

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse  
**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein  
**Band:** 146 (1995)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Reduktion der Wasseraufnahme von Fichten bei Trockenheit  
**Autor:** Stadler, Daniel / Käppeli, Thomas / Leuenberger, Jörg  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-766962>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 17.01.2026

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

# Reduktion der Wasseraufnahme von Fichten bei Trockenheit

Von Daniel Stadler, Thomas Käppeli, Jörg Leuenberger, Bernhard Buchter  
und Hannes Flühler

*Keywords:* root water uptake, drought stress, soil water balance, lysimeter, *Picea*.

FDK 116: 161.11: 174.7 Picea

## 1. Einleitung

Mit zunehmender Austrocknung eines Bodens nehmen die Baumwurzeln immer weniger Wasser auf. Als Folge wird die Evapotranspiration reduziert, was in Abhängigkeit von Dauer und Stärke der Trockenheit von einer reversiblen Beeinträchtigung bis hin zum Absterben der ganzen Pflanze führen kann.

Die maximal mögliche Evapotranspiration wird von den atmosphärischen Bedingungen wie Temperatur, Wasserdampfsättigungsdefizit und Windgeschwindigkeit bestimmt. Diese potentielle Evapotranspiration wird nur erreicht, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind: optimales Wasserangebot, gute Temperatur- und Durchlüftungsverhältnisse im Boden und keine Erkrankung der Pflanze (*Lascano* und *van Bavel*, 1984). Bei vorgegebenen klimatischen Bedingungen ist die potentielle Evapotranspiration von der Pflanzenart abhängig.

Sowohl die Messung der Evapotranspiration eines Einzelbaumes oder eines Bestandes als auch die Bestimmung der dabei vorhandenen Umweltbedingungen erweisen sich als schwierig. Die Messung des Wasserverbrauchs erfolgt entweder im ober- oder unterirdischen Kompartiment. Eine detaillierte Diskussion der Methoden geben verschiedene Autoren in *Lassoie* und *Hinckley* (1991).

Oberirdisch kann die Evapotranspiration mittels Gaswechselküvetten, Stammdurchflussmessungen oder bioklimatologischen Ansätzen (*Spittlehouse* und *Black*, 1981) erfasst werden. Bei den Messungen im Boden wird versucht, die Wasseraufnahme durch die Wurzeln zu bestimmen. Dazu können unter anderem Tracer und die Bodenwasserbilanzmethode verwendet werden.

Mit der Bodenwasserbilanzmethode, die auch in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, kann die Evapotranspiration (ET) wie folgt berechnet werden:

$$ET = N - TS - \Delta W, \quad (1)$$

wobei  $N$  das durch die Bodenoberfläche infiltrierte Wasser,  $TS$  die Tiefsickerung und  $\Delta W$  die Wasservorratsänderung im Boden bedeuten. In Gleichung (1) wird angenommen, dass Wasservorratsänderungen in den Pflanzen vernachlässigbar sind.

Problematisch ist die Bestimmung der Tiefsickerung und der Wasservorratsänderung im offenen System Boden. Diese Grössen können nur mit einem wägbaren Lysimeter, bei dem der Ausfluss aufgefangen wird, einfach bestimmt werden. Bei grossen, nicht wägbaren Lysimetern, die auch in unserer Untersuchung eingesetzt wurden, muss die Vorratsänderung des Bodenwassers mit Neutronen-, Gamma- oder TDR-Sonden (*time domain reflectometry*) gemessen werden.

Die zunehmende Drosselung der ET mit zunehmender Austrocknung wird in vielen Wasserhaushaltsmodellen als Stressfunktion parametrisiert. Dabei wird das Verhältnis der aktuellen zur potentiellen ET als Funktion des Matrixpotentials ausgedrückt. Dieses gibt die Intensität an, mit welcher das Bodenwasser an die Festsubstanz gebunden wird, und beschreibt damit die Energie, die für den Entzug dieses Wassers durch die Wurzeln nötig ist. *Denmead* und *Shaw* (1962) zeigten, dass die Drosselung der ET mit zunehmender potentieller ET grösser wird. Bedingt durch die Vielfalt der Bedingungen, unter denen ET-Raten bestimmt wurden, findet sich in der Literatur ein breites Spektrum von Stressfunktionen. Die Erfahrungswerte lassen also nur eine schlechte Schätzung der entsprechenden Parameter zu. Für die Modellierung erweist sich die ungenau definierte Stressfunktion aber als ausgesprochen empfindlicher Term. Dies ist die Ausgangslage der hier beschriebenen Experimente.

## 2. Lysimeteranlage

Die Untersuchungen wurden in der Grosslysimeteranlage von Sellenbüren in der Nähe von Zürich durchgeführt. Sie liegt auf 525 m ü. M. am Fusse eines nordostexponierten Hanges. Die Anlage besteht aus vier Lysimetern, die einen Durchmesser von 10 m und eine Tiefe von 2,1 m aufweisen. Gebaut wurden diese Betonbecken 1970. Sie wurden mit Material der sandigen E- und Bt-Horizonte der sauren Parabraunerde der Lokalform Winzlerboden (*Richard* und *Lüscher*, 1983) schichtweise aufgefüllt und verdichtet. 1986 wurden alle Lysimeter mit 4- bis 5jährigen Fichten bei einer Dichte von 2,1 Bäumen pro m<sup>2</sup> neu bepflanzt.

Detailliertere Angaben zur Anlage und vorherigen Bepflanzung finden sich in *Käppeli* und *Schulin* (1988). *Buchter* und *Leuenberger* (1995) interpretieren die Ausflussdaten der Lysimeter zwischen 1991 und 1993 unter natürlichen klimatischen Verhältnissen.

Für die Experimente während den Vegetationsperioden 1989 und 1990 wurden drei Lysimeter mit Giebelzelten abgedeckt, die an den Stirnflächen offen waren. Für die kontrollierte Bewässerung (N) wurden einige Zentimeter unter der Bodenoberfläche perforierte Schläuche eingelegt, die eine räumlich homogene Infiltration gewährleisten sollten. Seit dem Ende des Stressversuches 2 traf dies für das Lysimeter 2 nicht mehr zu, da seither der dem Wasserzulauf entfernter gelegene Bodenraum stärker austrocknete als der näher gelegene. Der Ausfluss aus den Lysimetern (TS) wurde mit Wippen mit einem Messvolumen von 0,1 Liter automatisch registriert.

In den Lysimetern 1 bis 3 wurden Tensiometer zur Bestimmung der Bodenwasserpotentiale und 30 cm lange TDR-Sonden (*Roth et al.*, 1990) zur Ermittlung der Wassergehalte eingesetzt. Pro Lysimeter waren je 3 Tensiometer und 3 TDR-Sonden in den Tiefen 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 105 und 135 cm, und ab dem Stressversuch 3 zusätzlich je 9 Tensiometer und 9 TDR-Sonden in 10, 20, 30 und 40 cm Tiefe installiert. Die vollständige Instrumentierung umfasste somit 63 Tensiometer und 63 TDR-Sonden pro Lysimeter. Die 54 TDR-Sonden zwischen 10 und 60 cm waren horizontal, alle übrigen Instrumente vertikal eingebaut.

Zusätzlich wurden die Bodentemperaturen in 5 und 60 cm Tiefe und die Lufttemperatur in 130 cm Höhe über Boden gemessen.

### 3. Experimente

Zur Bestimmung der Reduktion der Wurzelwasseraufnahme wurden 1989 und 1990 folgende Versuche durchgeführt:

*Parallelversuch 1 (PV 1)*: 26. Juni bis 24. Juli 1989. Die Wasserversorgung im Wurzelraum der Fichten in den Lysimetern 2 und 3 wurde so reguliert, dass eine maximale Evapotranspiration resultierte. Damit wurden die Unterschiede der ET zwischen den Fichtenbeständen bei gleichem, optimalem Wasserangebot bestimmt.

*Trockenstressversuch 1 (SV 1)*: 24. Juli bis 18. August 1989. Im Lysimeter 2 wurde die Bewässerung eingestellt, während sie im Lysimeter 3 weiterhin erfolgte.

*Parallelversuch 2 (PV 2)*: 30. April bis 5. Juni 1990. Analoge Versuchsanordnung wie im Parallelversuch 1, jedoch mit den Lysimetern 1, 2 und 3.

*Trockenstressversuch 2 (SV 2)*: 7. Juni bis 16. Juli 1990. Zu Beginn wurden alle Lysimeter durch Anheben des Auslaufrohres und damit des Wasserspie-

gels aufgesättigt. Anschliessend wurde die Bewässerung der Lysimeter 1 und 3 eingestellt, während sie im Lysimeter 2 weiterhin erfolgte. Weil durch die schnelle Absenkung des Wasserspiegels zu Beginn des Versuches die hohen Ausflussraten mit den Wippen nicht gemessen werden konnten, beginnen die Wasserbilanzen erst am 11. Juni 1990.

*Trockenstressversuch 3 (SV 3):* 16. Juli bis 24. September 1990. Das Lysimeter 2 wurde weiterhin mit grosser und die Lysimeter 1 und 3 wieder mit geringer Intensität bewässert.

Ausser zu Beginn des Stressversuches 2 wurde während allen Versuchszyklen der Wasserspiegel konstant auf einer Tiefe von 180 cm gehalten.

#### 4. Wasserhaushalt 1990

In *Tabelle 1* sind die Terme der Wasserbilanzgleichung (1) für die einzelnen Versuche angegeben. Der Stressversuch 3 wurde vor und nach dem 20. August in zwei Perioden zu je 5 Wochen unterteilt.

*Tabelle 1.* Wasserbilanzen der Lysimeter 1 bis 3 für den Parallelversuch 2 (PV 2) und die Stressversuche 2 (SV 2) und 3 (SV 3) im Jahre 1990. *N* bezeichnet die Bewässerung, *TS* die Tiefensickerung,  $\Delta W$  die Wasservorratsänderung und *ET* die Evapotranspiration. Alle Angaben in mm/d, gemittelt über die Versuchsdauer.

Versuch 1990	Dauer Tage	Lysimeter 1				Lysimeter 2				Lysimeter 3			
		<i>N</i>	<i>TS</i>	$\Delta W$	<i>ET</i>	<i>N</i>	<i>TS</i>	$\Delta W$	<i>ET</i>	<i>N</i>	<i>TS</i>	$\Delta W$	<i>ET</i>
PV 2	36	1,48	0,81	-0,50	1,17	2,89	1,25	-0,11	1,75	2,03	0,94	-0,92	2,01
SV 2	35	0,00	0,49	-2,15	1,66	3,38	1,54	-0,43	2,27	0,00	0,89	-2,11	1,22
SV 3-1	35	1,29	0,03	-0,43	1,69	3,35	0,66	-0,31	3,00	1,00	0,11	-1,28	2,17
SV 3-2	35	1,71	0,00	0,06	1,65	2,79	0,94	0,17	1,68	1,54	0,00	-0,20	1,74
Mittel	141	1,12	0,33	-0,75	1,54	3,10	1,10	-0,17	2,17	1,15	0,49	-1,13	1,79

##### 4.1 Bewässerung und Tiefensickerung

*Abbildung 1* zeigt die Bewässerungs- und Tiefensickerungsraten. Während der ganzen Versuchsdauer betrug die mittlere, tägliche Bewässerung des Lysimeters 2 3,1 mm/d, während Lysimeter 1 und 3 mit durchschnittlich nur 1,1 mm/d bewässert wurden. Im Stressversuch 2 erhielten die Lysimeter 1 und 3 kein Wasser und im Stressversuch 3 etwa die Hälfte des Lysimeters 2.

Während des Parallelversuches 2 betrugen die Tiefensickerungsmengen zwischen 43 und 55 % der Bewässerungsmengen. Beim Stressversuch 2 reduzierten sich die Tiefensickerungsraten der Lysimeter 1 und 3 auf etwa 1/8 bzw. 1/4 des Anfangswertes (*Abbildung 1*).

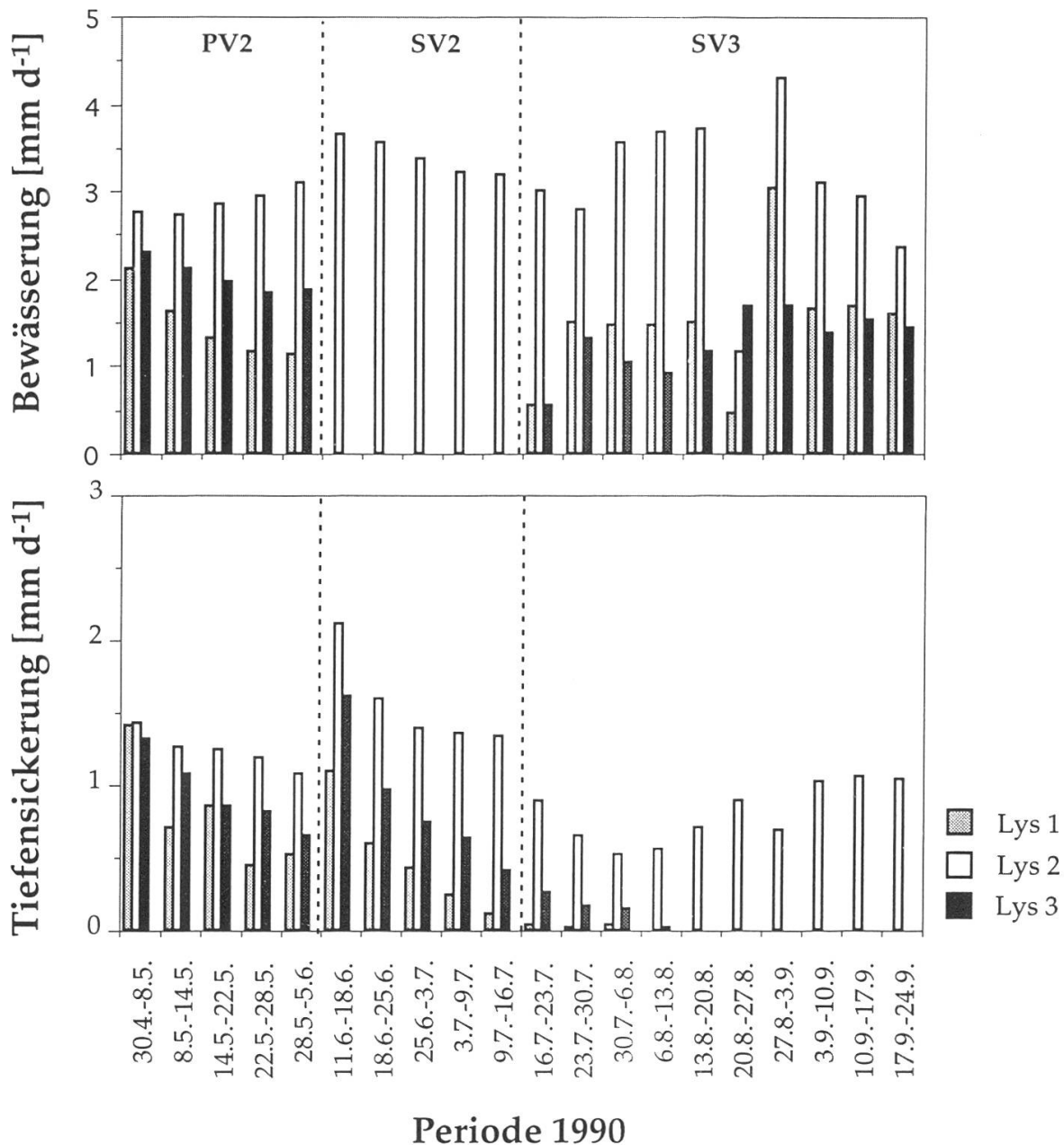


Abbildung 1. Bewässerungs- und Tiefensickerungsraten während des Parallelversuches 2 (PV 2) und der Stressversuche 2 und 3 (SV 2 und SV 3) 1990. Die Balken geben die über 6- bis 8tägige Perioden gemittelten Werte an.

Vor allem in der ersten Hälfte des Stressversuches 3 hat auch die Tiefensickerung des Lysimeters 2 infolge zu knapper Bewässerung abgenommen, stieg aber in der zweiten Hälfte wieder an. In den austrocknenden Lysimetern nahm die Tiefensickerung trotz der wieder aufgenommenen Bewässerung weiterhin ab und versiegte gegen Ende der ersten Hälfte dieses Stressexperimentes völlig.

## 4.2 Wasservorratsänderungen

Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wassergehalte und Matrixpotentiale in den einzelnen Lysimetern.

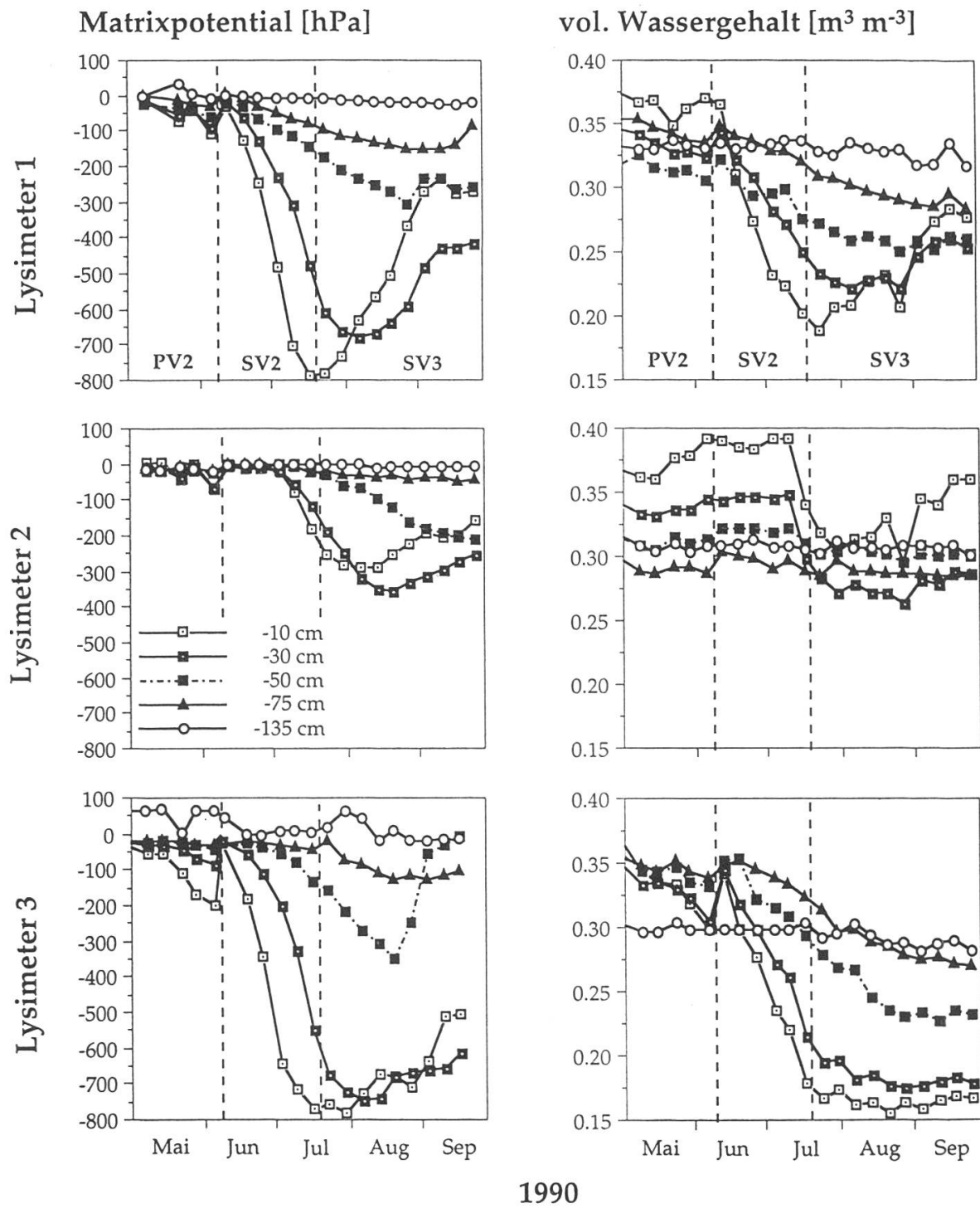


Abbildung 2. Zeitlicher Verlauf der Matrixpotentiale und Wassergehalte während des Parallelversuchs 2 (PV 2) und der Stressversuche 2 und 3 (SV 2 und SV 3) 1990.



Die volumetrischen Wassergehalte waren selbst unterhalb des angegebenen Wasserspiegels stets kleiner als 0,4. Die im Labor ermittelten Porositäten des natürlich gelagerten Bodens betragen zwischen 0,46 und 0,57 (*Richard und Lüscher, 1983*). Dieser Unterschied beruht einerseits auf der Verdichtung der Lysimeterböden und andererseits auf der Tatsache, dass ein Feldeboden bei Sättigung immer einen Anteil an eingeschlossener Luft aufweist.

Die Abnahmen der Wasservorräte der Lysimeter 1 und 3 waren während des Stressversuches 2 mit 2,1 mm/d beträchtlich (*Tabelle 1*). Im folgenden Versuch war nur noch die Abnahme im Lysimeter 3 markant.

In den Lysimetern 1 und 3 erfolgte während des Stressversuches 2 eine schnelle Wassergehaltsabnahme, wobei diese mit zunehmender Tiefe weniger ausgeprägt und zeitlich verzögert war. Diese Verteilung ergibt sich infolge der erhöhten Wasseraufnahme der Wurzeln in den obersten 40 cm und der grösseren hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens. Ein analoges Bild zeigen die Matrixpotentiale. Die Zweischichtigkeit der Bodenprofile wurde auch bei der Installation der Messgeräte festgestellt, wo unterhalb von etwa 40 cm nur noch wenige Wurzeln gefunden wurden.

Mit der wieder aufgenommenen Bewässerung im Stressversuch 3 stiegen die Wassergehalte bis in eine Tiefe von 50 cm wieder an, jedoch mit starker zeitlicher Verzögerung in grösseren Tiefen, wo sie zuerst noch weiter absanken. In 135 cm Tiefe wurden während der ganzen Versuchsdauer nahezu stabile Feuchtigkeitsverhältnisse festgestellt. Im Gegensatz zum Lysimeter 3 stiegen im Oberboden des Lysimeters 1 während des Stressversuches 3 die Matrixpotentiale und Wassergehalte wieder stärker an. Der Unterschied könnte auf eine höhere Wasseraufnahme im Lysimeter 3 zurückzuführen sein.

Als Folge der bereits erwähnten räumlich inhomogenen Bewässerung begannen auch im Lysimeter 2 gegen Ende des Stressversuches 2 die Matrixpotentiale und Wassergehalte bis in eine Tiefe von 50 cm abzusinken. In der Mitte des Stressversuches 3 wurden die tiefsten Werte erreicht. Während dieser Phase zeigten auch die Tiefsickerungsraten minimale Werte (*Abbildung 1*). Offensichtlich war die Bewässerung zu gering, um die in dieser Zeit starke Evapotranspiration bei gleichbleibenden Bodenwassergehalten zu gewährleisten.

Zu Beginn des Stressversuches 3 wurde in den austrocknenden Lysimetern bei einzelnen Tensiometern der Messbereich von etwa  $-800$  hPa unterschritten. Die dort vorgekommenen tatsächlichen Potentiale waren somit noch tiefer.

#### 4.3 Evapotranspiration

Aus der Wasserbilanzgleichung (1) lässt sich bei bekannter Wasservorratsänderung, Bewässerungs- und Tiefsickerungsmenge die tägliche Evapotranspiration berechnen (*Tabelle 1* und *Abbildung 3*).



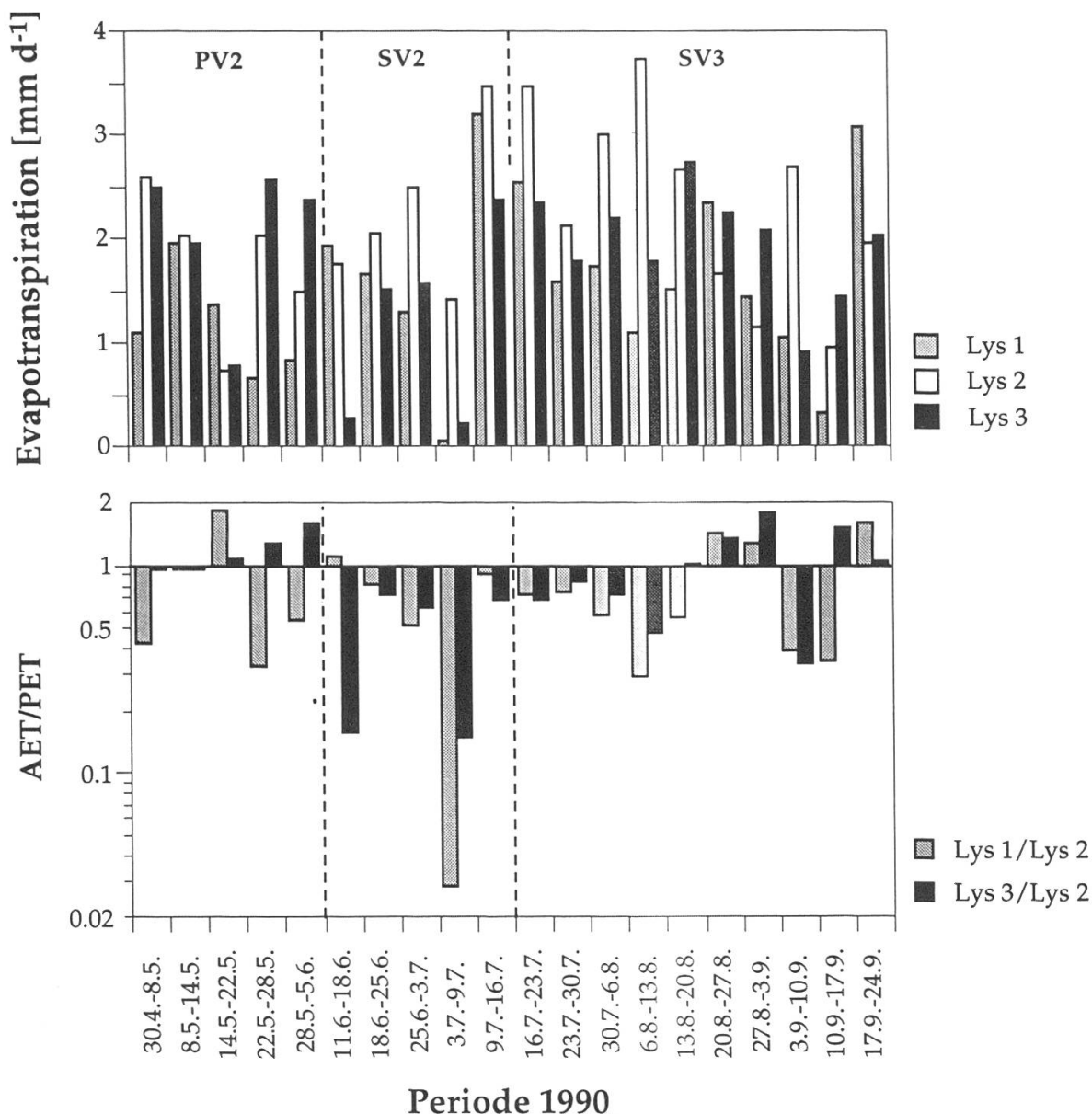


Abbildung 3. Oben: Berechnete Evapotranspirationsraten während des Parallelversuches 2 (PV 2) und der Stressversuche 2 und 3 (SV 2 und SV 3) 1990. Unten: Quotienten der ET-Raten der gestressten Fichten (AET, Lysimeter 1 und 3) zu den ungestressten Fichten (PET, Lysimeter 2). Die Balken geben die über 6- bis 8tägige Perioden gemittelten Werte an.

Die mittlere, tägliche Evapotranspirationsrate der bilanzierten 141 Tage betrug 1,54 mm/d für die Fichten im Lysimeter 1, 2,17 mm/d im Lysimeter 2 und 1,79 mm/d im Lysimeter 3. Daraus ergeben sich ET-Summen zwischen 236 und 332 mm für die Zeitspanne von Mai bis September 1990.

Obschon die Potentiale und Wassergehalte in allen drei Lysimetern während des Parallelversuches 2 vergleichbar waren, wichen die ET-Raten beträchtlich voneinander ab. Verglichen mit den ET-Raten von 1,75 und 2,01 mm/d der Lysimeter 2 und 3, muss der Wert von 1,17 mm/d des Lysimeters 1 bezweifelt werden. Während der folgenden Stressversuche waren die ET-Raten der austrocknenden Lysimeter 1 und 3 einigermassen vergleichbar.

Die aus Wochenbilanzen ermittelten Evapotranspirationsraten der Fichten des stets bewässerten Lysimeters 2 lagen zwischen 0,7 und 3,7 mm/d (*Abbildung 3*). Sie wiesen eine grosse negative Korrelation mit den Tiefsickerungsraten auf. Die ET der Lysimeter 1 und 3 betrug zwischen 0,1 und 3,2 bzw. 0,2 und 2,7 mm/d.

In *Abbildung 3* sind zusätzlich die Quotienten der Evapotranspirationsraten der gestressten zu den ungestressten Fichten dargestellt. Angenähert können diese Werte als Verhältnis der aktuellen (AET) zur potentiellen Evapotranspiration (PET) betrachtet werden, da die Umweltbedingungen der drei Fichtenbestände, abgesehen vom experimentell veränderten Bodenwasserhaushalt, sehr ähnlich waren. Mit der Bezeichnung AET/PET-Quotient nehmen wir an, dass die Fichten im Lysimeter 2 stets maximal transpirieren konnten, was für den Stressversuch 2 vermutlich zutrifft. Für den Stressversuch 3 wird dieser Quotient überschätzt, weil die Bezugsgrösse (PET) infolge Austrocknung des Lysimeters 2 zu gering ist.

Die AET/PET-Quotienten lagen zwischen 0,03 und 1,9. Diese grosse Streuung ist ein Indiz dafür, dass die Instrumentierung für exakte wöchentliche Wasserbilanzen unzureichend war. Trotzdem ist wenigstens andeutungsweise eine reduzierte Wasseraufnahme während der Trockenphase auszumachen.

Ein klareres Bild resultiert aus den Quotienten, die aus den ET-Raten der 5wöchigen Versuche berechnet wurden (*Tabelle 1*). Dabei liegen alle AET/PET-Quotienten des Stressversuches 2 und der ersten Hälfte des Stressversuches 3 zwischen 0,54 und 0,73. Das heisst, dass in der mittleren Versuchsphase die gestressten Fichten zwischen 54 und 73 % der Wassermenge transpirierten, welche der optimal bewässerte Bestand verbrauchte. In der zweiten Hälfte des Stressversuches 3 transpirierten alle drei Bestände etwa gleich viel.

## 5. Wasserhaushalt 1989

Die Ergebnisse 1990 zeigten, dass die aus wöchentlichen Wasserbilanzen ermittelten ET-Raten stark streuten. Deshalb werden für 1989 nur Bilanzen diskutiert, die für die ganze Dauer der Versuche berechnet wurden (*Tabelle 2*).

*Tabelle 2.* Wasserbilanzen der Lysimeter 2 und 3 für den Parallelversuch 1 (PV 1) und den Stressversuch 1 (SV 1) im Jahre 1989. *N* bezeichnet die Bewässerung, *TS* die Tiefsickerung,  $\Delta W$  die Wasservorratsänderung und *ET* die Evapotranspiration. Alle Angaben in mm/d, gemittelt über die Versuchsdauer.

Versuch 1989	Dauer Tage	Lysimeter 2				Lysimeter 3			
		<i>N</i>	<i>TS</i>	$\Delta W$	<i>ET</i>	<i>N</i>	<i>TS</i>	$\Delta W$	<i>ET</i>
PV 1	28	3,00	1,50	-0,50	2,00	3,07	1,89	-0,64	1,82
SV 1	25	0,00	0,44	-1,56	1,12	2,76	1,12	0,28	1,36
Mittel	53	1,58	1,00	-1,00	1,58	2,92	1,53	-0,21	1,60

Während des Parallelversuches 1 wurden beide Lysimeter mit durchschnittlich etwa 3 mm/d bewässert. Die Tiefensickerung des Lysimeters 3 war etwas grösser als diejenige des Lysimeters 2. Während des Stressversuches 1 wurde Lysimeter 2 nicht und Lysimeter 3 leicht reduziert bewässert. Als Folge davon nahm die Tiefensickerung des Lysimeters 2 deutlich ab, und der Wasservorrat verringerte sich um 1,56 mm/d, wovon über 2/3 durch die Wurzeln aufgenommen wurden.

Die unterschiedliche Bewässerung während des Stressversuches 1 äusserte sich auch im zeitlichen Verlauf der Matrixpotentiale und Wassergehalte (Abbildung 4). Beide Lysimeter waren während des Parallelversuches 1 beinahe gesättigt. Während des Stressversuches 1 sanken die Matrixpotentiale im Lysimeter 2 schnell ab, wobei die Abnahme mit zunehmender Bodentiefe geringer war. Die Austrocknung des Oberbodens äusserte sich auch in der Abnahme der Wassergehalte. Im Lysimeter 3 blieben wegen der Bewässerung die Wassergehalte stabil.

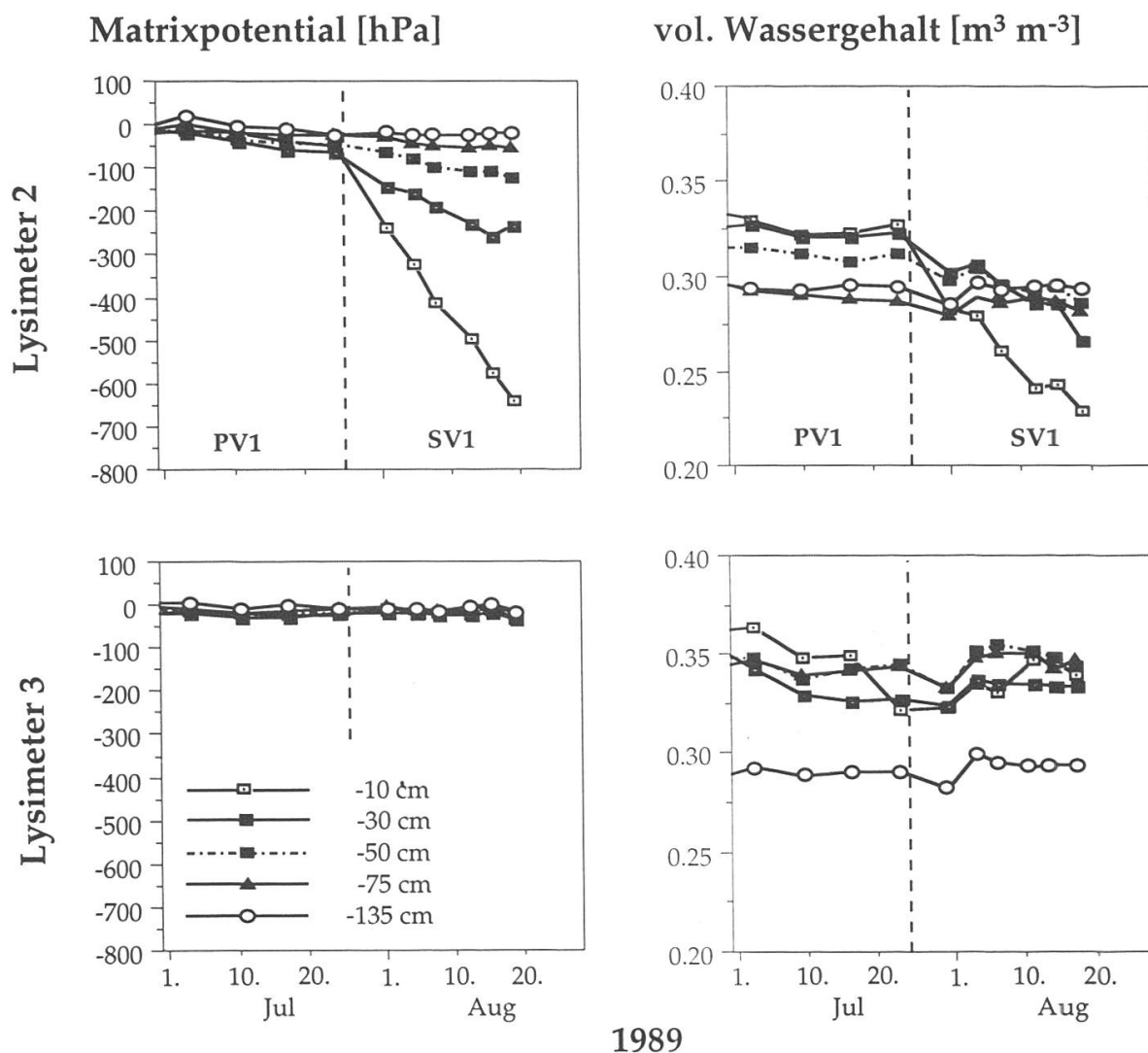


Abbildung 4. Zeitlicher Verlauf der Matrixpotentiale und Wassergehalte während des Parallelversuches 1 (PV 1) und des Stressversuches 1 (SV 1) 1989.

Während des Parallelversuches war die ET aus dem Lysimeter 2 mit 2 mm/d 10% grösser als diejenige aus dem Lysimeter 3. Während des Stressversuches betrug die Evapotranspiration aus dem austrocknenden Lysimeter 2 1,12 mm/d und aus dem bewässerten 1,36 mm/d. Die Reduktion der Evapotranspiration des gestressten Bestandes gegenüber dem ungestressten betrug 18%.

## 6. Signifikanz der berechneten Evapotranspirationsraten

Die Genauigkeit der Schätzung der berechneten Evapotranspiration wird durch die Messgenauigkeit der Grössen bestimmt, die in die Bilanzgleichung (1) eingehen. Es ist deshalb wichtig, den Fehler der abgeleiteten ET-Rate abzuschätzen, um beurteilen zu können, ob eine beobachtete Reduktion der ET der gestressten Fichten auch statistisch signifikant ist.

Ein möglicher Fehler wird einerseits aus der räumlichen Variabilität der Messgrösse und andererseits durch deren Messfehler bestimmt. Bei der Berechnung der ET-Raten mit der Bodenwasserbilanzgleichung (1) müssen die drei Grössen Bewässerung, Tiefensickerung und Wasservorratsänderung in Betracht gezogen werden. Die Bewässerungs- und Tiefensickerungsmengen konnten mit einer Genauigkeit von 1 Liter (0,012 mm) bzw. 0,1 Liter (0,001 mm) gemessen werden und fallen deshalb als Fehlerquellen ausser Betracht. Die Genauigkeit der berechneten ET-Rate ist deshalb alleine von der Genauigkeit der Bestimmung der Wasservorratsänderung abhängig.

Bei der Berechnung einer Wasservorratsänderung mit der TDR-Methode wirken sich vor allem Fehler bei der Bestimmung der Signallänge und der Temperatur aus. Für die Bestimmung des absoluten Wassergehaltes sind zusätzlich Fehler bei der Schätzung der Porosität und der Dielektrizitätszahl der Bodenmatrix zu berücksichtigen.

Eine fehlerhafte Bestimmung der Signallänge von 1 mm ergibt bei einer Porosität von 0,4 einen Fehler des Wassergehaltes von 0,64%, unabhängig von dessen absoluten Wert. Eine fehlerhafte Bestimmung der Temperatur von 1 °C wirkt sich auf den absoluten Wassergehalt mit 0,25% aus. Bei realistischen Messfehlern der Signallänge von  $\pm 1$  mm und der Temperatur von  $\pm 1$  °C summiert sich der Fehler somit auf  $\pm 0,89\%$ . Bei einer Profiltiefe von 1800 mm ergibt dies einen Schätzfehler des Wasservorrates von  $\pm 16$  mm. Werden 27 bzw. 63 Sonden (m) verwendet, ergibt sich unter der Annahme der Unabhängigkeit der Messfehler ein Standardfehler des gemittelten Wasservorrates von:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{m}} = \frac{16 \text{ mm}}{\sqrt{m}} = 3,07 \text{ bzw. } 2,02 \text{ mm.} \quad (2)$$

Bei der Bestimmung einer Wasservorratsänderung verdoppeln sich diese Fehler als Folge der Differenzenbildung. Sie sind von der Länge des Bilanzierungsintervalles unabhängig. Sie betragen zum Beispiel für 5wöchige Perioden 0,17 ( $m=27$ ) bzw. 0,12 mm/d ( $m=63$ ). Das Vertrauensintervall der ET-Rate berechnet sich aus:

$$\text{Vertrauensintervall} = \bar{x} \pm ts_{\bar{x}}, \quad (3)$$

wobei  $\bar{x}$  die mittlere ET-Rate und  $t$  die Quantile aus der t-Verteilung sind. Bei einem Signifikanzniveau von 95 % liegt der Vertrauensbereich für 5wöchige Perioden  $\pm 0,36$  ( $m=27$ ) bzw.  $\pm 0,23$  mm/d ( $m=63$ ) um  $\bar{x}$ .

Zur statistischen Untersuchung der räumlichen Variabilität der Wasservorratsänderungen wurden die Wasservorräte von 0–45 cm und von 45–180 cm getrennt untersucht. In der oberen Schicht befanden sich bis zum Stressversuch 2 3 Messprofile mit je 4 TDR-Sonden und für den Stressversuch 3 12 Messprofile mit je 4 TDR-Sonden untereinander. In der unteren Schicht waren konstant 3 Messprofile mit je 5 TDR-Sonden vorhanden.

Der Standardfehler  $s_{\bar{x}}$  wurde berechnet aus:

$$s_{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{s_o^2}{n_o} + \frac{s_u^2}{n_u}}}{d}, \quad (4)$$

wobei  $s^2$  die Varianz der Wasservorratsänderung der Messprofile,  $n$  die Anzahl der Messprofile, die Indizes  $o$  und  $u$  die obere und untere Schicht und  $d$  die Länge der Bilanzierungsperiode bedeuten. Die Korrelation der Wasservorratsänderungen in den Messprofilen oben und unten war vernachlässigbar und wurde deshalb nicht in die Berechnung miteinbezogen.

Das Vertrauensintervall wurde mit Gleichung (3) bestimmt, wobei die Anzahl Freiheitsgrade für die t-Verteilung mit folgender Annäherungsformel (Hartung, 1987, S. 510) ermittelt wurde:

$$v = \frac{(\frac{s_o^2}{n_o} + \frac{s_u^2}{n_u})^2}{(\frac{s_o^2}{n_o})^2/(n_o - 1) + (\frac{s_u^2}{n_u})^2/(n_u - 1)}. \quad (5)$$

Die 95 %-Vertrauensbereiche sind in *Abbildung 5* dargestellt. Sie liegen zwischen  $\pm 0,21$  und  $\pm 2,32$  mm/d um die berechneten mittleren ET-Raten. In diesen Bereichen sind die Messfehler bereits enthalten. Die räumliche Variabilität wurde offensichtlich mit der vorliegenden Instrumentierung nur ungenügend erfasst.

Nur während des Stressversuches 3–1 waren die ET-Raten der gestressten Fichten in den Lysimetern 1 und 3 gegenüber dem ungestressten Bestand in Lysimeter 2 signifikant kleiner. Obwohl die ET-Raten auch für die Stressver-

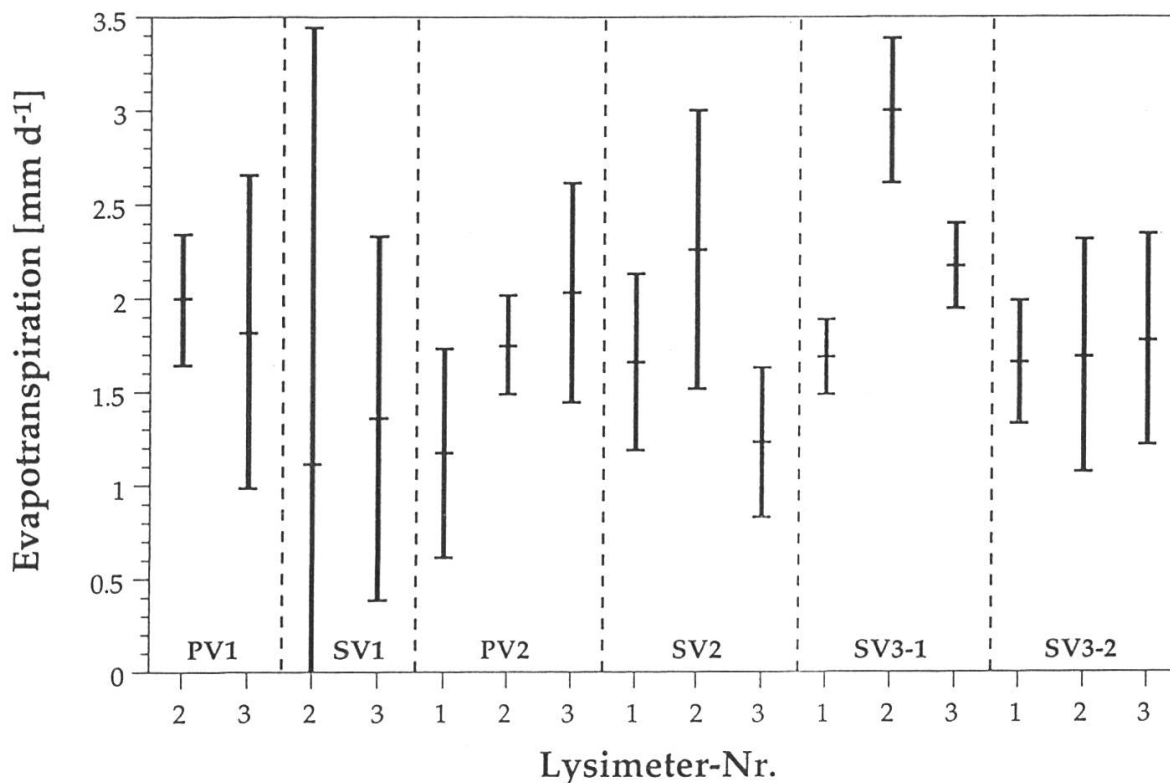


Abbildung 5. Berechnete ET-Raten und deren 95%-Vertrauensbereiche während der Parallel- (PV) und Stressversuche (SV) 1989 und 1990.

suche 1 und 2 auf eine Reduktion der Wurzelwasseraufnahme hinweisen, sind sie wegen der breiten Vertrauensintervalle statistisch nicht gesichert. Für die Parallelversuche 1 und 2 kann die Hypothese, dass die Bestände gleich viel transpirierten, nicht verworfen werden, obwohl für den Parallelversuch 2 der Mittelwert aus dem Lysimeter 1 gegenüber den anderen Lysimetern deutlich kleiner war. Für den Stressversuch 3–2 decken sich die Vertrauensbereiche deutlich.

## 7. Stressfunktion

Die Stressfunktion beschreibt die Abhängigkeit der AET/PET-Quotienten vom Matrixpotential im Boden der gestressten Fichten. Für jeden Versuch wurde das Matrixpotential über die Versuchsdauer und über die Tiefe zwischen 10 und 50 cm gemittelt. Dieser Tiefenbereich wurde gewählt, weil sich hier der Hauptwurzelraum befindet. Da die aus Wochenbilanzen gebildeten AET/ PET-Quotienten unrealistisch sind, wird die Stressfunktion nur für die 25- bis 36tägigen Versuche dargestellt (Abbildung 6).

Aufgrund der relativ breiten Vertrauensbereiche der geschätzten ET-Raten ist erwartungsgemäss keine klare Abhängigkeit des Quotienten vom Matrixpotential zu erkennen. Zudem wird die Streuung der Werte dadurch



erhöht, dass während des Stressversuches 3 die gemittelten Matrixpotentiale im Lysimeter 2 zwischen  $-150$  und  $-200$  hPa lagen, in einem Bereich also, wo aufgrund der AET/PET-Quotienten der Stressversuche 1 und 2 bereits eine Reduktion der ET zu vermuten ist, die allerdings statistisch nicht gesichert ist. Das bedeutet, dass die PET während des Stressversuches 3 eigentlich höher

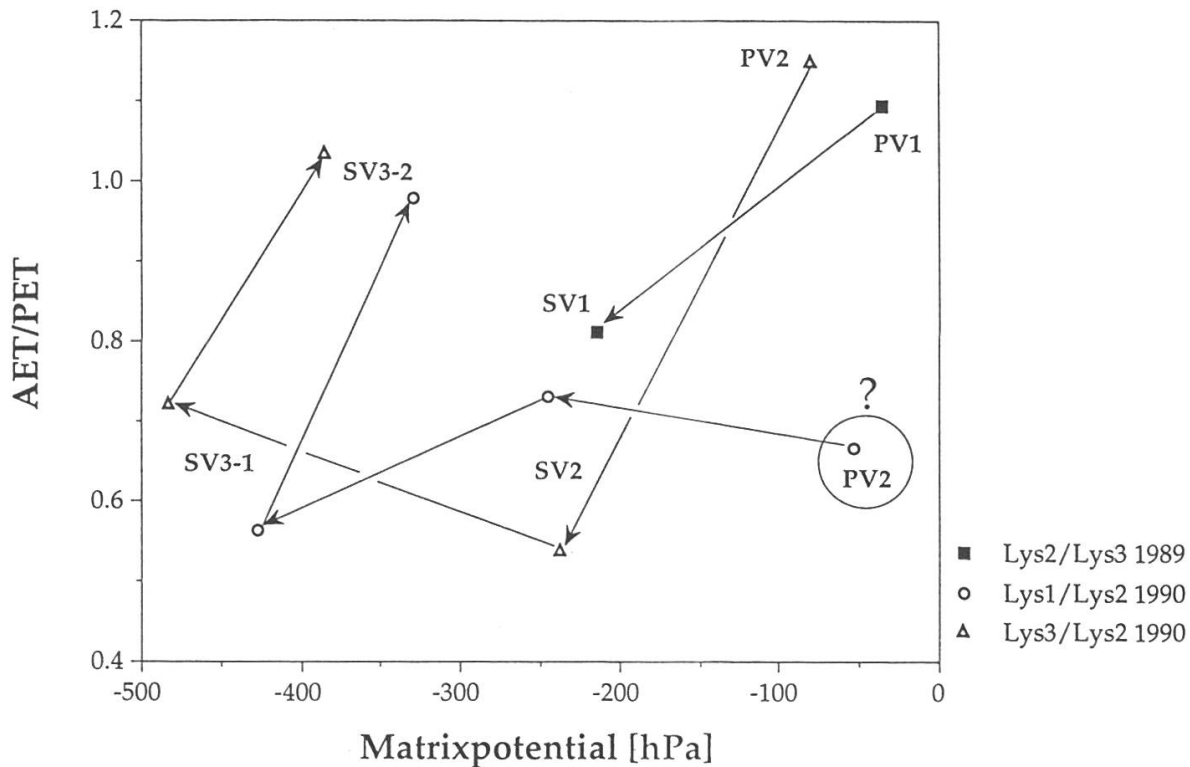


Abbildung 6. Beziehung zwischen Matrixpotential und Quotienten der ET-Rate der gestressten Fichten (1989: Lysimeter 2, 1990: Lysimeter 1 und 3) zu den ungestressten (1989: Lysimeter 3, 1990: Lysimeter 2) während der Parallel- (PV) und Stressversuche (SV). Während des SV 3 lagen die Potentiale im Lysimeter 2 zwischen  $-150$  und  $-200$  hPa. Die Pfeile zeigen den zeitlichen Verlauf.

gewesen wäre, was eine Verringerung der ET-Quotienten und somit eine eindeutigere Stressfunktion zur Folge gehabt hätte.

Zu beachten ist auch der zeitliche Verlauf der Werte der Stressfunktion. Abgesehen vom Parallelversuch 2, während dem für das Lysimeter 1 eine unerklärlich tiefe ET-Rate ermittelt wurde, sind 1990 die Verläufe für die Lysimeter 1 und 3 einigermaßen synchron. Der Anstieg der Quotienten vom ersten zum zweiten Teil des Stressversuches 3 ist vermutlich zum einen mit einer Verringerung der potentiellen ET und zum anderen mit der Erhöhung der Bewässerungsraten in die Lysimeter 1 und 3 erklärbar. Beide Faktoren bewirken einen geringeren Trockenstress. Da die Bewässerungsraten gerade etwa den ET-Raten entsprachen und die Tiefensickerung zum Stillstand gekommen war, veränderten sich die Matrixpotentiale in dieser Phase nur unwesentlich (Abbildung 2).



Die beiden Wertepaare aus den Versuchen 1989 bestätigen den Verlauf der Stressfunktionen aus den Versuchen 1990.

Während des Stressversuches 3–1 wurden die tiefsten über den Hauptwurzelraum gemittelten Potentiale von rund  $-450$  hPa gemessen. Für diesen Versuch wurden auch die einzigen statistisch signifikanten Reduktionen der ET der gestressten Bestände ermittelt (*Abbildung 5*).

## 8. Diskussion

Die mittlere Evapotranspirationsrate der ungestressten Fichten betrug  $1,60$  mm/d zwischen dem 26. Juni und 18. August 1989 (*Tabelle 2*) und  $2,17$  mm/d zwischen dem 30. April und 24. September 1990 (*Tabelle 1*). Diese Werte liegen in einem mittleren Bereich der in der Literatur angegebenen Evapotranspirationsraten für Fichten (*Schmidt-Vogt*, 1977, Übersicht 26 und 27). Für den Föhrenbestand im Winzlerboden errechnete *Item* (1974) zwischen Mai und Oktober 1966 eine durchschnittliche ET-Rate von  $2,9$  mm/d. Seine Berechnung basiert auf den im Feld gemessenen Matrixpotentialen, die zusammen mit den Labordesorptionskurven für die Ermittlung der Wasservorratsänderungen benutzt wurden. Dies führt erfahrungsgemäss zu einer Überschätzung der ET im feuchten Bereich.

Aus der Berechnung der Vertrauensintervalle der Evapotranspirationsraten geht hervor, dass die zur Verfügung stehende Instrumentierung unzureichend war, um auf der Basis von Wochendaten die Bodenwasserbilanzmethode vernünftig anzuwenden. Selbst bei den 4- bis 5wöchigen Bilanzen lagen die 95 %-Vertrauensbereiche der ET-Raten zwischen  $\pm 0,2$  und  $\pm 1,0$  mm/d um den berechneten Wert, in einem Fall sogar bei  $\pm 2,3$  mm/d (*Abbildung 5*). Diese grossen Vertrauensintervalle resultierten vorwiegend aus der räumlichen Variabilität der Wasservorratsänderung und nur zum kleineren Teil – zwischen  $\pm 0,23$  und  $\pm 0,36$  mm/d – aus Messfehlern bei deren Bestimmung. Dies ist auch eine Folge der geringen Wurzelwasseraufnahme, verglichen mit dem Wasservorrat im Lysimeter. Die zeitlichen Änderungen des Wasservorrates könnten nur mit einem wägbaren Lysimeter genau erfasst werden, welche jedoch in der Grösse, wie sie für Baumbestände benötigt werden, finanziell kaum realisierbar sind. Die Ungenauigkeit der Schätzung der ET-Raten lässt auch nur eine ungenaue Bestimmung einer allfälligen Reduktion der Wurzelwasseraufnahme und somit der Stressfunktion zu.

Die geschätzten AET/PET-Quotienten liegen für die Stressversuche zwischen  $0,54$  und  $0,82$ , abgesehen von der zweiten Hälfte des Stressversuches 3, wo sie um den Wert  $1,0$  liegen. Statistisch signifikant war eine Reduktion der ET allerdings nur im Stressversuch 3–1. Für diese Zeit fanden sich auch die tiefsten über den Hauptwurzelraum gemittelten Matrixpotentiale von

–450 hPa. Trotz einer geringen Bewässerung trocknete der Boden während dieses Versuches weiterhin aus, weil die potentielle ET in dieser Phase am grössten war. Die 5wöchige Austrocknung während des Stressversuches 2 zuvor genügte offensichtlich noch nicht, um eine signifikante Einschränkung der Evapotranspiration nachzuweisen. Dasselbe gilt auch für die 25tägige Austrocknungsphase 1989. Andere Autoren (Zusammenstellung in *Papritz et al.*, 1991, Tabelle 6–2) fanden kritische Matrixpotentiale, bei denen unterschiedliche Nadelbaumarten die ET einzuschränken beginnen, zwischen –300 und –3500 hPa. Unser Wert von –450 hPa liegt somit deutlich am oberen Ende dieses Bereiches.

Die Zuordnung der AET/PET-Quotienten zu Matrixpotentialen ergab keine klar definierte Stressfunktion (*Abbildung 6*). Dies ist zum einen auf die schwer messbare Grösse Wasservorratsänderung zurückzuführen. Zum anderen ist anzunehmen, dass eine solche exakte mathematische Beziehung gar nicht existiert, sondern je nach atmosphärischen, pedologischen und pflanzen-spezifischen Verhältnissen stark variiert.

### **Zusammenfassung**

Ein reduziertes Wasserangebot im Boden führt zu einer eingeschränkten Wasseraufnahme der Pflanzenwurzeln und damit zu einer reduzierten Transpiration. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war zu untersuchen, bei welcher Bodenfeuchte diese Einschränkung beginnt und wie gross sie ist. Dazu wurden an drei mit jungen Fichten bestockten, nicht-wägbaren Grosslysimetern in Sellenbüren (Kanton Zürich) Trockenstressexperimente durchgeführt. Während zwei Vegetationsperioden wurde jeweils ein Lysimeter optimal bewässert, um die potentielle Evapotranspiration zu bestimmen, und ein bzw. zwei weitere Lysimeter wurden ausgetrocknet. Mittels der Bodenwasserbilanz wurde die Evapotranspiration (ET) aus den gemessenen Grössen Bewässerung, Tiefensickerung und Wasservorratsänderung im Boden berechnet. Aus der Fehlerabschätzung geht hervor, dass trotz der dichten Instrumentierung Wochenbilanzen zu ungenau sind, um eine gegenüber der potentiellen ET geringere aktuelle ET nachzuweisen. Deshalb wurden für die Auswertung nur Monatsbilanzen verwendet. Während der 4- bis 5wöchigen Teilversuche betrug die Wasseraufnahme der Fichten aus den austrocknenden Lysimetern 54 bis 82% derjenigen der optimal bewässerten, für welche wir ET-Raten zwischen 1,4 und 3,0 mm/d berechneten. Eine signifikante Reduktion der ET konnte allerdings nur für einen Teilversuch statistisch nachgewiesen werden. Die über den Wurzelraum gemittelten Matrixpotentiale in den austrocknenden Lysimetern betrugen dabei etwa –450 hPa. Die sogenannte Stressfunktion, die die Grösse der Reduktion der ET in Abhängigkeit vom Matrixpotential angibt, war nicht eindeutig.

## Résumé

### Diminution du prélèvement en eau par des épicéas en condition d'assèchement

Une diminution de la réserve en eau d'un sol implique une réduction du prélèvement en eau des racines des plantes et donc une limitation de l'évapotranspiration. Le but de ce travail est d'étudier à partir de quels taux d'humidité cette réduction commence et quelle est alors son importance. Pour cela, on a effectué à Sellenbüren (ZH) des expériences en condition d'assèchement sur 3 gros lysimètres (impossible à peser) plantés de jeunes épicéas. Afin de déterminer l'évapotranspiration potentielle, un de ces lysimètres a été optimalement arrosé alors qu'un, voire deux autres étaient asséchés. L'évapotranspiration (ET) a été calculée d'après le bilan en eau du sol et à l'aide des grandeurs mesurées: humidification, infiltration en profondeur et variation de la réserve en eau du sol. Le calcul d'erreur montre que, malgré une instrumentation intensive, les bilans hebdomadaires sont trop imprécis pour calculer une ET inférieure à l'ET potentielle. C'est pourquoi seuls des bilans mensuels ont été exploités. Pendant les 4 à 5 semaines d'expérience, le prélèvement en eau des épicéas des lysimètres asséchés représente 54–82 % de celui des lysimètres optimalement arrosés, pour lesquels le taux d'ET se situait entre 1,4 et 3,0 mm/j. Cependant, la réduction de l'ET n'a été significative que pour une des expériences. Dans ce cas là, les potentiels matriciels moyens de la zone racinaire sont également descendus jusqu'à  $-450$  hPa. L'établissement sous forme d'une fonction de stress, d'une relation entre la diminution de l'ET et le potentiel matriciel dans les lysimètres asséchés a échoué. Nous supposons qu'il n'y a d'ailleurs pas de solution mathématique exacte.

Traduction: *Olivier Dury*

## Literatur

- Buchter, B. und Leuenberger, J., 1995. In Lysimetern gemessene Tiefsickerung unter Waldböden. Schweiz. Z. Forstwesen, 146: 265–275.
- Denmead, O. T. und Shaw, R. H., 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agronomy J., 54: 385–390.
- Hartung, J., 1987. Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 975 Seiten.
- Item, H., 1974. Ein Modell für den Wasserhaushalt eines Laubwaldes. Eidg. Anst. forstl. Versuchswesen, Mitt., 50: 135–331.
- Käppeli, T. und Schulín, R., 1988. Lysimeteruntersuchungen zur Wasserbilanz von Pappel, Weiss-erle, Fichte und Gras auf einem sandigen Boden über Schotter. Schweiz. Z. Forstwesen, 139: 129–143.
- Lascano, R. J. und van Bavel, C. H. M., 1984. Root water uptake and soil water distribution: Test of an availability concept. Soil Sci. Soc. Am. J., 48: 233–237.
- Lassoie, J. P. und Hinckley, T. M. (eds.), 1991. Techniques and approaches in forest tree ecophysiology. CRC Press, Boca Raton: 19–174.
- Papritz, A., Schneebeli, M., Attinger, W. und Flühler, H., 1991. Untersuchung des Wasserhaushalts der drei Beobachtungsflächen. In: Pankow, W. (Hrsg.), Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz, Ergebnisse aus dem NFP 14, Bd. 6: 101–122.

- Richard, F. und Lüscher, P.*, 1983. Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Bd. 3, Eidg. Anst. forstl. Versuchswesen, Birmensdorf.
- Roth, K., Schulm, R., Flühler, H. und Attinger, W.*, 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Res.*, 26: 2267–2273.
- Schmidt-Vogt, H.*, 1977. Die Fichte. Bd. 1, Paul Parey, Hamburg, 647 Seiten.
- Spittlehouse, D.L. und Black, T.A.*, 1981. Measuring and modelling forest evapotranspiration. *Can. J. Chem. Eng.*, 59: 173–180.

*Verfasser:* Daniel Stadler, dipl. Geogr., Thomas Käppeli, dipl. Forsting. ETH, Jörg Leuenberger, Dr. Bernhard Buchter und Prof. Dr. Hannes Flühler, Institut für terrestrische Ökologie der ETHZ, Bodenphysik, Grabenstrasse 3, CH-8952 Schlieren.