M. Hauhs (BI-TÖK, Univ. Bayreuth) und Ch. Blendinger (ehemals Institut für Angewandte Mathematik, SFB 350, Univ. Bonn) für die Simulation der Wasserflüsse im Boden entwickelt worden war, gab es zunächst einige Probleme bei der numerischen Umsetzung und bei der Parametrisierung. Letztendlich konnte die Koppelung zwischen HYDRA und silVlow aber technisch umgesetzt und die theoretischen Grundlagen dazu beschrieben werden. Der Modellverbund HYDRA-silVlow wurde schließlich ergänzend und teilweise neu parametrisiert.

Die Realisierung einer Koppelung von zwei Simulationsmodellen, die sich wie HYDRA und silVlow sowohl hinsichtlich ihrer ursprünglichen Konzeption und Intention als auch in ihrer Struktur unterscheiden, erfordert grundsätzlich vier zu bewältigende Schritte:

- die Erstellung eines Modelles für die Simulation des Einflusses von Wurzeln auf den Bodenwasserhaushalt,
- die programmiertechnische Umsetzung des Datenaustausches zwischen der HYDRA- und der silVlow-Software,
- die Parametrisierung des gekoppelten Modelles,
- und die Produktion von Ergebnissen zur Verifikation.

Die Koppelung beinhaltet ein Modell für den Einfluß von Wurzeln auf den Wasserhaushalt bzw. auf die Wasserbewegung im Boden (Blendinger 1994). Die Wurzeln stellen eine Senke dar, die dem Boden Wasser entzieht und dadurch das Wasserpotential des Bodens absenkt (Kap. 3.4.2.1). Schwierige Probleme bei der Umsetzung waren die Synchronisierung der Zeitsteuerungen beider Systeme und die Anpassung der Numerik von HYDRA an die neuen Umgebungsbedingungen. Die Zeitsteuerung wird nun komplett von silVlow übernommen und startet und beendet HYDRA eigenständig. Insbesondere der Eingriff in die Zeitsteuerung war mit weitgehenden Umstellungen der HYDRA-Programmarchitektur verbunden. Bei der Parametrisierung des gekoppelten Modells (Kap. 3.2.7) gab es bislang ungelöste Probleme, die einen weiteren Forschungsbedarf aufzeigen (s.u.). Die Simulationsergebnisse der HYDRA-silVlow-Koppelung, die als Teilaspekt in diesem Projekt vorgesehen waren, können daher nur beispielhaft dargestellt werden, und sind für quantitative Betrachtungen noch nicht geeignet. Die vorgenommenen Schritte bei der Koppelung sind in Kap. 3.4.2 näher beschrieben.

### **3.2.7 Parametrisierung des gekoppelten HYDRA-SilVlow-Modells**

Bei der Parametrisierung des gekoppelten HYDRA-silVlow-Modells traten einige Schwierigkeiten auf. So erwartet das gekoppelte Modell als Eingangsparameter eine Wurzelichte in der Einheit  $[cm]/[cm^3]$ , also eine Wurzellängendichte. Es stellte sich heraus, daß die dazu erforderlichen und sehr aufwendigen Feldmessungen von unserer Arbeitsgruppe zeitlich und personell nicht zu bewältigen waren. Es wurden daher beispielhaft die Feinwurzel-Massendichten ( $[g]/[cm^3]$ ) von nur einem Baumindividuum gemessen, die stichprobenartig durch Längendichten ergänzt wurden. Der Zusammenhang zwischen beiden Parametern konnte allerdings nicht mit der erforderlichen Genauigkeit hergestellt werden, so daß zusätzlich auf Erfahrungswerte aus der Literatur (s. Hertel 1999) zurückgegriffen werden mußte.

Das Modell silVlow abstrahiert den Bodenraum in sehr starkem Maße. Das Modell sieht den Bodenraum zweidimensional in einer X- und in einer Z-Richtung, wobei die Z-Richtung die Tiefe des Bodenraumes darstellt. Dadurch wird eine Richtung der Ebene abstrahiert. Es ist daher nicht möglich, die Wurzelarchitektur im Bodenraum abzubilden, um funktionale Wechselwirkungen zwischen der Architektur und dem Bodenraum zu untersuchen. Es wäre daher interessant, die Beziehungen zwischen Bodenraum und Wurzelarchitektur anhand eines "echten" 3D-Modelles abbilden zu können, wie es z.B. Clausnitzer & Hopmans (1994) in einem ersten Ansatz versucht haben.

### 3.2.8 Vergleich von HYDRA mit anderen Wasserflußmodellen

Ursprünglich war geplant, HYDRA mit dem Wasserflußmodell HYDRO von J. Dauzat (CIRAD, Montpellier) zu vergleichen. Dieses Modell realisiert gegenüber HYDRA einige Vereinfachungen bei der mathematischen Umsetzung der Richards-Gleichung für den axialen Wasserfluß und simuliert im Gegensatz zu HYDRA nur *steady-state*-Situationen.

Außerdem wird in HYDRO der Anteil der absorbierten Strahlungsenergie mit einem *turtle model* (MIR, zum Prinzip siehe Den Dulk 1989) und die Transpiration der Blätter mit Hilfe eines Energiebilanzmodells (Dauzat & Rapidel 1998) berechnet.

HYDRO wurde bisher schwerpunktmäßig an der Kaffeepflanze (*Coffea arabica*) getestet (Rapidel 1995). Leider haben sich bei der Parametrisierung von HYDRO für die Traubeneiche (siehe Projekt "Kopplung von Struktur- und Prozeßmodellen") Schwierigkeiten ergeben.

Diese sind dafür verantwortlich, daß einige Ausgabeparameter von HYDRO keine realistische Größenordnungen aufweisen. Diese Probleme waren zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichtes noch nicht gelöst. Aus diesem Grund ist ein Vergleich von HYDRA mit HYDRO-Simulationsergebnissen vorerst nicht möglich.

### 3.2.9 Weiterentwicklung der Simulationswerkzeuge (GROGRA, DISC und HYDRA)

Die bisher nur für Koniferen mit einer vereinfachten Behandlung der Beblätterung konzipierte Datenschnittstelle zwischen der Pflanzenarchitektur-Software GROGRA und dem Baumwasserfluß-Simulator HYDRA (via Diskretisierungs-Werkzeug DISC) mußte für die Verarbeitung von Laubbaum-Informationen erweitert werden. Dieses betraf Datenstrukturen, Dateiformate, Visualisierung, Analyse-Algorithmen und Ausgaberroutinen in GROGRA und die Datenstrukturen und Eingabe-/Ausgaberroutinen von DISC.

Das *dtd*-Format (*digital tree data*, Kurth 1994, 1999) zum Einlesen kartierter Pflanzen in GROGRA wurde um Direktiven zur Spezifikation blattbezogener Information ergänzt (**\leafarea**, **\leafobject**, **\fruitobject**, **\min\_intn**, **\phyllotaxy**<sup>1</sup>).

Über die **\leafobject**-Direktive können nun L-System-generierte Substrukturen zur Visualisierung von Blättern in die Repräsentation kartierter Bäume eingebunden werden. Zur Verwaltung artspezifischer Parameter wurden plattformunabhängige Datenstrukturen und Funktionen bzw. Klassen (in C und C++) entwickelt und ein gemeinsames Dateiformat für die Software-Systeme GROGRA (Kurth 1994), HYDRA (Früh 1995) und NEXUS (Anzola 2002) vereinbart. Dadurch ist nunmehr für jede Baumart eine Datei erforderlich, die von allen genannten Software-Werkzeugen gelesen werden kann. GROGRA wurde darüber hinaus mit zusätzlichen Ausgabeschnittstellen (MTG, PovRay, DXF) zur besseren Verwertbarkeit und Vergleichbarkeit von Ergebnissen versehen.

Die Berücksichtigung der Blattstiele und -spreiten mit je unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften erforderte die Erweiterung der internen Datenstrukturen von GROGRA, DISC und HYDRA und die Modifikation von Analyse-Algorithmen in GROGRA. Ferner wurde GROGRA durch einige neue Optionen ergänzt (Visualisierung horizontaler Schichten, topologische Analyse von Pflanzenarchitekturen, Analyse des *diameter exponent* nach Mandelbrot (1991), neue *turtle*-Kommandos für die L-System-Verarbeitung).

Bisher hatten DISC und HYDRA implizit eine strikt plagiotope Ausrichtung der Achsen höherer Ordnung angenommen, was für Koniferen als eine vertretbare Annäherung an die Realität erschien. In Laubbäumen sind dagegen schräge und orthotrope Seitenachsen häufig; somit mußten die internen Datenstrukturen um segmentbezogene Höheninformationen ergänzt werden. Bei der algorithmischen Bestimmung der segmentbezogenen axialen hydraulischen Leitfähigkeiten mußte neu zwischen holzigen Achsen, Blattstielen bzw. Blattspreiten differenziert werden (s.o.).

---

<sup>1</sup> Eine Dokumentation dieser und anderer GROGRA-Erweiterungen ist im Internet unter [http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/grogra\\_readme.html](http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/grogra_readme.html) verfügbar.

### 3.3 Datenmaterial und Methodik

#### 3.3.1 Empirische Feldmessungen

##### 3.3.1.1 Strukturkartierung

Von 7 Jungeichen (im folgenden als *ejc*, *ejd*, *ejf*, *ejg*, *ejh*, *ejj* und *ejk* bezeichnet) wurde das gesamte oberirdische, verzweigte Achsensystem mit hohem Aufwand manuell kartiert (zur Methode vgl. Kurth & Anzola 1997). Erfasst wurden die Triebbildungsarten (regulärer Austrieb, Syllepsis, Johannistriebe), die Längen der Wachstumseinheiten und ihre Positionen an den tragenden Einheiten, Verzweigungswinkel, Durchmesser sowie an Teilproben und an zusätzlichen, gesonderten Exemplaren auch versorgte Blattflächen und die Blatt-Trockenmassen. Diese Kartierungsarbeiten wurden (mit Ausnahme der Stichproben mit Blattflächen- und Blattmassenbestimmung) nichtdestruktiv ausgeführt, um an den Objekten später weitere Untersuchungen (Saftfluß-, Porometermessungen etc.) vornehmen zu können (s.u.).

Die Kronenarchitekturen der kartierten Bäume wurden im *dtd*-Format (*digital tree data*, Kurth 1994, 1999) im Computer rekonstruiert. Auf dieser Grundlage wurden extrapolativ Kronenkarten (*map files*) erstellt, die mit der Diskretisierungssoftware DISC (Früh 1995) aufbereitet wurden und als *input* für HYDRA dienen.

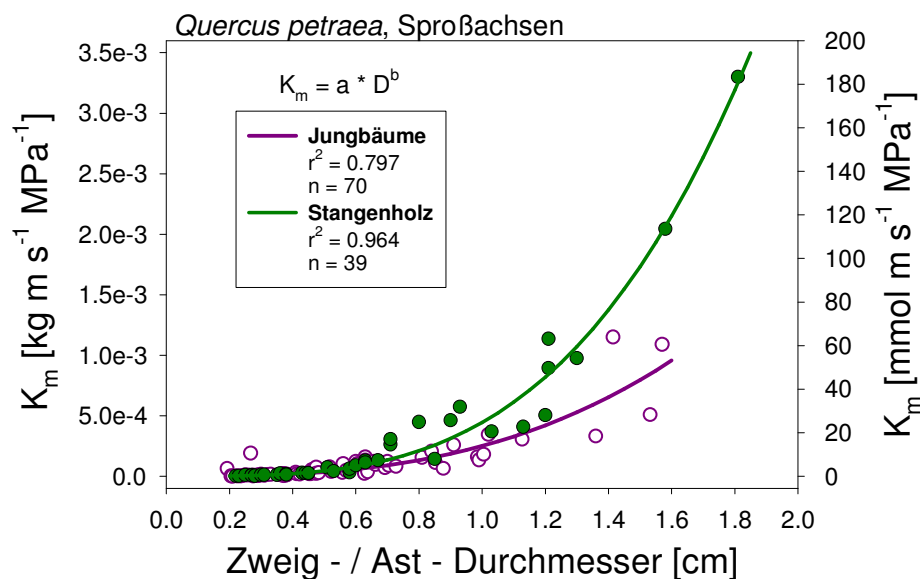
##### 3.3.1.2 Bestimmung der axialen hydraulischen Leitfähigkeit

Zwischen der längennormierten hydraulischen Leitfähigkeit ( $K_m$ ) und dem Durchmesser ( $D$ ) eines Achsenelementes gelten gesetzmäßige Beziehungen der Art

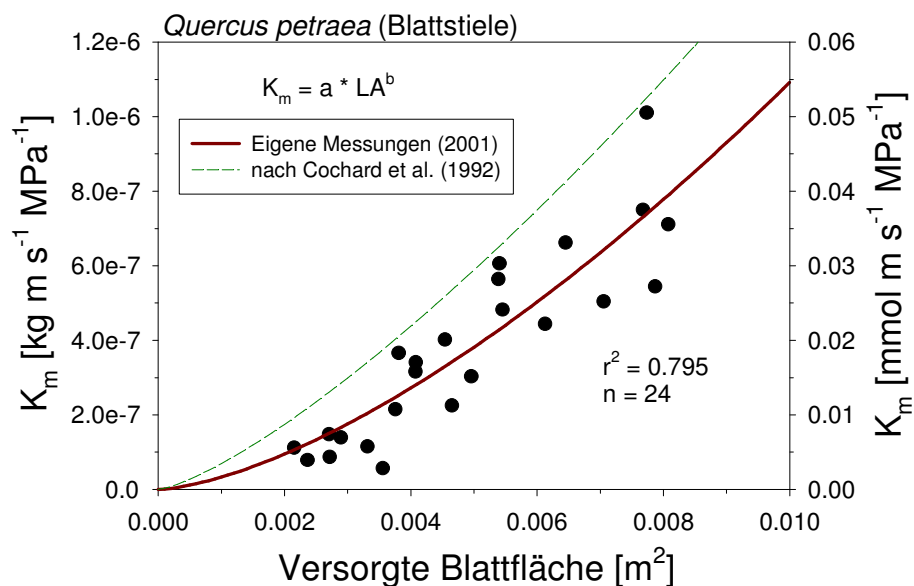
$$(1) K_m(D) = a \cdot D^b \text{ [kg m s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}\text{]}, \text{ mit } b > 2$$

(Tyree et al. 1983, Cochard 1992). In HYDRA werden diese Beziehungen zur Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften unterschiedlicher Achsenelemente verwendet (Abb. 2, Tab. 1).

Die axiale hydraulische Leitfähigkeit ( $K_m$ ) der Zweig-, Ast- und Stammsegmente wurde für unterschiedliche Durchmesserklassen mit der *gravity-flow*-Methode nach Dixon (1914) ermittelt, die bei Sperry et al. (1988) und Früh (1995) im Detail beschrieben ist.



**Abb. 2:** Hydraulische Leitfähigkeit von Zweigproben für Jungbäume und Stangenholz von *Quercus petraea* in Abhängigkeit vom Durchmesser. Parameterwerte (a, b) siehe Tab. 1.



**Abb. 3:** Hydraulische Leitfähigkeit von Blattstielen in Abhängigkeit von der versorgten Blattfläche. Zum Vergleich sind Meßwerte von Cochard et al. (1992) dargestellt (gestrichelte Linie). Die unterschiedlichen Skalierungen der y-Achsen beruhen auf unterschiedlichen Einheiten der hydraulischen Leitfähigkeit. Parameterwerte (a, b) siehe Tab. 1.

Für die Blattstiele wurde ein abgewandelter Ansatz nach Cochard et al. (1992) gewählt: die hydraulische Leitfähigkeit dieser Strukturelemente hängt nach der Beziehung

$$(2) K_m(LA) = a \cdot LA^b \text{ [kg m s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}]$$

ausschließlich von der Größe der versorgten Blattfläche (LA) ab (s. Abb. 3, Tab. 1).

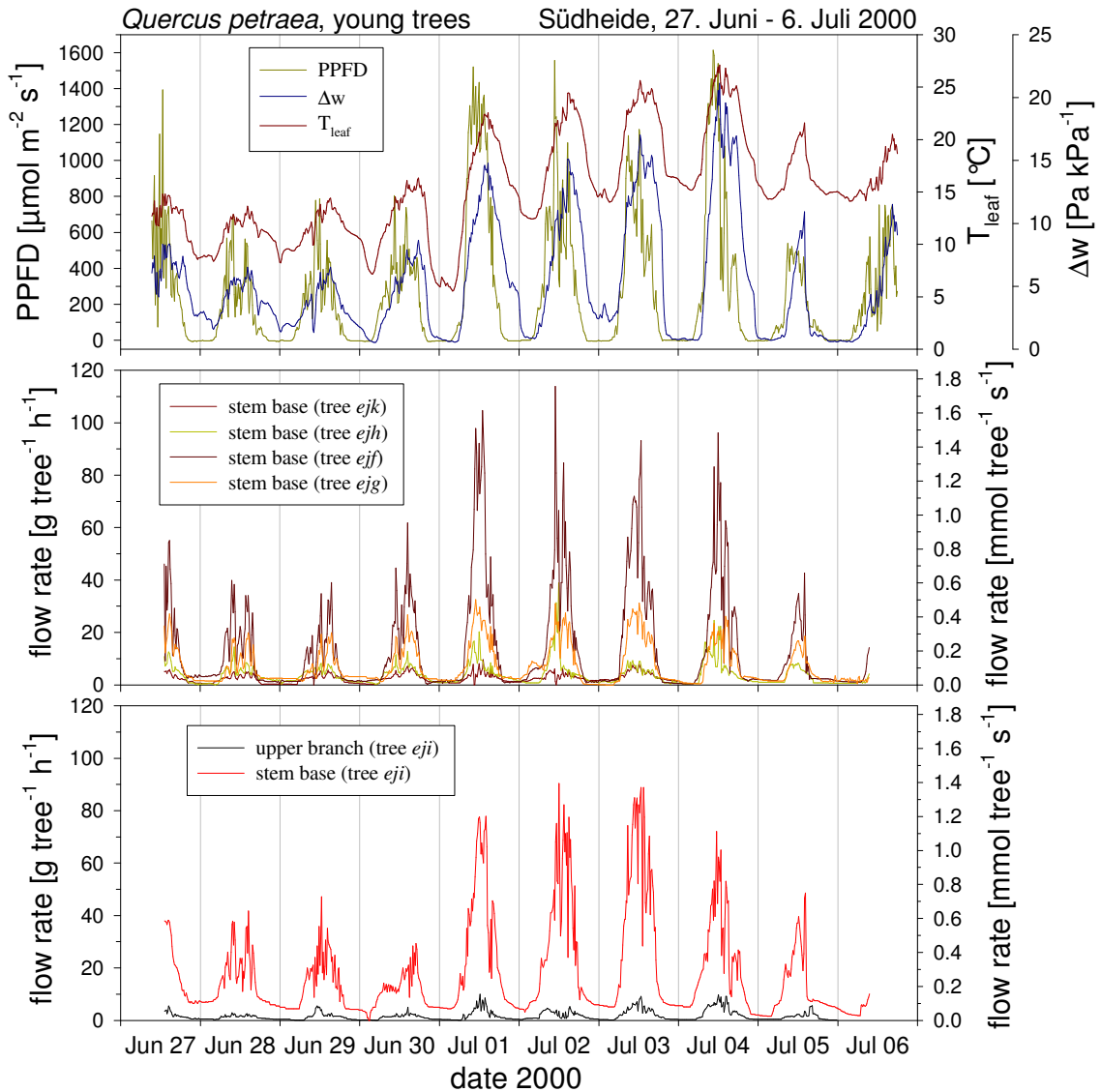
**Tab. 1:** Parameterwerte wichtiger Teilmodelle von HYDRA.  $K_m$  = hydraulische Leitfähigkeit,  $D$  = Sproßdurchmesser [cm],  $LA$  = versorgte Blattfläche [ $m^2$ ],  $RLC$  = relative loss of conductivity (cavitation function),  $P$  = Druckkomponente des Xylem-Wasserpotentials [MPa]. Details s. Text.

Funktionsgleichung	Parameter	Wert	Bezug
<i>Q. petraea</i> , Jungbäume, eigene Messungen (2000) $K_m = f(D) = a \cdot D^b \text{ [kg m s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}]$	a b	2.502984E-04 2.852992	Abb. 2
<i>Q. petraea</i> , Stangenholz, eigene Messungen (2001) $K_m = f(D) = a \cdot D^b \text{ [kg m s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}]$	a b	4.449450E-04 3.352376	Abb. 2
<i>Q. petraea</i> , Jungbäume, eigene Messungen (2001) $K_m = f(LA) = a \cdot LA^b \text{ [kg m s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}]$	a b	1.179406E-03 1.516830	Abb. 3
<i>Q. petraea</i> , Jungbäume, n. Cochard et al. (1992) $K_m = f(LA) = a \cdot LA^b \text{ [kg m s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}]$	a b	0.663716E-03 1.326412	Abb. 3
<i>Q. petraea</i> , Sproßachsen, n. Breda et al. (1993) $RLC = f(P) = 1 / (1 + \exp(a \cdot (P - P_{v50})))$	a b	1.722958 -3.491819	Abb. 14
<i>Q. petraea</i> , Blattstiele, n. Cochard et al. (1992) $RLC = f(P) = 1 / (1 + \exp(a \cdot (P - P_{v50})))$	a b	2.896489 -3.276055	Abb. 14
<i>Q. petraea</i> , Kapazitäten (siehe Früh 1995)			
Blätter [ $kg m^{-2} MPa^{-1}$ ]	$C_{leaf}$	0.10	---
Sproßachsen [ $kg dm^{-3} MPa^{-1}$ ]	$C_{wood}$	0.05	

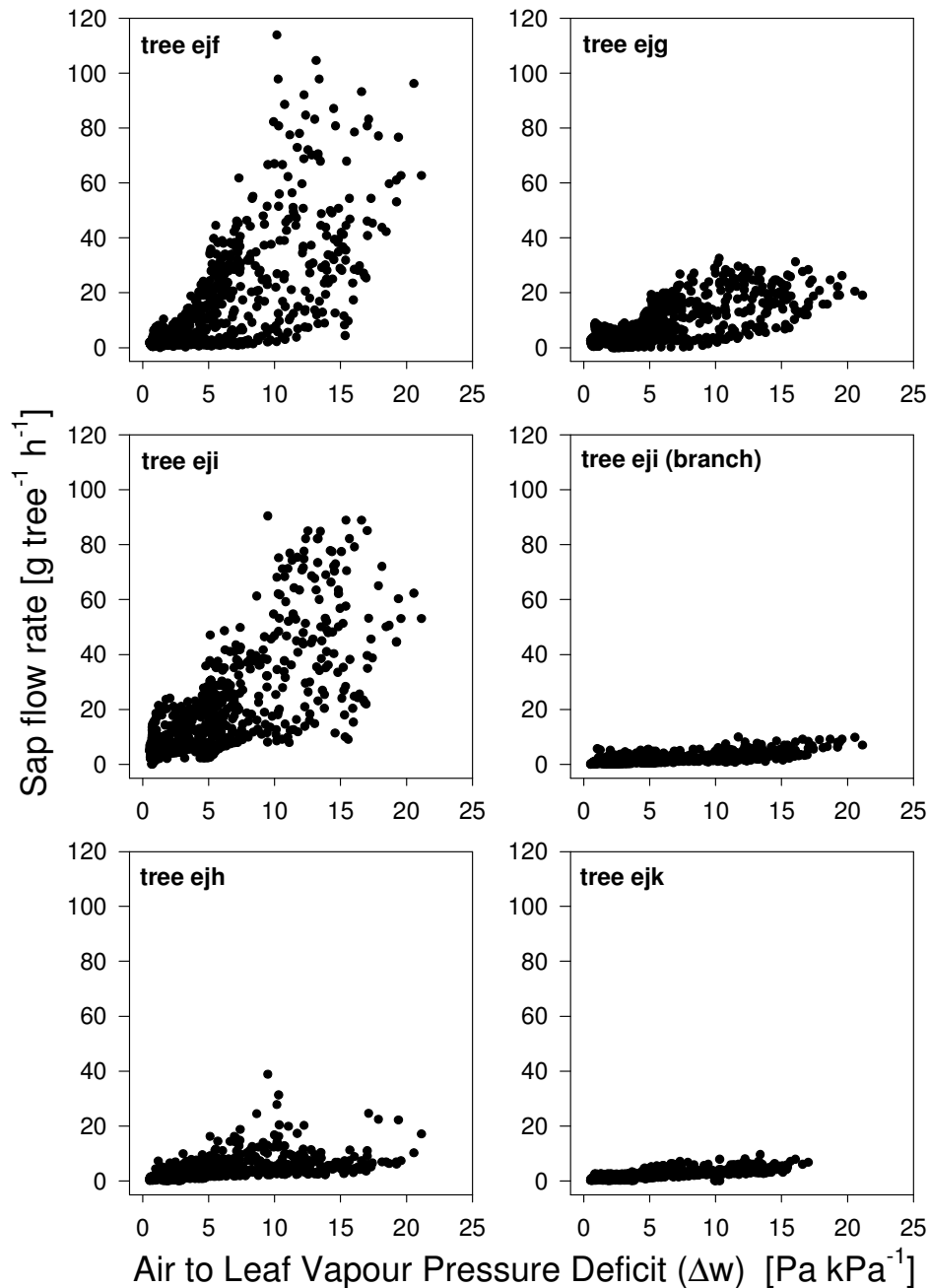
### 3.3.1.3 Messungen des Xylemsaftflusses

Im Rahmen einer etwa zweiwöchigen Meßkampagne vom 26. Juni bis zum 7. Juli 2000 wurden auf den Versuchsflächen in der Lüneburger Heide - in Zusammenarbeit mit Prof. Jan Cermák von der Universität Brno (Tschechische Republik) und Dr. Heinz Coners vom Göttinger Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften - umfangreiche Messungen zum Xylemsaftfluß von Jung- und Stangenholzeichen durchgeführt.

Die Saftflüsse durch den Stammfuß (also durch den „Flaschenhals“ des hydraulischen Gesamtsystems) von insgesamt 5 Jungweiden (*ejf*, *ejk*, *ejh*, *eji*, *ejk*) wurden nach der *heat-balance*-Methode (Cermák et al. 1976) über einen 10-tägigen Zeitraum kontinuierlich in 15-min-Intervallen gemessen, wobei am Baum *eji* eine zusätzliche Ast-Meßstelle angebracht war (s. Abb. 4).



**Abb. 4:** Mikroklima (obere Graphik) und Saftfluß von fünf *Quercus-petraea*-Jungbäumen (*ejf*, *ejk*, *ejh*, *eji*, *ejk*) auf der Versuchsfläche in der Südheide bei Unterlüß. An einem sonnenexponierten Ast des Baumes *eji* war ein zweiter Saftflußsensor angebracht (*upper branch*, s. untere Graphik). Das Mikroklima wurde in einer Entfernung von ca. 400 m am Rande eines *Q. petraea*-Stangenholzbestandes gemessen. Weitere Erklärungen siehe Text.



**Abb. 5:** Abhängigkeit der Saftflußrate von der Wasserdampf-Partialdruckdifferenz zwischen Blatinnerem und umgebender Luft ( $\Delta w$ ). Zur Datenbasis siehe Abb. 4.

Die Abhängigkeit der Saftflußrate von der Wasserdampf-Partialdruckdifferenz zwischen Blatinnerem und umgebender Luft ( $\Delta w$ ) und der photosynthetisch wirksamen Photonenflußdichte (PPFD) zeigen Abb. 5 bzw. Abb. 6.

Für die Saftflußmessungen wurde ein Miniaturmeßsystem vom Typ T-693 der Fa. EMS (Brno, Tschechische Republik) verwendet, das bei Cermák et al. (1976) ausführlich beschrieben ist. Die Ergebnisse der Saftflußmessungen dienen insbesondere der Modellüberprüfung und -validierung.



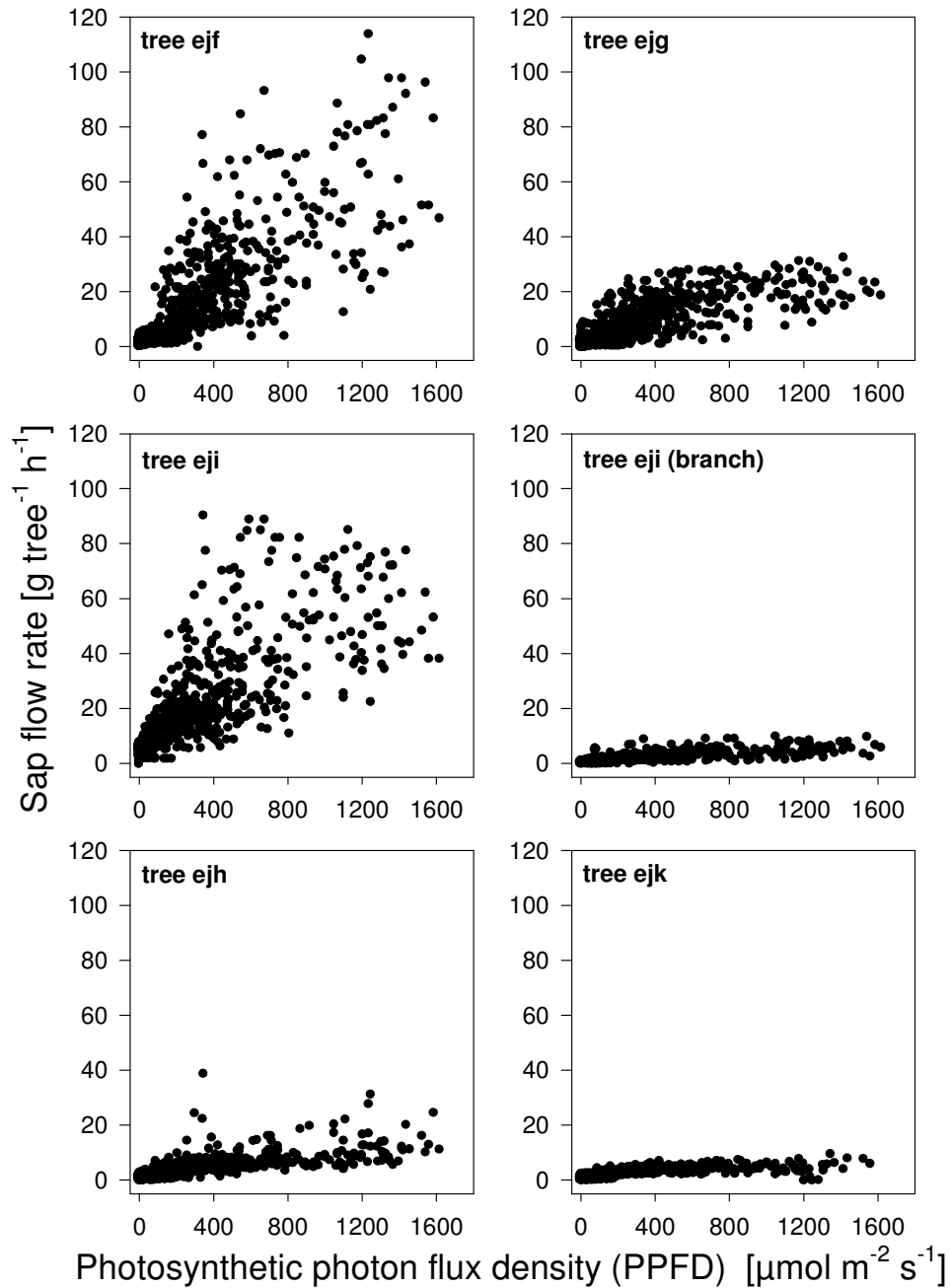


Abb. 6: Abhängigkeit der Saftflußrate von der photosynthetisch wirksamen Photonenflußdichte (PPFD). Zur Datenbasis siehe Abb. 4.

#### 3.3.1.4 Abschattungsversuche zur Ermittlung der Zeitkonstanten

Am 23. und 24. August 2000 wurden auf der Jungeichenfläche Abschattungsversuche durchgeführt. Damit sollte getestet werden, ob HYDRA die Zeitkonstante des Systems richtig wiedergibt, bzw. um diese mit Hilfe der hydraulischen Kapazitäten (s. FRÜH 1995) einzuzustieren. Dazu wurden einzelne, zuvor unbeschattete Bäume (*ejf*, *efg*, *eji*), die zuvor am Stammfuß mit einem Saftflußsensor (Typ s. oben) bestückt worden waren, rasch mit einem lichtundurchlässigen Zeltgerüst überdeckt. Die Zeitdauer der Abschattung erstreckte sich im Regelfall über 1 Stunde (siehe dazu die Zeitreihe am Beispiel des Baumes *ejg* in Abb. 7a).

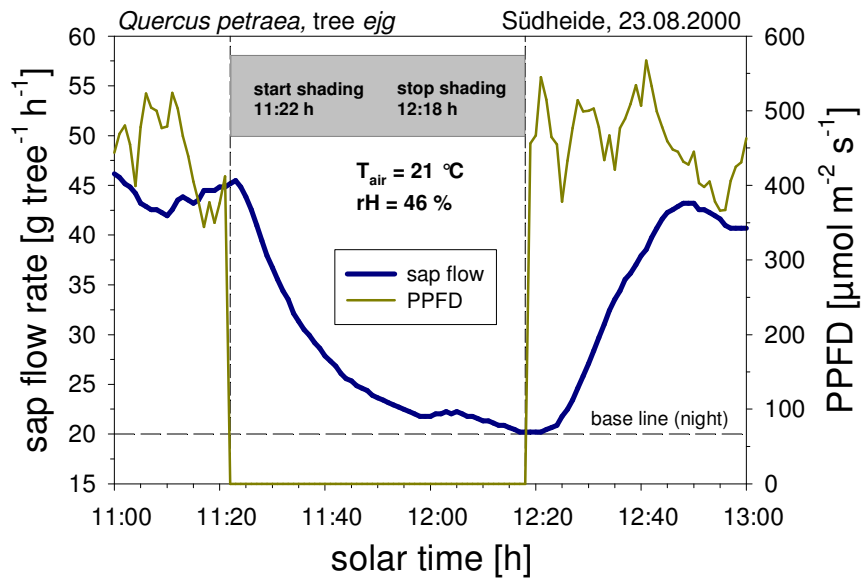


Abb. 7a: Abschattungsversuch zur Ermittlung der Zeitkonstanten, hier am Beispiel von *Quercus petraea*, Baum *eig*. Weitere Erklärungen siehe Text.

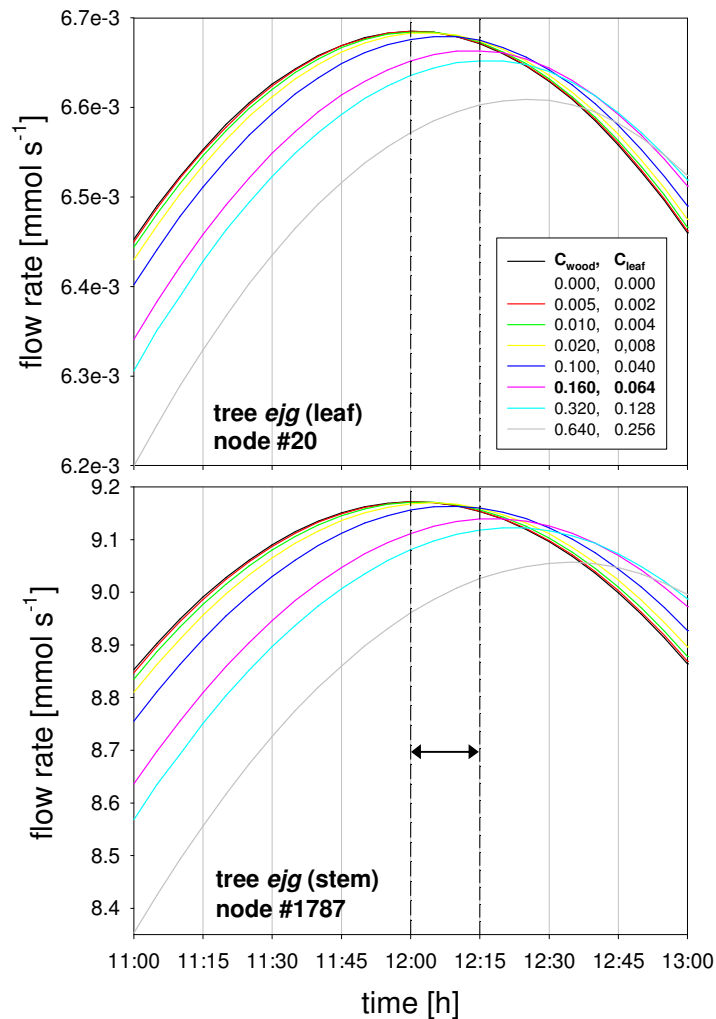
In der Regel wurde bei allen drei Bäumen die nächtliche Basislinie (s. gestrichelte Referenzlinie in Abb. 7a) des Saftflußsignals erreicht. Das ist eine notwendige Bedingung für das vollständige Erreichen eines neuen *steady-state*-Zustandes der Saftflußrate, der sich bei Dunkelheit einstellt (Cermák et al. 1976, Coners 2001). Die Speicherung der Saftflußdaten erfolgte im Minutentakt. Die Quantenflußdichte (PPFD) unter dem Zeltgerüst wurde zeitsynchron zur Saftflußrate vor, während und am Ende der Abschattung mit einem Quantum-Sensor (Li-Cor) gemessen.

Mit Hilfe der bei drei Bäumen bestimmten zeitlichen Verzögerungen der Xylemsaftflußreaktionen auf Verdunkelung bzw. Wiederbelichtung wurde eine durchschnittliche Verzögerungszeit von 15 Minuten berechnet.

#### *Einstellung der Zeitkonstanten in HYDRA mit Hilfe der hydraulischen Kapazitäten*

Durch eine zahlenmäßige Vergrößerung der Kapazitätskonstanten  $C_{\text{wood}}$  und  $C_{\text{leaf}}$  (Tab. 5, Kap. 3.3.2.2) erhöht sich die Reaktionszeit (Zeitkonstante) des Modellsystems auf Veränderungen der antreibenden Kräfte. Das ist gut zu begründen, wenn man sich die hydraulischen Kapazitäten in Holz und Blättern eines Baumes als mehr oder weniger wassergefüllte Räume vorstellt, die die Eigenschaft haben, allzu raschen Veränderungen im hydraulischen System - z.B. der Gradienten des Wasserpotentials, die den Wasserfluß antreiben - entgegenzuwirken. Es wird also stets eine gewisse Zeit benötigt, bis sich ein neues Gleichgewicht (*steady state*) des Wasserflusses eingestellt hat.

Unter der Zeitkonstante des Systems wird also die Zeitdauer verstanden, welche die Wasserflußrate im Xylem benötigt, um von einem alten zu einem neuen *steady-state*-Zustand zu gelangen. Um die ermittelte Zeitkonstante des Saftflusses von 15 Minuten in HYDRA einzustellen und zu simulieren, wurden mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Werten der hydraulischen Kapazitäten ( $C_{\text{wood}}$  und  $C_{\text{leaf}}$ ) gefahren, wobei die Werte - ausgehend von Null - von einem Lauf zum nächsten i.d.R. jeweils verdoppelt wurden (Abb. 7b). Als Ergebnis wurden hydraulische Kapazitäten für die verholzten Sproßachsen und die Blattspreiten von  $C_{\text{wood}} = 0.160 \text{ kg MPa}^{-1} \text{ dm}^{-3}$  bzw.  $C_{\text{leaf}} = 0.064 \text{ kg MPa}^{-1} \text{ m}^{-2}$  für Jungbäume von *Quercus petraea* ermittelt (Abb. 7b). HYDRA liest diese Werte aus der artspezifischen Datei (s. z.B. Tab. 5). Alle hier gezeigten Simulationsergebnisse (s. Kap. 3.4.3) basieren auf diesen hydraulischen Kapazitätswerten.



**Abb. 7b:** Einstellung der 15-min-Zeitkonstanten (s. Doppelpfeil) mit Hilfe der hydraulischen Kapazitäten  $C_{\text{wood}}$  und  $C_{\text{leaf}}$  am Beispiel eines Blatt- (oben) und eines Stammknotens (unten) des Baumes *ejg*. Weitere Erklärungen siehe Text.

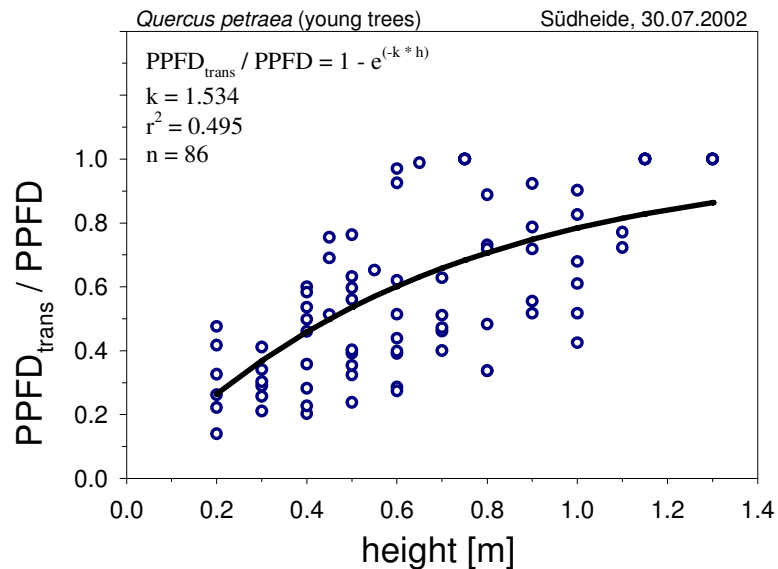
### 3.3.1.5 Erfassung des Mikroklimas

Zeitparallel zu den Saftflußmessungen wurden mit einer mobilen, batteriebetriebenen Wetterstation, die uns dankenswerterweise vom Institut für Bioklimatologie der Universität Göttingen bereitgestellt wurde, im 10-Sekunden-Takt die Freiland-Globalstrahlung, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte in 6 m Höhe über Grund gemessen und als 15-min-Mittelwerte abgespeichert. Die Meßstelle befand sich am Rande eines Stangenholzbestandes etwas oberhalb der Kronenoberfläche und in einer Horizontaldistanz (Luftlinie) von etwa 400 m zum Jungeichenbestand.

Die Meßdaten wurden später mit geeigneten Methoden in *PPFD* (*photosynthetic photon flux density*), (näherungsweise) in Blatt-Temperatur ( $T_{\text{leaf}}$ ) und (näherungsweise) in *ALVPD* (*air to leaf vapour pressure deficit*, im weiteren  $\Delta w$  genannt) umgerechnet. Als spezielle „Wetterdateien“ werden sie bei HYDRA in Form von Tagesgängen als Eingangsparameter für Simulationsläufe mit dem Blattleitfähigkeits-Modell verwendet (s. Tab. 5). Zur Zeit liegen von der Versuchsfläche in der Südheide 8 vollständige Tagesgänge des Mikroklimas vom 28. Juni 2000 bis zum 5. Juli 2000 zur Verwendung mit HYDRA vor (Abb. 4, oben). Diese Tagesgänge sind gemeinsam in einer Wetterszenarie-Datei (WEATHER\_FILE: <SH\_2000.dat>) abgespeichert.

### 3.3.1.6 Transmittierte Strahlung

Ende Juli 2002 wurden an drei Jungeichen die transmittierten Strahlungsflüsse (PPFD) in Abhängigkeit von der Höhe mit Hilfe eines Quantumsensors (Fa. Li-Cor, USA) bestimmt. Für jede einzelne Transmissionsmessung diente die PPFD über der Baumkrone als Referenz.



**Abb. 8:** Abhängigkeit des Strahlungsgenusses von der Höhenlage eines Blattes über Grund. PPFD ist die photosynthetisch wirksame Photonenflußdichte über der Baumkrone, PPFD<sub>trans</sub> ist transmittierte PPFD in einer bestimmten Höhe über Grundniveau (Für Details zur Methode, s. Schulte 1993).

In HYDRA wird die höhenabhängig transmittierte, photosynthetisch wirksame Photonenflußdichte (PPFD<sub>red</sub>) aus der PPFD über der Baumkrone mit Hilfe folgender Exponentialbeziehung berechnet (Details s. Schulte 1993):

$$(6) \text{PPFD}_{\text{trans}} = \text{PPFD} \cdot e^{(-k \cdot (h_{\text{tree}} - h_{\text{leaf}}))}$$

mit  $h_{\text{tree}}$  = maximale Baumhöhe [m],  $h_{\text{leaf}}$  = Insertionshöhe des Blattes [m]. Die Transmissionskonstante wurde iterativ zu  $k = 1.534$  ermittelt (s. Abb. 8). Aufgrund der stark inhomogenen Blattflächenverteilung in den Kronen, die für Jungbäume allerdings charakteristisch ist, streuen die Meßwerte sehr stark. Weil jedoch zum Meßzeitpunkt Ende Juli bei allen Bäumen Blattverluste durch Insektenfraß aufgetreten und die Kronen dadurch leicht aufgelichtet waren, wurde bei allen HYDRA-Simulationsläufen mit einem mittleren  $k$ -Wert von 2.0 gerechnet (Tab. 5).

Bestimmungen des relativen Lichtgenusses sind bei Jungbäumen naturgemäß schwierig, und die Werte streuen sehr stark (Abb. 8). Besser wäre es, den Anteil der absorbierten Strahlungsenergie eines jeden Einzelblattes mit einem *turtle model*, wie es in dem Wasserflußmodell HYDRO von J. Dauzat (CIRAD, Montpellier) realisiert ist, zu berechnen (zum Prinzip siehe Den Dulk 1989 und Anzola 2002). Die Ankoppelung eines solchen Strahlungsmodells an HYDRA war grundsätzlich auch vorgesehen, konnte aber aufgrund von Problemen bei der Parametrisierung von HYDRO nicht mehr realisiert werden (s. Kap. 3.2.8).

### 3.3.1.7 Transpirationsrate, Blattleitfähigkeit und Blattwasserpotential

Von wissenschaftlichen Hilfskräften wurden - kampagneweise - in unterschiedlichen Untersuchungsjahren (August 1998, August-September 1999, Juni-August 2000, Juli-August 2001, Juli 2002) stichprobenartige Messungen der Transpirationsrate ( $J_{H_2O}$ ) und Wasserdampfleitfähigkeit ( $g_{H_2O}$ ) von unterschiedlichen Blättern unter differenzierten Wetter- und Wasserstatusbedingungen durchgeführt. Dazu wurde ein *steady-state*-Porometer der Fa. Li-Cor, USA (Typ LI-1600) eingesetzt, das zeitgleich auch Mikroklimadaten (PPFD,  $T_{leaf}$ ,  $\Delta w$ ) aufzeichnet. An geeigneten Meßtagen (vorzugsweise unter Wasserstreßbedingungen) wurden parallel dazu Blattwasserpotentiale ( $\Psi_{leaf}$ ) nach der SCHOLANDER-Methode erfaßt (Abb. 12).

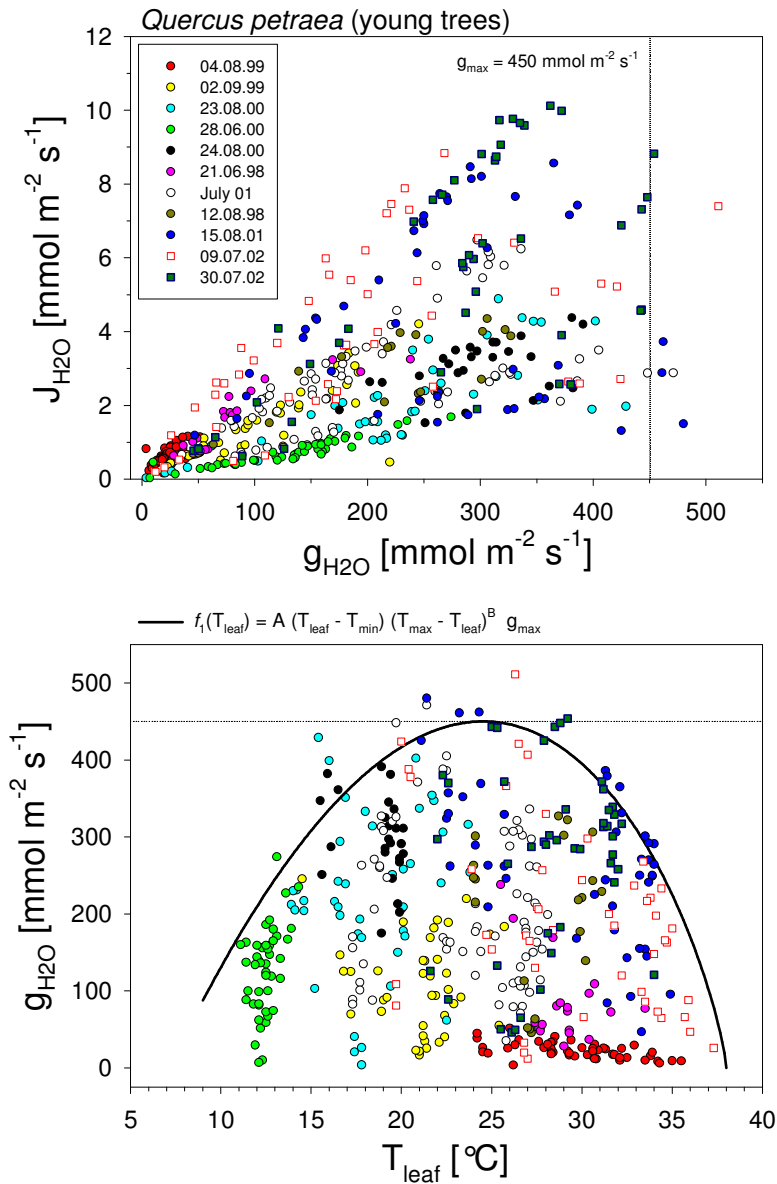
Die Ergebnisse dieser Messungen dienen insbesondere zur Parametrisierung des Blattleitfähigkeitsmodells (Kap. 3.3.1.8, Tab. 2), das nunmehr integraler Bestandteil von HYDRA ist (s. u.).

**Tab. 2:** Parameterwerte des Blattleitfähigkeits-Teilmodells (Details siehe Text)

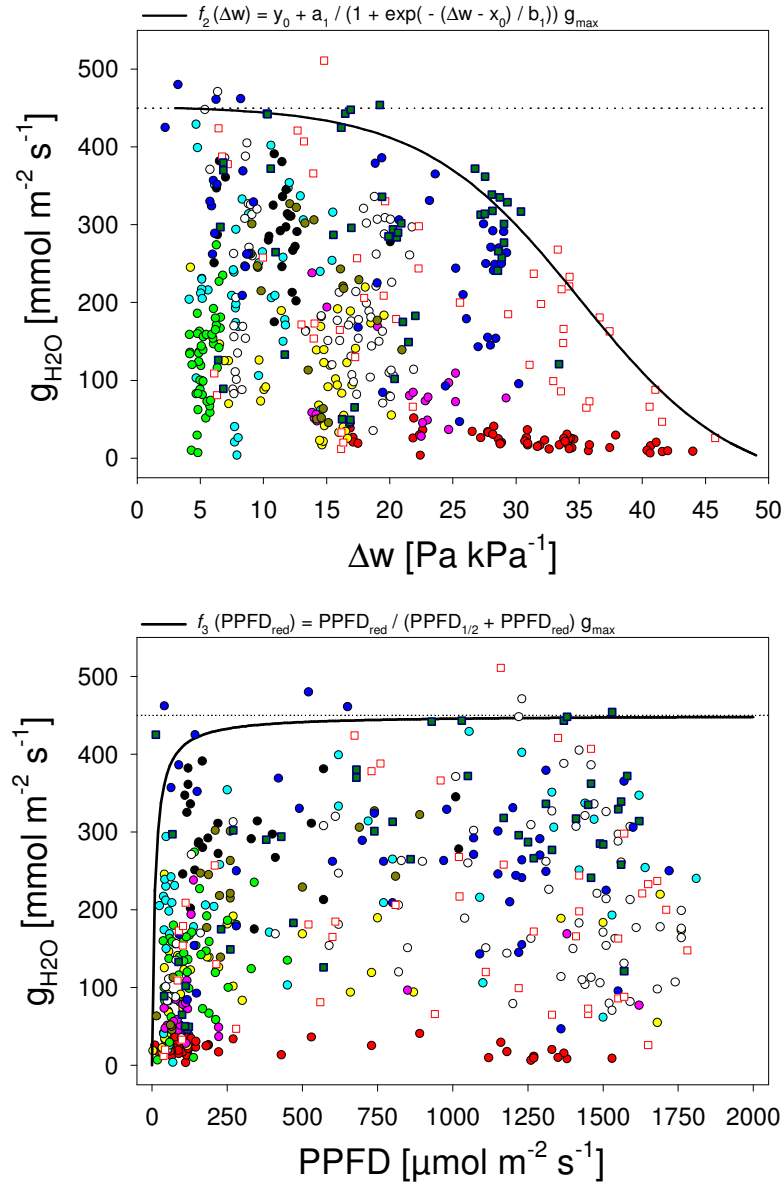
Funktionsgleichung	Parameter	Wert
<i>Gesamtfunktion</i>		
$g_{H_2O} = g_{max} \cdot f_1(T_{leaf}) \cdot f_2(\Delta w) \cdot f_3(PPFD_{trans}) \cdot f_4(\Psi_{leaf})$	$g_{max}$	450 mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
<i>Transpirationsrate (Transportgleichung)</i>		
$J_{H_2O} = g_{H_2O} \cdot \Delta w$	-	-
<i>Temperaturabhängigkeit (s. Abb. 9, unten)</i>		
$f_1(T_{leaf}) = A \cdot (T_{leaf} - T_{min}) \cdot (T_{max} - T_{leaf})^B$	A	7.661007E-03
	$T_{min}$	7.134348 °C
	$T_{max}$	38.000012 °C
	B	0.775014
<i>Luftfeuchteabhängigkeit (s. Abb. 10, oben)</i>		
$f_2(\Delta w) = y_0 + a_1 / (1 + e^{-(\Delta w - x_0) / b_1})$	$y_0$	-0.098728
	$a_1$	1.105138
	$x_0$	35.050478
	$b_1$	-6.235445
<i>Höhenabhängigkeit der Strahlung (s. Abb. 8)</i>		
$PPFD_{trans} = PPFD \cdot e^{(-k \cdot (h_{tree} - h_{leaf}))}$	k	2.0
<i>Strahlungsabhängigkeit (s. Abb. 10, unten)</i>		
$f_3(PPFD_{trans}) = PPFD_{trans} / (PPFD_{1/2} + PPFD_{trans})$	$PPFD_{1/2}$	10.025058 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
<i>Abhängigkeit vom Blattwasserpotential (s. Abb. 11)</i>		
$f_4(\Psi_{leaf}) = ((if \Psi_{leaf} \geq \Psi_{up} then f(\Psi_{leaf}) = 1)$	$g_{min}$	34 mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$else if (\Psi_{leaf} \leq \Psi_{down} then f(\Psi_{leaf}) = g_{min} / g_{max}))$	a	9.136858
$else f(\Psi_{leaf}) = a + b \cdot \Psi_{leaf}$	b	3.270674
	$\Psi_{up}$	-2.4878 MPa
	$\Psi_{down}$	-2.7706 MPa
<i>Tagesgänge des Blattwasserpotentials (s. Abb. 12)</i>		
$f(\text{time}) = a \cdot e^{(-0.5(\text{abs}(\text{time} - x_0) / b)^c)}$	<u>Datum</u>	<u>09.07.02</u> <u>31.07.02</u>
	a	-2.023932    -2.574910
	b	484.062275    411.217200
	c	3.664191    2.962638
	$x_0$	1192.076777    1217.443391

### 3.3.1.8 Parametrisierung des Blattleitfähigkeit-Teilmodells

Mit Hilfe der Porometerdaten zur Blattleitfähigkeit (s.o.) wurde ein *multiplicative model* nach der bei Jarvis (1976) beschriebenen Methode (*boundary line analysis*) parametrisiert (Tab. 2). Zweck ist, die Abhängigkeit der Blattleitfähigkeit ( $g_{H_2O}$ ) von der Strahlung (PPFD), der Blatt-Temperatur ( $T_{leaf}$ ), der Luftfeuchte ( $\Delta w$ ) und vom Blattwasserpotential ( $\Psi_{leaf}$ ) zu beschreiben (s. Rapidel 1995, Yang et al. 1998, Schäfer et al. 2000).



**Abb. 9, oben:** Abhängigkeit der zu verschiedenen Terminen feldgemessenen Transpirationsraten ( $J_{H_2O}$ ) von der Blatt-Leitfähigkeit ( $g_{H_2O}$ ), **unten:** Hüllkurve (*boundary line analysis*) zur Beschreibung der temperaturabhängigen Blatt-Leitfähigkeit (Parameterwerte s. Tab. 2). Die dünn gestrichelten Referenzlinien repräsentieren jeweils die maximale Blattleitfähigkeit  $g_{max}$  von  $450 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .



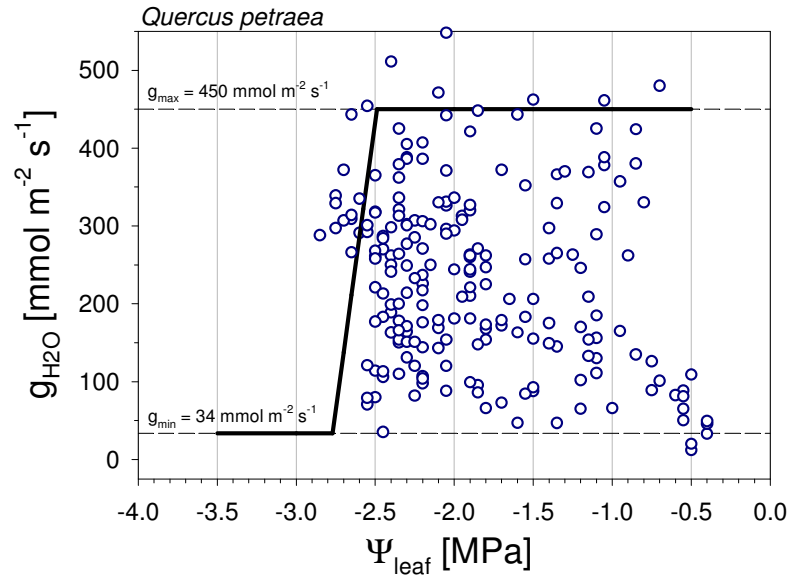
**Abb. 10, oben:** Hüllkurve (*boundary line analysis*) zur Beschreibung der Blatt-Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Wasserdampfpartialdruckdifferenz zwischen Blatinnerem und umgebender Luft ( $\Delta w$ ), **unten:** Hüllkurve zur Beschreibung der strahlungsabhängigen Blatt-Leitfähigkeit (Parameterwerte s. Tab. 2, Legende s. Abb. 9).

Dieses Modell hat die allgemeine Form:

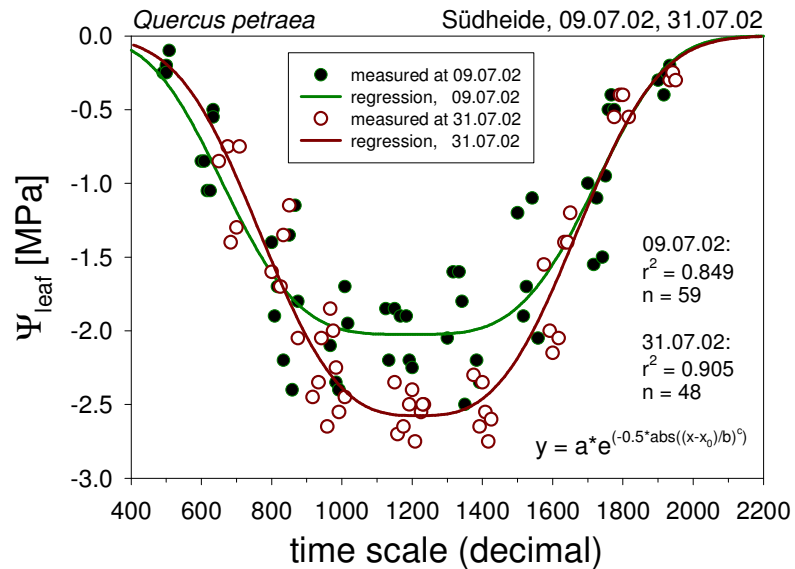
$$(7) \quad g_{H_2O} = f(g_{max}, f_1, f_2, f_3, f_4) = g_{max} \cdot f_1(T_{leaf}) \cdot f_2(\Delta w) \cdot f_3(\text{PPFD}_{trans}) \cdot f_4(\Psi_{leaf}),$$

mit  $g_{H_2O}$  = Blattleitfähigkeit für Wasserdampf [mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>],  $g_{max}$  = maximale Blattleitfähigkeit [mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>],  $\text{PPFD}_{trans}$  = transmittierte *photosynthetic photon flux density* [ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ],  $T_{leaf}$  = Blatt-Temperatur [°C],  $\Delta w$  = *air to leaf vapour pressure deficit* [Pa kPa<sup>-1</sup>],  $\Psi_{leaf}$  = Blattwasserpotential [MPa], wobei die Funktionswerte  $f_1 \dots f_4$  jeweils in der normierten Form (0 ... 1) zur Anwendung kommen (s. Abb. 9 - 11, Tab. 2).

Die Transpirationsrate ( $J_{H_2O}$ ) berechnet sich damit in Analogie zur allgemeinen Transportgleichung (Grace 1983, Willert et al. 1995) zu  $J_{H_2O} = g_{H_2O} \cdot \Delta w$  in  $[\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ .



**Abb. 11:** Hüllkurve (*boundary line analysis*) zur Beschreibung der Blattleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Blattwasserpotential. Regressionsgleichung und Parameterwerte siehe Tab. 2.



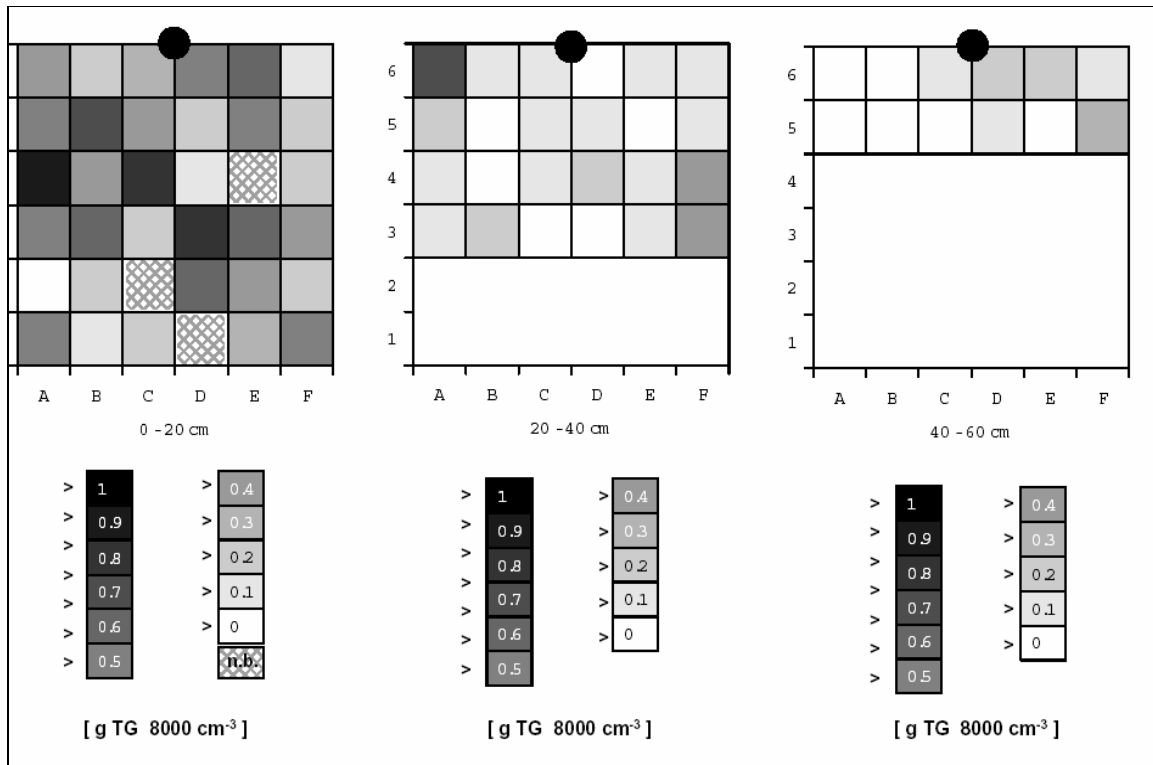
**Abb. 12:** Tagesgänge des Blattwasserpotentials von *Quercus petraea* an zwei ausgewählten Sommertagen (9. Juli und 31. Juli 2002). Die Kurve für den 31. Juli erreicht gegen Mittag knapp die Schwelle in Abb. 11, die vom 9. Juli dagegen erreicht sie nicht. Die Regressionen wurden mit einer modifizierten Funktion nach Gauß erstellt. Zu den Parameterwerten ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $x_0$ ) siehe Tab. 2.



### 3.3.1.9 Verteilung der Feinwurzellängendichte

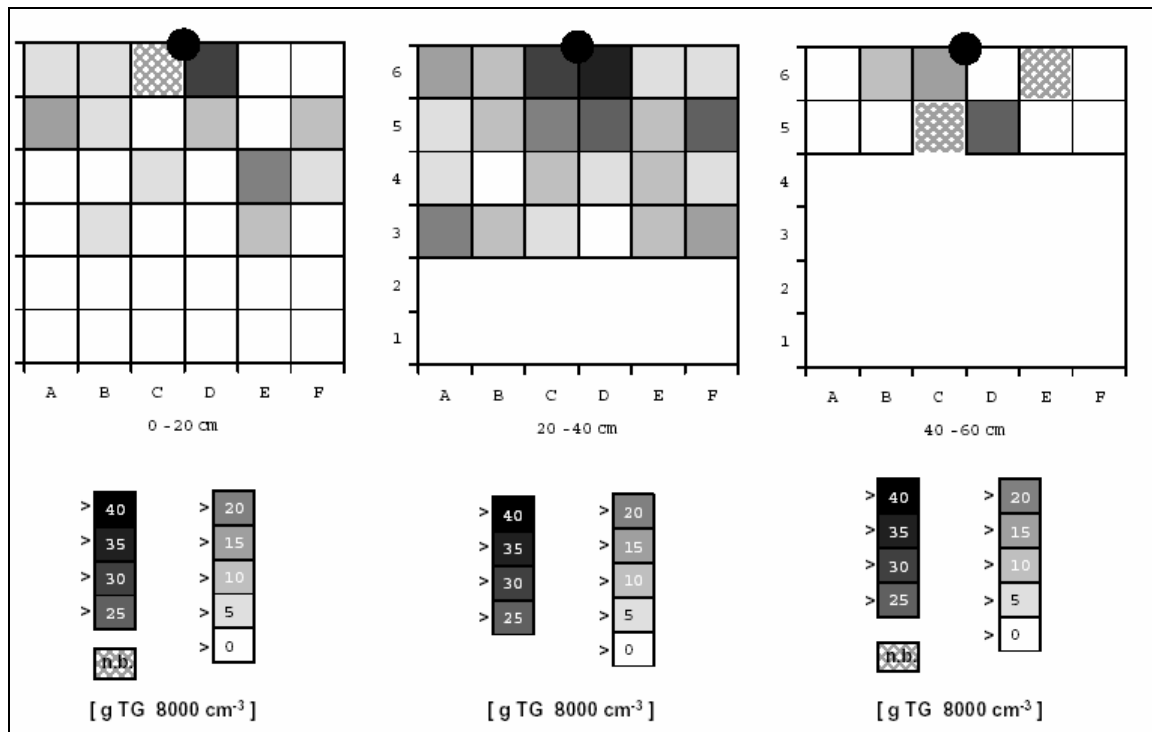
Das Modell, das der Kopplung zugrunde liegt (silVlow), erwartet als Eingangsparameter für die Repräsentation des Wurzelraumes eine diskrete Längendichteverteilung der Feinwurzeln (Durchmesser < 2 mm). Diese bildet die Grundlage für den Senkenterm in einem finiten Element des Bodenaumes. Ursprüngliches Ziel war es, die Feinwurzellängendichten von allen Bäumen - parallel zur Kartierung der oberirdischen Struktur, s. Kap. 3.3.1.1 - zu bestimmen. Diese Aufgabe war leider schon bei der Antragstellung zu diesem Projekt erheblich unterschätzt worden: Im Laufe der Arbeiten stellte sich heraus, daß es mit der herkömmlichen Methodik nicht möglich war, einen kompletten Datensatz für alle Wurzelräume der Probebäume zu erarbeiten. Der Zeitaufwand für die komplette Bestimmung der Längendichten (Feldernte, Auswaschung, Lebend-Tot- und Fein-Grob-Sortierung, Scannen der Wurzellängen) erwies sich - unerwartet - als so hoch, daß die personellen und apparativen Mitteln an unserem Institut dazu nicht ausreichten.

Um dieses Problem - zumindestens im Ansatz - zu lösen, wurden die Massendichteverteilungen nach einer vereinfachten Methode nur abgeschätzt, wodurch der Arbeitsaufwand - für das Ergebnis angemessen - verringert werden konnte. Dadurch konnte die Dichteverteilung nur exemplarisch am Wurzelsystem eines einzelnen Baumes - und hier auch nur zur Hälfte (Abb. 13 a, b) - untersucht werden. Die Massendichten sollten ursprünglich stichprobenartig durch Längendichten ersetzt werden. Mit einem geeigneten rechnerischen Zusammenhang zwischen beiden Parametern wären die restlichen Längendichten dann zu ermitteln gewesen. Dieser Ansatz war aber aus den oben beschriebenen Gründen nicht mehr umzusetzen.



**Abb. 13a:** Verteilung der Feinwurzel- ( $\odot < 2$  mm) Massendichten im Wurzelraum einer etwa 8-jährigen Traubeneiche. Es handelt sich um Werte aus drei verschiedenen Tiefenstufen (s. Teilgraphiken von links nach rechts). Die unterschiedlichen Graustufen repräsentieren die Trockenmassen pro 8000 cm<sup>-3</sup> Bodenaum, entsprechend den einzelnen Kuben von jeweils 20 cm Kantenlänge. Der schwarze Kreis in der oberen Mitte veranschaulicht jeweils die Position des Stammfußes.

Die Ergebnisse der Massendichtebestimmung für die Fein- und Grobwurzeln sind in Abb. 13a-b dargestellt. Es handelt sich dabei um die Massendichte pro ausgezähltem Kubus in Abhängigkeit von der Bodentiefe und vom Abstand zum Stammfuß einer ca. 8-jährigen Traubeneiche. Insgesamt umfaßt der Wurzelraum des Probebaumes eine Dimension von 108 Kuben. Davon entfallen jeweils sechs mal sechs Kuben auf die Horizontale und jeweils drei in die Vertikale. Die Dichte ist hier definiert als Trockenmassendichte an Wurzeln für jeden einzelnen Kubus ( $\text{g TG} \cdot 8000 \text{ cm}^{-3}$ ).



**Abb. 13b:** Verteilung der Grobwurzel- ( $\odot \geq 2 \text{ mm}$ ) Massendichten<sup>2</sup> im (Halb-) Wurzelraum einer etwa 8-jährigen Traubeneiche. Es handelt sich um Werte aus drei verschiedenen Tiefenstufen (s. Teilgraphiken von links nach rechts). Die unterschiedlichen Graustufen repräsentieren die Trockenmassen pro  $8000 \text{ cm}^{-3}$  Bodenraum, entsprechend den einzelnen Kuben von jeweils 20 cm Kantenlänge. Der schwarze Kreis in der oberen Mitte veranschaulicht jeweils die Position des Stammfußes.

Da silVlow als Eingangsparameter zwingend Feinwurzel-Längendichten vorsieht<sup>2</sup>, waren wir für die Umrechnung der Massendichten in Längendichten auf Literaturangaben angewiesen. Hertel (1999) hat in einer Untersuchung über die interspezifische Wurzelkonkurrenz bei der Buche auch spezifische Wurzeloberflächen in [ $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$  Trockenmasse (TM)] für Traubeneichen in der Lüneburger Heide bestimmt. Daraus haben wir die spezifischen Wurzellängen in [ $\text{cm g}^{-1}$  TM] abgeleitet. Mit den spezifischen Wurzellängen ließen sich dann aus den Massendichten die Längendichten für Feinwurzeln berechnen. Dieses ist streng genommen ein Kompromiß gegenüber der eigentlichen Planung, nach der die Längendichten direkt bestimmt werden sollten.

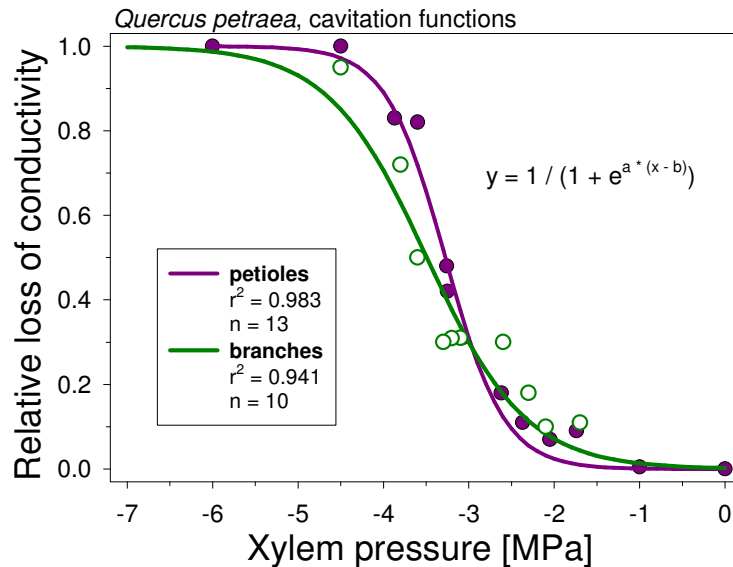
Zur Einbindung der Daten in das Bodenwassermodell silVlow ist anzumerken, daß die Längendichten in der Horizontalen gemittelt wurden. Die resultierenden Wasserpotentiale werden zusätzlich aufintegriert, so daß eine von der Größenordnung her angepaßte Parametrisierung durchaus angemessen ist.

<sup>2</sup> Die Grobwurzel-Massendichten sind hier nur ergänzend dargestellt und haben für das Bodenwasserfluß-Modell silVlow keine funktionelle Bedeutung. Nach neueren Erkenntnissen (s. z.B. Coners 2001) nehmen aber auch Grobwurzeln in geringem Maße Wasser auf. Dieser Aspekt konnte allerdings hier noch keine Berücksichtigung finden.

### 3.3.2 Datenerhebung aus anderen Quellen

#### 3.3.2.1 Verwundbarkeitskurven (*cavitation functions*)

Bei einer trockenstreibenden, fortschreitenden Abnahme des Wasserpotentials im Leitgewebe von Sproßachsen und Blattstielen kommt es zu einem progressiven Leitfähigkeitsverlust (Edwards & Jarvis 1982), der nur bedingt reversibel ist (Borghetti et al. 1991). Der Leitfähigkeitsverlust ist mit der Anwesenheit von Gasembolien im Leitgewebe korreliert (Zimmermann 1983). In HYDRA wird die bedingte Reversibilität modelltechnisch dadurch realisiert, indem es erst in der Nacht, wenn die Gefäße bis zum *predawn*-Zustand wiederaufgefüllt werden, zu einer vollständigen Wiederherstellung der ursprünglichen Leitfähigkeit kommt. Tagsüber erlittene Embolien bleiben also bis zum Ende des Simulationslaufes erhalten (Abb. 15 - 16) und senken die hydraulische Leitfähigkeit ggf. entsprechend der *cavitation function* ab. HYDRA bietet auch die Möglichkeit, über einen Schalter (*switch*) den Wasserfluß unter Ausschaltung von Kavitationen zu simulieren (s. Tab. 4).



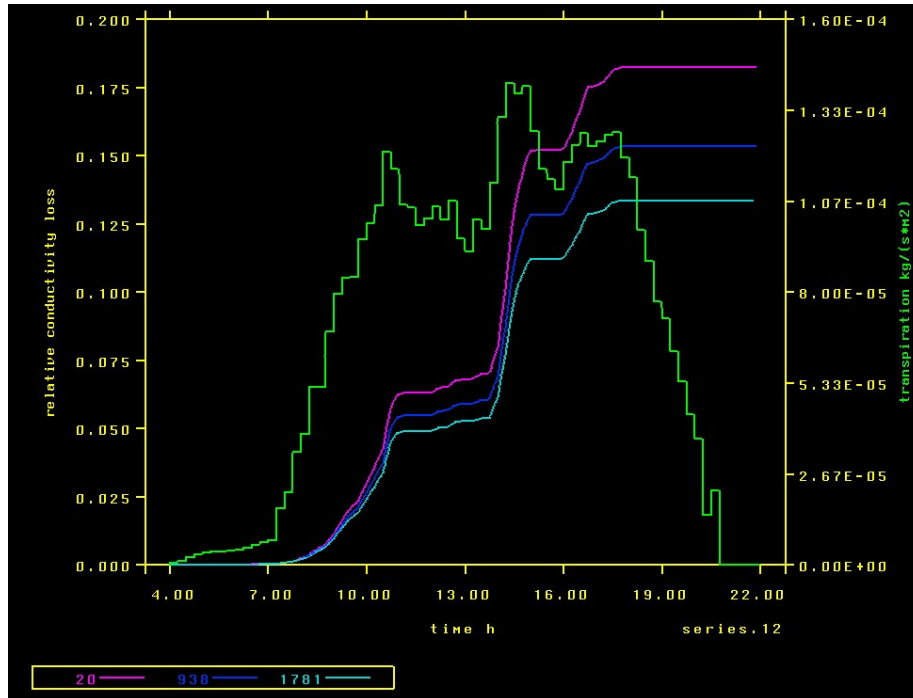
**Abb 14:** Verwundbarkeitskurven (*cavitation functions*) von Zweigen und Blattstielen für *Quercus petraea*, übernommen von Cochard et al. (1992) für Blattstiele, und von Breda et al. (1993) für Sproßachsen. Dargestellt sind die relativen hydraulischen Leitfähigkeitsverluste in Abhängigkeit von der Druckkomponente des Xylem-Wasserpotentials (weitere Erklärungen siehe Text). Parameterwerte (a, b) siehe Tab. 1.

Der relative Leitfähigkeitsverlust im Xylem wird durch eine sigmoide Exponentialfunktion (Abb. 14) beschrieben:

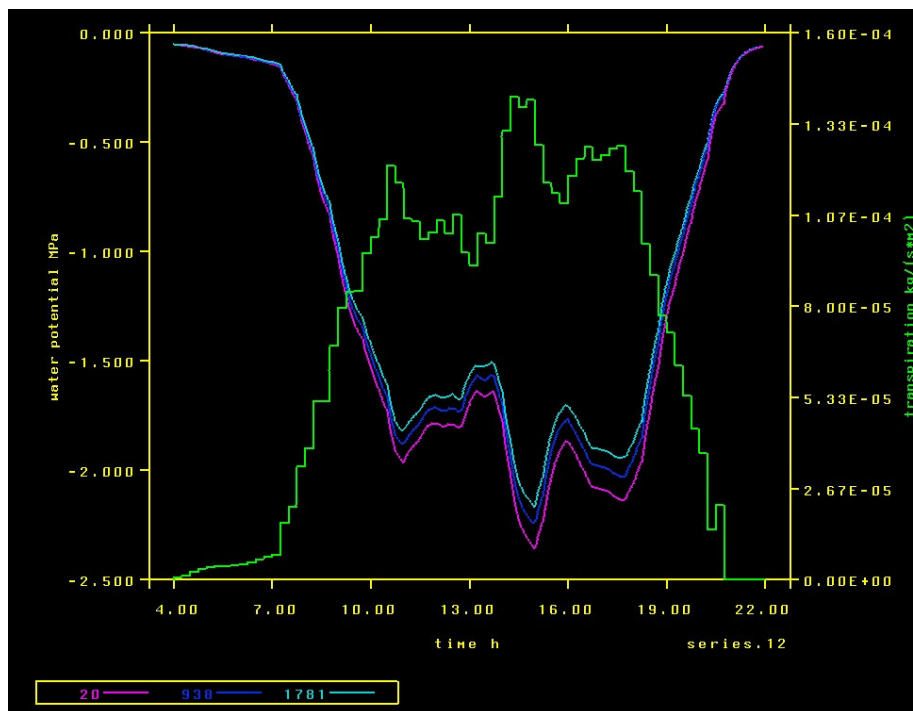
$$(8) \quad f(x) = 1 / (1 + e^{a \cdot (x-b)}) \quad \text{oder} \quad f(P) = 1 / (1 + e^{a \cdot (P - P_{v50})})$$

mit P = Druckkomponente des Xylem-Wasserpotentials aus ( $\Psi_{\text{Xylem}} = P + \rho_{\text{H}_2\text{O}} g z (-\pi) (-\tau)$ ) in [MPa], b = Konstante,  $P_{v50}$  = Konstante, die den Xylemdruck bei 50% Leitfähigkeitsverlust angibt,  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  = Dichte von Wasser [ $\text{kg m}^{-3}$ ], g = Schwerebeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ], z = Höhe über Referenzniveau [m]. Matrix- ( $-\tau$ ) und osmotisches ( $-\pi$ ) Potential werden bei der Simulation mit HYDRA vernachlässigt (s. Früh 1995, Früh & Kurth 1999).

Für *Quercus petraea* wurden die *vulnerability curves* den Arbeiten von Cochard et al. (1992) für Blattstiele von zwei- bis vierjährigen Zweigen, bzw. von Breda et al. (1993) für ca. einjährige Sproßachsen, übernommen (s. Abb. 14, Tab. 1).



**Abb. 15:** Beispiel für eine Original HYDRA-Graphik zur Darstellung des simulierten, relativen Leitfähigkeitsverlustes gemäß Abb. 14 von ausgewählten Blattknoten des Baumes *ejg* im Verlauf eines Tages. Knoten Nr. 20 (magenta) repräsentiert ein Blatt an der Kronenoberfläche, Knoten Nr. 938 (blau) ein Blatt in der Kronenmitte und Knoten Nr. 1781 (cyan) ein Blatt an der Kronenbasis. Die grün abgestufte Kurve zeigt die Transpirationsrate.



**Abb. 16:** Original HYDRA-Graphik zur Darstellung des simulierten Wasserpotentials von ausgewählten Blattknoten des Baumes *ejg* im Verlauf eines Tages. Legende s. Abb. 15.

### 3.3.2.2 Hydraulische Kapazitäten

Unter der hydraulischen Kapazität ( $C_{\text{wood}}$  oder  $C_{\text{leaf}}$ ) versteht man die Fähigkeit von Pflanzenorganen, Wasser bei isothermischen Veränderungen des Wasserpotentials zu speichern oder abzugeben (Tyree & Yang 1990). Sie läßt sich bestimmen, indem bei progressiver Austrocknung gleichzeitig Wassergehalt bzw. dessen Defizit und Wasserpotential gemessen und gegeneinander aufgetragen werden (Abb. 17)

$$(9) C_{\text{Xylem}}(P) = \delta\theta / \delta\Psi \quad \text{mit } P = \Psi_{\text{Xylem}} - \rho_{\text{H}_2\text{O}} g z \quad \text{bei } T_{\text{Xylem}} = \text{const.} \quad [\text{kg m}^{-3} \text{MPa}^{-1}]$$

Die Kapazitäten der Segmenthälften werden aus den Komponenten  $C_{\text{wood}}$  und  $C_{\text{leaf}}$  (Tab. 1) additiv zusammengesetzt.  $C_{\text{wood}}$  gehört zu der Sproßachse selbst, und die Komponente  $C_{\text{leaf}}$  rührt von der dem Segment zugeordneten Blattfläche her (Früh 1995).

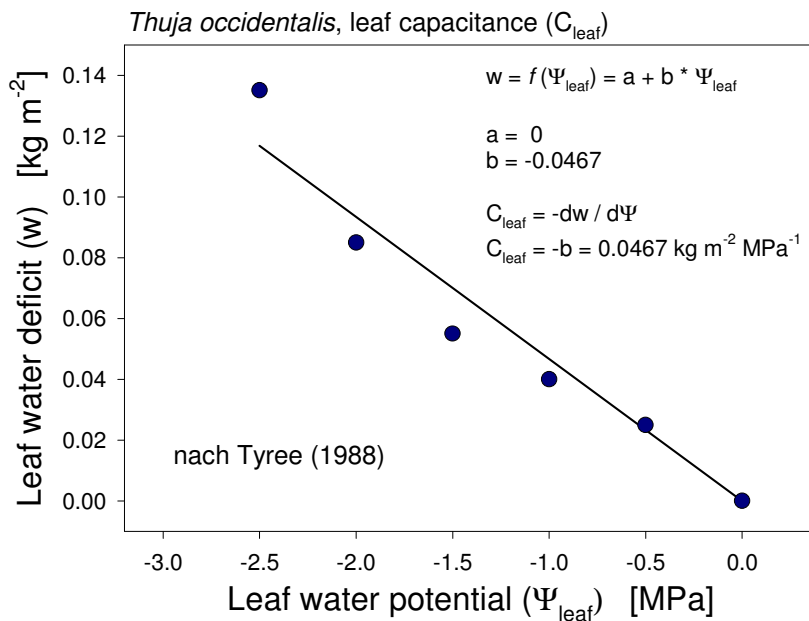
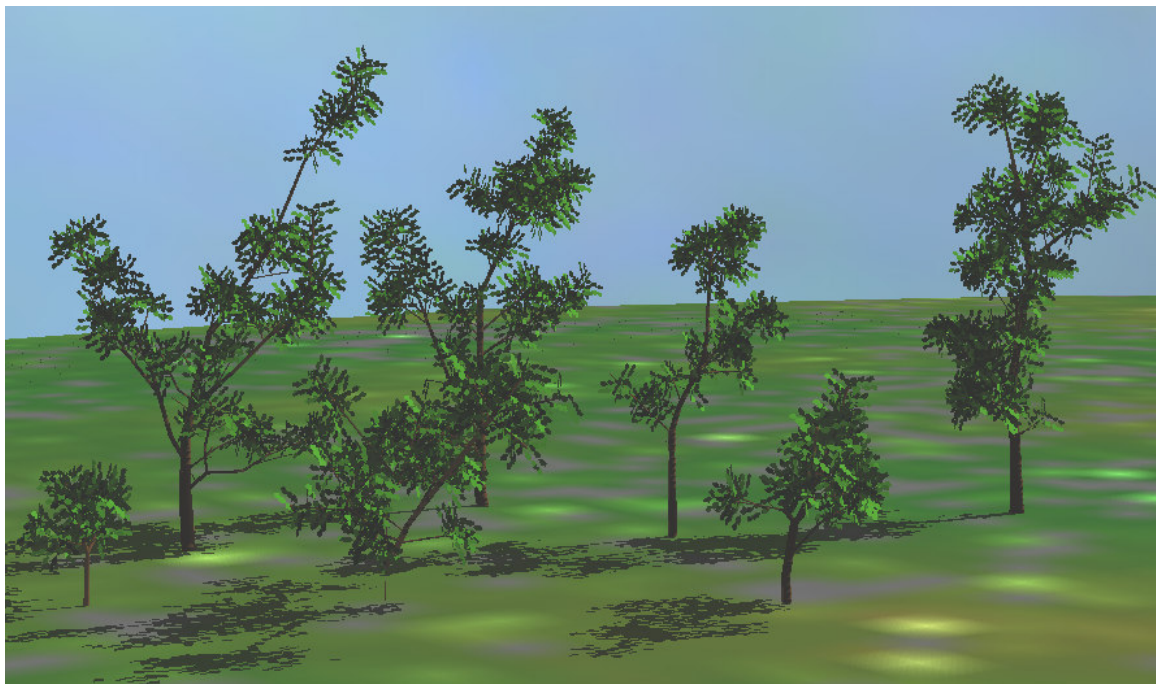


Abb. 17: Zum Prinzip der Kapazitätsbestimmung, hier am Beispiel der Blätter von Thuja occidentalis (nach TYREE 1988, verändert). Weitere Erklärungen s. Text.

$C_{\text{leaf}}$  und  $C_{\text{wood}}$  wurden in erster Näherung von Tyree (1988) für Thuja occidentalis übernommen, da für Quercus petraea keine Kapazitätsmessungen bekannt sind.

$C_{\text{wood}}$  und  $C_{\text{leaf}}$  wurden später so angepaßt, daß die Zeitkonstante des Systemverhaltens von HYDRA für Jungbäume von Quercus petraea der beobachteten Zeitkonstante aus Feldversuchen von 15 min entspricht (Kap. 3.3.1.4).



**Abb. 18:** Rekonstruktion der Versuchsbäume mit AMAP (nach Anzola 2002, leicht verändert). Die Bezeichnung der einzelnen Bäume von links nach rechts: *ejk*, *eji*, *ejc*, *ejf*, *ejh*, *ejd*, *efg*. Die relative Zuordnung der Bäume in der Graphik spiegelt nicht die natürliche Lage zueinander im Feld wieder (s. dazu auch Anhang [2]).

### 3.4 Baumwasserfluß-Modell HYDRA: Parametrisierung und Simulation

#### 3.4.1 Parametrisierung

##### 3.4.1.1 Umsetzung der hydraulischen Struktur mit GROGRA

Das numerische Baumwasserfluß-Simulationsmodell HYDRA berechnet Wasserpotentiale und Flüsse in den zylindrischen Achsensegmenten der verzweigten Kronenarchitektur. Diese Achsen-segmente bilden die strukturellen Grundeinheiten des Modells.

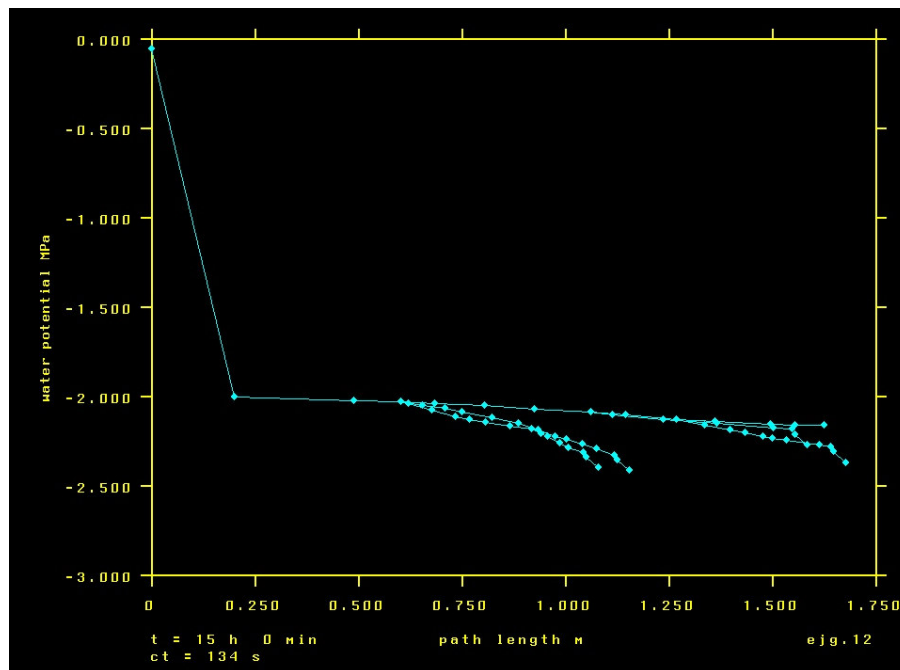
**Tab. 3:** Eigenschaften der Probebäume (s. Abb. 18). *#nodes* bezeichnet die Anzahl der Knoten bzw. Segmente im *map file* nach Erstellung bzw. Bearbeitung mit GROGRA und DISC (siehe Kurth 1994 und Früh 1995). Für die Simulation mit HYDRA wird jedem Blatt eine Blattfläche von 13.37 cm<sup>2</sup> und jedem Blattstiel ein Durchmesser von 0.74 mm zugeordnet. Die Wurzeln werden durch den jeweils letzten *node* mit einem einheitlichen Durchmesser von 3.5 mm repräsentiert.  $K_{soil}$  bezeichnet die resultierende (absolute) hydraulische Leitfähigkeit des Wurzelsegments.

Baum	Höhe [m]	Ø Stammfuß [cm]	Blattzahl [n]	Blattfläche [m <sup>2</sup> ]	#nodes [n]	Wurzelsegment-Länge [cm]	$K_{soil}$ [kg s <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]
<i>ejc</i>	0.977	1.42	363	0.4853	974	35.0	3.578E-05
<i>ejd</i>	0.559	1.20	206	0.2754	508	60.0	2.087E-05
<i>ejf</i>	1.391	1.64	485	0.6484	1230	22.5	5.566E-05
<i>ejg</i>	1.510	2.08	686	0.9172	1789	20.0	6.261E-05
<i>ejh</i>	1.070	1.17	231	0.3088	605	45.0	2.783E-05
<i>eji</i>	1.681	1.90	474	0.6337	1193	25.0	5.009E-05
<i>ejk</i>	0.388	0.92	97	0.1297	241	125.0	1.002E-05

Die grundlegenden Annahmen dabei sind (s. auch Anhang [2]):

- das Gesetz der Massenerhaltung
- das Darcy-Gesetz, welches den stationären Wasserfluß durch ein poröses Medium beschreibt
- die Annahme einer räumlichen Homogenität von Kapazität und axialer hydraulischer Leitfähigkeit innerhalb der einzelnen Segmente des verzweigten Achsensystems.

In der Schnittstelle von GROGRA (*Growth Grammar Interpreter*, s. Kurth 1999) zu HYDRA findet eine Transformation der Struktur statt. Der Grund dafür ist, daß die Numerik der Wasserflußsimulation gewisse Anforderungen an die zugrundegelegte Struktur stellt: Um eine räumlich gleichmäßige Genauigkeit des numerischen Verfahrens zu gewährleisten, werden die Schrittweiten bei der räumlichen Diskretisierung des Achsensystems so gesetzt, daß sie groß sind, wo sich flache Gradienten der Lösungsfunktion (des simulierten Wasserpotentials) ausbilden, und klein, wo die Gradienten steil sind. Zu weiteren Details siehe Kurth (1999) und Früh (1995).



**Abb. 19:** Beispiel für eine Pfadauswahl (Original HYDRA-Graphik) im Verzweigungssystem des Baumes *ejg* für einen HYDRA-Simulationslauf. Dargestellt ist hier das simulierte Wasserpotential ( $\Psi_{\text{Xylem}}$ ) in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Die blauen Punkte bezeichnen die Verbindungsknoten (*nodes*) zwischen den einzelnen Segmenten. Das erste Pfadstück (Segment) stellt die Wurzel dar, deren  $\Psi_{\text{Xylem}}$  bei  $-0.05$  MPa beginnt. Dieser Wert entspricht dem voreingestellten Bodenwasserpotential.

Die Abspeicherung und Weitergabe der modifizierten Verzweigungsstrukturen erfolgt in tabellenorientierten Dateien (primäres Basisgitter = \*.pbg-, und sekundäres Basisgitter = \*.sbg-Format, s. Kurth 1994). HYDRA kann aus den Strukturdaten – zusammen mit den Zeitreihen der Transpirationsrate ( $J_{\text{H}_2\text{O}}$ ) der Blätter – sowohl Zeitreihen des Wasserpotentials ( $\Psi_{\text{Xylem}}$ ) und Wasserflusses (Abb. 22, 25 - 27) als auch Profile (Abb. 19) berechnen (Früh 1995). Für die Erstellung eines Profils sind entsprechend ein Zeitpunkt und eine Pfadauswahl im Verzweigungssystem vorzugeben. Für die Protokollierung von Zeitreihen kommen beliebige Positionen (*nodes*) in Frage, die interaktiv, d.h. per Mausklick, bestimmt werden können (Abb. 21).

### 3.4.1.2 Eingabeparameter zur Steuerung von HYDRA

Eine grundsätzliche Charakterisierung des Computerprogramms HYDRA wurde bereits von Früh (1995) und Früh & Kurth (1999) vorgenommen, wobei Früh dieses Programm für Koniferen entwickelt hat. Deshalb wird an dieser Stelle nur eine kurze Übersicht zur Arbeitsweise von HYDRA gegeben, die durch zusätzliche Informationen zu Änderungen bezüglich der Neuparametrisierung für Laubbäume und der Neuimplementation des Leitfähigkeitmodells ergänzt sind. Nach dem Programmstart liest HYDRA zunächst programmsteuernde Parameter aus einer Auswahldatei (<selection file>, z.B. <ejg.sel>) ein. Diese Parameter haben folgende Bedeutung (s. Tab. 4):

**Tab. 4:** Beispiel für eine HYDRA-Auswahldatei <selection file> mit Erläuterungen (hier für *Quercus petraea*, tree *ejg*)

SELECTION FILE FOR HYDRA	
*****	
MAIN_DECISION	3
NONLIN	1
TO_NEXUS	0
G_SUBMODEL	1
G_SUBMODEL_FILE	1
PSI_SUBMODEL	2
OUTPUT_CONTROL	0
-----	
LIST_FILE	1
LIST_TIME	12
LIST_FIRST_NODE	1
LIST_LAST_NODE	1789
-----	
SOIL_FILE	005s.in
MAP_FILE	ejg.map
RESULT_FILE	ejg.12
SERIE_NODES_FILE	ejg.nsel
SERIES_FILE	series.12
EVA_INFILE	eva.12
PS_FILE	ejg.ps
OVERWRITE	1
ALREADY_CHECKED	1
-----	
LA_CONTROL	1
LA_PER_LENGTH	0.08
SPECIES	QUERCUS_PETRAEA
EVA_BY_FILE	0
EVA_SWITCH	t
-----	
START_TIME	4
TIME_LIMIT	22
OUTPUT_DISTANCE	0.25
START_SELECTION	0.0
-----	
SCREEN_SIZE	S
MAX_CLICK	50
TAKE_LAST_PATH_SEL	1
PAR_QUALITY	W
PAR_SPAN	3.0
PAR_EVA	2E-04
-----	
PAPER_SIZE	4
PS_NODES	0
-----	
G_PPF	2000.0
G_TLEAF	24.5
G_DW	25.0
G_PSI	-2.0
-----	

**MAIN-DECISION:** legt fest, ob HYDRA im Simulations- (1) oder Ausgabemodus (3) arbeiten soll.

**NONLIN:** Schalter für den nichtlinearen (1) oder linearen (0) Modus, d.h. die Simulation wird mit bzw. ohne Leitfähigkeitsverluste gefahren.

**TO\_NEXUS:** Erzeugung eines speziellen map-files für *Nexus*: ja (1) oder nein (0).

**G\_SUBMODEL:** schaltet das Blattleitfähigkeits-Modell ein (1) oder aus (0).

**G\_SUBMODEL\_FILE:** Ausgabe (1) oder keine Ausgabe (0) einer zusätzlichen Textdatei mit Ergebnissen aus dem G\_SUBMODEL.

**PSI\_SUBMODEL:** Spezifiziert den Tagesgang des Blattwasserpotentials: (1) = 9. Juli 2002 (Schwelle nicht erreicht), (2) = 31. Juli 2002 (Schwelle erreicht, s. Abb. 11-12).

**OUTPUT\_CONTROL:** Schaltet die zusätzliche Bildschirmausgabe bestimmter Kontrollparameter ein (1) oder aus (0).

**LIST\_FILE:** Ausgabe (1) oder keine Ausgabe (0) einer tabellenorientierten Textdatei mit den wichtigsten Simulationsergebnissen.

**LIST\_TIME:** Legt die Ausgabe von LIST\_FILE für eine bestimmte Uhrzeit (12 = 12:00 Uhr) fest (0 = alle Zeiten von 4 bis 22 Uhr, abhängig von START\_TIME, TIME\_LIMIT).

**LIST\_FIRST\_NODE:** Erster Ausgabeknoten für LIST\_FILE.

**LIST\_LAST\_NODE:** Letzter Ausgabeknoten für LIST\_FILE (erster und letzter Knoten = 0 → Ausgabe aller Knoten).

**SOIL\_FILE:** Angabe der Datei, die einen Wert für das Bodenwasserpotential enthält (z.B.:  $\Psi_{soil} = -0.05$  MPa).

**MAP\_FILE:** Angabe der mit GROGRA und DISC erzeugten Strukturdatei (Baumkarte), die hydraulische und topologische Informationen enthält.

**RESULT\_FILE:** Diese Datei verwendet HYDRA zur Speicherung von artspezifischen Ergebnissen zwischen Simulation und Ausgabe.

**SERIE\_NODES\_FILE:** In diese Datei können *nodes* geschrieben werden, die HYDRA in der Textversion verwendet (ersetzt dadurch die manuelle Knotenauswahl).

**SERIES\_FILE:** Dient zur Zwischenspeicherung von Ergebnissen für die graphische Zeitreihenausgabe.

**EVA\_INFILE:** Wird von HYDRA (abhängig von EVA\_BY\_FILE) zur Zwischenspeicherung von Transpirationszeitreihen verwendet.

**PS\_FILE:** Spezifiziert den Namen der *Post-Script*-Ausgabedatei.

**OVERWRITE:** Ein neuer Simulationslauf überschreibt vorhergehende Ergebnisdateien (1) oder nicht (0).

**ALREADY\_CHECKED:** Überprüft die Konsistenz der Knotenstruktur, wenn (1).

**LA\_CONTROL:** Blattfläche aus map-file (1) oder multiplikativ aus der Sproßlänge (0).

**LA\_PER\_LENGTH:** Proportionalitätsfaktor für LA\_CONTROL = (0)

**SPECIES:** Name der Baumart (GATTUNGSNAME\_ARTNAME).

**EVA\_BY\_FILE:** Zeitreihe der Transpirationsrate. Bei (0) wird sie mittels einer Funktion erzeugt (s. EVA\_SWITCH), bei (1) wird sie aus EVA\_INFILE (z.B. <eva.12>) gelesen.

**EVA\_SWITCH:** Legt Art bzw. Muster der Transpirationszeitreihe (Tagesgang) für die Simulation fest (a = sinusförmige, b = stufenförmige, c = konstante, t = empirische Zeitreihe (s. Abb. 17)). Bei EVA\_SWITCH = „t“ werden die Transpirationsdaten mikroklimaabhängig unter Verwendung des Blattleitfähigkeitmodells (G\_SUBMODEL) berechnet.

**START\_TIME:** Startzeitpunkt (Stunde) der Simulation.

**TIME\_LIMIT:** Endzeitpunkt (Stunde) der Simulation.

**OUTPUT\_DISTANCE:** Zeitschritt (in Stunden) der Simulation.

**START\_SELECTION:** hat für die neue Version von HYDRA keine Relevanz.

**SCREEN\_SIZE:** Steuert die Größe des Ausgabefensters für Graphiken. F = großes Fenster (Full), S = kleines Fenster (Small).

**MAX\_CLICK:** Legt die maximale Anzahl der auszuwählenden Knoten fest.

**TAKE\_LAST\_PATH\_SELECTION:** Bei hintereinander ablaufenden Modellläufen wird der zuvor ausgewählte Pfad jeweils übernommen (1) oder nicht übernommen (0).

**PAR\_QUALITY:** Legt die auszugebende Parametergraphik fest (W = Wasserpotential, P = Druckpotential, F = Flow usw.).

**PAR\_SPAN:** Achsenskalierung für die linke y-Achse (s. PAR\_QUALITY).

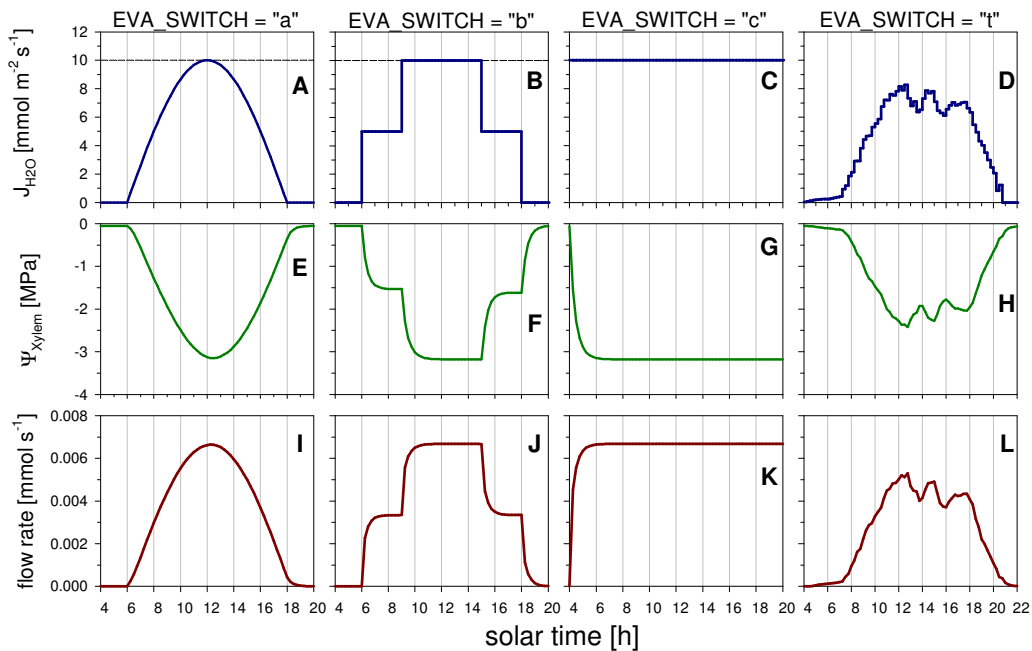
**PAR\_EVA:** Achsenskalierung für die rechte y-Achse (= Transpirationsrate).

**PAPER\_SIZE:** Eingabe der Papiergröße für den Graphikausdruck.

**PS\_NODES:** Bestimmt die Darstellung von nodes in der PostScript-Ausgabe.

**G\_PPF, G\_TLEAF, G\_DW, G\_PSI:** Voreingestellte Werte für PPF,  $T_{leaf}$ ,  $\Delta w$  und  $\Psi_{leaf}$  für das Blattleitfähigkeitmodell (werden nur verwendet, falls G\_SUBMODEL = 0).





**Abb. 20:** Auswirkungen der Schalterstellung EVA\_SWITCH (siehe Tab. 4) auf den zeitlichen Verlauf der Transpirationsrate  $J_{H_2O}$  (A - D) und auf die Simulationsergebnisse von  $\Psi_{Xylem}$  (E - H) und der Flußrate (I - L) bezüglich des Baumes *ejg* (*leaf #node* = 938). Die EVA\_SWITCH-Einstellungen (a, b und c) werden nur zu Testzwecken (ohne Leitfähigkeitsmodell) verwendet. Bei der Einstellung „t“ verwendet HYDRA empirische Mikroklimadaten („Wetterdateien“) zur Berechnung der Transpirationsrate mit Hilfe des Leitfähigkeitsmodells (s. Abb. 25 - 27).

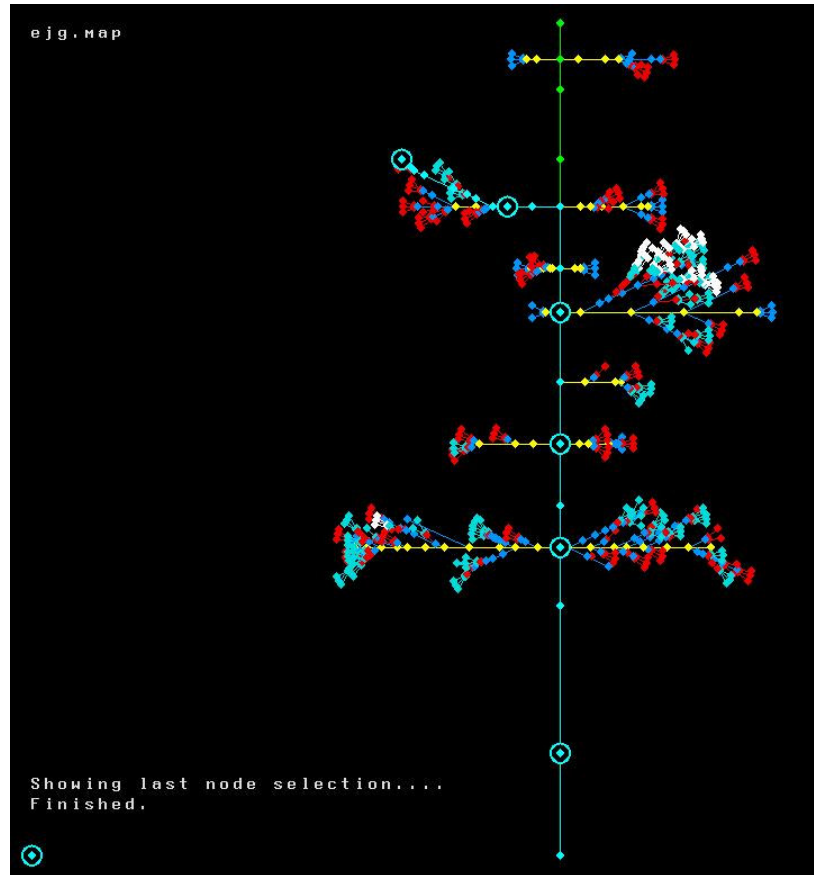
Mit dem Schalter EVA\_SWITCH lassen sich in der HYDRA-Auswahldatei (s. Tab. 4) zu Testzwecken unterschiedliche Muster der zeitabhängigen Transpirationsflußdichte ( $J_{H_2O}$ ) festlegen (Abb. 20). So erzeugen die Einstellungen EVA\_SWITCH = „a“ eine sinusförmige, „b“ eine stufenförmige, „c“ eine konstante und „t“ eine empirisch begründete Zeitreihe. Bei EVA\_SWITCH = „t“ wird  $J_{H_2O}$  mit Hilfe der Wetterdateien und des Blattleitfähigkeitsmodells (Kap. 3.3.1.8) berechnet.

Die Reaktionen des Wasserpotentials ( $\Psi_{xylem}$ ) und der Flußrate eines Blattknotens auf ein stufenförmiges Transpirationssignal zeigt Abb. 20 (B, F, J): Auf abrupte Änderungen der Transpirationsrate reagieren Wasserpotential und Flußrate verzögert, wodurch die zeitlichen Übergänge „gerundet“ erscheinen.

Im Wiedergabemodus von HYDRA (MAIN\_DECISION = 3, Tab. 4) können Simulationsergebnisse aus der Ergebnis- und Zeitreihendatei (z.B. EVA\_INFILE = <ejg.12>) eines früheren Programmlaufes aufgerufen und graphisch dargestellt werden (FRÜH 1995). Zusätzlich zu den Profilgraphiken (z.B. Abb. 19) können im Wiedergabemodus Zeitreihen (Tagesgänge) erzeugt werden (z.B. Abb. 22). Diese bleiben auf die Knotenauswahl (s. Abb. 21) beschränkt, die in der Zeitreihendatei (EVA\_INFILE) abgespeichert wurde. Sowohl für Profil- als auch für Zeitreihengraphiken ist neben der Bildschirmausgabe immer auch eine Ausgabe auf eine *PostScript*-Datei möglich.

Ein weiterer Schalter erlaubt die Unterscheidung zwischen „linearer“ und „nichtlinearer“ Simulation (NONLIN, Tab. 4). Die lineare Option führt dazu, daß die druckabhängige Aktualisierung der hydraulischen Leitfähigkeit entfällt, d.h. daß mögliche druckabhängige Leitfähigkeitsverluste durch Kavitationen (Kap. 3.3.2.1) nicht berücksichtigt werden.



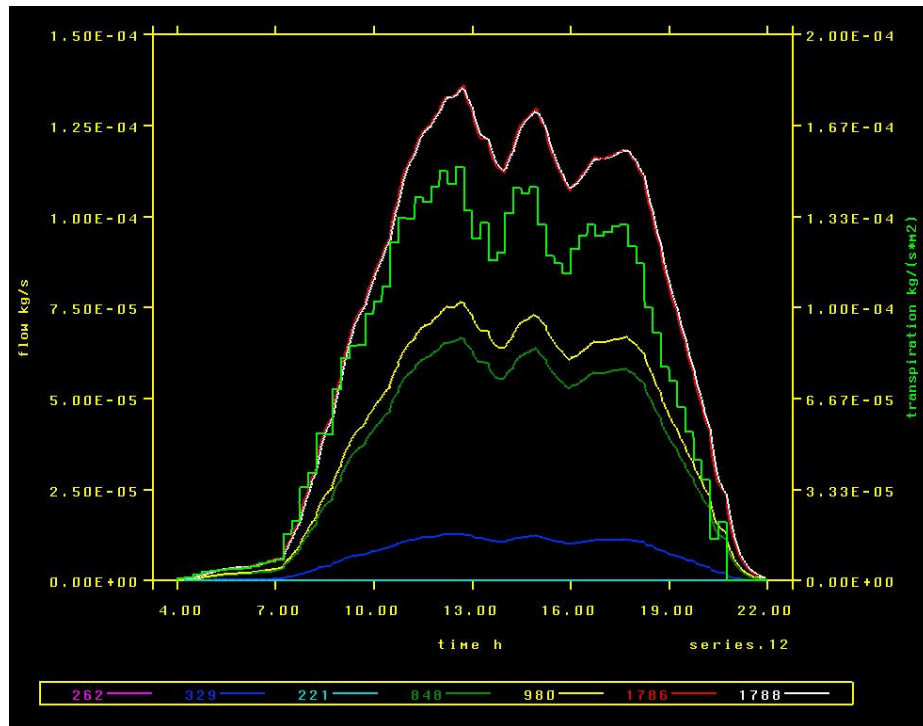


**Abb. 21:** Beispiel für eine Original HYDRA-Graphik des Baumes *ejg* zur Pfad- und Knotenauswahl für einen Simulationslauf. Der ausgewählte Pfad ist durch eine durchgehende blaue Linie vom Stammfuß bis zu einem Blatt in der Krone (markierter Knoten oben links) dargestellt. Das unterste Segment stellt die Wurzel dar. Die blauen Kreise markieren die ausgewählten Knoten, deren Flußraten Abb. 22 zeigt. Das Auswahlsymbol in der linken unteren Ecke der Graphik deutet einen nicht darstellbaren (verdeckten) Knoten an, der in der Knotenauswahl-datei <ejg.nsel> (s. Tab. 4) eingetragen wurde. Unterschiedliche Farben bedeuten unterschiedliche Verzweigungsordnungen.

#### 3.4.1.4 Pfad- und Knotenauswahl

Im Simulationsmodus ( $MAIN\_DECISION = 1$ , s. Tab. 4) werden in einem ersten Schritt die topologischen und geometrischen Informationen der Baumkarte (*map file*, z.B. <ejg.map>) eingelesen. Aus den geometrischen Daten werden dann die hydraulischen Parameter erzeugt.

Anschließend sind interaktiv besondere Pfade und Knoten auszuwählen (s. Abb. 21). Mit der Knotenauswahl wird eine Liste derjenigen Knoten des Raumgitters erstellt, für welche während der Simulation die zeitlichen Verläufe (Tagesgänge) der Variablen hochaufgelöst in einer Zeitreihendatei (*RESULT\_FILE*, s. Tab. 4) abgespeichert wird. Im Wiedergabemodus ( $MAIN\_DECISION = 3$ , s. Tab. 4) werden diese Zeitreihen graphisch zugänglich gemacht (z.B. die Flußrate in Abb. 22). Zu weiteren Details siehe Früh (1995).



**Abb. 22:** Beispiel für eine Original HYDRA-Graphik zur Darstellung der simulierten Flußrate in  $[\text{kg s}^{-1}]$  von ausgewählten Knoten des Baumes *eig*. Knoten Nr. 262 repräsentiert ein Blatt, Knoten Nr. 1788 den zweitletzten Knoten des Stammfußes (markierte Knoten links oben und ganz unten in Abb. 21). Die grün abgestufte Kurve zeigt die Transpirationsrate. Die Flüsse durch die Knoten 221 und 262 (cyan und magenta) sind aufgrund der Skalierung nicht darstellbar, während die Flußraten der Knoten 1786 und 1788 (rot und weiß) identisch sind und sich überdecken.

### 3.4.2 Ankoppelung von silVlow an HYDRA

#### 3.4.2.1 Senkenmodellierung (Christoph Blendinger)

Das Modell, mit dem das Baumwasserflußmodell HYDRA mit dem Bodenwasserflußmodell silVlow gekoppelt wird, beruht auf einem einfachen und seit langem in der Hydrologie üblichen makroskopischen Wurzelmodell (vgl. z.B. Feddes et al. 1974, Klute & Peters 1969; bei Schlichter 1980 wird ein vergleichbarer Ansatz verwendet, allerdings auf einer mikroskopischen Modellierung basierend, so daß die vorkommenden Variablen eine z.T. andere Interpretation haben).

Dabei wird im Einzugsbereich der Wurzeln eines Baumes ( $\Omega_w \supset \Omega$ ) der Ansatz

$$(10) \quad S(h) = a K(h) (h_w - h)$$

gewählt, wobei  $a$  eine vom Ort abhängige Proportionalitätskonstante,  $h_w$  ein als ortsunabhängig angenommenes Wurzeloberflächenpotential und  $K(h)$  eine geeignete Leitfähigkeitsfunktion ist. Die Proportionalitätskonstante ( $a$ ) hat die Einheit  $[L] / [L^3]$  und läßt sich als Wurzellängendichte interpretieren. Es sei noch darauf hingewiesen, daß diese Art der Wurzellängenmodellierung in keiner Weise an der verwendeten Raumdimension hängt, obwohl die klassischen Anwendungen von eindimensionalen Problemen herrühren (z.B. Feddes et al. 1974, Klute & Peters 1969). Das Baummodell HYDRA modelliert zwar die verzweigte hydraulische Architektur im oberirdischen Teil des Baumes sehr detailliert, schneidet das Wurzelsystem aber komplett ab und ersetzt dieses durch eine Randbedingung am untersten Stammsegment.

Hier gibt es einerseits eine Flußrate ( $q_0$ ) in das unterste Stammsegment, andererseits ein Stammfußpotential ( $h_0$ ). Das ursprünglich ungekoppelte Modell von Früh (1995) verwendet als untere Randbedingung einfach ein konstantes  $h_0$ , so daß sich der Fluß ( $q_0$ ) in Abhängigkeit von der aktuellen Transpirationsrate – also dem Fluß an den oberen Enden (Blättern) des Baumes – einstellt. Die beiden wesentlichen Modellierungsannahmen zur Kopplung der beiden Teilmodelle sind einerseits eine Massenerhaltungsbedingung für den Fluß vom Wurzelsystem in den Stamm des Baumes

$$(11) \quad \int_{\Omega_w} S(h) = -q_0$$

was dann eine gute Näherung darstellt, wenn der axiale Fluß in den Wurzeln um Größenordnungen schneller ist als im Boden; andererseits ein gegebener funktionaler Zusammenhang zwischen dem Wurzeloberflächenpotential ( $h_w$ ) und dem Stammfußpotential ( $h_0$ ) von der Form

$$(12) \quad h_w = f(h_0)$$

wobei die Funktion  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  invertierbar, also z.B. differenzierbar mit  $f' \neq 0$ , sein sollte. Im einfachsten Fall ist  $f = id$ , also  $h_w = h_0$ .

Grundsätzlich könnte man mit dem Ansatz (11) beliebig viele Baumindividuen an ein 3D-Bodenwassermodell ankoppeln; da bei rotationssymmetrischer 3D-Modellierung des Bodenmodells sinnvoll aber nur ein Baum mit rotationssymmetrischem Wurzelsystem dazumodelliert werden kann, ist die realisierte Koppelung von HYDRA und silVlow auf einen einzigen Baum beschränkt.

Durch Einsetzen von (10) in (11) erhält man zunächst

$$\int_{\Omega_w} a \cdot K(h) \cdot (h_w - h) = -q_0$$

und nach einfacher Umformung

$$q_0 + h_w \int_{\Omega_w} aK(h) = \int_{\Omega_w} aK(h)h$$

Unter Verwendung von (12) erhält man schließlich

$$(13) \quad q_0 + f(h_0) \int_{\Omega_w} aK(h) = \int_{\Omega_w} aK(h)h$$

was unter der Voraussetzung, daß die beiden Integrale bekannt sind, die Form einer nichtlinearen Randbedingung 3. Art für HYDRA hat; ist  $f$  linear, so wird auch die Randbedingung linear in  $h_0$ . Mit dieser Randbedingung am Stammfuß haben die HYDRA-Gleichungen i.A. eine eindeutige Lösung, durch die dann insbesondere  $q_0$  und  $h_0$  festgelegt sind.

### *Numerik des gekoppelten Systems*

Zur effizienten numerischen Lösung dieses gekoppelten Modells wird bzgl. der Behandlung des Senkenterms im Zeitschrittverfahren innerhalb silVlow die Technik des „time lagging“ angewandt: zur approximativen Berechnung der Lösung  $h(t_i)$  aus der Lösung  $h(t_{i-1})$  wird statt der auch im S-Term nichtlinearen Gleichung

$$\frac{\theta(h(t_i)) - \theta(h(t_{i-1}))}{t_i - t_{i-1}} - \nabla \cdot K(h(t_i))(\nabla(h(t_i) - z)) = S(h(t_i)) \quad \text{in } \Omega$$

die Gleichung

$$\frac{\theta(h(t_i)) - \theta(h(t_{i-1}))}{t_i - t_{i-1}} - \nabla \cdot K(h(t_i))(\nabla(h(t_i) - z)) = S(h(t_{i-1})) \quad \text{in } \Omega$$

näherungsweise gelöst, in der im S-Term die zu diesem Zeitpunkt bereits berechnete Lösung  $h(t_{i-1})$  verwendet wird. Die so berechnete Näherungslösung ist asymptotisch korrekt i.d.S., daß sie unter schwachen Annahmen an  $S$  bei kleiner werdenden Zeitschritten gegen die exakte Lösung konvergiert. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, daß pro Zeitschritt der S-Term nur einmal berechnet werden muß und dadurch auch bei komplizierten  $S$  der Rechenaufwand kontrollierbar bleibt.

Das für die Auswertung von  $S(h(t_{i-1}))$  erforderliche Wurzeloberflächenpotential  $h_w(t_{i-1})$  berechnet sich gemäß (12) aus dem Stammfußpotential  $h_0(t_{i-1})$ ; letzteres erhält man, indem man die HYDRA-Gleichungen für den Zeitpunkt  $t_i$  mit einigen HYDRA-Zeitschritten  $\tau_0, \dots, \tau_n$  mit  $\tau_0 = t_{i-2}, \tau_n = t_{i-1}$  mit der analog (13) hergeleiteten Randbedingung

$$q_0(\tau_i) + f(h_0(\tau_i)) \int_{\Omega_w} aK(h(t_{i-1})) = \int_{\Omega_w} aK(h(t_{i-1}))h(t_{i-1})$$

berechnet; die mögliche Nichtlinearität von  $f$  wird dabei durch Linearisierung approximativ behandelt, so daß tatsächlich in jedem HYDRA-Zeitschritt  $\tau_i$  die lineare Randbedingung

$$q_0(\tau_i) + (f(h_0(\tau_i)) + f(h_0(\tau_{i-1}))(h_0(\tau_i) - h_0(\tau_{i-1}))) \int_{\Omega_w} aK(h(t_{i-1})) = \int_{\Omega_w} aK(h(t_{i-1}))h(t_{i-1})$$

verwendet wird; falls  $f$  linear ist, liefert dieses Verfahren exakte Ergebnisse. Zur Berücksichtigung dieser Randbedingung wurde das in HYDRA verwendete Cholesky-Verfahren gegenüber der bei Früh (1995) beschriebenen Version geringfügig modifiziert.

In jedem großen silVlow-Zeitschritt ist also die Lösung von einigen „hinterherhinkenden“ kleinen HYDRA-Zeitschritten erforderlich. Damit entspricht der Gesamtaufwand zur Berechnung des gekoppelten Systems etwa der Summe der Aufwände für geeignet parametrisierte ungekoppelte Teilsysteme. Der dabei in Kauf genommene Genauigkeitsverlust ist bei der vorgestellten Modellierung des Senkenterms überschaubar und läßt sich leicht durch die probeweise Wahl kleinerer Zeitschritte in silVlow quantifizieren.

### 3.4.2.2 Globalparameter in silVlow

Das Modell silVlow benötigt für die Simulationsläufe einige Globalparameter, die in Tab. 6 zusammenfassend dargestellt sind. Zeiteinheit ist jeweils der Tag. Die Längeneinheit wird in silVlow nur abstrakt, d.h. nicht absolut, gesehen. Sie hat für die internen Rechenabläufe nur eine relative Bedeutung. Um die Kompatibilität der silVlow-Einheiten zu den HYDRA-Einheiten sicherzustellen, ist es allerdings sinnvoll, die Längeneinheit in Zentimeter festzulegen.

Der Bodenraum wird in zahlreiche finite Elemente zerlegt. Der Gesamtraum, in dem die Wurzel sich ausbreitet, wird als Zylinder betrachtet. Von seinem Ursprung her ist silVlow nur ein zweidimensionales Bodenwasserflußmodell, das den Boden prinzipiell nur als Rechteck sieht. Die dritte Dimension wird mathematisch über eine spezielle Rotationssymmetrie - mit dem Stammfuß als Rotationsachse - erreicht. Die Ausdehnung des Bodenraumes wird über die Anzahl der finiten Elemente festgelegt. Die Aufteilung erfolgt über eine Triangulation des „Bodenrechteckes“. Das Rechteck wird dazu in Teilrechtecke unterteilt, die in jeweils zwei Dreiecke geteilt werden. Die Kantenlängen dieser Teilrechtecke werden vorgegeben und als X- bzw. Z-Faktor bezeichnet. Ebenso werden die Anzahl dieser Rechtecke in horizontaler bzw. vertikaler Richtung vorgegeben. Durch die Festlegung dieser Parameter ergibt sich eine Gesamtausdehnung des Bodenraumes von 300 cm in horizontaler und 350 cm in vertikaler Richtung (s. Abb. 23).

**Tab. 6:** Eigenschaften des triangulierten Bodenraumes in silVlow. Die X- und Y-Faktoren bezeichnen die Kantenlängen eines Rechteckes jeweils in horizontaler bzw. in vertikaler Richtung. Aus den Rechtecken pro Zeile und dem X-Faktor ergibt sich eine horizontale Ausdehnung von 300 cm. Aus den Rechtecken pro Spalte und dem Z-Faktor ergibt sich eine vertikale Ausdehnung von 350 cm. Pro Rechteck existieren zwei Dreiecke. Daraus ergibt sich die Gesamtzahl von 4200 Dreiecken. Die Dichte bezeichnet die spezifische Dichte von Wasser, und die Steigung repräsentiert die Neigung einer potentiellen Hanglage. Nähere Erklärungen siehe Text.

Parameter	Wert	Einheit
Zeiteinheit	---	[d]
Längeneinheit	---	[cm]
Anzahl Rechtecke pro Zeile	30	---
Anzahl Rechtecke pro Spalte	70	---
X-Faktor	10	[cm]
Z-Faktor	5	[cm]
Ausdehnung des Bodenraumes (horizontal)	300	[cm]
Ausdehnung des Bodenraumes (vertikal)	350	[cm]
Gesamtzahl an Dreiecken	4200	---
Ausdehnung des Wurzelraumes (horizontal)	120	[cm]
Ausdehnung des Wurzelraumes (vertikal)	60	[cm]
Steigung (pot. Hanglage)	0.0	[cm cm <sup>-1</sup> ]
Dichte	0.001	[kg cm <sup>-3</sup> ]

Der Dichtewert in Tab. 6 gibt das Gewicht einer silVlow-Volumeneinheit Wasser in [kg] an, hat also hier die Einheit [kg cm<sup>-3</sup>] – und repräsentiert damit die spezifische Dichte von Wasser. Dieser Wert dient zur Umrechnung der Flußraten von der Einheit [cm<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>], die in silVlow verwendet wird, in die von HYDRA verwendete Einheit [kg s<sup>-1</sup>]. Die Zeiteinheit wird gesondert umgerechnet.

### 3.4.2.2 Ausdehnung des Gesamtbodenraumes

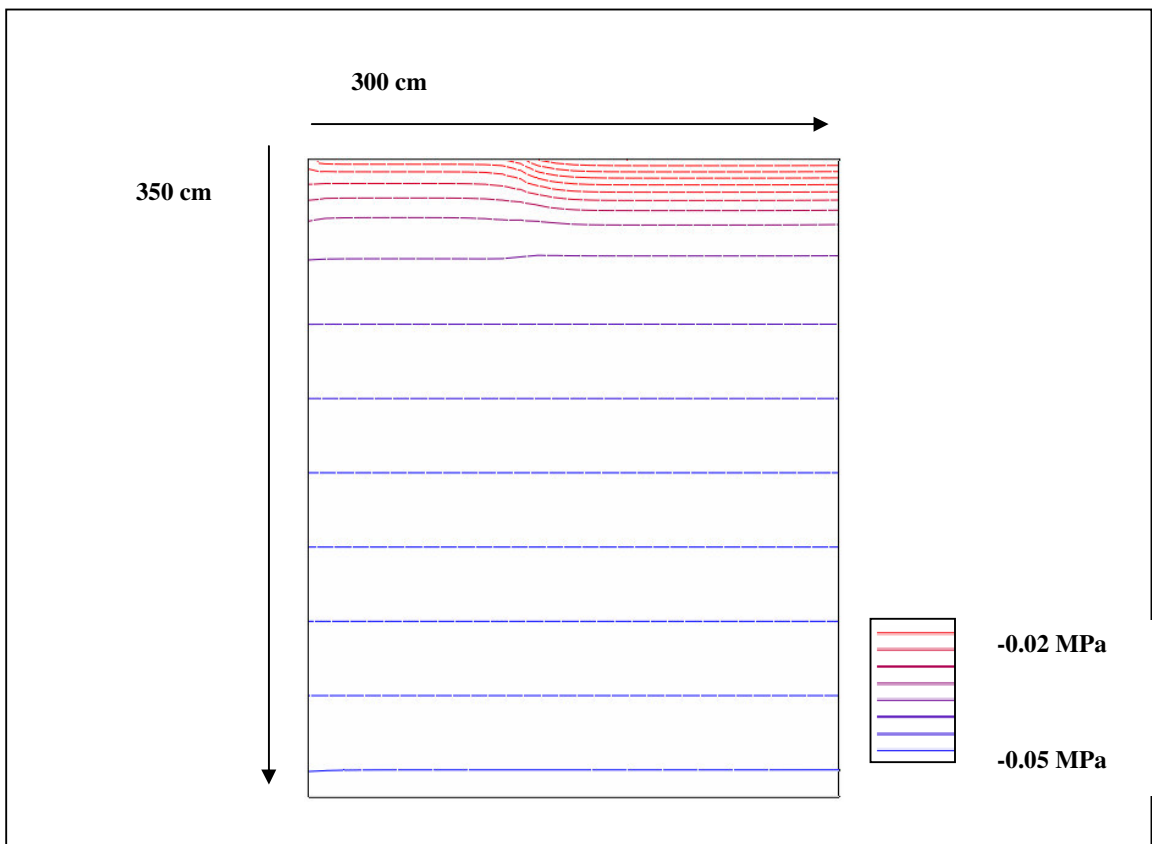
Die Gesamtausdehnung des Bodenraumes ist abhängig von der Ausdehnung des Wurzelraumes des zur Rohdatengewinnung benutzten Baumes. Das Wurzelsystem des Probebaumes z.B. erreicht eine horizontale Ausdehnung von 120 cm und eine Tiefe von 60 cm. Ziel ist es, die Größe des Bodenraumes im Verhältnis zum Wurzelraum so groß zu wählen, daß die Ränder des simulierten Bodenraumes keinen Einfluß auf die Wasserbewegung im Wurzelraum haben. Einfacher gesagt, der Abstand zwischen den Rändern des Wurzel- und des Gesamtbodenraumes darf eine gewisse Größe nicht unterschreiten.

Abb. 23 zeigt die Gesamtpotentialgradienten im Gesamtbodenraum. Die Gradienten sind in Form von Isolinien gleichen Gesamtpotentials dargestellt. Der Gradient wird über die Interpolation zwischen den Farben rot ( $\Psi_{\text{Soil}} = -0.02$  MPa) und blau ( $\Psi_{\text{Soil}} = -0.05$  MPa) dargestellt. Die Abbildung zeigt nur ein Beispiel für die Potentialgradienten. Gewählt ist die Simulation 2 (s. Abb. 30) zum Zeitpunkt  $t = 1$ . Tag um 12:00 Uhr. Die Isolinien verlaufen in der oberen linken Ecke anders als im Rest der Graphik. Dies zeigt den Einfluß des Wurzelraumes auf die Wasserbewegung und die Potentiale. Die Ränder haben keinen Einfluß auf diesen Bereich.

### 3.4.2.3 Randbedingungen

Der Bodenraum wird in der Simulation als Zylinder gesehen. Der Mittelpunkt des Zylinders ist durch den Stammfuß des Baumes repräsentiert. Das Simulationsprogramm silVlow sieht den Bodenraum ursprünglich als zweidimensionales Rechteck (Kap. 3.4.2.1). Aus der Geometrie entsteht die Notwendigkeit, Randbedingungen zu definieren, die den Austausch zwischen dem System und seiner Umwelt abbilden. Da die Grundgeometrie ein Rechteck ist, gibt es vier Randbedingungen bzw. Austauschgrößen. Diese werden über Zeitfunktionen dargestellt und geben das Wasser-Saldo wieder, das über die vier Kanten in das oder aus dem System fließt.

Die einfachste Randbedingung läßt sich für die Seite am Rotationsmittelpunkt festlegen. Hier findet natürlich kein Austausch mit der Umgebung statt, und es wird die Nullrandbedingung angenommen. Ebenso kein Austausch wird dem äußeren Rand in horizontaler Sicht zugeschrieben. Das ist nicht ohne weiteres einsichtig, weil das System doch eigentlich in dieser Richtung offen erscheint. Der Abstand zwischen dem Stammfuß und dem äußeren Rand des betrachteten Wurzelraumes ist aber so groß gewählt, daß Austauschgrößen an diesem Rand keinen Einfluß mehr auf den eigentlichen Wurzelraum haben. Damit ist auch hier die Annahme der Nullrandbedingung gerechtfertigt.



**Abb. 23:** Isolinien des Gesamtwasserpotentials im Bodenraum. Beispielhaft dargestellt ist die Simulation eines Probebaumes mit den Wetterdaten vom 4. Juli 2002. Der Bodenausgangszustand entspricht relativ feuchten Bedingungen ( $\psi_{\text{soil}} = -0.05$  MPa) ohne gleichzeitigen Niederschlag. Abgebildet ist der Zeitschritt zum Zeitpunkt  $t = 1$  Tag um 12:00 Uhr. Die Ausgabe wurde mit der Software „flat“ erstellt, die auf der Grafikbibliothek „GRAPE“ beruht. **Blau** bedeutet ein Potential von  $-0.05$  MPa und **rot** ein Potential von  $-0.02$  MPa. Zwischen den Farben wurde interpoliert, so daß **lila** Farbtöne intermediäre Potentialzustände anzeigen, die zwischen beiden Extrema liegen.



Am oberen Rand des Rechtecks ist der Niederschlag ausschlaggebende Austauschgröße mit der Umwelt. Etwas komplexer gestaltet sich die untere Randbedingung. Das Problem hier ist, daß man keinerlei Information darüber hat, wie die Potentialbedingungen in größerer Tiefe waren und sind. Es wird aber davon ausgegangen, daß der Grundwasserspiegel nicht sehr hoch ansteht. Aus diesem Grund ist vorzugsweise die Gleichgewichtsrandbedingung (Blendinger 1994) anzunehmen.

Das Teilmodell silVlow gibt HYDRA das Stammfußpotential als Randbedingung vor, das sich aus dem Wasserpotential der Wurzeloberfläche berechnet. Die Umrechnung des Stammfußpotentials in das Wurzelpotential muß durch den Benutzer über eine Zeitfunktion definiert werden. Dabei ist die Umrechnung von silVlow- in HYDRA-Einheiten zu berücksichtigen. Wählt man die Identität ( $y = x$ ), so muß man zur Umrechnung der Einheit [cm Wassersäule] in die Einheit [MPa] einen Faktor von 10.000 ansetzen. Um, wie ohne Bodenwasserflußmodell schon realisiert, Blattwasserpotentiale von kleiner als -2.0 MPa erreichen, ist es allerdings notwendig, diesen Faktor je nach Rand- und Ausgangsbedingungen anzupassen. Dies führt dann zu Faktoren von 440 bis 600 MPa cm<sup>-1</sup> WS. Dieser Faktor ist daher bei den Ergebnissen stets anzugeben.

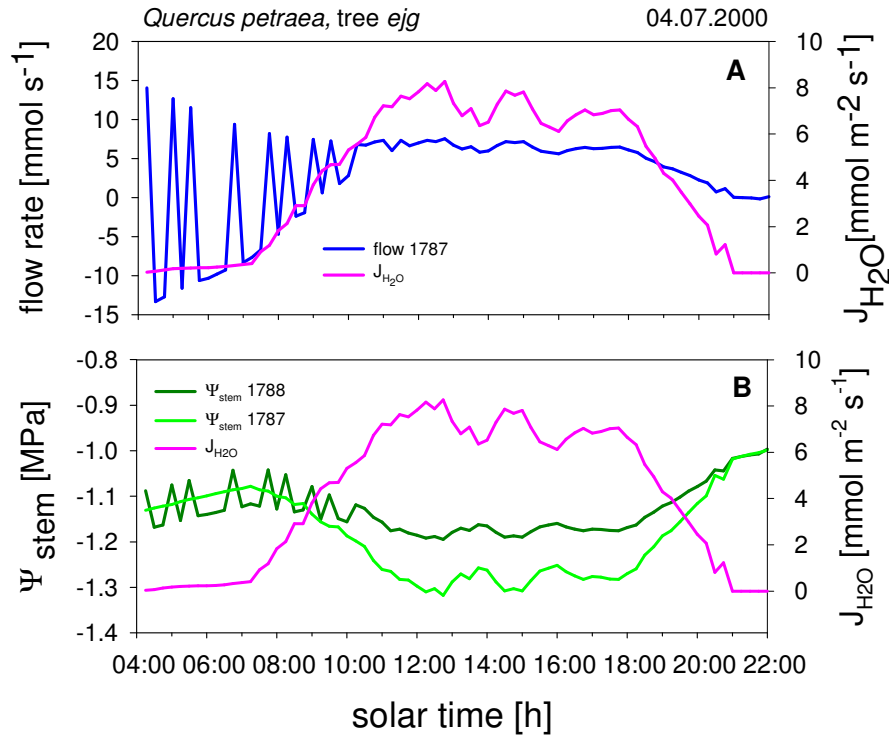
#### 3.4.2.4 Ausgangszustand

Der Ausgangszustand des Bodenraumes kann als zeitliche Randbedingung angesehen werden. Im Ausgangszustand wird beschrieben, welche Gesamtpotentiale in den finiten Einheiten herrschen, bevor der eigentliche Simulationslauf beginnt. Problematisch dabei ist, einen Anfangszustand zu finden, der einen stabilen Simulationslauf gewährleistet. In der Regel treten Einschwingungsvorgänge zwischen HYDRA und silVlow auf, die, über die Zeit gesehen, ein nichtinterpretierbares Wasserpotential am Bodenknoten bewirken. Lösung wäre die Messung eines Ausgangszustandes. Dieses erwies sich im vorliegenden Fall aber als zu komplex, denn es wäre erforderlich gewesen, den gesamten Potentialzustand des Boden-Baum-Systems messen müssen. Dieses ist mit den zur Verfügung stehenden Meßmethoden aber unmöglich.

Eine andere Möglichkeit ist, einen realistischen Ausgangszustand im Boden zu definieren, und die Simulation solange laufen zu lassen, bis alle Einschwingvorgänge abgeschlossen sind. Dies ist in den gezeigten Simulationsläufen nach ca. einem halben „Tag“ geschehen.

Als Ausgangszustände wurden möglichst einfache Verhältnisse zugrunde gelegt. In den HYDRA-Simulationen ohne silVlow-Kopplung wurde davon ausgegangen, daß über den gesamten Bodenraum ein gleichmäßiges Bodenwasserpotential von -0.05 MPa zugrundeliegt. Um den Einfluß unterschiedlicher Ausgangszustände zu verdeutlichen, haben wir gleichmäßige Bodenwasserpotentiale von -0.05 MPa und -0.07 MPa angenommen, also einen feuchteren und einen trockeneren Ausgangszustand des durchwurzelteten Bodenraumes.

Durch die Einschwingvorgänge war es notwendig, die Simulationen über mehr als einen Tag laufen zu lassen. Da die Simulation erst nach etwa 12 h stabil ist, erforderten alle Simulationen zwei Tage Laufzeit. Da der Tag für den Baum um 4:00 h beginnt und um 22:00 h endet, dauert ein Lauf 40 Stunden. Die Transpirationsdaten sind für beide Tage identisch. Abb. 24 zeigt den Einschwingvorgang am ersten Tag für einen Simulationslauf ohne Niederschlag mit feuchtem Ausgangszustand ( $\Psi_{\text{soil}} = -0.05$  MPa). Deutlich zu erkennen ist die Fluktuation beim Fluß und beim Wasserpotential. Die negativen Flüsse kommen dadurch zustande, daß sich der Potentialgradient zwischen dem ersten und zweiten Segment (#1787 und #1788) jeweils umkehrt, da die HYDRA-Numerik das Potential im zweiten Segment stabilisiert. Aber es ist deutlich zu erkennen, daß die Fluktuation etwa ab dem Zeitpunkt  $t = 1$ .Tag um 12:00 Uhr beendet ist.



**Abb. 24:** Ergebnisse (A:  $flow\ rate$ ,  $J_{H_2O}$ , B:  $\Psi_{leaf}$ ,  $J_{H_2O}$ ) eines Simulationslaufes der HYDRA-silVlow-Kopplung mit Mikroklimadaten (PPFD,  $T_{leaf}$ ,  $\Delta w$ ) vom 4. Juli 2000 und einem modellierten Tagesgang des Blattwasserpotentials ( $\Psi_{leaf}$ ) vom 9. Juli 2002 (s. auch Abb. 12). Dargestellt ist der Einschwingvorgang über 18 h des Flusses am vorletzten Stammknoten (#1787) und  $\Psi_{stem}$  (#1787 und #1788) des Baumes *ejg*. Weitere Erklärungen siehe Text.

### 3.4.2.5 Wassergehalts- und Leitfähigkeitsfunktionen

Die Wassergehalts- und Leitfähigkeitsfunktionen waren so zu wählen, daß sie die Bedingungen, die in dem Untersuchungsgebiet vorlagen, so genau wie möglich abbildeten. Diesbezügliche Feldmessungen lagen leider nicht vor, so daß wir auch hier auf die Literatur angewiesen waren. Es wurden Leitfähigkeiten und Wassergehalte von Sandböden aus der Lüneburger Heide verwendet, die Leuschner (1994) unter Laborbedingungen bestimmt und in seiner Habilitationsschrift beschrieben hat. Seine Proben stammten also von Böden, die denen des Standortes unserer Probestämme sehr ähnlich waren.

### 3.4.2.6 Unterschiede zur HYDRA-Simulation ohne silVlow

Wie schon erwähnt, wurde die Modellstruktur von HYDRA in der Kopplungsversion mit silVlow nicht verändert. Einzige Unterschiede betreffen die Datenübergabe am Bodenknoten und die Architektur des untersuchten Baumes. In der Simulation ohne Bodenwassermodell wurde ein Zusatzknoten eingefügt, der dazu dient, das absolute Wasserpotential in den Blattknoten anzupassen. Dieser nunmehr überflüssige Knoten, der das komplette Wurzelsystem repräsentierte, ist hier wieder entfernt worden.

Ein anderer Unterschied ist, daß sich die Höhendifferenzierung der Transpiration bei der HYDRA-silVlow-Kopplungsversion modelltechnisch noch nicht umsetzen ließ. Alle Ergebnisse enthalten daher bezüglich der Blätter (noch) keine Strahlungsreduktionseinflüsse.

### 3.4.3 Ergebnisse der Simulationsläufe und Sensitivitätstests

#### 3.4.3.1 Simulationsläufe und Sensitivitätstests ohne Bodenwassermodell

Vor der Ankoppelung des Bodenwasserfluß-Modells (SilVlow) an HYDRA wurde mit einem konstanten Bodenwasserpotential ( $\Psi_{\text{soil}} = -0.05$  MPa) gearbeitet (Abb. 19). Dieser Wert beruht auf Erfahrungswerten aus Tensiometermessungen bei mittleren Feuchtebedingungen in Sandböden der südlichen Lüneburger Heide (s. Backes & Leuschner 2000).

Die Wurzeln setzen der Wasseraufnahme einen besonders hohen Transportwiderstand entgegen, der im SPAC den zweitgrößten Widerstand - nach dem Blatt-Luft-Widerstand - ausmacht. Dabei fällt besonders der hohe radiale Wurzelwiderstand ins Gewicht, der nach Coners (2001) im Vergleich zum axialen Wurzelwiderstand um mehr als 10-fach höher anzusetzen ist. Gegenüber dem Radialwiderstand erscheint daher der Axialwiderstand des Wurzelxylems fast vernachlässigbar klein (s. Landsberg & Fowkes 1978, Sperry et al. 2002).

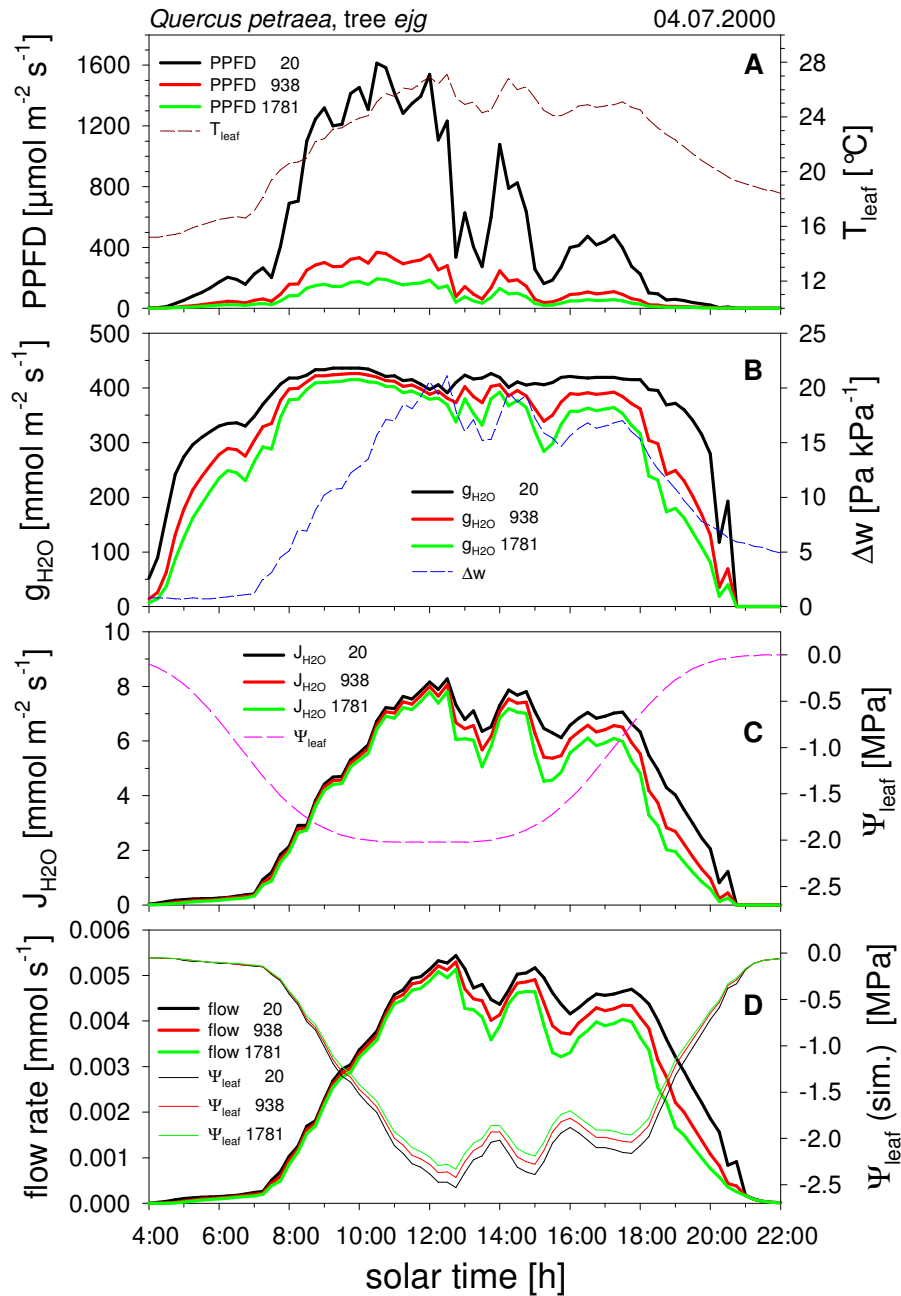
Um den hohen Transportwiderstand (bzw. diese geringe hydraulische Leitfähigkeit) in den Wurzeln zu berücksichtigen, wurde in die Baumkarte (*map file*) unterhalb des Stammfußsegments ein zusätzliches Segment eingefügt, das die hydraulischen Leitfähigkeitsverhältnisse des gesamten verzweigten Wurzelsystems näherungsweise repräsentieren soll. Die hydraulische Leitfähigkeit ( $K_m$ ) dieses Wurzelsegments berechnet sich in HYDRA – wie die der oberirdischen Sproßsegmente auch – nach der Durchmesser-Leitfähigkeits-Beziehung (s. Tab. 1, Abb. 2). Die strukturellen Eigenschaften (Durchmesser, Länge) dieses Wurzelsegments wurden so angepaßt, daß HYDRA für bestimmte mikroklimatische Bedingungen die Blattwasserpotentiale ( $\Psi_{\text{leaf}}$ ) realistisch berechnet.

Dazu wurde ein "Klimatag" mit hoher Transpirationsbelastung (hier: 4. Juli 2000) aus der Wetterdatei selektiert (s. WEATHER\_FILE und WEATHER\_DATE in Tab. 5). Der Durchmesser (D) des Wurzelsegments wurde während mehrerer Simulationsläufe bei  $D = 3.5$  mm konstant gehalten und die Segmentlänge solange variiert, bis sich für die Blätter ein  $\Psi_{\text{leaf}}$  von etwa  $-2.5$  MPa einstellte. Dieser Wert des Blattwasserpotentials beruht auf Erfahrungen aus Feldmessungen, die unter ähnlichen mikroklimatischen Bedingungen durchgeführt wurden (s. Abb. 11 – 12). Die nach diesem Verfahren ermittelten Wurzelsegmentlängen für die einzelnen Probestämme sind in Tab. 3 aufgelistet.

#### *Simulationsläufe mit und ohne kritischem Blattwasserpotential*

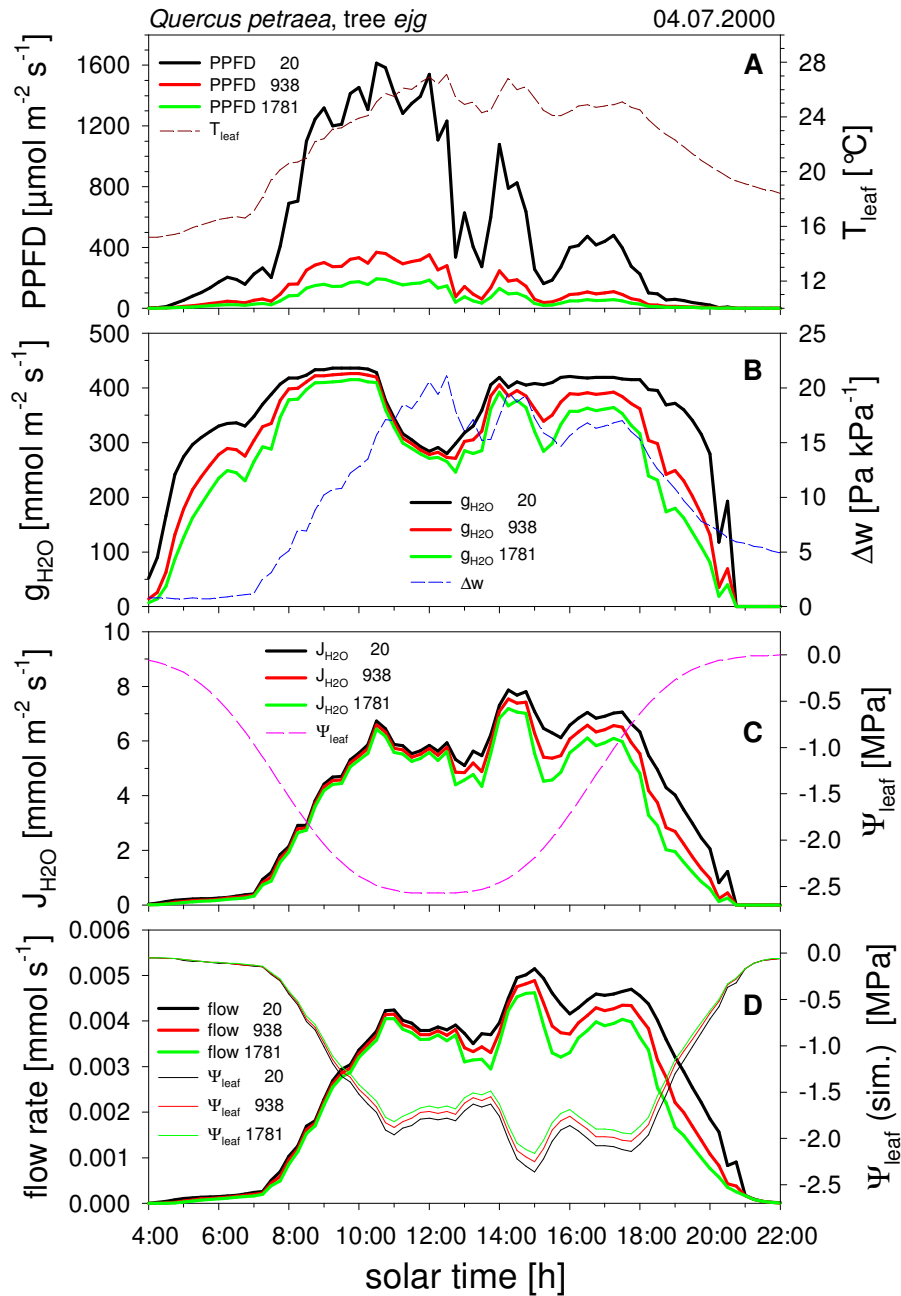
Die Abbildungen 25 und 26 zeigen Ergebnisse von zwei HYDRA-Simulationsläufen, wobei in Abb. 25 die Blattwasserpotentialschwelle unkritisch (Minimum von  $\Psi_{\text{leaf}} > -2.0$  MPa) und in Abb. 26 kritisch (Minimum von  $\Psi_{\text{leaf}} < -2.5$  MPa) eingestellt wurde. Dargestellt sind jeweils die Photonenflußdichten (A), die Blattleitfähigkeiten (B), die Transpirationsraten (C) und die Flußraten (D) von 3 Blattknoten aus der Kronenspitze, der Kronenmitte und der Kronenbasis des Probebaumes *e.j.g.* In (A), (B) und (C) sind zusätzlich die Blatt-Temperatur ( $T_{\text{leaf}}$ ), der Luftfeuchtegradient zwischen Blatt und Luft ( $\Delta w$ ) bzw. der vorgegebene Tagesgang des Blattwasserpotentials ( $\Psi_{\text{leaf}}$ ) eingezeichnet. Diese drei Parameter, die während der Simulation für alle Blätter des Probebaumes dieselben Werte annehmen (nur die Photonenflußdichte weist in HYDRA einen Höhengradienten auf, s. Kap. 3.3.1.6), bestimmen zusammen mit der Strahlung den Öffnungszustand der Stomata und damit die Blattleitfähigkeit für Wasserdampf (s. Kap. 3.3.1.8).

Aus Abb. 26 B wird ersichtlich, daß unterhalb einer kritischen Schwelle von  $\Psi_{\text{leaf}}$  die Zeitreihe der Blattleitfähigkeit um die Mittagszeit eine deutliche Absenkung ("Mittagsdelle") aufweist, die in Abb. 25 B fast völlig fehlt. Dieser zeitlich begrenzte Stomataschluß führt in der Folge zu verringerten Wasserflüssen (*flow rates*) im Blatt- (Abb. 26 D) und im Sproßxylem (Abb. 27 D). Dadurch steigen die simulierten Wasserpotentiale im Blatt- ( $\Psi_{\text{leaf}}$  (sim.), Abb. 26 D) und im Sproßxylem ( $\Psi_{\text{branch}}$ ,  $\Psi_{\text{stem}}$ , s. Abb. 27 D) wieder an.



**Abb. 25:** Ergebnisse (**D**: flow rate,  $\Psi_{\text{leaf}}$ ) eines HYDRA-Simulationslaufes mit Mikroklimate (PPFD,  $T_{\text{leaf}}$ ,  $\Delta w$ ) vom 4. Juli 2000 (**A**, **B**, siehe auch Abb. 5 oben) sowie mit einem modellierten Tagesgang des Blattwasserpotentials (**C**:  $\Psi_{\text{leaf}}$ ) vom 9. Juli 2002 (s. auch Abb. 12). Dargestellt sind die Ergebnisse von 3 Blattknoten aus der Kronenspitze (20), der Kronenmitte (938) und der Kronenbasis (1781) des Baumes *ejg* (s. Abb. 18, rechts). Das Blattwasserpotential (**C**) hat hier keinen Einfluß auf  $g_{\text{H}_2\text{O}}$  (**B**) und damit auf die Ergebnisse, weil der Schwellenwert (s. Abb. 11) nicht erreicht wird. Weitere Erklärungen siehe Text.

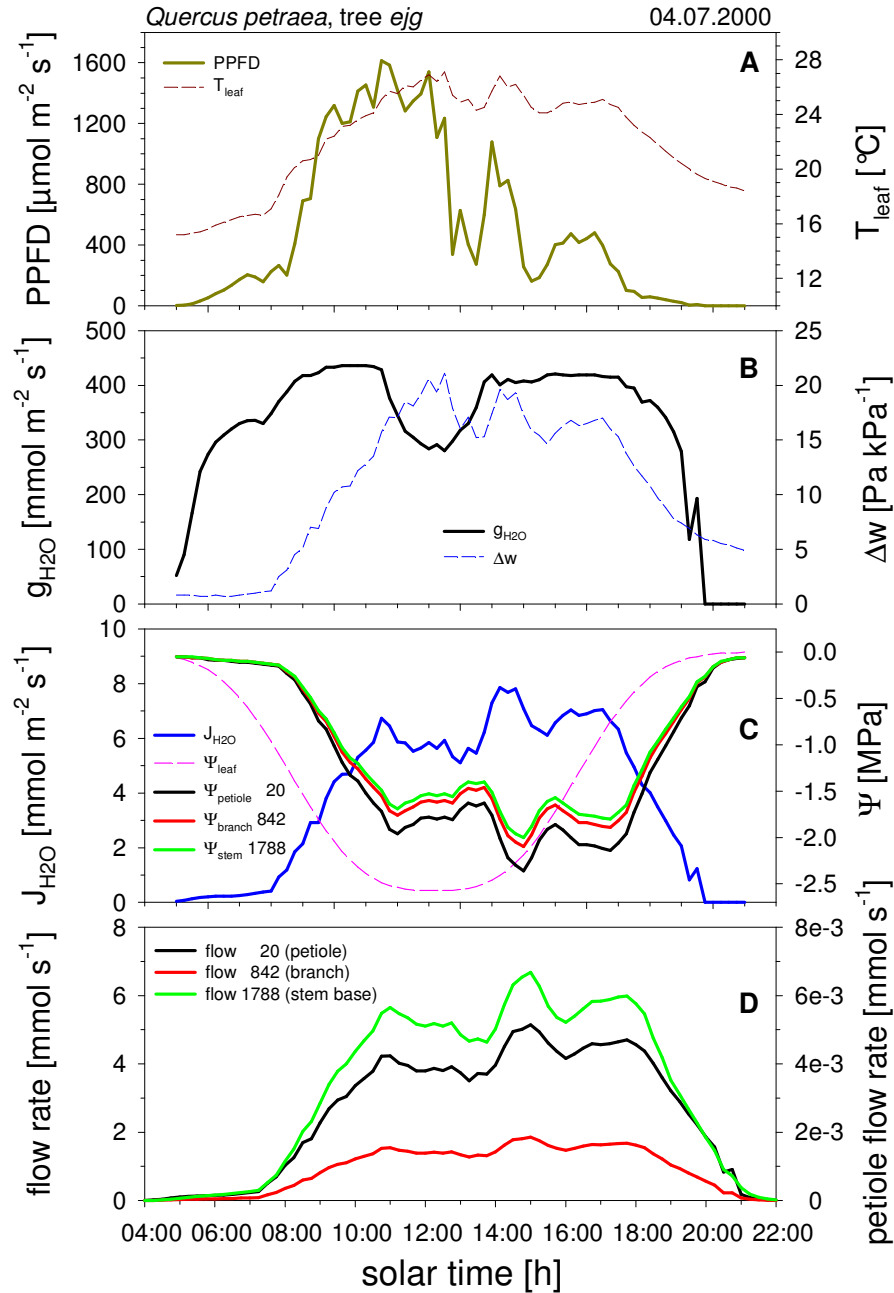
Dieses Ergebnis ist realistisch, denn Absenkungen des Xylemsaftflusses durch Stomatenschluß als Folge einer kritischen Unterschreitung des Blattwasserpotentials wurden bei Feldmessungen an unterschiedlichen Pflanzenarten beobachtet.



**Abb. 26:** Legende und Mikroklima wie in Abb. 22, jedoch mit einem modellierten Tagesgang des Blattwasserpotentials (C:  $\Psi_{\text{leaf}}$ ) vom 31. Juli 2002 (s. auch Abb. 12). Das Blattwasserpotential (C) unterschreitet hier den Schwellenwert (s. Abb. 11) und senkt die Blattleitfähigkeit (B,  $g_{\text{H}_2\text{O}}$ ) um die Mittagszeit ab, wodurch die Flußrate (D) verringert und das simulierte Wasserpotential (D) angehoben wird. Weitere Erklärungen siehe Text.

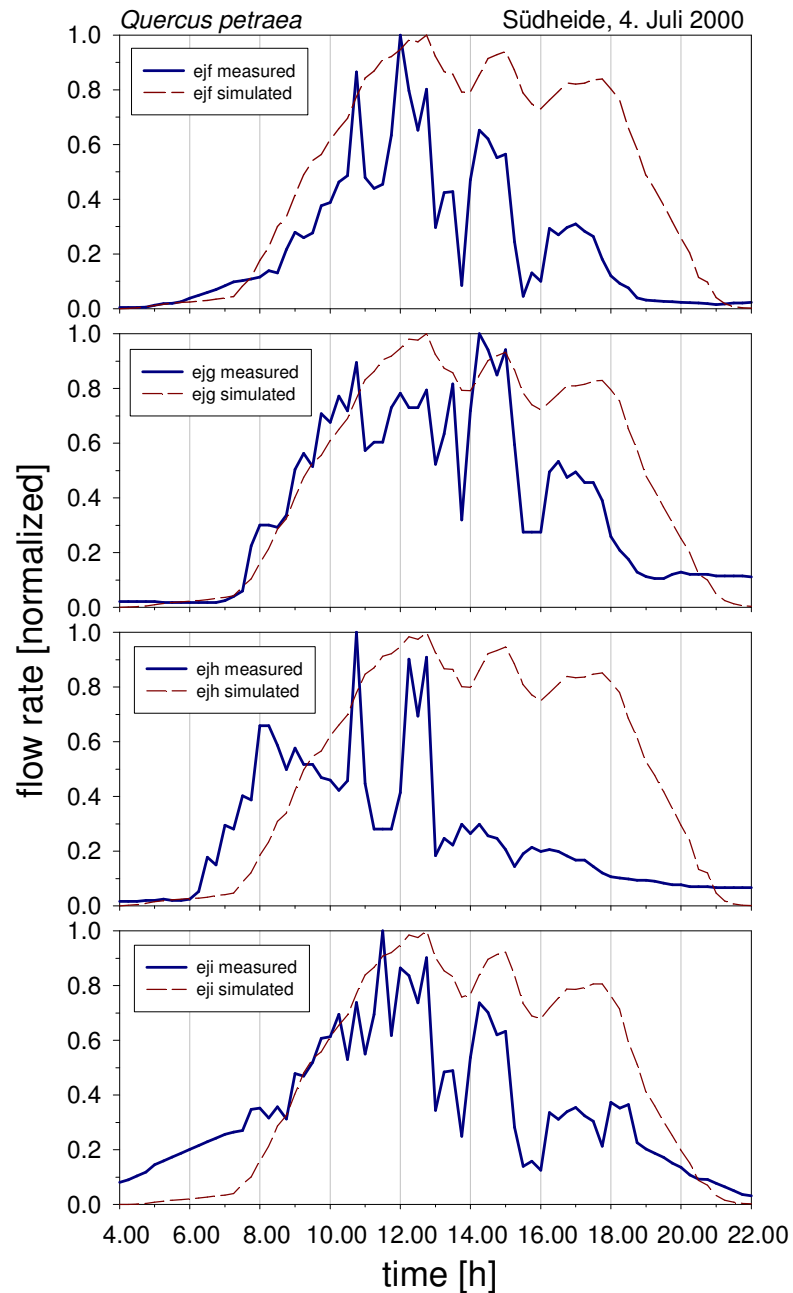
#### Vergleich der simulierten Wasserflüsse in Blatt, Zweig und Stamm

In Abb. 27 sind die Ergebnisse eines HYDRA-Simulationslaufes dargestellt, der unter den gleichen mikroklimatischen Bedingungen (A, B, C) wie unter denen in Abb. 26 gefahren wurde. Im Unterschied dazu werden hier die simulierten Wasserflüsse und -potentiale (C, D) in unterschiedlichen Kompartimenten (Blattstiel, Zweig, Stammfuß) des Baumes *ejg* miteinander verglichen.



**Abb. 27:** Ergebnisse eines HYDRA-Simulationslaufes mit Mikroklimadaten vom 4. Juli 2000 (A: PPF<sub>D</sub>, T<sub>leaf</sub>; B: Δw) und einem modellierten Tagesgang des Blattwasserpotentials vom 31. Juli 2002 (C: Ψ<sub>leaf</sub>). Dargestellt sind die Ergebnisse eines Blattstielknotens in der Kronenspitze (#20), eines Astknotens in der Kronenmitte (#842) und eines Stammknotens an der Stammbasis (#1788) des Baumes *ejg*. C: Simulierte Wasserpotentiale (Ψ<sub>petiole</sub>, Ψ<sub>branch</sub>, Ψ<sub>stem</sub>). D: Simulierte Flußraten. Der Strahlungsfluß (A: PPF<sub>D</sub>), die Blattleitfähigkeit (D: g<sub>H2O</sub>) und die Transpirationsrate (C: J<sub>H2O</sub>) beziehen sich auf das Blatt mit dem Blattstielknoten #20. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung in (D) für den Fluß durch den Blattstiel gegenüber den Ast- und Stammflüssen. Weitere Erklärungen siehe Text.

Es wird deutlich, daß im Stammfuß, der den "Flaschenhals" des hydraulischen Systems Baum darstellt, die höchste, und im Blattstiel die niedrigste Wasserflußrate simuliert wird (D). Entsprechend verhalten sich die Wasserpotentiale (C), die vom Blattstiel in Richtung Stammbasis ansteigen.



**Abb. 28:** Vergleich der mit HYDRA simulierten Flußraten (dunkelrote, gestrichelte Linien) mit den feldgemessenen Saftflußraten (dunkelblaue, ungestrichelte Linien) im Xylem des Stammfußes von vier Probestämmen (von oben nach unten: *ejf*, *ejg*, *ejh*, *eji*). Zur besseren Vergleichbarkeit der Zeitreihen sind alle Flußraten normiert dargestellt. Weitere Erklärungen siehe Text.

#### Vergleich von simulierten mit gemessenen Wasserflußraten

In Abb. 28 sind die mit HYDRA simulierten Tagesgänge der Wasserflußraten von vier Probestämmen (*ejf*, *ejg*, *ejh*, *eji*) den feldgemessenen Zeitreihen der Saftflußraten (s. Abb. 4) gegenübergestellt. Alle Flußraten sind zur besseren Vergleichbarkeit normiert. Es fällt auf, daß die simulierten Flußraten bei allen Probestämmen fast immer über den gemessenen Raten liegen.

Die Gründe dafür, daß die simulierten Wasserflußraten im Modell nur geringfügig den dynamischen Veränderungen des Mikroklimas folgen, sind im Verhalten des verwendeten Teilmodells für die Blattleitfähigkeit (Kap. 3.3.1.8) zu suchen. Weil der Öffnungsgrad der Stomata - und damit die Blattleitfähigkeit ( $g_{H_2O}$ ) - hauptsächlich der Strahlung folgen, und  $g_{H_2O}$  bereits bei geringen Strahlungsflüssen gesättigt, d.h. maximal ist (s. Abb. 10, unten), wirken sich Veränderungen der Strahlungsflüsse oberhalb von etwa  $200-300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  kaum noch auf die Blattleitfähigkeit und damit auf die Transpirations- und Wasserflußraten aus (vgl. Abb. 25-26). Die Verwendung eines verbesserten Simulationsverfahrens für die Blattleitfähigkeit statt der von Jarvis (1976) und Rapidel (1995) übernommenen Methode (*boundary line analyses, multiplicative model*) würde in dieser Hinsicht möglicherweise konsistentere Ergebnisse bringen.

Ein weiteres Problem, das bei den Simulationen mit HYDRA offensichtlich ist, stellen die starken Abweichungen in der Quantität zwischen simulierten und gemessenen Wasserflußraten dar. Aus diesem Grund sind alle Flußraten in Abb. 25 normiert dargestellt. Generell liegen die simulierten Flußraten - bei einigen Bäumen sogar um ein Mehrfaches - deutlich höher als die feldgemessenen Saftflußraten in denselben Probebäumen. Die sorgfältige und mehrfache Überprüfung aller Rechenschritte und Eingabeparameter in HYDRA sowie der hier verwendeten Saftfluß-Meßmethodik und -ergebnisse brachte diesbezüglich keine Klärung dieses Problems. Ein weiterer Grund für die Abweichungen kann darin vermutet werden, daß am natürlichen Standort die Probebäume während der Saftflußmessungen durch einige Altbäume stärker als angenommen beschattet wurden. Außerdem ist es möglich, daß die gegenseitige Beschattung der Blätter eines Baumes durch das verwendete Strahlungstransmissionsmodell (Kap. 4.3.1.6) nur unzureichend berücksichtigt wird.

Ein weiterer Grund könnte in den unterschiedlichen Vitalitäten der Blätter eines Baumes zu finden sein, bei denen natürlicherweise nicht alle Individuen mit den artspezifischen und potentiell erreichbaren Transpirationsraten operieren - die hier aber in stark idealisierter Weise durch den Einsatz des Blattleitfähigkeit-Modells, das natürlich die tatsächlichen Bedingungen nur gemittelt und näherungsweise simulieren kann, vorausgesetzt werden. Sorgfältig ausgeführte Saftflußmessungen an ausgewählten Versuchsbäumen unter Labor- und genau definierten Mikroklimabedingungen würden vermutlich zu besseren Übereinstimmungen zwischen Meß- und Simulationsergebnissen führen.

#### 3.4.3.2 Simulationsläufe und Sensitivitätstests mit Bodenwassermodell

Die hier dargestellten Ergebnisse sollen kurz den Einfluß des Bodenwassermodelles silVlow auf die Simulationsergebnisse von HYDRA skizzieren. Es sei hier angemerkt, daß die Parametrisierung aufgrund der ungenauen Bestimmung der Wurzellängendichten noch nicht als endgültig angesehen werden darf. Es zeigen sich jedoch bei den Ergebnissen deutliche qualitative Unterschiede zu den Simulationsläufen ohne silVlow-Koppelung.

Die Simulationsläufe sind derart gestaltet, daß eine qualitative Vergleichsmöglichkeit mit den Simulationen ohne Bodenwassermodell gewährleistet ist. Den Simulationsläufen ohne Koppelung ist lediglich ein Bodensystem hinzugefügt, d.h. die mikroklimatischen Bedingungen sind identisch mit denen in Kap. 3.4.3.1 (s. Abb. 25 und 26). Um den Einfluß von silVlow auf HYDRA zu verdeutlichen, wurden unterschiedliche Ausgangszustände der Bodenfeuchte gewählt, d.h. jeweils ein trockener und ein feuchter Zustand. Die Ergebnisse unterscheiden sich dahingehend, daß keine Höhendifferenzierung des Strahlungsgenusses einzelner Blattsegmente berechnet wurde. Die Parametrisierung und die damit verbundenen Probleme sind bereits in Kap. 3.4.2 dargestellt worden.

Tab. 7 zeigt die Unterschiede in den Parametern zwischen den Simulationsläufen. Es sind vier verschiedene Läufe dargestellt. Sie unterscheiden sich im Ausgangmatrixpotential im Boden zum Zeitpunkt  $t = 0$ , also vor dem Einschwingprozeß. Die Niederschlagsrate ist der Einfachheit halber über den Simulationszeitraum konstant. Es sind zwei unterschiedliche Raten angewandt: ein typischer Niederschlag im Mai in der Lüneburger Heide mit  $1.2 \text{ cm Tag}^{-1}$  und kein Niederschlag, wobei diese Werte nur beispielhaft sind. Sie sollen den Einfluß der oberen Randbedingung verdeutlichen.



In Tab. 7 ist zusätzlich ein sogenannter Potentialfaktor angegeben. Er gibt den bereits oben beschriebenen Faktor in der Umrechnung von HYDRA-Stammfußpotentialen in silVlow-Wurzelpotentiale wieder. Dieser Wert ist so angepaßt, daß sich in den oberen Blattsegmenten - ohne zusätzliche Niederschläge - jeweils ein realistischer Potentialwert von weniger als -2.0 MPa ergibt.

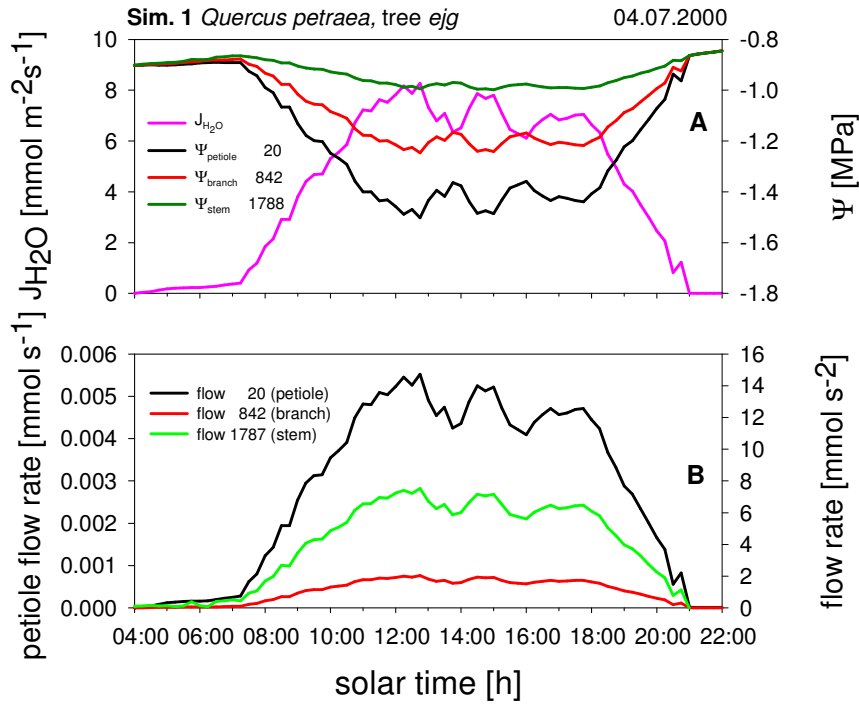
**Tab. 7:** Unterschiede in den Parametern bei den vier Simulationsläufen. Der Ausgangszustand von  $\Psi_{\text{soil}}$  beschreibt das Matrixpotential, das vor dem Einschwingvorgang herrscht. Die Niederschlagsrate ist über den Simulationszeitraum konstant. Der Potentialfaktor beschreibt den Umrechnungsfaktor zwischen Wurzel- und Stammfußpotential. Nähere Erklärung siehe Text.

Simulation Nr.	Ausgangszustand von $\Psi_{\text{soil}}$ [MPa]	Niederschlagsrate [ $\text{cm d}^{-1}$ ]	Potentialfaktor [ $\text{MPa cm}^{-1} \text{ WS}$ ]
1	-0.05	1.2	440
2	-0.05	0.0	440
3	-0.07	1.2	600
4	-0.07	0.0	600

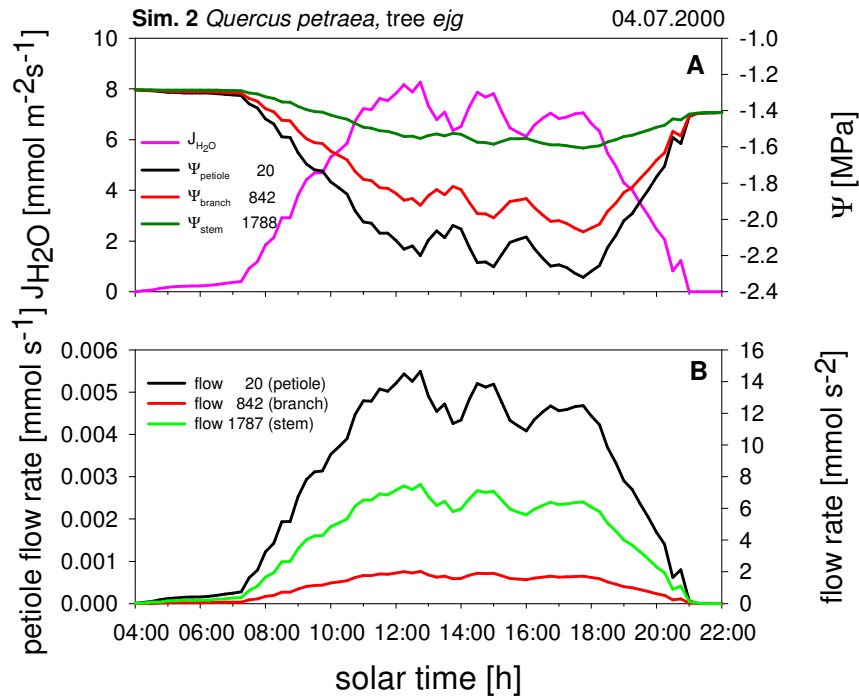
In den Abbildungen sind als Bodensegment zwei verschiedene Knoten ausgewählt. Aufgrund des fehlenden Potentialgradienten am Knoten #1788 ist der Fluß durch den Stamm über den Knoten #1787 repräsentiert. Daher sind zwei unterschiedliche Knoten für das Wasserpotential und den Fluß im Stamm ausgewählt. Besonderes Augenmerk gilt den Potentialwerten am Bodenknoten (#1788). Bei einer reinen HYDRA-Simulation ohne silVlow wäre er konstant. Hier zeigen sich deutlich die Auswirkungen der Kopplung zwischen den beiden Modellen. Die Abb. 29 und 30 zeigen die Simulationen 1 und 2. Sie unterscheiden sich ausschließlich durch die Niederschlagshöhe (s. Tab. 7). Die Flüsse sind in beiden Simulationen identisch. Das hängt damit zusammen, daß sich die Potentialgradienten zwischen den Segmenten des Probebaumes nicht verändern.

Die absoluten Potentiale unterscheiden sich hingegen erheblich. Mit 12 mm Niederschlag pro Tag liegen sie absolut gesehen höher (d.h. weniger negativ) als ohne Niederschlag. Da die Gradienten gleich bleiben, gilt dieser Unterschied für alle Segmente.

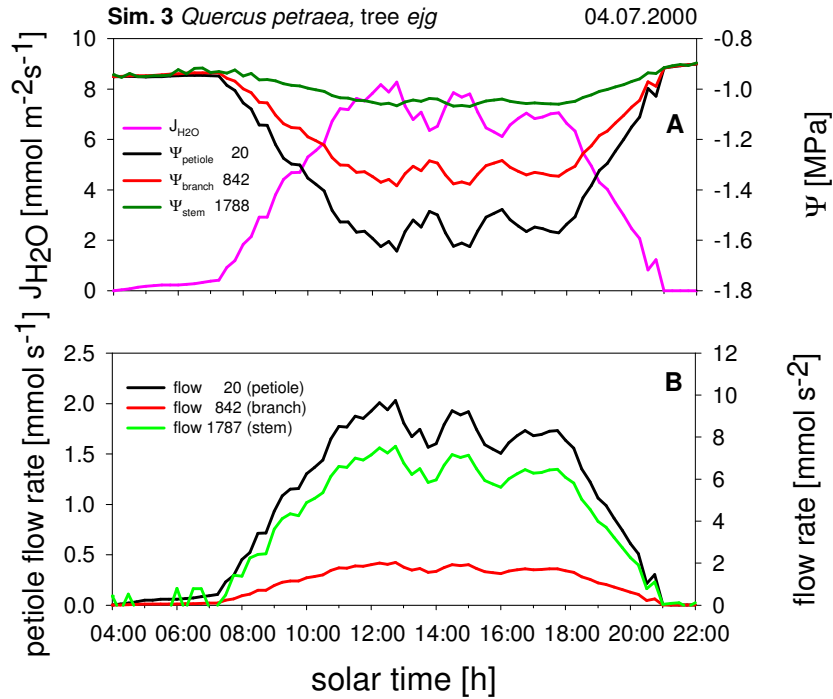
Die Abbildungen 31 und 32 zeigen die Simulationen 3 und 4. Sie unterscheiden sich jeweils durch den Ausgangszustand der Bodenfeuchte, der mit -0.07 MPa trockener gewählt ist als in Simulation 1 und 2. Auch hier sind die Flüsse identisch, und es gilt ebenfalls, daß sich die Potentialgradienten zwischen den Segmenten nicht verändern. Allerdings verändern sich auch hier die absoluten Wasserpotentiale. Sie unterscheiden sich dadurch, daß auch hier die absoluten Potentiale ohne Niederschlagsereignis niedriger (d.h. negativer) liegen. Wichtig ist hier aber auch der Unterschied bei den beiden Simulationen 3 und 4 zu den Simulationen 1 und 2. Ein trockenerer Ausgangszustand der Bodenfeuchte bewirkt demnach niedrigere absolute Wasserpotentiale im Xylem.



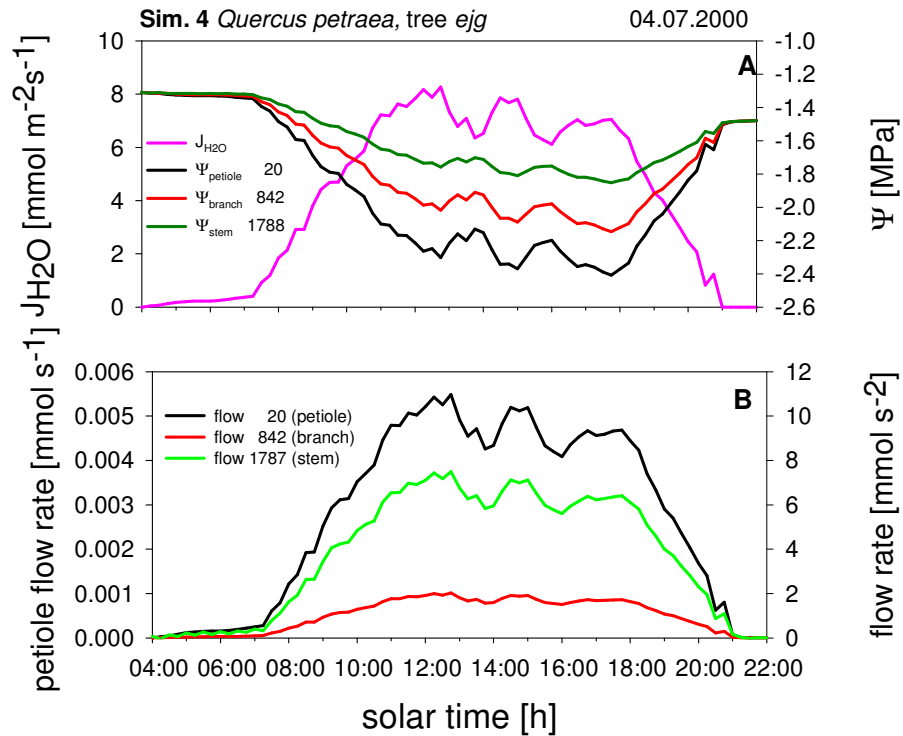
**Abb. 29:** Ergebnisse des 1. Simulationslaufes mit HYDRA-silVlow-Kopplung. **A:** Transpirationsrate ( $J_{H_2O}$ ) und simulierte Wasserpotentiale ( $\Psi_{petiole}$ ,  $\Psi_{branch}$ ,  $\Psi_{stem}$ ), sowie **B:** Wasserflüsse durch einen Blattstielknoten (#20), einen Astknoten (#842) und einen Stammknoten (#1787) des Baumes *ejg*. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung in (**B**) für den Fluß durch den Blattstiel (links). Das Bodenwasserpotential betrug im Ausgangszustand -0.05 MPa bei einem dauerhaften Niederschlag von  $1.2\ cm\ d^{-1}$ . Weitere Erklärungen siehe Text.



**Abb. 30:** Ergebnisse des 2. Simulationslaufes mit HYDRA-silVlow-Kopplung. Das Bodenwasserpotential betrug im Ausgangszustand -0.05 MPa ohne Niederschlag. Legende und sonstige Erklärungen s. Abb. 29 und Text.



**Abb. 31:** Ergebnisse des 3. Simulationslaufes mit HYDRA-silVlow-Kopplung. Das Bodenwasserpotential betrug im Ausgangszustand -0.07 MPa bei einem dauerhaften Niederschlag von  $1.2\ cm\ d^{-1}$ . Legende und sonstige Erklärungen s. Abb. 29 und Text.



**Abb. 32:** Ergebnisse des 4. Simulationslaufes mit HYDRA-silVlow-Kopplung. Das Bodenwasserpotential betrug im Ausgangszustand -0.07 MPa ohne Niederschlag. Legende und sonstige Erklärungen s. Abb. 29 und Text.

## 4 Schlußfolgerungen

Mit HYDRA wird ein Modell zur Simulation des Wasserflusses in der verzweigten Baumarchitektur bereitgestellt, das hydraulische und morphologische Komponenten miteinander verbindet. Gegenüber anderen Flußmodellen (z.B. denen von Jarvis 1975 und Tyree 1988, die bei Fröh 1995 ausführlicher diskutiert werden), folgt HYDRA konsequent physikalischen Gesetzen und physiologischen Vorgaben. Das beweisen ausführliche Modelltests, die von Fröh (1995) durchgeführt wurden. Zu den Besonderheiten von HYDRA zählen sowohl die Anwendung des Darcy-Gesetzes und seiner Voraussetzungen, als auch das Prinzip der räumlichen Homogenität von Kapazität und axialer Leitfähigkeit und das der Massenerhaltung (Fröh & Kurth 1999). Außerdem sei die Möglichkeit hervorgehoben, Kavitationsereignisse (Embolien) im wassergefüllten Xylem unter Wasserstreßbedingungen zu simulieren (Borghetti et al. 1991, Cochard et al. 1992, Breda et al. 1993).

Der gut begründeten physio-physikalischen Basis der Modellstruktur stehen bei HYDRA allerdings einige Schwierigkeiten bei der Parametrisierung entgegen, die hier nicht verschwiegen werden sollen. So erwies sich das *multiplicative model* zur Berechnung der Blattleitfähigkeit, das in Anlehnung an Jarvis (1976) und Dauzat & Rapidel (1998) nach der Methode der *boundary line analysis* aufwendig mit Hilfe umfangreicher empirischer Felddaten parametrisiert wurde, als wenig sensibel gegenüber Änderungen der Photonenflußdichte (PPFD). Erfahrungen bei den Feldmessungen zur Blattleitfähigkeit belegen aber die dominante Rolle der PPFD für die Stomataöffnung und damit für die Leitfähigkeit und die Transpirationsrate. Die möglichen Gründe dafür wurden bereits in Kap. 3.4.3.1 ansatzweise diskutiert. Der Einsatz einer verbesserten Simulationsmethode für die Blattleitfähigkeit würde hier möglicherweise zur Konsistenz der Ergebnisse beitragen.

Als weniger problematisch erwies sich die Bestimmung der axialen hydraulischen Leitfähigkeiten in den Xylemen wasserführender Strukturelemente (Wurzel, Stammfuß, Ast, Zweig, Blattstiel) von Jungeichen nach der Methode von Sperry et al. (1988). Diese Messungen sind allerdings mit großer Sorgfalt und zahlreichen Wiederholungen durchzuführen, um befriedigende Ergebnisse zu erhalten. Bei großen Segmentdurchmessern (> 20 mm) versagt diese Methode jedoch, weil der zu applizierende hydrostatische Druck ansteigt und so zu erheblichen Dichtungsproblemen führt. Aus diesem Grunde wurde vorerst bei Stangenholzindividuen von *Quercus petraea* auf Leitfähigkeitsmessungen und Modellsimulationen verzichtet.

Erhebliche Probleme bereitete die Datenerhebung zur Feinwurzel-Längendichte [ $cm / cm^3$ ], die für die Parametrisierung der HYDRA-silVlow-Kopplungsversion unbedingt erforderlich ist. Der dazu erforderliche Aufwand bei den Feldmessungen war bei der Planung für dieses Projekt in hohem Maße unterschätzt worden. Zeitlich und personell waren diese Arbeiten nicht in dem Umfang zu bewältigen, der für eine hinreichend genaue Parametrisierung von silVlow notwendig wäre. Aus diesem Grunde mußte ergänzend auf Erfahrungswerte aus der Literatur (s. Hertel 1999) zurückgegriffen werden, die allerdings von einer benachbarten Alteichenfläche ohne Naturverjüngung stammen. Sie sind deshalb nur unzureichend auf die Bodenverhältnisse unseres Standortortes übertragbar. Eine erheblich verbesserte Datengrundlage bei der Feinwurzel-Längendichte ist also unverzichtbar, um reproduzierbare Ergebnisse bei der Simulation des Baumwasserflusses unter Einbeziehung der Bodenwassersimulation (silVlow) zu erreichen.

Das Problem der modelltechnischen Umsetzung des Datenaustausches zwischen HYDRA und silVlow konnte komplett gelöst werden, z.B. die Synchronisierung der Zeitsteuerungen beider Systeme und die Anpassung der Numerik. Das gekoppelte Modell wurde ergänzend parametrisiert und getestet. Die insbesondere bei der Parametrisierung noch ungelösten Probleme belegen jedoch den weiteren Forschungsbedarf. Die Simulationsergebnisse der HYDRA-silVlow-Koppelung sind vorläufig nur eingeschränkt nutzbar und deshalb für quantitative Betrachtungen des Wasserflusses über den gesamten Flußpfad des SPAC noch nicht geeignet. Trotzdem zeigen die vorläufigen Simulationsergebnisse, daß wir mit unserem Ansatz auf dem richtigen Wege sind.

## 5 Zusammenfassung

Das vorgegebene Arbeitsthema dieses Projektes war die numerische Simulation des hydraulischen Systems Baum-Boden bei der Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Dazu wurde ein bereits vorhandenes Wasserflußmodell (HYDRA) auf numerischer Basis, das ursprünglich für Koniferen entwickelt worden war, an Laubbäume angepaßt und mit Hilfe empirischer Daten bezüglich der Traubeneiche neu parametrisiert. HYDRA wurde schließlich um ein neu programmiertes Blattleitfähigkeits- und ein bereits bestehendes Bodenwasserfluß-Modell (silVlow) funktionell erweitert.

Die empirischen Daten wurden auf einer Probefläche in der südlichen Lüneburger Heide erhoben. Dazu gehörten mehrtägige Messungen des Xylemsaftflusses im Stammfuß und einzelnen Ästen von etwa 8-10-jährigen Traubeneichen. Zeitparallel dazu wurden Mikroklimamessungen (Globalstrahlung, Luft-Temperatur, relative Luftfeuchte) in der Nähe der Probefläche durchgeführt. In mehreren Meßkampagnen wurden Blatt-Leitfähigkeiten, Transpirationsraten, Blatt-Wasserpotentiale, vertikale Kronengradienten der Strahlung, Zeitkonstanten und Feinwurzel-Längendichten erfaßt. Mit Hilfe von umfangreichen Porometerdaten (Blatt-Leitfähigkeit, Transpirationsrate, PPF, Blatt-Temperatur, Wasserdampf-Partialdruckdifferenz zwischen Blatt und Luft,  $\Delta w$ ) wurde ein multiplikatives Leitfähigkeits-Modell nach der Hüllkurvenmethode (*boundary line analyses*) erstellt und in die HYDRA-Programmstruktur integriert.

Zur labormäßigen Bestimmung der axialen hydraulischen Leitfähigkeiten wurden zu unterschiedlichen Jahreszeiten Segmentproben der oberirdischen Verzweigungsstruktur (Stamm, Ast, Zweig, Blattstiel) entnommen. Die oberirdischen Teile (Sprosse) mehrerer Jungeichen wurden vollständig kartiert und deren zugeordnete Blattflächen bestimmt. Die Daten dienen zur computergestützten Generierung hydraulischer Baumkarten mit Hilfe von GROGRA, aus denen HYDRA u.a. die Verzweigungsstruktur und die morphologischen Informationen zur Berechnung der axialen hydraulischen Leitfähigkeiten entnimmt. Weitere Daten, die von uns nicht eigenständig erhoben werden konnten, wurden der Literatur entnommen. Dazu gehören Verwundbarkeitskurven (*cavitation functions*) und die hydraulischen Kapazitäten im Sproß- und Blattxylem.

Das Bodenwasserfluß-Modell silVlow, das an HYDRA angekoppelt wurde, simuliert die Wasserbewegung im Boden, indem es sowohl Niederschlagsereignisse (*source*) als auch den Wasserentzug durch die Baumwurzeln (*sink*) erkennt. Wichtige Eingangsparameter für silVlow sind das Volumen des durchwurzelten Bodens, die Niederschlagshöhe, die hydraulischen Bodeneigenschaften (pF-Kurve), der momentane Bodenwasserstatus (Wassergehaltskurve) und die Längendichte der Feinwurzeln im Boden. Unter Berücksichtigung dieser und anderer Start- und Randbedingungen errechnet silVlow einen Wasserpotentialwert, der "virtuell" den Wurzeln zugeschrieben wird. Dieser Wert wird schließlich dem untersten Stammfußknoten zugeordnet und damit formell an HYDRA übergeben. HYDRA berechnet aus den übergebenen Informationen einen Potentialgradienten zwischen Wurzel und Stammfuß, der gemeinsam mit den Sproßgradienten des Wasserpotentials den Wasserfluß in Richtung Krone antreibt.

HYDRA ist damit in der Lage, aufgrund fundierter physio-physikalischer Basisannahmen (Strukturinformationen, hydraulische Leitfähigkeit, pF-Kurve, Wasserpotentialgleichung, Darcy-Gesetz, "Richards"-Gleichung, Massenerhaltung) den Wasserfluß im Xylem von jungen Traubeneichen mit hinreichender Genauigkeit zu simulieren. Die bisher bekannten Probleme, die bei der Simulation mit HYDRA auftreten, sind weniger auf eine fehlerhafte Programmstruktur, sondern vielmehr auf eine unzureichende und lückenhafte Parametrisierung der angekoppelten Teilmodelle zurückzuführen. Insbesondere bei der Parametrisierung des silVlow-Teilmodells, das den unterirdischen Teil des hydraulischen Systems Baum repräsentiert, besteht noch ein erheblicher weiterer Datenbedarf. Weiterhin ist anzuregen, das multiplikative Blattleitfähigkeits-Modell durch ein Modell zu ersetzen, das ausreichend sensibel auf Änderungen der Photonenflußdichte zu reagieren vermag.

## 6 Literatur

- Anzola G. (2002):** Linking structural and process-oriented models of plant growth. Diss. Fak. Forstwiss. u. Waldökol.d. Univ. Göttingen.
- Backes K., Leuschner C. (2000):** Water relations and gas exchange in *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. in a mixed stand at their southern limit of distribution in Europe. *Trees* 14: 344-352.
- Blendinger C. (1994):** silVlow, Schnittstellenbeschreibung, Ver. 2.3.1. Inst. f. Angewandte Mathematik, Univ. Bonn.
- Borghetti M., Edwards W.R.N., Grace J., Jarvis P.G., Raschi A. (1991):** The refilling of embolized xylem in *Pinus sylvestris* L. *Plant Cell Environ.* 14: 357-369.
- Breda N., Cochard H., Dreyer E., Granier A. (1993):** Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. *Ann. Sci. For.* 50: 571-582.
- Cermák J., Deml M., Penka M. (1973):** Improvement of the method of sap flow rate determination in fullgrown trees based on the heat balance with direct electric heating of xylem. *Biol. Plant.* 18: 105-110.
- Clausnitzer V., Hopmans J.W. (1994):** Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant and Soil* 164: 299-314.
- Cochard H. (1992):** Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiology* 11: 73-83.
- Cochard H., Breda N., Granier A., Aussenac G. (1992):** Vulnerability to air embolism of three oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl., *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L.). *Ann. Sci. For.* 49: 225-233.
- Coners H. (2001):** Wasseraufnahme und artspezifische hydraulische Eigenschaften der Feinwurzeln von Buche, Eiche und Fichte: *In situ*-Messungen an Altbäumen. Diss. Univ. Göttingen, 118 S.
- Dauzat J., Rapidel B. (1998):** Modélisation du fonctionnement hydrique des plantes. Application au calcul de la transpiration du caféier. In: *Architecture et modélisation en arboriculture fruitière. 11ème colloque sur les recherches fruitières, Montpellier, France 5-6/03/1998.* INRA-Ctifl; 253-262 pp.
- Den Dulk, J.A. (1989):** The interpretation of remote sensing, a feasibility study. *Doctoral Thesis*, Wageningen.
- Dixon H.H. (1914):** Transpiration and the ascent of sap in plants. MacMillan, London.
- Edwards W.R.N., Jarvis P.G. (1982):** Relations between water contents, potential and permeability in stems of conifers. *Plant Cell Environ.* 5: 271-277.
- Feddes R.A., Bresler E., Neuman S.P. (1974):** Field test of modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Resour. Res.* 10, 1199-1206.
- Früh T. (1995):** Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung des Wasserflusses in der verzweigten Baumarchitektur. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme d. Univ. Göttingen, Reihe A, Bd. 131.
- Früh T., Kurth W. (1999):** The hydraulic system of trees: theoretical framework und numerical simulation. *J. theor. Biol.* 201: 251-270.
- Grace J. (ed.) (1983):** Plant-atmosphere relationships. In: *Outline studies in ecology.* Chapman and Hall: London, New York.

- Hertel D. (1999):** Das Feinwurzelsystem von Rein- und Mischbeständen der Rotbuche: Struktur, Dynamik und interspezifische Konkurrenz. Diss. Univ. Göttingen, Gebr. Borntraeger-Verlag, Berlin, 190 S.
- Jarvis P.G. (1975):** Water transfer in plants. In: De Vries D.A., Afgan N.H. (eds.): Heat and mass transfer in the biosphere. John Wiley & Sons, New York.
- Jarvis P.G. (1976):** The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 273: 593-610.
- Klute A., Peters D.B. (1969):** Water uptake and root growth. In: Whittington W.J. (ed.): Root Growth. Proceedings of the fifteenth Easter School in Agricultural Science, University of Nottingham. Butterworth, London.
- Kurth W. (1994):** Growth Grammar Interpreter GROGRA 2.4. A software tool for the 3-dimensional interpretation of stochastic, sensitive growth grammars in the context of plant modelling. Introduction and Reference Manual. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme d. Univ. Göttingen, Reihe B, Bd. 38.
- Kurth W., Anzola G. (1997):** Triebwachstum und Verzweigung junger Fichten in Abhängigkeit von den beiden Einflußgrößen "Beschattung" und "Wuchsdichte": Datenaufbereitung und -analyse mit GROGRA. Pelz D.R. (Hrsg.), Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, 10. Tagung, Freiburg i. Br., 24. - 26. 9. 1997. Ljubljana, Biotechnische Fakultät, 89-108.
- Kurth W. (1999):** Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken. Wissenschaftlicher Verlag, Berlin, pp 327.
- Landsberg J.J. (1977):** Some useful equations for biological studies. Expl. Agric. 13: 273-286.
- Landsberg J.J., Fowkes N.D. (1978):** Water movement through plant roots. Ann. Bot. 42: 493-508.
- Leuschner Ch. (1993):** Patterns of soil water depletion under coexisting oak and beech trees in a mixed stand. Phytocoenologia 23: 19-33.
- Leuschner Ch. (1994):** Walddynamik in der Lüneburger Heide: Ursachen, Mechanismen und die Rolle der Ressourcen. Habilitationsschrift zur Erlangung der Lehrberechtigung an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- Rapidel B. (1995):** Etude expérimental et simulation des transferts hydriques dans les plantes individuelles. Application au caféier (*Coffea arabica* L.). Thèse de doctorat, Université de Montpellier.
- Schäfer K.V.R., Oren R., Tenhunen J.D. (2000):** The effect of tree height on crown level stomatal conductance. Plant, Cell Environment 23: 365-375.
- Schulte M. (1993):** Saisonale und interannuelle Variabilität des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) – Bestimmung von C-Bilanzen mit Hilfe eines empirischen Modells. Diss. Univ. Göttingen. Reihe Biologie, Verlag Shaker, Aachen: 164 S.
- Schlichter T.M. (1980):** Die Entwicklung eines Simulationsmodells für den Wasserhaushalt in einem Buchenbestand im Hochsolling. Diss. Univ. Göttingen.
- Sperry J.S., Donnelly J.R., Tyree M.T. (1988):** A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. Plant Cell Environ. 11: 35-40.
- Sperry J., Stiller V., Hacke U. (2002):** Soil water uptake and water transport through root systems. In: Waisel Y., Eshel A., Kafkafi U. (eds.): Plant Roots: The hidden half. Decker, New York, 3<sup>rd</sup> edition.

- Tyree M.T., Graham Med, Cooper Ke, Bazos L.J. (1983):** The hydraulic architecture of *Thuja occidentalis*. Can. J. Bot. 61: 2105-2111.
- Tyree M.T. (1988):** A dynamic model for water flow in a single tree: evidence that models must account for hydraulic architecture. Tree Physiol. 4: 195-217.
- Tyree M.T., Yang S. (1990):** Water storage capacity of *Thuja*, *Tsuga* and *Acer* stems measured by dehydration isotherms. Planta 182: 420-426.
- Yang S., Liu X., Tyree M.T. (1998):** A model of stomatal conductance in Sugar Maple (*Acer saccharum* Marsh). J. theor. Biol. 191: 197-211.
- Weatherley P.E. (1970):** Some aspects of water relation. Adv. Bot. Res. 3: 171-206.
- Whitehead D. (1998):** Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies. Tree Physiol. 18: 633-644.
- Willert v., D.J., Matyssek R., Herppich W. (1995):** Experimentelle Pflanzenökologie - Grundlagen und Anwendungen -. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 344 pp.
- Wirtz K.W. (1997):** Modellierung von Anpassungsvorgängen in der belebten Natur. Diss. im Fachber. Physik der Univ. Kassel.
- Zimmermann M.H. (ed.) (1983):** Xylem structure and the ascent of sap. Springer Verlag, Berlin: 143 pp.



## Verwendete Symbole und Abkürzungen

AMAP	<i>Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes</i> , software-System zur Pflanzenmodellierung am CIRAD (France)	
$C_{\text{leaf}}$	Hydraulische Kapazität der Blätter	[kg m <sup>-2</sup> MPa <sup>-1</sup> ]
$C_{\text{wood}}$	Hydraulische Kapazität der Sproßachsen	[kg dm <sup>-3</sup> MPa <sup>-1</sup> ]
D	Durchmesser	[cm]
DISC	<i>Discretisation tool</i> (Diskretisierungs-Programm)	
$\Delta w$	<i>air to leaf water vapour pressure deficit</i> , Wasserdampf-Partialdruckdifferenz zwischen dem Blattinneren und der umgebenden Luft (atmosphärischer Antrieb der Transpiration)	[Pa kPa <sup>-1</sup> ]
g	Schwerebeschleunigung	[m s <sup>-2</sup> ]
$g_{\text{H}_2\text{O}}$	Blatt-Leitfähigkeit für Wasserdampf	[mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$g_{\text{max}}$	Maximale Blatt-Leitfähigkeit für Wasserdampf	[mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$g_{\text{min}}$	Minimale Blatt-Leitfähigkeit für Wasserdampf	[mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
GROGRA	<i>Growth Grammar Interpreter</i> , Computerprogramm zur Umsetzung von Wachstumsgrammatiken in dreidimensionale Verzweigungsstrukturen	
$h_{\text{leaf}}$	Insertionshöhe eines Blattes über Grund	[m]
$h_{\text{tree}}$	maximale Baumhöhe	[m]
$J_{\text{H}_2\text{O}}$	Transpirationsflußdichte, Transpirationsrate	[kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ] [mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
k	Transmissionskonstante	[ - ]
$K_m$	Längennormierte axiale hydraulische Leitfähigkeit	[kg m s <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ] [mmol m s <sup>-1</sup> MPa <sup>-1</sup> ]
LA	<i>leaf area</i> , (versorgte) Blattfläche	[m <sup>2</sup> ]
<i>#node</i>	Knotennummer in der Baumkarte ( <i>map file</i> ). Der Knoten repräsentiert das darunterliegende Segment.	[n]
( $-\pi$ )	Osmotisches Potential (hier vernachlässigt)	[MPa]
P	Druckkomponente des Wasserpotentials	[MPa]
PPFD	<i>Photosynthetic Photon Flux Density</i> , photosynthetisch wirksame Quantenflußdichte ( $\lambda = 400 - 700$ nm)	[ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
PPFD <sub>trans</sub>	Transmittierte, höhenabhängige PPFD	[ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
$\theta$	Wassergehalt	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	Dichte von Wasser	[kg m <sup>-3</sup> ]
RLC	<i>Relative Loss of Conductivity</i> , relativer Leitfähigkeitsverlust, z.B. durch Kavitationen (Embolien)	[ - ]
SPAC	<i>Soil-Plant-Atmosphere Continuum</i>	
$T_{\text{air}}, T_{\text{leaf}}$	Luft- bzw. Blatt-Temperatur	[°C]
$T_{\text{min}}, T_{\text{max}}$	Minimale, Maximale Blatt-Temperatur	[°C]
$T_{\text{xylem}}$	Xylem-Temperatur	[°C]
( $-\tau$ )	Matrixpotential (hier vernachlässigt)	[MPa]
$\Psi_{\text{leaf}}$	Blatt-Wasserpotential	[MPa]
$\Psi_{\text{xylem}}$	Xylem-Wasserpotential	[MPa]
$\Psi_{\text{soil}}$	Bodenwasserpotential	[MPa]
z	Höhe über Referenzniveau	[m]

## Anhang [1]: Basisgleichungen von HYDRA

(1) **Wasserpotential:**  $\Psi = P + \rho_{H_2O} g z (-\pi^*) (-\tau^*)$  [Pa]

P = hydrostatischer Druck [Pa],  $\rho_{H_2O}$  = Dichte von Wasser [ $\text{kg m}^{-3}$ ], g = Schwerebeschleunigung [ $\text{m s}^{-2}$ ], z = Höhe über Referenzniveau [m],  $\pi^*$  = osmotisches Potential [Pa],  $\tau^*$  = Matrixpotential [Pa]

(2) **Darcy-Gleichung:**  $F = K_m (\partial\Psi / \partial x)$  [ $\text{kg s}^{-1}$ ]

F = Massenfluss [ $\text{kg s}^{-1}$ ],  $K_m$  = längennormierte hydraulische Leitfähigkeit [ $\text{kg m s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$ ], x = Weglänge [m]. (Voraussetzungen: laminare Strömung, homogene und inkompressible Flüssigkeit, homogenes poröses Medium, keine Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit und porösem Medium).

(3) **Verwundbarkeitskurven:**  $f(P(t)) = 1 - [K(P(t)) / (K(0))]$  [-]

$f(P(t))$  = *specific cavitation function* [-]

$K(0)$  = Maximale hydraulische Leitfähigkeit zum Zeitpunkt (0)

$K(P(t))$  = Hydraulische Leitfähigkeit zum Zeitpunkt  $t > 0$

(4) **Hydraulische Kapazität:**  $c(P) = (\partial\theta / \partial\Psi)$  [ $\text{kg m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$ ]

P =  $(\Psi - \rho_{H_2O} g z)$  [Pa],  $\partial\theta$  = Änderung des Wassergehaltes [ $\text{kg dm}^{-3}$ ],  $\partial\Psi$  = Änderung des Wasserpotentials [Pa]

(5) **Massenerhaltung:**  $\partial f / \partial x = -\partial\theta / \partial t$  [ $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]

$\partial f$  = differentielle Änderung der Massenflussdichte [ $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ],  $\partial t$  = differentieller Zeitschritt [s]

Die Kombination der Gleichungen (1) bis (5) führt zu einer nichtlinearen Diffusionsgleichung, die einen speziellen Typ der „Richards“-Gleichung darstellt:

(6)  $\partial / \partial x [K(x, P) (\partial\Psi / \partial x)] = c(x, P) (\partial\Psi / \partial t) + E(t) LA(x)$

$E(t)$  = Transpirations-Flussdichte [ $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ] (*sink term*)

$LA(x)$  = Lokale Blattfläche [ $\text{m}^{-2} \text{m}^{-3}$ ].

- Die numerische Berechnungsweise beruht auf den Prinzipien von:
  - Darcy-Gesetz und seinen Voraussetzungen (siehe oben)
  - Räumliche Homogenität von Kapazität und axialer Leitfähigkeit
  - Massenerhaltung
  - Berücksichtigung von Kavitationsereignissen.
- Die empirisch bestimmte maximale hydraulische Leitfähigkeit (K oder  $K_m$ ) der Achsenelemente wird nach der Leitfähigkeits-Durchmesser-Beziehung  $K = a D^b$  berechnet.  
D = Achsendurchmesser [m], a und b sind Konstanten.
- Die maximale hydraulische Leitfähigkeit (K oder  $K_m$ ) der Blattstiele wird nach der Beziehung  $K = a LA^b$  berechnet. LA = Blattfläche [ $\text{m}^2$ ], a und b sind Konstanten.
- Die Transpirations-Flußdichte ( $E(t)$ ) der Blätter wird mit einem Leitfähigkeitsmodell in Abhängigkeit von Strahlung, Blatt-Temperatur, Luftfeuchte und Blattwasserpotential bestimmt.

(für weitere Details siehe Früh 1995 und Früh & Kurth 1999)

## Anhang [2]: Repräsentation mit GROGRA und AMAP



Abb. A1: Foto des Baumes *ejk*



Abb. A2: Foto des Baumes *ejf*



Abb. A3-A4: Repräsentation der Bäume *ejk*, *ejf* mit GROGRA



Abb. A5 - A6: Repräsentation der Bäume *ejk*, *ejf* mit AMAP