

Nicht entleihen

KfK-PEF 38:2
Februar 1988

**Projekt Europäisches
Forschungszentrum für
Maßnahmen zur Luftreinhaltung
(PEF)**

**Untersuchungen zum
Wassertransport und zur
Wasserführung in Fichten**

**S. Strack, H. Unger
Hauptabteilung Sicherheit/Radioökologie
Kernforschungszentrum Karlsruhe**

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Zentralbibliothek

20 APR. 1988

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KfK - PEF 38

Projekt Europäisches Forschungszentrum
für Maßnahmen zur Luftreinhaltung
Forschungsbericht KfK-PEF 38

Untersuchungen zum Wassertransport und zur Wasserführung in Fichten

von
S. Strack, H. Unger

Hauptabteilung Sicherheit/Radioökologie
Kernforschungszentrum Karlsruhe

Die Arbeiten des Projektes Europäisches Forschungszentrum für
Maßnahmen zur Luftreinhaltung werden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg und der
Europäischen Gemeinschaft gefördert

Förderkennzeichen 83/007/EG

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Zentralbibliothek

64 Seiten
27 Abbildungen
38 Literaturstellen

Februar 1988

KfK-PEF-Berichte

Das Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF) im Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH fördert, koordiniert und betreut im Auftrag des Landes Baden-Württemberg und der Europäischen Gemeinschaft Forschungsvorhaben zur Ausbreitung und Umwandlung von Luftverunreinigungen sowie deren Einwirkungen auf Waldökosysteme und die menschliche Gesundheit. Darüberhinaus werden Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Emissionsminderungsverfahren gefördert. Hierbei arbeitet es eng mit Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft und Einrichtungen der Öffentlichen Hand zusammen. Die PEF-Projektleitung gibt die Schriftenreihe PEF-Berichte heraus.

Diese Schriftenreihe hat den Zweck, die im PEF-Programm erarbeiteten Erkenntnisse bekannt zu machen und ihre rasche und breite Anwendung und Nutzung in der Praxis zu unterstützen.

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Das Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH übernimmt keine Gewähr insbesondere für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben, sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

ISSN: 0931-2749

Herausgeber:

Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen
zur Luftreinhaltung (PEF) im Kernforschungszentrum Karlsruhe

Druck und Verbreitung:

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 36 40, 7500 Karlsruhe 1

Printed in the Federal Republic of Germany

ZUSAMMENFASSUNG

S. Strack, H. Unger

Untersuchungen zum Wassertransport und zur Wasserführung in Fichten

Mit Hilfe von Tritiumwasser (HTO) konnte in Paarvergleichen an ca. 30 jährigen Bäumen festgestellt werden, daß die Wasserführung im Xylem kranker Fichten gravierend verändert ist. Während im gesunden Baum injiziertes HTO einem Drehwuchs der Holzfasern folgend in der Krone deutlich differenziert verteilt wird, ist dies im kranken Baum nicht zu erkennen. Zusammen mit der Beobachtung einer schnelleren Bewegung des HTO im kranken Baum, wurde abgeleitet, daß der wasserleitende Querschnitt im kranken Baum reduziert ist. Nach dem Fällen der Versuchsbäume bestätigte sich, daß im Stamm des kranken Baumes eine Verkernung von ca. 60 %, bezogen auf die gesamte Querschnittsfläche, eingetreten war, im Vergleich zu 5 - 20 % bei gesunden Bäumen. Die Methoden der Wasserbestimmung in den Jahresringen sind beschrieben. Im Gewebewasser von Nadeln gesunder Bäume zeigte sich im Gegensatz zu den Nadeln kranker Bäume eine deutliche Abstufung der Tritiumkonzentrationen nach Jahrgängen. Daraus wird gefolgert, daß in den gesunden Nadeln eine jahrgangsspezifische Regulation der Stomata vorhanden ist, während dies bei den kranken Nadeln nicht mehr der Fall ist. Wasserpotentialmessungen zu unterschiedlichen Zeiten während der Vegetationsperiode ergaben Hinweise auf einen angespannteren Wasserhaushalt in erkrankten Bäumen, jedoch nicht auf einen chronisch erhöhten Wasserstreß. Die Rolle der pathologischen Verkernung im Verlauf der Erkrankung wird diskutiert.

ABSTRACT

S. Strack, H. Unger

Investigations into the Water Flow and Water Conduction in Spruce Trees

The water-flow systems in the xylem of healthy and ailing spruce trees, based on the distribution patterns of tritiated water (HTO), were compared. In case of the ailing tree a severely altered water flow system was observed. Whereas in the healthy tree the injected HTO spread in the apex in a distinctly differentiated manner following the spiral pattern of the ligneous fibers, no comparable spreading pattern was detected in the ailing tree. Also the labeled water molecules distributed twice as fast in the ailing as in the healthy tree. We conclude that the water conducting cross section of the diseased tree is reduced. Indeed, heartwood formation was about 60 % in the ailing as compared to 5 - 20 % in healthy trees. The methods of determining water content in the annual rings are described. The tissue water of needles from the healthy tree showed a distinct gradation of tritium concentrations according to age. This finding suggests that there is an age specific stomatal regulation in the healthy but not in the diseased needles. Water potential measurements at various times during the vegetation period provided evidence of a tighter water budget in diseased trees; however, a chronically enhanced water stress was not evident. The role of pathological heartwood formation during the disease is discussed.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	5
2. EIN WASSERSTOFFMODELL	8
3. MATERIAL UND METHODEN	11
3.1. Untersuchungsgebiet und Pflanzen	11
3.2. Applikation von Tritiumwasser	12
3.3. Tritiummessung	12
3.3.1. Austausch	12
3.3.2. Gefriertrocknung	13
3.3.3. Auspressen	13
3.3.4. Transpirationswasser	13
3.3.5. Organisch gebundenes Tritium	13
3.4. Wasserpotential- und Saftflußmessungen	13
3.5. Relativer Wassergehalt in Jahresringen (Verkernung)	14
3.5.1. Kupfersulfat	14
3.5.2. Abschleifen der Stammscheiben	14
3.5.3. Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit	14
3.5.4. Visuelle Bestimmung durch Eindrücken	14
3.5.5. Kernspintomographie	15
3.5.6. Stärkeeinlagerungen im Holz	15
4. ERGEBNISSE	16
4.1. Untersuchungen zum Verhalten des Tritiumwassers	16
4.1.1. Austausch der Luftfeuchte mit Gewebewasser	16
4.1.2. Eindringen von HTO aus der Atmosphäre	17
4.1.3. Tritium im aufgefangenen Transpirationswasser	19
4.1.4. Tritium im ausgepreßten Xylemwasser	21
4.2. Wasserpotentialmessungen	22
4.3. Saftflußgeschwindigkeiten (Heiz-Puls-Methode)	27
4.4. Wasserführung in Stamm und Ästen stehender Bäume	30
4.4.1. Geschwindigkeit des Transpirationsstromes	30
4.4.2. Verteilung des Transpirationsstromes	33
4.4.3. Injektion in Äste	35
4.4.4. Gewebewasser im Holz	37

4.5. Untersuchungen nach Fällen der Versuchsbäume	38
4.5.1. Wasserverteilung in Jahresringen	38
4.5.2. Stärkeeinlagerungen im Holz	41
4.5.2. Kernspintomographie	42
4.5.3. Bewurzelung	46
4.6. Wasserumsätze in Nadeln	48
4.6.1. Hydroregulation der Spaltöffnungen	48
4.6.2. OBT in Nadeln	49
5. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	53
6. LITERATUR	58

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2-1: Kompartimentmodell für Wasserstoffumsätze in Bäumen	8
4-1: Überprüfung des Tritiummodells	16
4-2: Kinetik der HTO-Aufnahme in Nadeln	18
4-3: HTO im Transpirationswasser abgeschnittener Äste	20
4-4: HTO im Xylem im Vergleich zum Transpirationswasser	21
4-5: Tagesgänge des Wasserpotentials bei Fichten	23
4-6: Tagesgang der Wasserpotentiale am 30.08.85	26
4-7: Tagesgang der Saftflußgeschwindigkeiten am 30./31.08.85	28
4-8: Tagesgang der Saftflußgeschwindigkeiten am 20.09.85	29
4-9: Tagesgang der Saftflußgeschwindigkeiten am 22.08.85	29
4-10: Zurückgelegte Saftflußstrecke (22.08.85)	30
4-11: Vertikalprofile der HTO-Konzentrationen	32
4-12: Verteilung des HTO im Transpirationswasser	34
4-13: HTO-Konzentration nach Astinjektion	36
4-14: Tritiumkonzentrationen im Xylemwasser	37
4-15: Bestimmung der Wasserverteilung mit Kupfersulfat	39
4-16: Visuelle Bestimmung der Wasserverteil. in Jahresringen	39
4-17: Wasserverteilung im Längsschnitt	39
4-18: Verkernung an Stammscheiben	40
4-19: Kernspintomographische Aufnahme des gesunden Versuchsbaumes C	43
4-20: Kernspintomographische Aufnahme des kranken Versuchsbaumes D	44
4-21: Kernspintomographische Aufnahme des gesunden Referenzbaumes G	45
4-22: Ansicht der ausgegrabenen Wurzeln am Standort	46
4-23: Wurzelsystem des gesunden Versuchsbaumes C	47
4-24: Wurzelsystem des kranken Versuchsbaumes D	47
4-25: Tritiumkonzentrationen im Nadelwasser	49
4-26: HTO und OBT in Nadeln	50
4-27: OBT in Holz und Rinde	51

TABELLENVERZEICHNIS

4-1: HTO-Aufnahme von Nadeln bei Exposition im Klimaschrank	18
4-2: Pre-dawn-Werte des Wasserpotentials nach Trockenperiode	24
4-3: Pre-dawn-Werte des Wasserpotentials nach Regen	25
4-4: Verkernung der Stämme	41

1. EINLEITUNG

Seit den ersten Beobachtungen der ausgedehnten "neuartigen Waldschäden", damals noch als "Tannensterben" eingeordnet, werden Störungen des Wasserhaushaltes als Krankheitsursache diskutiert. ULRICH formuliert [1981] in seiner Hypothese für das Tannensterben, daß es über eine Verringerung der Transpiration zur Kronentrocknis kommt, da der Wassertransport durch einen "Naßkern" behindert ist. Es gab auch Versuche, Witterungsverläufe als Primärursache für die neuartigen Waldschäden verantwortlich zu machen [CRAMER, CRAMER-MIDDENDORF 1984]. Allerdings wurden bisher viele Argumente zusammengetragen, die solchen Hypothesen entgegenstehen [NIEßLEIN 1985, BURSCHEL 1985]. Als auslösende oder mitwirkende Sekundärursache kann eine Beeinträchtigung des Wasserhaushaltes allerdings eine wichtige Rolle spielen, zumal eine Verminderung der Wasserversorgung auch mit einer Unterversorgung durch Nährelemente einhergehen kann [SCHULZE et al. 1986]. Eine Untersuchung der Auswirkungen solcher Störungen des Wasserhaushaltes auf den Verlauf der Erkrankung kann dazu beitragen, die Schädigung differenziert zu beschreiben und so Schlüsse auf die Art der Primärursache zu ermöglichen.

Anders als bei der Tanne, wo ein bis ins Splintholz übergreifender gut sichtbarer Naßkern die Wasserleitung erheblich einschränken kann, ist bei der Fichte eine Beteiligung des Xylems bei der Erkrankung nicht so deutlich geworden. Aus bisherigen Untersuchungen gibt es jedoch Hinweise auf Veränderungen in kranken gegenüber gesunden Fichten:

Einerseits ist der Anteil des wasserführenden Splintholzes am Stammquerschnitt reduziert [KUCERA 1985], andererseits ist der Feuchtigkeitsgehalt in diesem Splintholz geringer [GRUBER 1986].

Es stellt sich die Frage, welche Konsequenzen diese Veränderungen auf die Wasserführung und Wasserversorgung haben. Bekannt ist, daß es infolge von übermäßigen Saugspannungen bei hohen Belastungen durch Kavitationen und Luftembolien in den wasserführenden Tracheiden zur Blockierung des Xylems kommen kann [ZIMMERMANN 1983]. Extreme Saugspannungen unterhalb eines Grenzwertes können sowohl durch Störungen der Wassernachleitung von den Wurzeln her oder durch einen über-

mäßigen Wasserverbrauch bei der Transpiration hervorgerufen werden. Hauptziel der vorliegenden Untersuchung ist daher die Erfassung der Wasserführung in Stamm, Ästen und Zweigen von gesunden und kranken Fichten.

Zur Markierung der Saftströme bei den Untersuchungen wurde der radioaktive Wasserstoff Tritium ausgewählt. Tritiiertes Wasser (HTO) besitzt im Gegensatz zu anderen Tracern (Farbstoffe, Salze) die gleichen chemischen Eigenschaften wie Wasser, nur geringfügige Isotopie-Effekte (unterschiedliche Verdampfungsgeschwindigkeit gegenüber H_2O [SEPALL, MASON 1960] und leichte Diskriminierung beim photosynthetischen Einbau in organische Substanzen [STRACK 1978]) sind zu berücksichtigen. Allerdings müssen bei der Verwendung von HTO auch bestimmte spezifische Aspekte berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu Elektrolyten oder organischen Substanzen gibt es für Tritiumwasser in Organismen keine Diffusionsbarrieren, so daß die Geschwindigkeit, mit der sich das HTO in den Saftströmen fortbewegt, nicht der eigentlichen Strömungsgeschwindigkeit des Saftstromes entsprechen muß [HÜBNER 1959/60]. Andererseits werden bei der Verwendung von HTO als Tracer nicht nur die Netto-Diffusionsströme des Wassers beobachtet (wie z.B. bei der Transpiration), sondern hier können auch Diffusionsströme beobachtet werden, die sonst nicht registriert werden können (z.B. die Diffusion von Wasser aus der Atmosphäre in das Blatt, s. 4.1.1. und 4.1.2).

Durch Bestimmung der Tritium-Konzentration im Gewebewasser der Nadeln, die vom Xylem her mit HTO versorgt wurden, können Aussagen über die Hydroregulation der Spaltöffnungen abgeleitet werden. Dies ist dadurch möglich, daß das tritiummarkierte Nadelwasser von der tritiumfreien Luftfeuchte in der Umgebung der Nadel durchmischt wird. Der Grad und die Geschwindigkeit der Durchmischung hängen dabei von der relativen Luftfeuchte in der Atmosphäre und dem stomatären bzw. dem kutikulären Widerstand ab.

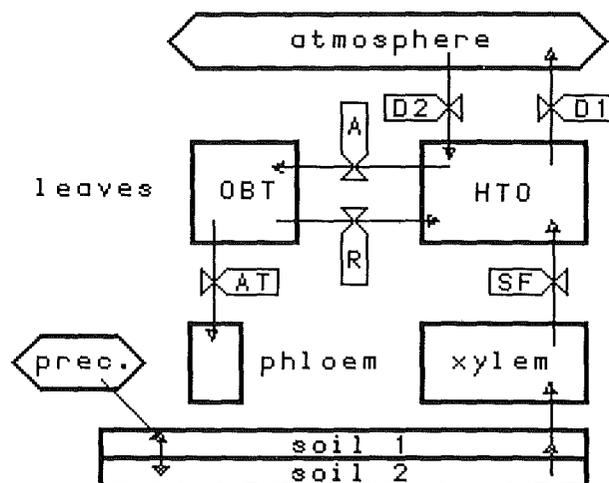
Ein weiterer Aspekt bei den Untersuchungen war es, durch den Nachweis von organisch gebundenem Tritium (OBT) in verschiedenen Pflanzenteilen abzuschätzen, ob Unterschiede der Photosyntheseleistung zwischen geschädigten und gesunden Bäumen vorliegen. Bei der Photosynthese wird das Tritiumwasser markierter Bäume in der jeweils aktuellen Konzentration in den Nadeln für den Aufbau organischer Substanzen verwendet. Messungen könnten somit Aufschluß über die Bildung der Assimilate in den Blattorganen und deren Abtransport geben, bzw. Hinweise dafür erbringen, ob sich eine Störung der Assimilatableitung in den Nadeln, wie sie von PARAMESWARAN et al. [1985] vermutet wird, an stehenden Bäumen beobachten läßt.

Nach Voruntersuchungen im Labor bzw. unter kontrollierten Bedingungen auf dem Versuchsgelände des KfK wurden Versuche an Fichten mit Tritiumwasser in Form von Paarvergleichen im Südschwarzwald durchgeführt. Diese Freilanduntersuchungen an stehenden Bäumen erfolgten in der Zeit von August bis Oktober 1985.

2. EIN WASSERSTOFFMODELL

Bei der Markierung des Wassers mit Tritium muß man sich über die möglichen Wege des Wasserstoffs in der Pflanze im Klaren sein, die bei einer Betrachtung der Wasserumsätze im üblichen Sinne nur zum Teil berücksichtigt werden. Die Wege sind in einem vereinfachten Modell in Abb. 2-1 dargestellt.

Abb. 2-1: Kompartimentmodell für Wasserstoffumsätze in Bäumen ($D1$, $D2$ = Diffusionsströme, A = Assimilation, R = Respiration, AT = Assimilattransport, SF = Saftfluß, $prec.$ = Niederschlag, HTO = tritiummarkiertes Gewebewasser, OBT = tritiummarkierte organische Substanz)



Bei der Auswertung der markierten Proben muß berücksichtigt werden, daß die beobachtbare Transpiration (T) der Differenz der Diffusionsströme von Wasser aus dem Blatt heraus ($D1$) und in das Blatt hinein ($D2$) entspricht (Gl.1). Das kommt außerdem dem Saftfluß (SF) gleich, wenn man vereinfachend einen gleichbleibenden Wassergehalt in den Nadeln annimmt. Die Diffusionsströme stehen im gleichen Verhältnis zueinander wie die entsprechenden Dampfdrücke in der Atmosphäre (e) und im Blattinnern, wobei der Dampfdruck innerhalb des Blattes bei gegebener Temperatur einem gesättigten Dampfdruck (E) gleichkommt (Gl.2). Dieses Verhältnis entspricht dem, was wir unter der relativen Luftfeuchte (f) verstehen.

$$T = D_1 - D_2 = SF \quad (1)$$

$$D_2 / D_1 = e / E = f \quad (2)$$

Zur Beschreibung der Tritiumkonzentration des Gewebewassers (A_1) im Gleichgewichtszustand lassen sich die Wasserumsätze durch Assimilation und Respiration vernachlässigen. Danach ergibt sich nach Einsetzen der Tritiumkonzentrationen in der Atmosphäre (A_2) und im Xylemwasser (A_3) für das Gewebewasser folgende Konzentration:

$$A_1 = f * A_2 + (1-f) A_3 \quad (3)$$

Bei Lufttemperaturen im Bereich von 0 bis 30 Grad Celsius muß noch ein mittlerer Isotopieeffekt von $a = 1,1$ berücksichtigt werden, denn die schwereren HTO-Moleküle werden beim Übergang von der flüssigen in die dampfförmige Phase zu etwa 10 % diskriminiert [SEPALL 1960]. Da die Tritiumkonzentration in der Atmosphäre gleich 0 ist, vereinfacht sich die Gleichung (3):

$$A_1 = a (1-f) A_3 \quad (4)$$

Im Blattwasser stellt sich somit, gleiche Temperaturen innerhalb und außerhalb des Blattes vorausgesetzt, im Gleichgewichtszustand eine Tritiumkonzentration ein, die durch die relative Feuchtigkeit in der Luft (f) bzw. dem Luftfeuchtigkeitsdefizit ($1-f$) vorgegeben ist, wobei die Tritiumkonzentration sowohl im Transpirationsstrom als auch in der Luftfeuchte berücksichtigt werden muß. Entsprechende experimentelle Beobachtungen hierzu sind bereits bei verschiedenen Pflanzen, wie *Helianthus annuus* [RANEY, VAADIA 1965], *Vitis vinifera* [BELOT 1979] und *Fagus sylvatica* [STRACK 1982], beschrieben worden.

Bei der Photosynthese wird dieses Wasser, das sowohl der Atmosphäre als auch dem Boden entstammt, mit der jeweils aktuellen Tritiumkonzentration in den Chloroplasten für den Aufbau der organischen Substanz verwendet. Dieser organisch gebundene Wasserstoff wird durch Respiration zum Teil wieder als Wasser frei, teils wird er mit dem Assimilatstrom aus dem Blatt transportiert oder er verbleibt in der organischen Substanz des Blattes. Im Vergleich zu den bei der Transpiration in der Pflanze durchgesetzten Wasser- bzw. Wasserstoffmengen sind die photosynthetisch eingebauten Mengen sehr klein. Durch die empfindliche Nachweismethode sind sie aber meßbar, und ihr Nachweis könnte somit weiteren Aufschluß über die Photosynthese und den Assimilatabtransport in der Pflanze geben.

3. MATERIAL UND METHODEN

3.1. Untersuchungsgebiet und Pflanzen

Die Freilandversuche an stehenden Bäumen wurden in den höheren Lagen (750 m ü. NN) des Südschwarzwaldes im Bereich der "Kälbelescheuer" an 30-jährigen Fichten (*Picea abies*) durchgeführt, wobei lebende Bäume und abgeschnittene Zweige der Schadklasse 0 und 2 miteinander verglichen wurden (Paarvergleiche). An dem Versuchsbaum-Paar A und B (A = Schadstufe 0, B = Schadstufe 2) wurden Tagesgänge der Saftflußgeschwindigkeiten und des Wasserpotentials aufgenommen. Die Tritiumkonzentrationen im Transpirations- bzw. Gewebewasser wurden an diesem Paar jedoch nur stichprobenartig verfolgt, weil die Injektion des markierten Wassers an den beiden Bäumen nicht vergleichbar verlaufen war. Am Versuchsbaum-Paar C und D (C = Schadstufe 0, D = Schadstufe 2) wurde der Transport und die Verteilung des Tritiumwassers intensiv verfolgt. Ebenfalls wurden hier Tagesgänge des Wasserpotentials und der Saftflußgeschwindigkeit im Stamm aufgenommen. Zur Untersuchung der Verkernung im Stamm wurden nach Abschluß der Tritiumexperimente diese Bäume gefällt. An einem weiteren Baumpaار E und F (E = Schadstufe 0, F = Schadstufe 2) wurde Tritiumwasser in Äste injiziert. Außerdem wurden von diesem Paar für Experimente an abgeschnittenen Zweigen jeweils Äste entnommen.

Die Bäume dieses Fichtenbestandes stocken an einem Nordwesthang auf Granitverwitterungsböden. Eine eingehende Charakterisierung des Untersuchungsstandortes und des Bestandes ist bei MIES und ZÖTTL [1985] zu finden. Hinsichtlich der Schadsymptome überwiegt die von innen nach außen fortschreitende Vergilbung der Nadeljahrgänge. Allerdings konnte auch manchmal an jüngeren Jahrgängen (mit Ausnahme der jüngsten Nadeln) eine stärkere Gelbfärbung beobachtet werden. Der Zustand der geschädigten Fichten entspricht weitgehend der Beschreibung der Fichte 22 im PEF Untersuchungsprogramm Kälbelescheuer von SIEFERMANN - HARMS [1985]. Im Bestand wurden herrschende Fichten untersucht.

Für die Vorversuche mit Tritiumwasser auf einer Versuchsfläche im KfK bzw. im Labor wurden Äste und Zweige von ungeschädigten Fichten entnommen, die auf dem KfK - Gelände (in der Regel einzeln stehend) wachsen.

3.2. Applikation von Tritiumwasser

Von den zahlreichen Möglichkeiten zur Verabreichung des Tritiumwassers wurden folgende Methoden ausgewählt:

1. Bei der weitaus größten Anzahl der Experimente unter Freilandbedingungen wurden abgeschnittene Zweige in Gefäße mit HTO gestellt. Bei ausreichender Luftbewegung sind die Nadeln dabei einer tritiumfreien Luftfeuchtigkeit ausgesetzt.
2. In einer Klimakammer wurden Pflanzen und Äste einer Luftfeuchtigkeit mit vorgegebener HTO-Konzentration ausgesetzt. Das Bodenwasser ist in diesem Fall tritiumfrei.
3. An lebende Bäume wurde das HTO in Form einer Dauerinfusion ins Xylem des Stammes oder einzelner Äste appliziert. Dabei wurde das Holz durch eine Wassermanschette hindurch angebohrt, so daß keine Luftembolie entstehen konnte. Anschließend wurde die Manschette über einen Schlauch mit einer Vorratsflasche verbunden, und die Pflanzen konnten bis zur Verstopfung der Bohrung das Wasser aufnehmen.

3.3. Tritiummessung

Die Tritiumkonzentrationen wurden bestimmt, indem Wasser direkt nach einer Standardmethode im Flüssigszintillationsspektrometer (LSC) ausgemessen wurde. Auf dem Versuchsgelände im Südschwarzwald diente ein LSC-Gerät der Fa. LKB-Wallac (Rack Beta, Modell 1217) für die sofortige Bestimmung der Tritiumkonzentrationen im Transpirationswasser und in dem Wasser, das appliziert wurde. Ansonsten wurden die Tritiumkonzentrationen im KfK mit Hilfe eines Beckman-Gerätes (LS 9800) bestimmt.

Die Wasserproben wurden durch verschiedene Methoden gewonnen:

3.3.1. Austausch

Nadelsegmente (ca. 70-100 mg Frischsubstanz) wurden für 24 h in 2 ml tritiumfreies Wasser gebracht, anschließend wird ein Aliquot dieses Wassers ausgemessen

und auf die ursprüngliche Tritiumkonzentration in den Segmenten mit einem Verdünnungsfaktor zurückgerechnet.

3.3.2. Gefriertrocknung

Blatt- und Holzproben werden in diesem Fall eingefroren und anschließend unter Rückgewinnung des Wassers in einer Kühlfalle gefriergetrocknet.

3.3.3. Auspressen

Mit Hilfe einer Druckkammer, wie sie auch für die Wasserpotentialbestimmungen nach Scholander verwendet wird, kann aus kleinen Zweigen der Saft bei unterschiedlichem Druck ausgepreßt werden.

3.3.4. Transpirationswasser

Das Transpirationswasser wurde durch Einhüllen von Zweigen in durchsichtige Plastikbeutel gesammelt. Bei Sonneneinstrahlung kondensiert das transpirierte Wasser an der Innenwand des Beutels und kann so bei Sammelzeiten von einer bis zu mehreren Stunden für die Tritiummessung gewonnen werden.

3.3.5. Organisch gebundenes Tritium

Die Konzentration des organisch gebundenen Tritiums (OBT) wird dadurch bestimmt, daß die gefriergetrocknete Trockensubstanz in einer speziellen Apparatur verbrannt (Oxidiser Ox 300, Fa. Zinser) und das entstandene Oxidationswasser anschließend ausgemessen wird.

3.4. Wasserpotential- und Saftflußmessungen

Neben den Tritiummessungen wurden Tagesgänge der Saftflußgeschwindigkeit mit Hilfe der Heiz-Puls-Methode (Sap Flow Meter HP-1, HAYASHI DENKOH CO. LTD) und des Wasserpotentials mit Hilfe der Druckkammer-Methode nach Scholander aufgenommen.

3.5. Relativer Wassergehalt in Jahresringen und Verkernung

Zur Bestimmung der wasserleitenden Querschnittsfläche nach dem Fällen der Versuchsbäume wurden verschiedene Methoden angewendet:

3.5.1. Kupfersulfat

Durch Aufbringen von pulverisiertem wasserfreiem Kupfersulfat auf die frisch gesägte Stammscheibe wird durch einen Farbumschlag nach blau der feuchte Splint sichtbar. Trockene Bereiche, wie Kernholz oder Astansätze, bleiben hell.

3.5.2. Abschleifen der Stammscheiben

Nach feinem maschinellm Abschleifen der Stammscheiben hebt sich der feuchte Splint durch eine dunklere Tönung deutlich vom "Trockenkern" ab. Die Grenze zwischen feuchtem Splint und "Trockenkern" läßt sich auf diese Weise gut markieren. Nach Abdruck dieser Stammscheiben können die Flächenanteile von Splint und Kern z.B. durch eine gravimetrische Methode ermittelt werden.

3.5.3. Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit

Durch Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in den Jahresringen mit Hilfe von zwei Stech-Elektroden kann ebenfalls die Wasserverteilung im Stamm an Stammscheiben ermittelt werden. Dazu wird eine Spannungsmeßbrücke verwendet, die einen mit einer Frequenz von 1 kHz zwischen positivem und negativem Bereich pulsierenden Strom von 0,45 μA liefert.

3.5.4. Visuelle Bestimmung durch Eindrücken

Durch Eindrücken des Parenchyms der einzelnen Jahresringe mit einer Präpariernadel unter Beobachtung durch eine starke Lupe läßt sich ebenfalls eine grobe Aussage über den relativen Feuchtigkeitsgehalt machen.

3.5.5. Kernspintomographie

Durch Kernspintomographie läßt sich die Feuchtigkeitsverteilung in den Jahresringen von ganzen Stammabschnitten durch Bestimmung des Protonengehaltes relativ einfach ermitteln. Die Stammabschnitte von etwa 1 m Länge wurden dafür gleich nach dem Fällen mit einem Sprühlack versiegelt und bis zur Messung am folgenden Tag aufbewahrt. Die Kernspintomographie ist eine Bildgebungsmethode, bei der die räumliche Verteilung der an Wassermoleküle gebundenen Protonen wiedergegeben wird. Die Technik beruht auf dem "Kernspinresonanz-Effekt" in Verbindung mit magnetischen Gradientenfeldern. Die Abbildungen 4-19 bis 4-21 wurden mittels Kernspintomographie an einem supraleitenden Hochfeldmagneten mit einer Feldstärke von 2,35 Tesla Feldstärke und einer Magnetbohrung von 40 cm aufgenommen (BIOSPEC 24/40 System der Fa. Bruker-Medizintechnik GmbH, Rheinstetten-Karlsruhe)

3.5.6. Stärkeeinlagerungen im Holz

Nach BRAUN [1963, S.110] gelten als wichtigste Kriterien für eine "Verkernung" des Holzes der Verlust der Wasserleitfunktion und das Absterben der lebenden Zellen. Die Anwesenheit von Stärke in den Markstrahlen des Holzes kann dabei als ein Hinweis dafür genommen werden, daß die Zellen trotz Verlustes der Wasserleitfunktion noch am Leben waren. Beim Übergang des Splints in Kernholz sind diese Bereiche normalerweise frei von Stärke [BAMBER, FUKAZAWA 1985]. Zur Bestimmung des Stärkegehaltes im Holz wurden die geschliffenen Stammscheiben mit einer Iod-Iodkali Lösung überschichtet und anschließend auf eine Blaufärbung in den Markstrahlen des Holzes untersucht.

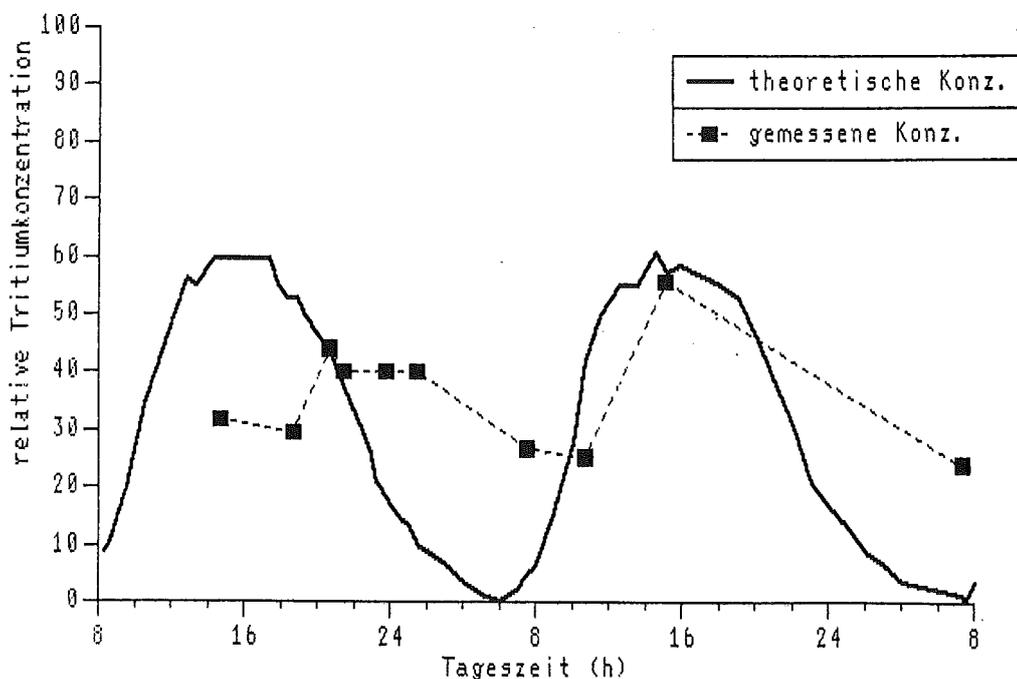
4. ERGEBNISSE

4.1. Untersuchungen zum Verhalten des Tritiumwassers

4.1.1. Austausch der Luftfeuchte mit Gewebewasser

Das Modell wurde an abgeschnittenen Fichtenzweigen, die in einem Gefäß mit Tritiumwasser (Konzentration = 100 %) standen, überprüft. Die relative Luftfeuchte wurde in der Nähe der Nadeln gemessen, so daß sich mit dem oben beschriebenen Modell ein für Gleichgewichtsverhältnisse geltender theoretischer Verlauf der Tritiumkonzentrationen im Gewebewasser ermitteln läßt (Abb. 4-1). Die tatsächlich gemessenen Werte geben diesen Verlauf nur angenähert wieder.

Abb. 4-1: Überprüfung des Tritiummodells anhand der Tagesperiodizität der Tritiumkonzentrationen im Gewebewasser von Fichtennadeln. Nach 24 stündiger Aufsättigung eines gesunden Zweiges mit Tritiumwasser (Konzentration 100 %) wurden unter Freilandbedingungen an zwei aufeinanderfolgenden Schönwettertagen (3.u.4.7.1985) Nadeln zu verschiedenen Zeiten entnommen. Die Kurve für den theoretischen Verlauf ergibt sich aus den mit Hilfe des Modells berechneten Gleichgewichtswerten basierend auf den gemessenen Tagesgängen der relativen Luftfeuchte an diesen Tagen. Die gemessenen Konzentrationen zeigen am 2. Tag deutlich eine Tagesperiodizität, jedoch folgen sie nur bedingt dem theoretischen Verlauf (s.Text).



Erkennbar ist jedoch, daß in den frühen Morgenstunden, wenn die relative Luftfeuchte nahe bei 100 % liegt, aber noch kein Saftfluß stattfindet, die niedrigsten Konzentrationen beobachtet werden, wenn sie auch nicht soweit absinken, wie es das Modell voraussagt. Eine in der Praxis doch nicht ganz tritiumfreie Luftfeuchte in der Nähe der Nadeln könnte einerseits dafür verantwortlich sein. Andererseits ist es möglich, daß der Ausgleich der Tritiumkonzentrationen in den Nadeln doch wesentlich langsamer verläuft, als zunächst angenommen, wobei sich das Schließen der Stomata noch verstärkend auswirkt.

4.1.2. Eindringen von HTO aus der Atmosphäre

Um das Eindringen von dampfförmigem Tritiumwasser durch die Stomata in die Nadeln direkt zu messen, wurden zwei Fichtenzweige im Klimaschrank unter kontrollierten Bedingungen (50 % relative Luftfeuchte, 20 Grad C Lufttemperatur, Weißlicht 12000 lux) für drei Stunden einer Luftfeuchtigkeit mit einem Gehalt an HTO von 6600 Bq/ml ausgesetzt. Für den Versuch wurden Zweige von einer etwa 30-jährigen Fichte auf dem KfK-Gelände in ein Gefäß mit tritiumfreiem Wasser gestellt. Nach einer Expositionszeit von drei Stunden wurden die Zweige aus der Kammer entfernt. Um bei der Bestimmung der Tritiumkonzentration des Gewebewassers sicherzustellen, daß die Messungen nicht durch eine oberflächige Kontamination der Nadeln verfälscht werden, wurde ein Zweig am Ende des Versuchs "trockengefönt" bevor die Tritiumkonzentrationen nach Gefriertrocknung sowohl im Gewebewasser als auch in der organischen Substanz bestimmt wurde (Tab. 4-1). Der Vergleich der beiden Proben zeigt sogar einen etwas höheren Meßwert für die HTO-Konzentration bei den "gefönten" Nadeln. Dies ist eine Bestätigung dafür, daß das HTO tatsächlich im Gewebewasser verteilt ist und somit aus der umgebenden Atmosphäre in die Blätter hineindiffundiert ist. Bei dem gemessenen OBT ist anzunehmen, daß es sich nach einer so relativ kurzen Versuchsdauer in erster Linie um austauschbares Tritium handelt, d.h. es ist zum größten Teil nicht photosynthetisch eingebaut worden, sondern nur mit dem nicht-kohlenstoffgebundenen Wasserstoff ausgetauscht worden.

Der Verlauf der HTO-Konzentrationen ist in relativen Einheiten in Abbildung 4-2 wiedergegeben. Durch die Meßwerte wurde eine Ausgleichskurve entsprechend einer Exponentialfunktion 1. Ordnung gelegt (Gl. 5):

$$C(t) = C(\max) * (1 - \exp(-k * t)) \quad (5)$$

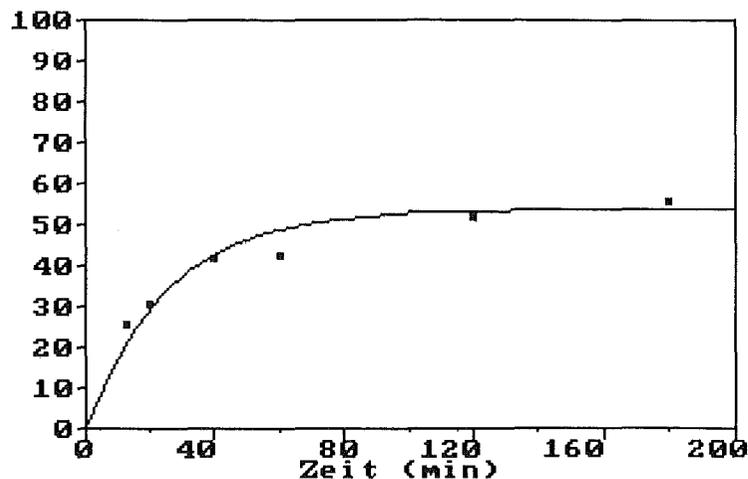
(C(t) = aktuelle HTO-Konzentration in den Nadeln, C(max) = maximale HTO-Konz. in den Nadeln, k = Geschwindigkeitskonstante der HTO-Aufnahme, t = Versuchszeit)

Die Aufnahme rate k liegt danach bei dieser graphisch angepaßten Ausgleichskurve bei einem Wert von $k = 0,04$ pro min entsprechend einer Verdopplungszeit der HTO-Konzentration in den Nadeln von 17,3 Minuten.

Tab. 4-1: HTO-Aufnahme von Nadeln bei Exposition im Klimaschrank Fichtenzweige in Gefäßen mit tritiumfreiem Wasser wurden für 3 h einer tritiumhaltigen Luftfeuchtigkeit exponiert (rel. Luftfeuchte 50 %, Lufttemperatur 25 Grad C, Weißlicht 12000 lux, HTO=Gewebewasser, durch Gefrier-trocknung gewonnen, OBT= organ. gebunden in der Trockensubstanz, Angabe bezogen auf das Oxidationswasser)

Probe	Tritiumkonzentrationen in Bq/g		
	in der Luftfeuchte	in den Nadeln nach 3 h	
		HTO	OBT
unbehandelt	6600	825	163
"gefönt"	6600	932	176

Abb. 4-2: Kinetik der HTO-Aufnahme in Nadeln aus der Luftfeuchte (Versuchsbedingungen wie bei Tab. 4-1). Nach unterschiedlichen Versuchszeiten wurden die Tritiumkonzentrationen im Gewebewasser der Nadeln bestimmt (in relativen Einheiten). Die graphisch angepaßte Ausgleichskurve beschreibt einen exponentiellen Anstieg der HTO-Konz. entsprechend einer Verdopplungszeit von 17,3 min.



4.1.3. Tritium im aufgefangenen Transpirationswasser

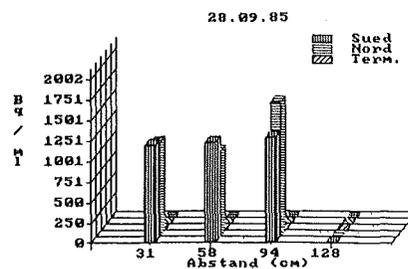
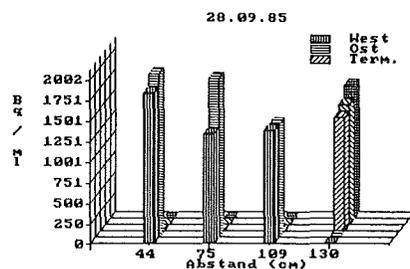
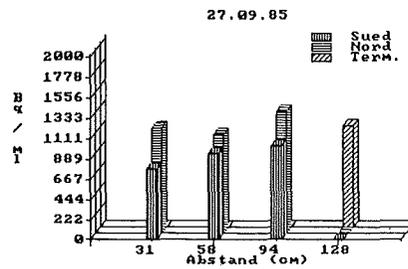
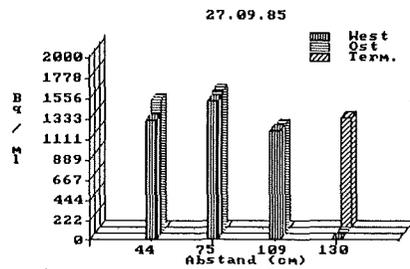
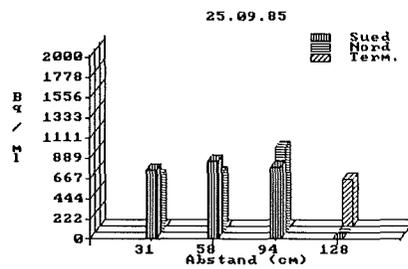
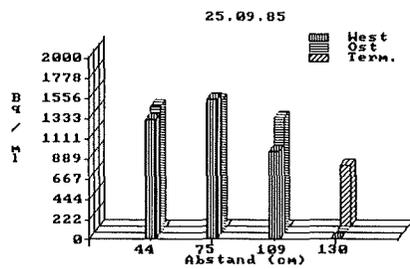
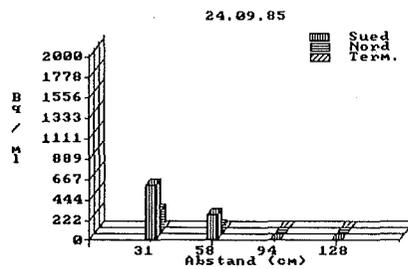
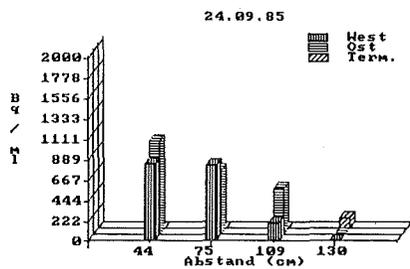
Die Sammlung von Transpirationswasser mit Hilfe von PVC-Beuteln wurde an abgeschnittenen Ästen getestet. Die Äste wurden von dem Versuchsbaum-Paar E und F gegen 15 Uhr (23.9.85) entnommen und auf einer Freifläche neben dem Bestand für 6 Tage (bis 28.9.85) in Gefäßen mit Wasser bekannter HTO-Konzentration gestellt (3600 Bq/ml). Die Äste wurden so ausgewählt, daß sie dem Wuchs nach etwa gleich ausgebildet waren. An den Bäumen waren sie in südlicher (E, Schadstufe 0) und westlicher Richtung (F, als Ast eingestuft in Schadstufe 1) orientiert. Die Seitenzweige 2. Ordnung (in Abb. 4-3 mit den Abständen in cm von der Schnittstelle und entsprechend ihrer Orientierung am Baum bezeichnet) sowie der Terminaltrieb (Mitteltrieb einschließlich seitlichem Austrieb) wurden am nächsten Tag (24.9.) in PVC-Beutel eingehüllt. Nachdem sich etwa 10 ml Transpirationswasser an der Innenseite der Beutel niedergeschlagen hatten (etwa in der Zeit von 11 bis 14 h), wurden die Beutel entfernt und die HTO-Konzentration im Kondensat sofort bestimmt. Abb. 4-3 zeigt im Vergleich die Tritiumkonzentrationen im Transpirationswasser von beiden Ästen an vier Tagen. Es ist zu sehen, daß die Tritiumkonzentrationen im Transpirationswasser der Zweige am 4. Tag (27.09.) ihr Maximum erreicht haben, wobei sie aber in beiden Ästen nur bei etwa 50 % der im Gefäß vorliegenden Konzentration liegen. Ein mehrmaliger Wechsel der PVC-Beutel innerhalb der Mittagszeit, wie es am Terminaltrieb des gesunden Astes am 5. Tag versucht wurde, bringt dabei nur eine geringfügige Steigerung der Konzentration (Abb. 4-3 links unten, gesunde Fichte 28.9.). Für den Terminaltrieb des Astes F liegen an diesem Tag keine Meßwerte vor.

Dieses Ergebnis war Grund für einige Kontrollversuche, bei denen anstelle eines transpirierenden Zweiges lediglich ein Evaporimeter, das mit Tritiumwasser gefüllt war, in einen PVC-Beutel eingehüllt wurde. Es zeigte sich, daß hier ebenfalls nur ein bestimmter Anteil der vorgegebenen Tritiumkonzentration gemessen werden konnte, d.h. es findet ein Austausch mit der Umgebungsluft statt, und zwar entweder durch die PVC-Folie hindurch oder an der Stelle, an der der Beutel um den Ast möglichst luftdicht - jedoch nicht vollständig - befestigt wurde. Dies muß unter genau kontrollierten Bedingungen noch geprüft werden. Unter Berücksichtigung dieses Fakts handelt es sich ansonsten um eine brauchbare Methode, um schnell einen Überblick über die Verteilung von injiziertem Wasser in der Krone eines Baumes zu bekommen.

Abb. 4-3: HTO im Transpirationswasser abgeschnittener Äste vom Versuchsbaum-Paar E und F, die für 6 Tage (23.9. bis 28.9.85) auf dem Versuchsgelände "Kälbele-scheuer" in Tritiumwasser (3600 Bq/ml) standen. Die Seitentriebe 2. Ordnung (nach Abstand in cm von der Schnittstelle und ihrer Orientierung am Baum be-zeichnet) sowie der Terminaltrieb (Term.= Mitteltrieb einschließlich seitlichem Austrieb) wurden an 4 Tagen in PVC-Beutel eingehüllt. Das so in 2 - 3 Stunden gesammelte Transpirationswasser wurde direkt ausgemessen. Vier Tage nach der Applikation haben die Konzentrationen ihr Maximum erreicht. Sie liegen dann nur bei etwa 50 % der applizierten Konzentration. Ein mehrmaliger Wechsel des PVC-Beutels am Terminaltrieb des gesunden Astes (130 cm) während der Mittagszeit am 28.9. bringt nur eine geringfügige Steigerung. Für den Terminaltrieb des kranken Baumes liegen an diesem Tage keine Meßwerte vor.

Gesunde Fichte E

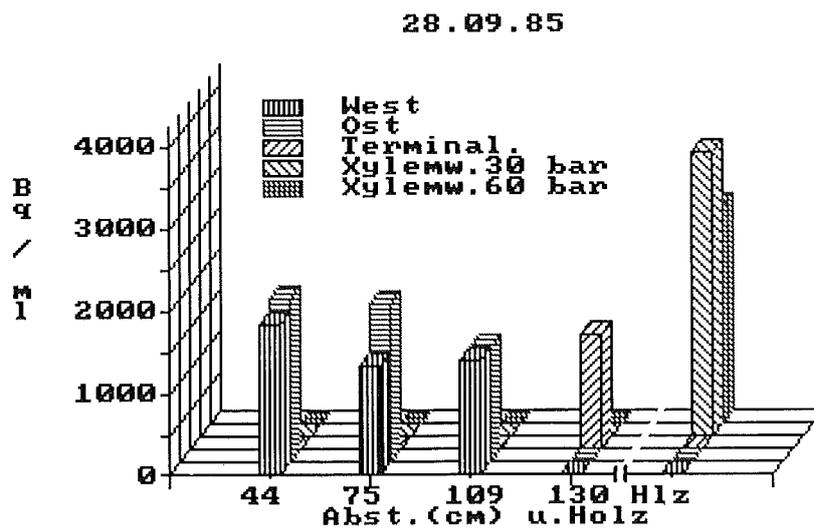
Kranke Fichte F



4.1.4. Tritium im ausgepreßten Xylemwasser

Bei dem in Abbildung 4-3 dargestellten Versuch wurde am Ende der Meßreihe das Xylemwasser des gesunden Zweiges (E) nach Entfernung der Nadeln mit Hilfe einer Druckkammer ausgepreßt. Im ausgepreßten Wasser lassen sich dabei nahezu 100 % der im Vorratsgefäß vorliegenden Tritiumkonzentration wiederfinden, zumindest bei dem Saft, der bis zu einem Druck von ca. 30 bar aus dem Holz austritt. Der Saft, der nach einer Druckerhöhung auf ca. 60 bar aufgefangen werden kann, hat eine etwas niedrigere HTO-Konzentration (Abb. 4-4). Der Grund dafür läßt sich darin vermuten, daß nach der Druckerhöhung ein Teil des in den Zellwänden "gebundenen" Wassers austrat, wobei es bei diesem Wasser während der Exposition mit HTO aufgrund der geringeren Beweglichkeit nicht zu einem vollständigen Konzentrationsausgleich gekommen war.

Abb. 4-4: HTO im Xylem des gesunden Astes im Vergleich zum Transpirationswasser beim in Abb. 4-3 dargestellten Versuch am 28.9.85. Das Xylemwasser (HLz) des Terminaltriebes wurde mit Hilfe einer Druckkammer bei unterschiedlichen Drücken (30 und 60 bar) ausgepreßt.

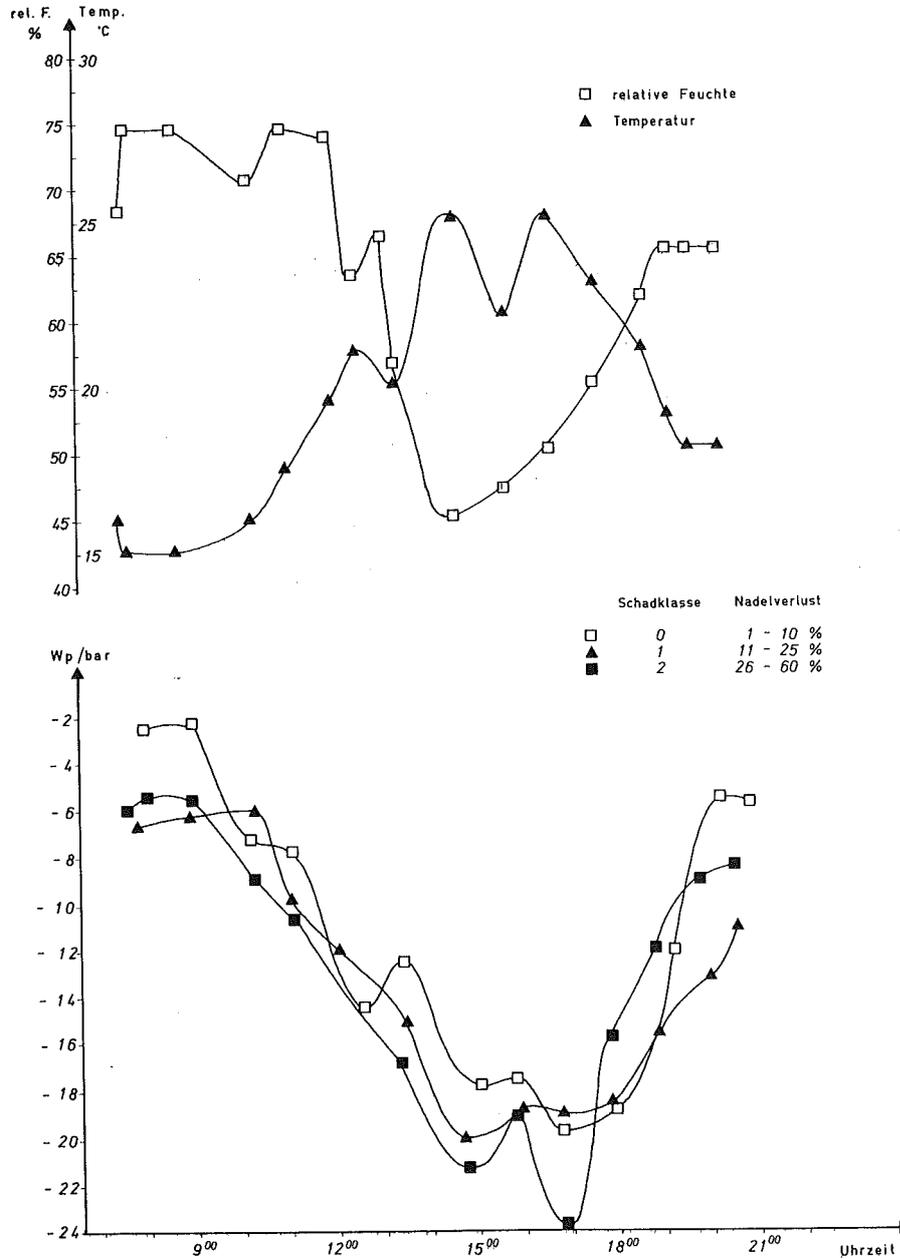


4.2. Wasserpotentialmessungen

1984 wurden auf der Beobachtungsfläche "Kälbelescheuer" Tagesgänge des Wasserpotentials an einer gesunden (Schadklasse 0) und an zwei geschädigten Fichten (Schadklasse 1 und 2) aufgenommen. Die etwa 14-jährigen Bäume standen an einem Südwesthang in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander. Gemessen wurde an den jüngsten Trieben des 7. und 8. Quirls auf der Talseite. Die einzelnen Punkte in Abbildung 4-5 repräsentieren 2 bis 3 Messungen.

Aufschlußreich sind zunächst die in den frühen Morgenstunden durchgeführten Messungen (Pre-dawn-Werte) bis ca. 9.00 Uhr, je nach Lage der Bäume. Bis zu dieser Zeit haben gesunde Bäume bei normaler Wasserversorgung in der Regel ihre Transpirationsverluste vom Vortag wieder ausgeglichen, d.h. ihr Wasserpotential hat sich dem Wasserpotential des Bodens weitgehend angeglichen. Die etwas niedrigeren Wasserpotentialwerte von -6 und -7 bar der kranken Bäume weisen darauf hin, daß es den kranken Bäumen im Vergleich zu den gesunden nicht mehr so gut gelingt, ihren Wasserverlust vom Vortag auszugleichen. Der Vergleich der Kurven in den frühen Abendstunden bestätigt diesen Eindruck. Während sich der gesunde Baum gegen 20 Uhr offenbar schon weitgehend erholt hat, zeigen die bis zum Ende der Meßreihe ansteigenden Werte der kranken Bäume, daß bei ihnen die Erholungsphase noch nicht abgeschlossen ist.

Abb. 4-5: Tagesgänge des Wasserpotentials bei Fichten unterschiedlicher Schädigung (Schadklassen 0 - 2) am Standort "Kälbelescheuer" (August 1984) - Vergleich mit Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte. Gemessen wurde das Potential im Xylem der jüngsten (1984) Triebe des 7. und 8. Quirls auf der Talseite.



Tab. 4-2: Pre-dawn-Werte des Wasserpotentials nach Trockenperiode (5 regenlose Tage) von Nadeln einer gesunden (Schadklasse 0) und einer kranken (Schadklasse 3) Fichte bei Moosbronn (Angaben in bar)

Schadklasse	1. Jahrgang		2. Jahrgang	
	0	3	0	3
	- 4,5	-10,0	- 7,5	- 9,0
	- 5,5	- 9,5	- 6,0	- 7,0
	- 6,0	- 6,0	- 4,5	-10,5
	- 5,0	- 1,0	- 7,5	-10,5
	- 6,5	-10,5		- 9,5
		- 8,5		- 9,0
		- 6,5		
Mittel	-5,5±0,8	-8,8±1,6	-6,6±1,3	-8,9±1,5

Um weiteren Einblick in den Wasserzustand kranker Fichten zu bekommen, wurden außerdem zwei Reihen von Pre-dawn-Messungen an Fichten bei Moosbronn (Nord-schwarzwald) durchgeführt. Die erste Meßreihe (Tab. 4-2) fand nach einer strahlungsreichen Trockenperiode von 5 Tagen statt, die zweite Meßreihe (Tab. 4-3) wurde an den gleichen Bäumen nach einem starken Regen vorgenommen. Somit konnte bei der ersten Meßreihe von einer Belastung des Wasserhaushalts ausgegangen werden. Gemessen wurden die Nadeln des 1. und 2. Jahrgangs von ca. 20 jährigen Fichten mit den geschätzten Schadklassen 0 und 3.

Diese Messungen bestätigen die Befunde des Standorts Kälbelescheuer (Abb. 4-5). Sie zeigen, daß der Wasserhaushalt bei kranken Fichten zumindest in der morgendlichen Dämmerung angespannter ist als bei gesunden. Beim 1. Nadeljahrgang lagen die Werte im Mittel um 3,3 und beim 2. Jahrgang um 2,3 bar niedriger.

Diese Meßreihe wurde einige Tage später an den selben Bäumen und Zweigen wiederholt, nachdem es zuvor stark geregnet hatte. Zusätzlich wurden noch die Nadeln des 3. Jahrgangs gemessen, die z.T. schon vergilbt waren und an den Spitzen auch leichte Braunfärbungen aufwiesen. Wie die relativ hohen Werte in Tab. 4-3 zeigen, sind die Nadeln insgesamt besser mit Wasser versorgt als am 1. Meßtag. Unterschiede zwischen dem gesunden und dem kranken Baum sind kaum noch zu erkennen.

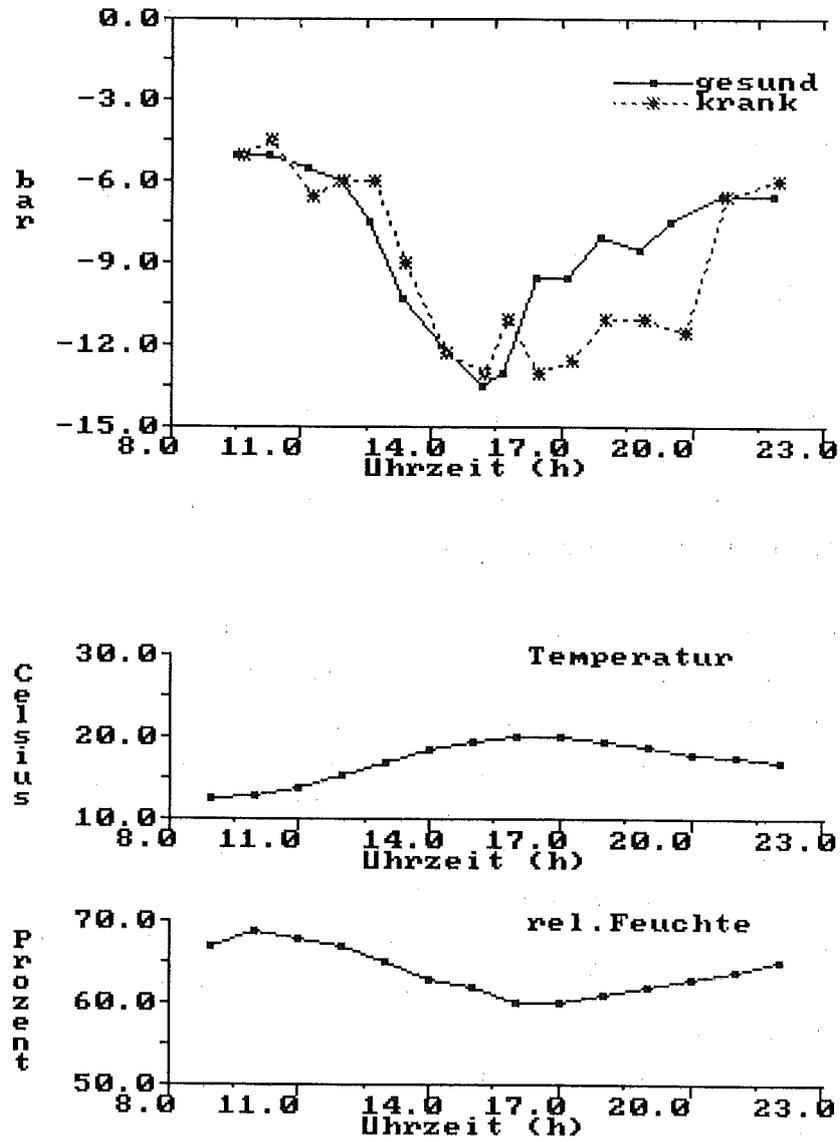
Tab. 4-3: Pre-dawn-Werte des Wasserpotentials nach Regen an Nadeln einer gesunden (Schadklasse 0) und einer kranken Fichte (Schadklasse 3) bei Moosbronn (Angaben in bar)

	1. Jahrgang		2. Jahrgang		3. Jahrgang	
Schadkl.	0	3	0	3	0	3
	-5,0	-6,5	-6,0	-7,5	-4,5	-1,5
	-3,5	-4,0	-3,5	-5,5	-3,5	-0,5
	-4,5	-4,5	-4,0	-5,0	-4,5	-0,5
	-4,0	-4,5	-5,0	-3,5	-4,0	-4,5
			-5,5		-4,0	-2,0
Mittel	-4,2±0,6	-4,9±1,1	-4,8±1,0	-5,4±1,7	-4,1±0,4	-1,9±1,7

Die hohen Werte des 3. Jahrgangs beim kranken Baum von - 0,5 bis - 2,0 bar sind offensichtlich ein Zeichen letaler Schädigung der Nadeln. Durch weitgehende Zerstörung der Zellmembranen in den stark nekrotisierten Nadeln kann hier kein osmotisches Potential mehr aufgebaut werden.

Es wurden an dem Versuchsbaum-Paar A und B auf der Kälbelescheuer, bei dem später Tritiumuntersuchungen vorgenommen wurden, ebenfalls zu verschiedenen Zeiten Tagesgänge des Wasserpotentials aufgenommen. Bei den Tagesgängen am 30.08.85 (Abb.4-6) lassen sich Unterschiede im Verlauf erkennen. Zunächst beginnen an diesem Schönwettertag beide Bäume mit frühmorgendlichen Wasserpotentialwerten von -5 bar und der Abfall bis zum Mittag vollzieht sich fast gleich. Bei beiden Bäumen kommt es dann ab 15.00 Uhr an diesem durchgehenden Schönwettertag zum Schließen der Stomata. Während allerdings das Wasserpotential der gesunden Fichte anschließend bis zum Abend allmählich abfällt, öffnet die kranke Fichte die Stomata bald wieder. Erst gegen 20.00 Uhr läßt sich anhand der Wasserpotentialwerte ein zügiges Schließen erkennen. Das längere Verharren auf einem relativ niedrigem Niveau beim kranken Baum könnte darauf hinweisen, daß der kranke Baum die Tageszeit länger zur Assimilation ausnutzt. Der anschließende abrupte Abfall des Wasserpotentials bei Sonnenuntergang auf das gleiche Niveau wie das Wasserpotential des gesunden Baumes zeigt aber auch, daß dieser Baum noch keine ernsthaften Probleme mit der Wasserversorgung hat. Darauf weisen auch die trotz längerer Trockenheit noch relativ hohen Pre-dawn-Werte hin. Insofern konnten hier die Beobachtungen einer angespannten Wasserversorgung erkrankter Fichten von 1984 in dieser Form nicht bestätigt werden.

Abb. 4-6: Tagesgang der Wasserpotentiale am 30.08.85 an den Versuchsbäumen A und B ("Kälbelescheuer") im Vergleich mit Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit. Gemessen wurden die jüngsten Triebe.



4.3. Saftflußgeschwindigkeiten (Heiz-Puls-Methode)

An den Versuchsbäumen im Bereich "Kälbelescheuer" wurden in der Zeit August/September 1985 eine Reihe von Tagesgängen der Saftflußgeschwindigkeiten mit Hilfe der Heiz-Puls-Methode aufgenommen. Hierbei werden zwei Temperatur-Meßfühler in unterschiedlichem Abstand oberhalb und unterhalb von einer Heizsonde in den Stamm ca. 2 cm eingebohrt. Die angegebenen Geschwindigkeiten in cm/h wurden nach den Angaben des Geräteherstellers aus dem Abstand zwischen zwei Temperatur-Meßsonden und der zeitlichen Differenz, mit der sich die Temperaturen an diesen Meßfühlern angleichen, berechnet. Diese "Kompensations-Meßtechnik" geht auf eine Beschreibung von HUBER und SCHMIDT [1937] zurück, die sie für die Messung langsamer Saftströme in Nadelhölzern entwickelt hatten. Eine Kalibrierung, soweit dies überhaupt möglich ist, wurde nicht vorgenommen. Die Messungen wurden ebenfalls an Paaren einer gesunden und einer kranken Fichte vorgenommen, wobei an jedem Baum jeweils zwei Sätze von Meßsonden an unterschiedlichen Stellen im Stamm angebracht wurden, in der Regel im Bereich von 1 - 2 m über dem Boden, in einem Fall (22.8.) auch in 6 m Höhe über dem Boden.

Die derart bestimmten Saftflußgeschwindigkeiten im Splint der Stämme zeigen stets eine starke Streuung an verschiedenen Meßpunkten (Abb. 4-7 bis 4-9). Wahrscheinlich wirkt es sich bereits auf die registrierte Geschwindigkeit aus, wenn sich die Spitzen der relativ kleinen Meßsonden (Durchmesser 2,0 mm) an verschiedenen Positionen im Jahresring (z.B. Frühholz oder Spätholz) befinden, denn die Saftflußgeschwindigkeiten sind zum einen dem Saugspannungsgradienten und zum anderen aber auch dem Quadrat der Kapillaren-Radien proportional (vgl. ZIMMERMANN 1971, S.190 - 195).

Die gemessenen mittäglichen Höchstgeschwindigkeiten liegen im Bereich von 8 bis 17 cm/h und erscheinen damit im Vergleich zu Angaben in der Literatur, z.B. SCHUBERT [1939] mit 1,2 - 1,4 m/h bei Koniferen, sehr niedrig. Berechnet man aus den gemessenen Geschwindigkeiten für einen Tag die jeweils zurückgelegte Strecke, so kommt man für die verschiedenen Tagesgänge auf Strecken im Bereich von 60 bis 140 cm/d. Diese Entfernungen lassen sich recht gut mit den mit der "Tritium-Methode" ermittelten Werten für einen ganzen Tag vergleichen (s.S. 31). In Abb. 4-10 sind für den 22.08.1985 die integrierten Saftflußgeschwindigkeiten für einen ganzen Tag dargestellt.

Aufgrund der Erkenntnisse über laminare Strömungen in Kapillaren, die von HAGEN und POISSEUILLE im letzten Jahrhundert gewonnen wurden, sind die Absolutangaben

der Strömungsgeschwindigkeit des Saftflusses (z.B. in m/h oder cm/s) jedoch fragwürdig. Danach bewegen sich die Wassermoleküle in den Kapillaren mit Geschwindigkeiten von 0 an der Wandung bis zu einem Maximum im Zentrum (vgl. ZIMMERMANN 1983, S.13-15).

Während für die absolute Beschreibung der Saftflußgeschwindigkeiten integrierende Methoden, wie eine Isotopen-Methode oder die Bestimmung der Volumengeschwindigkeit, wie sie bei CERMAK et al. [1982] und SCHULZE et al. [1985] beschrieben wurde, besser geeignet sind, so liefern Messungen nach der Heiz-Puls-Methode allerdings Erkenntnisse über relative Geschwindigkeitsveränderungen im Vergleich. Die Tagesgänge der Saftflußgeschwindigkeiten weisen so an einem durchgehend sonnigen Tag (Abb. 4-9) bei beiden Bäumen eine ausgeprägte Mittagsdepression auf, d.h. auch der kranke Baum zeigt eine Regulation der Stomata und keine ungehemmte Transpiration. Ansonsten sind an den Tagesgängen aufgrund der oben erwähnten methodisch bedingten Streuungen in ihrem Verlauf keine signifikanten Unterschiede zwischen gesund und krank zu erkennen.

Abb. 4-7: Tagesgang der Saftflußgeschwindigkeiten am 30./31.08.85 von zwei Fichten (Versuchsbäume A, gesund, und B, krank) in cm pro h, gemessen mit der Heiz-Puls-Methode an je zwei verschiedenen Positionen 1 - 2 m über dem Boden.

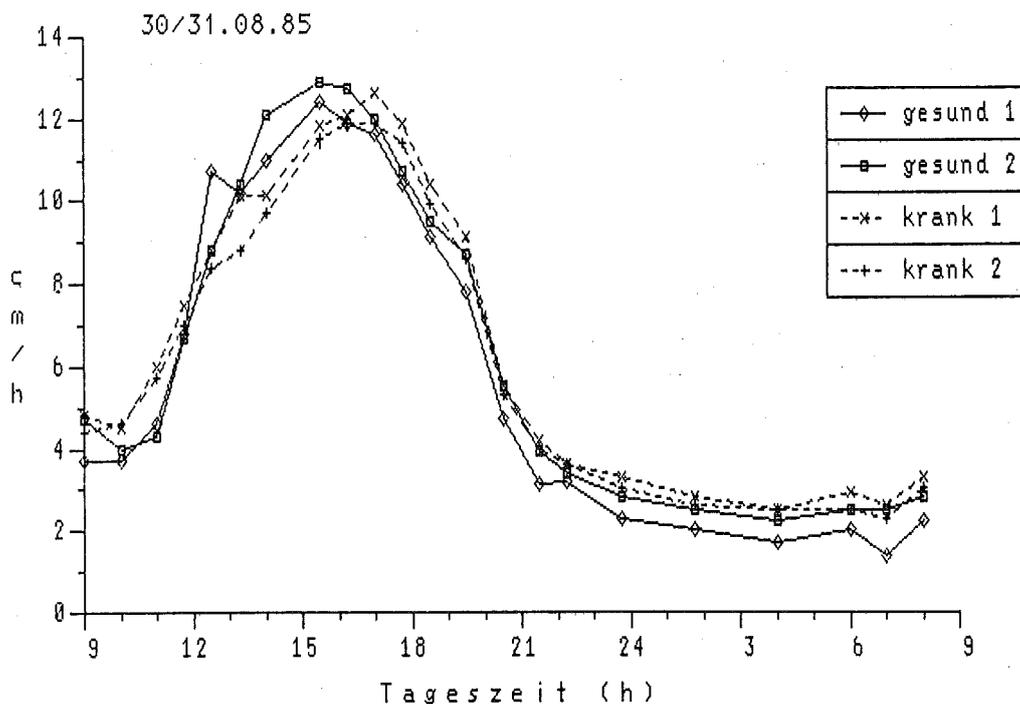


Abb. 4-8: Tagesgang der Saftflußgeschwindigkeiten am 20.09.85 von zwei Fichten (Versuchsbäume A, gesund, und B, krank) in cm pro h, gemessen mit der Heiz-Puls-Methode an je zwei verschiedenen Positionen 1 - 2 m über dem Boden.

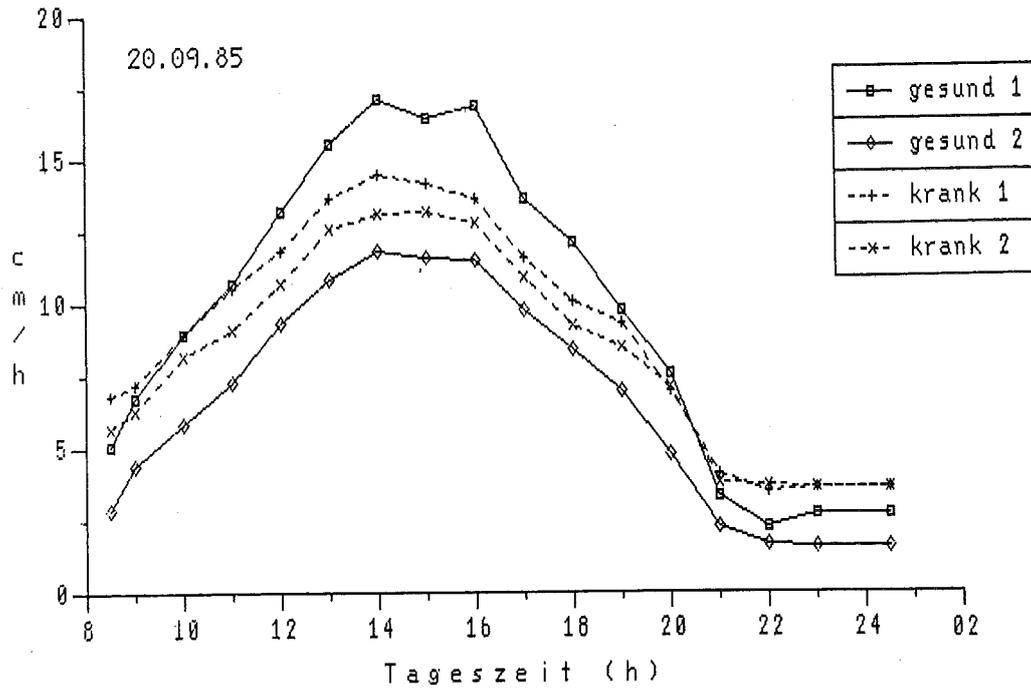


Abb. 4-9: Tagesgang der Saftflußgeschwindigkeiten am 22.08.85 von zwei Fichten (Versuchsbäume A, gesund, und B, krank) in cm pro h, gemessen mit der Heiz-Puls-Methode an je zwei verschiedenen Positionen (1 = 1,5 m und 2 = 6 m über dem Boden).

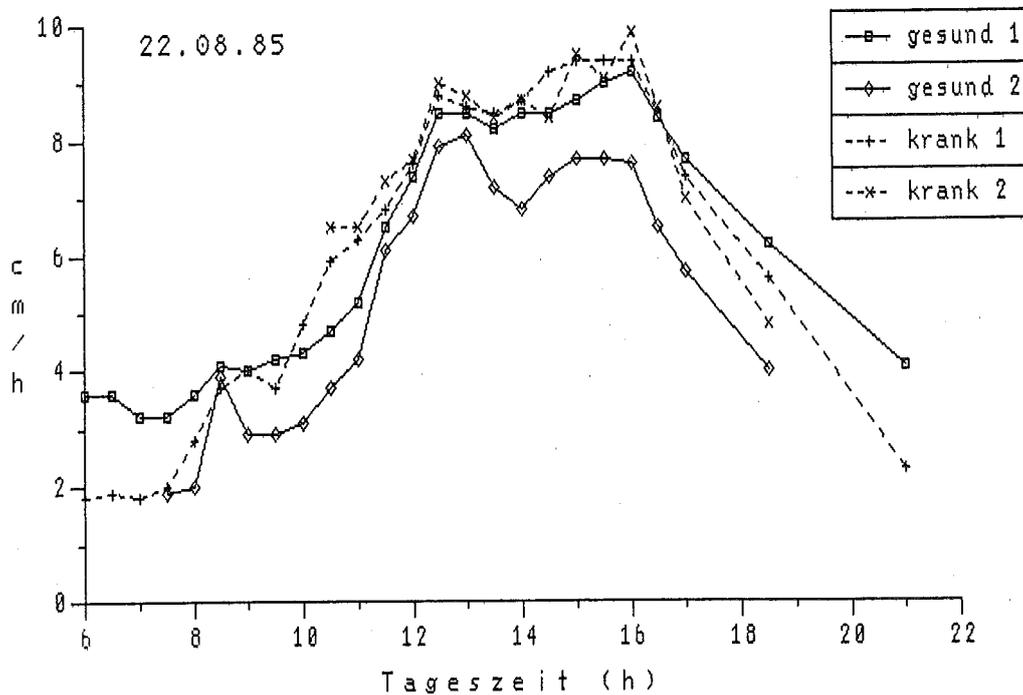
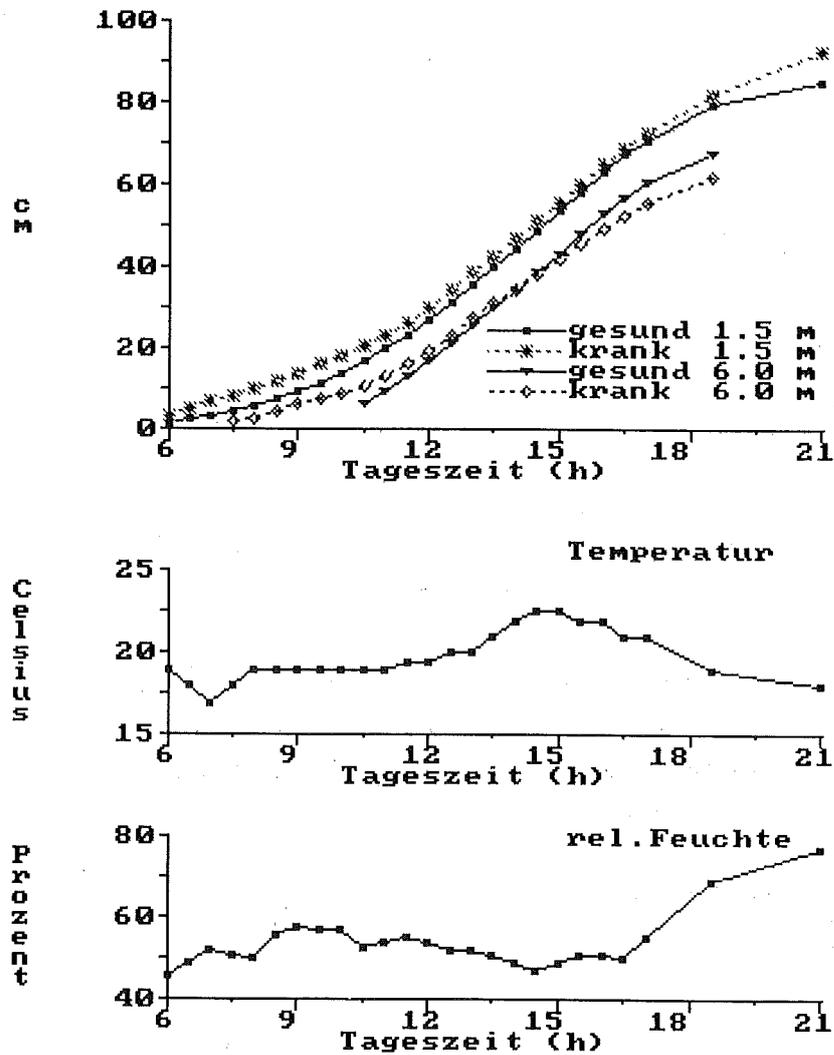


Abb. 4-10: Zurückgelegte Saftflußstrecke (22.08.85) in cm bei Versuchsbäumen A und B (integriert nach Geschwindigkeitsmessungen mit der Heiz-Puls-Methode, dargestellt in Abb. 4-9) im Vergleich mit der Lufttemperatur und der relativen Feuchte.



4.4. Wasserführung in Stamm und Ästen stehender Bäume

4.4.1. Geschwindigkeit des Transpirationsstromes

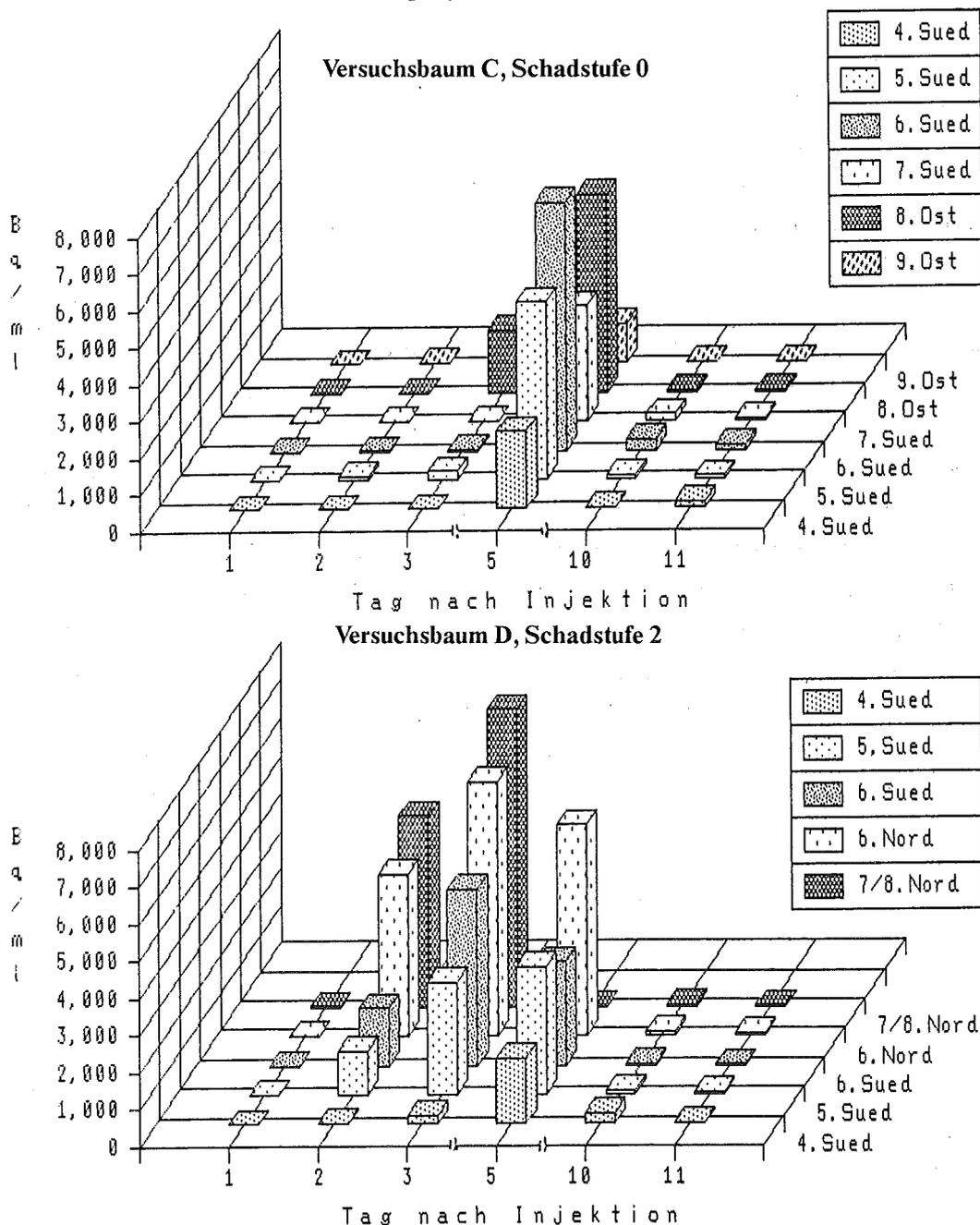
Für die Untersuchung der Wasserführung in Stamm und Ästen lebender Bäume wurde der Saft von ausgesuchten Baumpaaren in den Monaten August und September 1985 durch Infusionen von Tritiumwasser (HTO) markiert. Die Infusion in die Ver-

suchsbäume A und B verlief unterschiedlich. Beim gesunden Versuchsbaum A lief das Vorratsgefäß während der Nacht leer, nachdem der Baum etwa 220 ml Tritiumwasser aufgenommen hatte. Auf diese Weise konnte Luft in die Bohrung an der Infusionsstelle gelangen, so daß die Vergleichbarkeit zwischen beiden Bäumen nicht mehr gewährleistet war. Die Tritiumkonzentrationen in den Nadeln dieses Baumpaares wurden deshalb anschließend nur stichprobenartig verfolgt.

Bei den Versuchsbäumen C und D wurden größere Vorratsflaschen gewählt, so daß die Bäume das Tritiumwasser emboliefrei solange einsaugen konnten, bis die Bohrung verstopft war. Die Infusionen erfolgten etwa in Höhe des Kronenansatzes auf der Nord-Ost-Seite, und zwar in je eine Bohrung, die durch mehrere Jahresringe hindurch ging (ca. 2 cm tief). Das Anbohren erfolgte am 7.9.85 um 11.00 (Baum C) bzw. 12.30 h (Baum D) durch eine Wassermanschette hindurch. Die Bäume konnten das HTO aus einer Vorratsflasche bis zum Verstopfen der Bohrung einziehen. Am Morgen des folgenden Tages war die Infusion bei beiden Bäumen bereits beendet, nachdem sie insgesamt 1100 ml (Baum C, gesund) bzw. 900 ml (Baum D, krank) aufgenommen hatten. Die Aktivitätskonzentration des Wassers betrug 370 kBq/g.

Durch Auffangen des Transpirationswassers bis zu den obersten Ästen an mehreren Tagen sollte die Geschwindigkeit ermittelt werden, mit der das Tritiumwasser in den Bäumen an einem Tag transportiert wird. Abbildung 4-11 zeigt die so aufgenommenen Vertikalprofile der Tritiumkonzentrationen im Transpirationswasser, die an mehreren Tagen oberhalb der Infusionsstellen aufgenommen wurden. Die interessanten Konzentrationen wären beim gesunden Baum erst zwischen dem 5. und 10. Tag zu beobachten gewesen, wo es keine Meßergebnisse gibt. Es läßt sich jedoch sagen, daß die vertikale Wanderung des HTO im Stamm des kranken Baumes deutlich schneller ist. Durch eine grobe Abschätzung der Strecken von der Injektionsstelle bis hin zu den entsprechenden Zweigen kommt man auf Geschwindigkeiten von ca. 55 cm pro Tag im gesunden und ca. 133 cm/Tag im kranken Baum. Im kranken Baum bewegt sich das HTO somit, über einen Tag integriert, mit etwas mehr als der doppelten Geschwindigkeit.

Abb. 4-11: Vertikalprofile der HTO-Konzentrationen im Transpirationswasser nach Infusion von Tritiumwasser (HTO-Konzentration 370 kBq/g) in den Stamm der Versuchsbäume C und D an der "Kälbelescheuer" (oben: gesunde Fichte C - Schadst. 0, unten: kranke Fichte D - Schadst. 2). Das Anbohren erfolgte emboliefrei etwa in Höhe des Kronenansatzes am 7.9.85 um 11.00 (Baum C) bzw. um 12.30 h. Bis zum Verstopfen der Bohrung (im Verlauf der Nacht) konnten die Bäume das Tritiumwasser (C=1100 ml, D=900 ml) aus einer Vorratsflasche aufnehmen. Beim kranken Baum ist in den unteren Quirlen das Konzentrationsmaximum bereits am 3. Tag nach der Infusion überschritten, während es im gesunden Baum nicht vor dem 5. Tag auftritt.



4.4.2. Verteilung des Transpirationsstromes

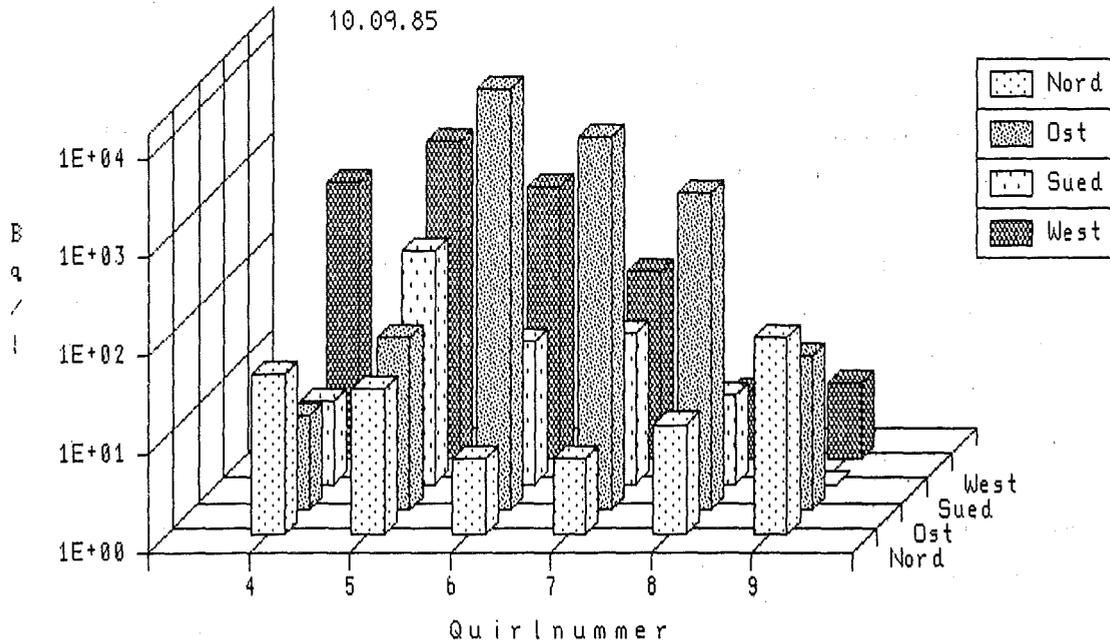
Durch eine Aufnahme von Profilen des Transpirationswassers über einen Großteil der ganzen Krone an einem Tag konnte ein Überblick darüber gewonnen werden, wie das an einer Stelle des Stammes eingebrachte Tritiumwasser im Kronenbereich verteilt wird. In Abbildung 4-12 sind diese Profile der Tritiumkonzentrationen dargestellt. Die Konzentrationen sind in diesem Fall logarithmisch angegeben. Im kranken Baum liegen die Werte an diesem Tag allgemein höher. Dabei zeigt sich jedoch im Vergleich der beiden Bäume ein interessanter Unterschied in der Verteilung des Tritiumwassers. Es ist auffällig, daß im gesunden Baum die Konzentrationen recht systematisch abgestuft sind, wobei die Maxima in den verschiedenen Himmelsrichtungen unterschiedlich verteilt sind. Im kranken Baum hingegen ist eine solche systematische Differenzierung nicht zu erkennen.

Offensichtlich steht diese Beobachtung damit in Zusammenhang, daß in Koniferen der Transpirationsstrom in gedrehter Richtung verläuft [VITÉ 1958, 1959]. Bei Fichten sind bisher spiralig rechtsdrehende Formen beobachtet worden [RUDINSKY, VITÉ 1959]. Beim gesunden Baum wird dieses Wasser mit einer solchen Drehrichtung weitergeleitet, woraus man schließen kann, daß das Wasserleitungssystem hier intakt ist. Im kranken Baum hingegen ist eine Drehrichtung nicht zu erkennen, d.h. das Wasserleitungssystem liegt hier nicht mehr im physiologisch originären Zustand vor.

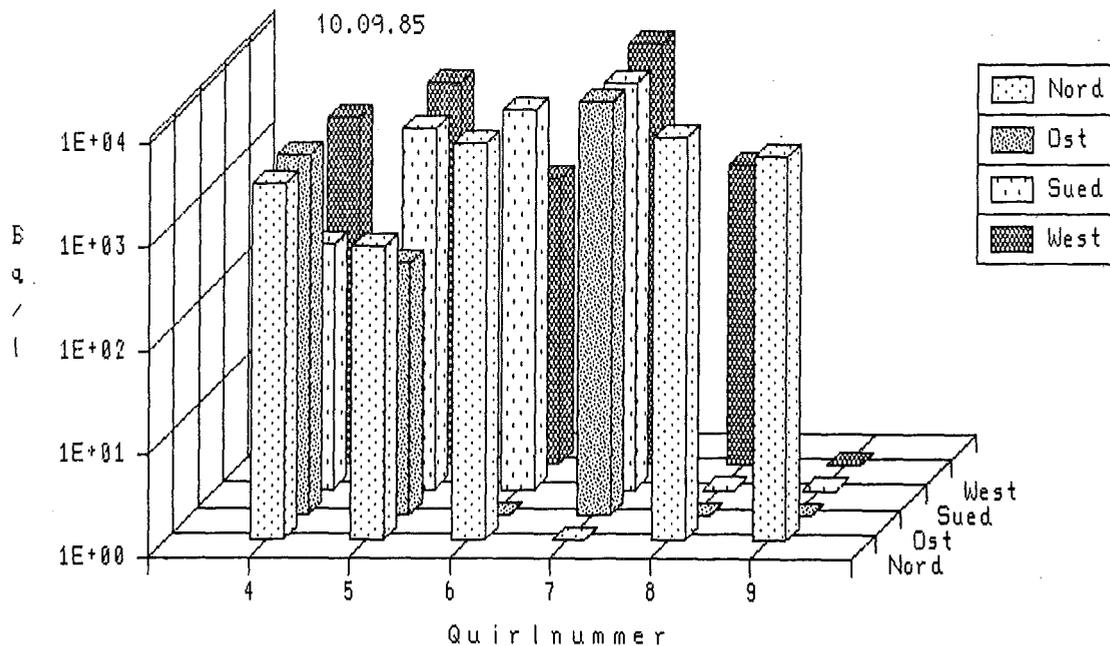
Zusammen mit der Beobachtung eines schnelleren Transportes der markierten Wassermoleküle im kranken Baum läßt sich hieraus schließen, daß die wasserleitende Querschnittsfläche im Xylem reduziert ist. Dabei muß der Transpirationsstrom durch Verengungen wie durch einen Flaschenhals hindurch, wobei sich das Wasser des Saftflusses intensiv vermischt.

Abb. 4-12: Verteilung des HTO im Transpirationswasser in der Krone der Versuchsbäume C und D am 10.9.85 (Daten der Infusion: siehe Abb. 4-11). Die logarithmische Darstellung zeigt beim gesunden Baum entsprechend einer Wasserleitung mit einer Drehrichtung eine systematische Abstufung der Konzentrationen je nach Orientierung am Stamm, während dies beim kranken Baum nicht zu erkennen ist.

Versuchsbaum C, Schadstufe 0



Versuchsbaum D, Schadstufe 2



4.4.3. Injektion in Äste

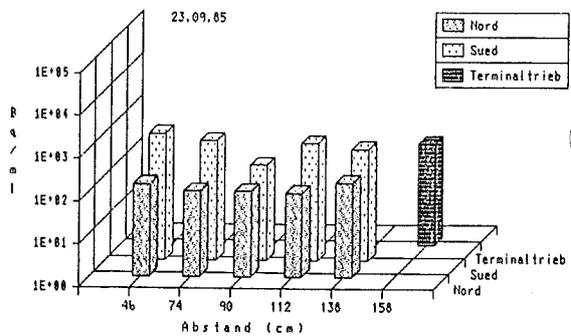
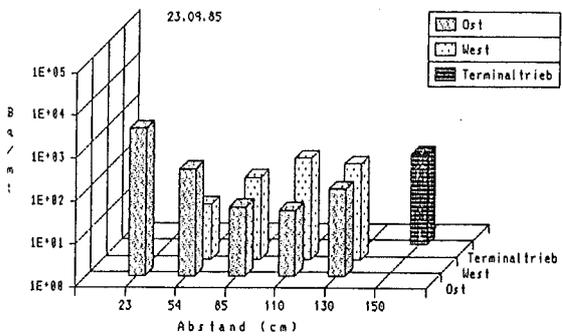
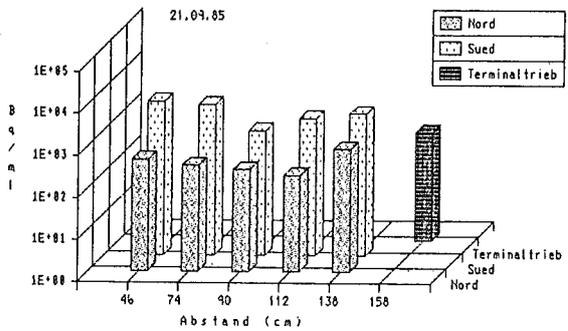
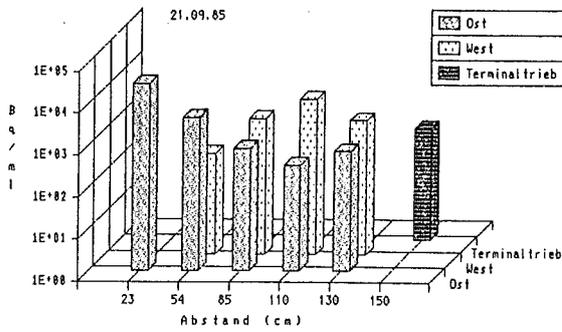
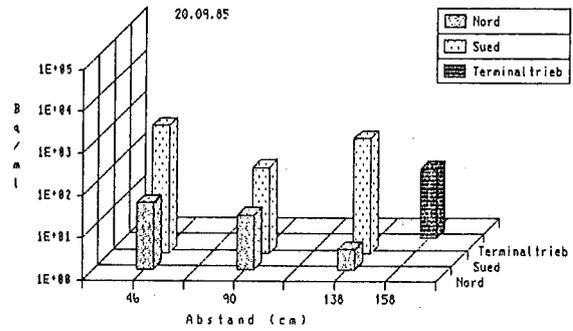
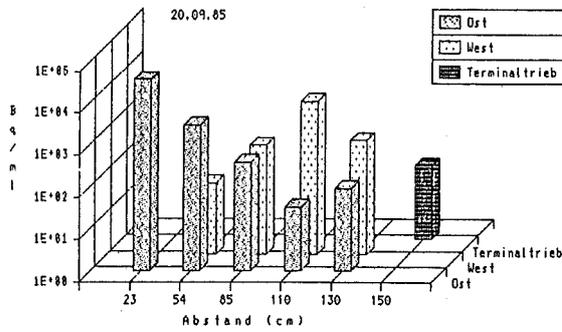
Bei der Injektion von Tritiumwasser in einzelne Äste von gesunden und kranken Fichten (Versuchsbäume E und F) konnte ebenfalls eine unterschiedliche Wasserleitung gefunden werden. An beiden Ästen wurde das Transpirationswasser der Zweige in unterschiedlichem Abstand von der Injektionsstelle gesammelt. In Abbildung 4-13, in der die Konzentrationsprofile von drei Tagen dargestellt sind, ist zu erkennen, daß noch am Tag der Injektion in beiden Terminaltrieben Tritium-Aktivität auftritt, d.h. es wird offensichtlich etwa gleich schnell dorthin transportiert.

Insgesamt zeigen die Profile allerdings einen interessanten Unterschied. Beim gesunden Zweig wird eine Drehrichtung bei der Wasserleitung deutlich, in dem der Transpirationsstrom auf der Länge des Astes etwa einen Spiralbogen beschreibt. Beim kranken scheint es, als werden die Zweige 2. Ordnung auf jeder Seite durch eine zur Astachse parallel verlaufende Wasserleitung versorgt. Es läßt sich aufgrund dieser Beobachtung allerdings nicht sagen, ob es sich hier um eine krankhafte Veränderung handelt.

Abb. 4-13: Entwicklung der HTO-Konzentrationen im Transpirationswasser der Zweige 2. Ordnung nach Infusion von HTO (am 19.9.85) in den Fuß zweier Äste der Versuchsbäume E und F (Schadstufe 0 bzw. 2) im Verlauf von 4 Tagen.

Gesunde Fichte

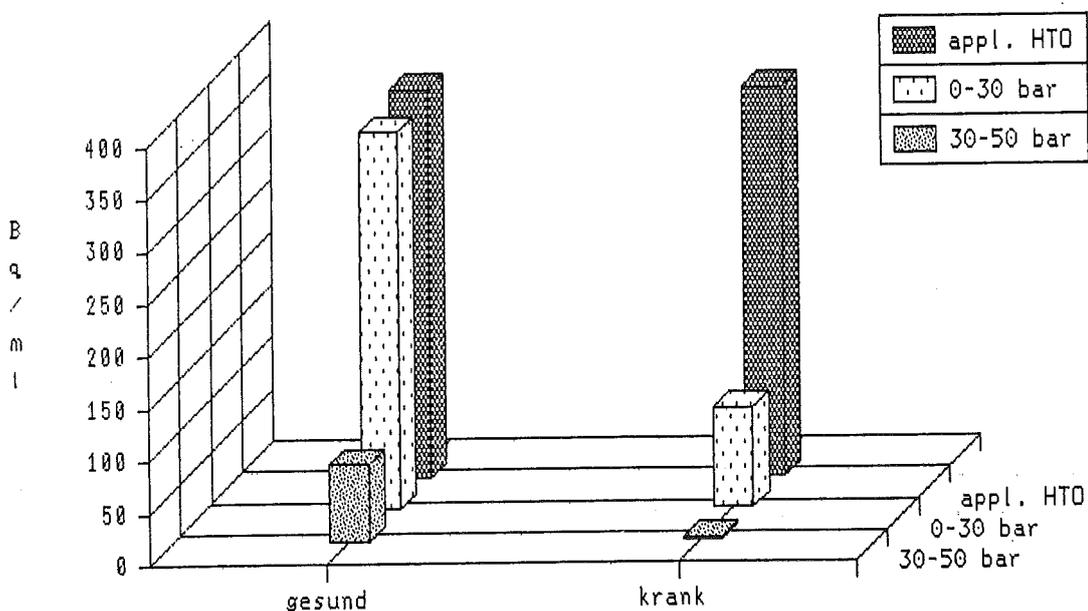
Kranke Fichte



4.4.4. Gewebewasser im Holz

Um die Wasserverhältnisse in den Zweigen der in Abb. 4-13 dargestellten Versuchsbäume (E und F) näher zu untersuchen, wurde der Saft aus abgeschnittenen Zweigen mit Hilfe einer Druckkammer bei unterschiedlichen Drücken ausgepreßt. Zuvor standen diese Zweige zwei Tage in einem Gefäß mit Tritiumwasser auf der Versuchsfläche. Für die Bestimmung der Tritiumkonzentration im Xylemwasser (Abb. 4-14) wurden die Nadeln kurz vor dem Auspressen des Saftes entfernt. Während sich im gesunden Zweig bei niedrigen Drücken (bis 30 bar) nahezu 100 % der applizierten Tritiumkonzentration wiederfinden, wird das Wasser des kranken Zweiges stark durch Wasser verdünnt, das nicht am Transpirationsstrom teilgenommen hat. Das im Xylemgewebe des kranken Zweiges befindliche Wasser hat also zum großen Teil keinen Kontakt mit dem Transpirationsstrom gehabt. Dieser deutliche Unterschied zeigt sich auch bei dem Wasser, das mit höheren Drücken (bis 50 bar) gewonnen wurde.

Abb. 4-14: Tritiumkonzentrationen im ausgepreßten Xylemwasser von Zweigen 2. Ordnung der Versuchsbäume E und F im Vergleich zur Konzentration des applizierten Wassers (370 Bq/g). Die Zweige der bereits seit zwei Tagen in Tritiumwasser stehenden Äste wurden bei 30 bzw. 50 bar ausgepreßt, nachdem zuvor die Nadeln entfernt worden waren. Die deutlich niedrigeren Konzentrationen des Xylemwassers vom kranken Baum lassen sich dadurch erklären, daß dieses Wasser stark verdünnt wurde durch Wasser, das nicht am Transpirationsstrom teilnahm.



4.5. Untersuchungen nach Fällen der Versuchsbäume

4.5.1. Wasserverteilung in Jahresringen

Bohrkerne aus den Stämmen der Versuchsbäume C und D, ein Jahr später (September 1986) entnommen, ergaben bereits deutliche Hinweise darauf, daß im Stamm der kranken Fichte ein wesentlich größerer Bereich mit einem deutlich gegenüber dem äußeren Splint herabgesetzten Wassergehalt vorlag. Deshalb wurden die ehemaligen Versuchsbäume im November 1986 gefällt und auf das Vorhandensein eines "Trockenkerns" hin untersucht *). Dabei wurden verschiedene Methoden zur Wasserbestimmung in Stammscheiben bzw. ganzen Stammabschnitten angewendet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Durch Auftragen von fein pulverisiertem wasserfreiem Kupfersulfat auf die frisch abgeschnittenen Stammscheiben war anhand der Blaufärbung über dem feuchten Splintholz bereits vor Ort die Verkernung zu erkennen. Abb.4-15 zeigt eine solche Stammscheibe des gesunden Referenzbaumes, auf der das Kupfersulfat-Pulver unmittelbar nach dem Sägen fein verteilt worden war. Das gleiche Bild ergaben Messungen der elektrischen Leitfähigkeit in den einzelnen Jahresringen. An den von den aufbewahrten Stammabschnitten einige Tage später abgetrennten Scheiben ließ sich ebenfalls der gleiche Trockenkern auch noch im nachhinein nachweisen, indem die Scheiben maschinell abgeschliffen wurden. Der feuchte Splintholzbereich setzte sich dabei durch eine dunklere Tönung gegenüber dem Trockenkern deutlich ab. Abb. 4-16 zeigt die Aufnahme einer Stammscheibe vom kranken Baum, an der die unterschiedliche Tönung gut zu erkennen ist.

In Abb.4-18 sind Querschnitte der beiden Versuchsbäume C und D und eines gesunden Referenzbaumes gegenübergestellt, wobei die Grenzlinie zwischen Splint und Trockenkern nachgezeichnet wurde. Es zeigte sich dabei, daß im Stamm des stark erkrankten Baumes in der Tat - wie angenommen - eine hochgradige Verkernung (Trockenkern) von etwa 59 %, bezogen auf die gesamte Xylemfläche, vorlag (Tab. 4-4).

*)Der Begriff "Trockenkern" wird hier für den Bereich verwendet, bei dem unter Verlust der Wasserleitfunktion der Wassergehalt gegenüber dem äußeren Splint deutlich herabgesetzt ist. Eine Prüfung daraufhin, ob dies auch im Sinne der Definition für eine übliche Verkernung nach BRAUN [1963,S.110] mit Absterben der lebenden Zellen verbunden ist, wurde erst später durch die Untersuchung von Stärkeeinlagerungen im Holz durchgeführt.

Abb. 4-15: Bestimmung der Wasserverteilung in Jahresringen eines gesunden Referenzbaumes mit Hilfe von Kupfersulfat (vgl. Abb.4-18)

(Im Bereich des wasserführenden Splintholzes hat sich das Kupfersulfat blau gefärbt. Nur der relativ kleine Kern dieses gesunden Baumes und der Astansatz sind trocken.)



Abb. 4-16: Visuelle Bestimmung der Wasserverteilung in Jahresringen am Versuchsbaum D (Schadstufe 2)

(Nach dem Abschleifen der frisch gesägten Stammscheibe läßt sich an der dunkleren Tönung erkennen, daß bei der kranken Fichte nur noch der äußere Bereich des Splintholzes wasserführend ist, vgl. Abb. 4-18 Mitte)

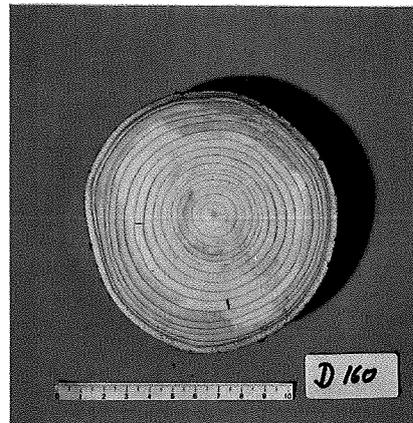


Abb. 4-17: Wasserverteilung im Längsschnitt gezeigt am Versuchsbaum C

(Durch die dunklere Tönung rechts im Bild ist zu erkennen, daß gegenüber dem Astansatz die Anzahl der wasserführenden Jahresringe größer ist.)

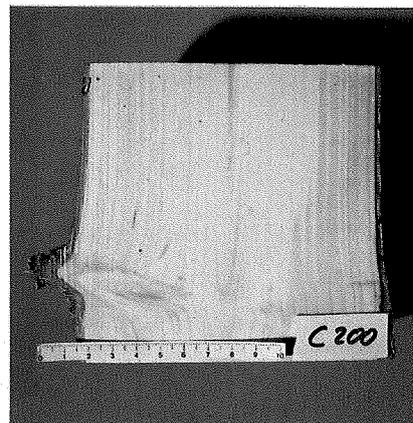
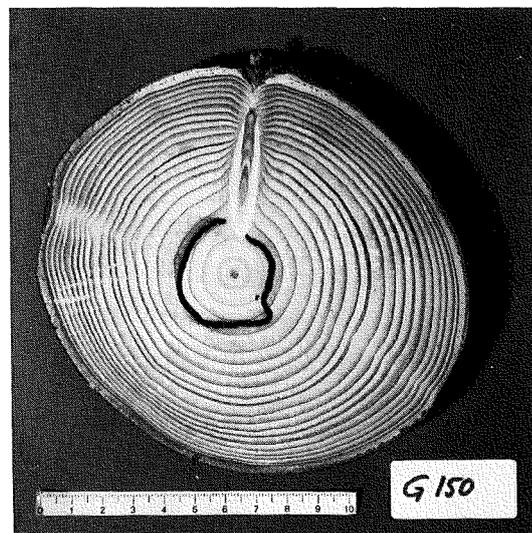
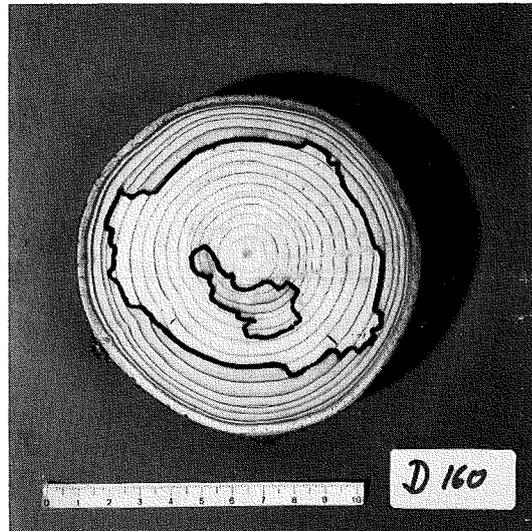
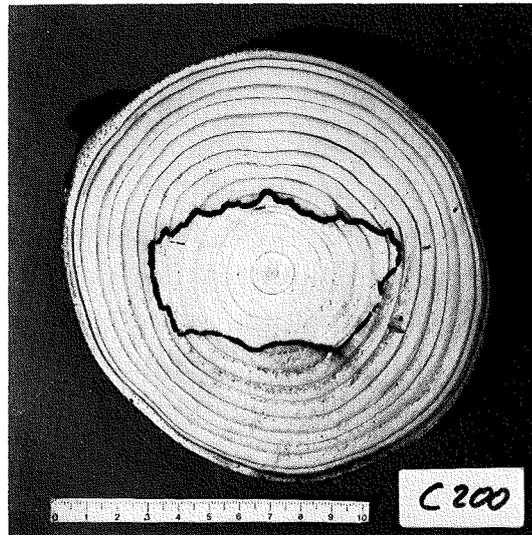


Abb. 4-18: Verkernung an Stammscheiben der Versuchsbäume C (Schadstufe 0 1985) und D (Schadstufe 2) sowie eines gesunden Referenzbaumes G (Schadstufe 0)

(Die Zahl hinter der Bezeichnung gibt die Höhe des Querschnitts am Stamm über dem Wurzelansatz in cm an. Die Grenze zwischen wasserführendem Splint und Trockenkern wurde nachgezeichnet.)

Maßstab = 10 cm



In dem zur Zeit der Experimente als gesund eingestuften Baum C betrug der Anteil des verkernten Querschnitts immerhin auch 21 %. Zum Zeitpunkt des Fällens wurde allerdings deutlich, daß die Vergilbung der Nadeln in der Zeit nach den Experimenten stark zugenommen hatte, so daß der Baum auch nicht mehr als "gesund" eingestuft werden konnte. Im Vergleich dazu ließ sich an dem gesunden Referenzbaum (G) nur eine Verkernung von 6 % feststellen.

Die Form des Trockenkerns war in beiden Versuchsbäumen sehr unregelmäßig mit Ausuferungen bis zu den jüngsten Jahrgängen beim kranken Baum. Bei den abgeschliffenen Stammscheiben des stark geschädigten Baumes D war innerhalb des trockenen Kerns noch ein feuchter Bereich zu erkennen (Abb. 4-18). Allerdings war dieser bei den kernspintomographischen Aufnahmen (Abb. 4-20) nicht sichtbar. Eine Erklärung dafür konnte bisher nicht gefunden werden.

Tab. 4-4: Verkernung (Trockenkern) der Stämme in Prozent zur gesamten Querschnittsfläche des Xylems in Höhen von 1,50 m - 2,00 m über dem Boden

	Kern (%)	Splint (%)
Versuchsbaum C (Schadstufe.0, 1985)	21	79
Versuchsbaum D (Schadst.3)	59	41
Referenzbaum G (Schadst.0)	6	94

An Längsschnitten der Stammabschnitte konnte ebenfalls durch visuelle Bestimmung an einigen Proben die vertikale Form der Verkernung diagnostiziert werden. In Abb. 4-17 ist auf der rechten Seite im Bild zu erkennen, wie in Höhe des Astansatzes die Anzahl der wasserführenden Jahresringe vergrößert ist.

4.5.2. Stärkeeinlagerungen im Holz

An den bereits getrockneten Stammscheiben wurde später ein qualitativer Nachweis für Stärkeeinlagerungen mit Hilfe von Iod-Iodkali-Lösung vorgenommen, um so feststellen zu können, ob in diesem Trockenkern lediglich die Wasserleitfunktion

verloren gegangen ist, oder ob dies gleichzeitig mit einem Absterben der lebenden Zellen verbunden war. Es zeigte sich, daß beim kranken Baum D die gefundene Grenze zwischen Splint und Trockenkern sehr gut mit der Grenze übereinstimmte, bis zu der Stärkeeinlagerungen im Holz zu beobachten waren. Lediglich an einigen Stellen mit unregelmäßigen Ausuferungen der Trockenkerngrenze konnten noch in dem darauffolgendem Jahresring Stärkeeinlagerungen festgestellt werden. Beim Versuchsbaum C entsprach der stärkefreie Bereich im wesentlichen ebenfalls dem trocknen Bereich, wobei jedoch die Grenze recht konzentrisch verläuft ohne daß sie den Ausuferungen des Trockenkerns folgt. Beim gesunden Referenzbaum G war ein allmähliches Abnehmen der Stärkeeinlagerungen zur Stammitte hin zu beobachten, so daß der weitgehend stärkefreie Kernbereich etwa den doppelten Durchmesser hatte, wie der beobachtete Trockenkern. Vereinzelt konnten jedoch Spuren von Stärke bis in die ältesten Jahresringe festgestellt werden.

Unter der Voraussetzung, daß die Stärkeeinlagerungen im Splintholz als Hauptreserve für die Kronenregeneration dienen [BAMBER, FUKAZAWA 1985], wird hier deutlich, daß dem kranken Baum D einschneidend weniger Reservestoffe zur Verfügung stehen.

4.5.2. Kernspintomographie

In Zusammenarbeit mit der Firma Bruker - Medizintechnik GmbH *) wurden weiterhin ganze Stammabschnitte der gefällten Bäume mit Hilfe der Kernspintomographie auf den Wassergehalt in den Jahresringen hin untersucht. In einem Stammabschnitt können hier an zahlreichen Querschnittsaufnahmen durch das Holz die Verkernungen in der Längsrichtung verfolgt werden. Die Jahresringe sind hier ebenfalls deutlich zu erkennen. Die dunklen Zonen in den Querschnitten entsprechen den feuchten Geweben. Dabei ist in den betrachteten Ebenen eine sehr gute Übereinstimmung der computer-tomographischen Abbildungen mit den Aufnahmen zu erkennen, die mit den anderen Methoden erarbeitet wurden. Ein wesentlicher Vorteil der Kernspintomographie läge darin, wenn es gelänge, mit Hilfe einer mobilen Anlage an den Bäumen in vivo ohne schädigenden Eingriff Aufnahmen vom wasserführenden Splintholz zu bekommen.

*) Für die Möglichkeit zur Anfertigung kernspintomographischer Aufnahmen danken wir der Fa. Bruker-Medizintechnik GmbH, Rheinstetten-Karlsruhe, insbesondere Herrn Dr.D.Höpfel für die Durchführung der Experimente

Abb. 4-19: Kernspintomographische Aufnahme des gesunden Versuchsbaumes C. Die Abbildung zeigt mehrere Schnitte durch einen Stammabschnitt (mit Vergleich zu einer photographischen Aufnahme einer Stammscheibe). Versuchsbaum C erschien "gesund" (Schadst.0) im Jahre 1985. Zum Zeitpunkt des Fällens (1986) konnte eine fortgeschrittene Vergilbung der Nadeln festgestellt werden.

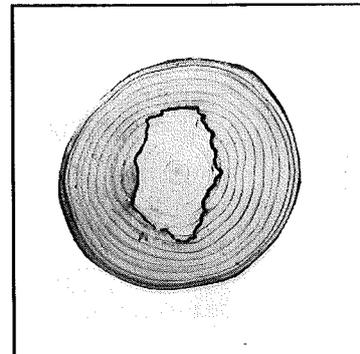
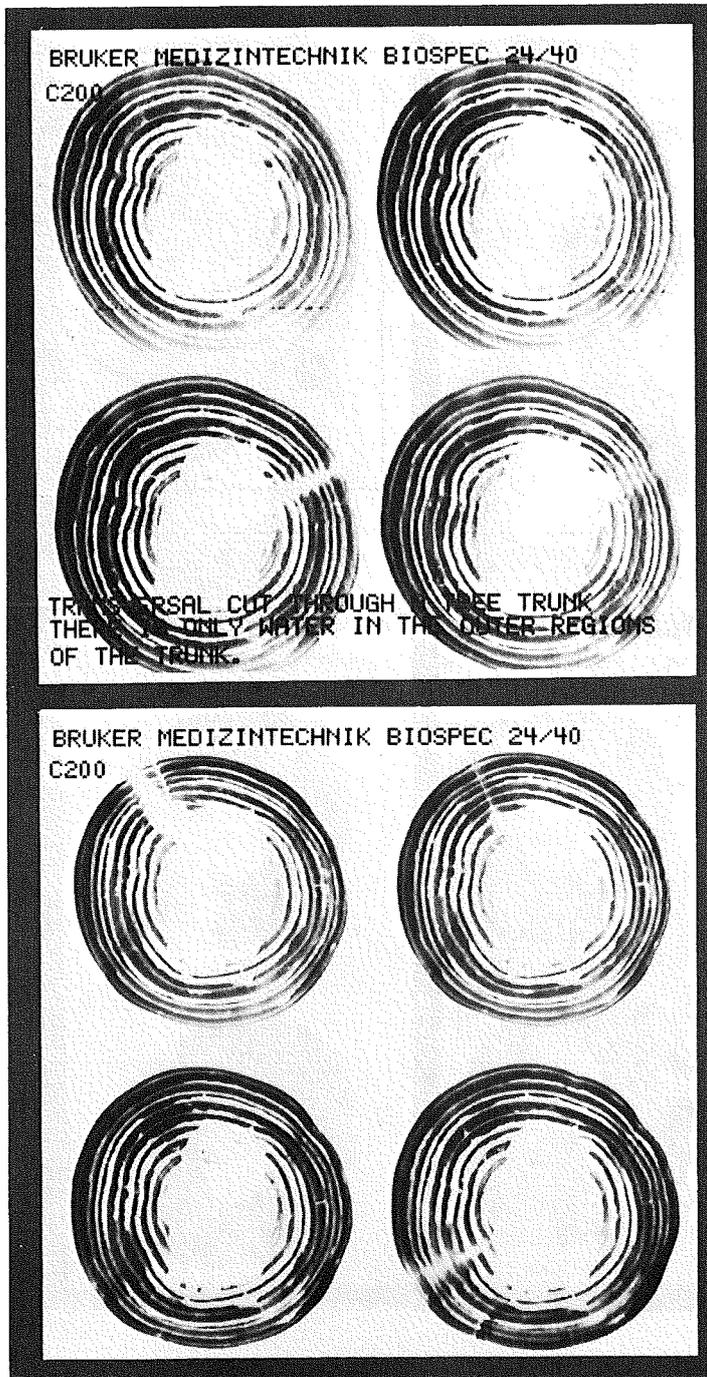


Abb. 4-20: Kernspintomographische Aufnahme des kranken Versuchsbaumes D (Schad-
stufe 3). Die Abbildung zeigt zwei Schnitte durch einen Stammab-
schnitt mit Vergleich zu einer fotografischen Aufnahme einer Stamm-
scheibe.

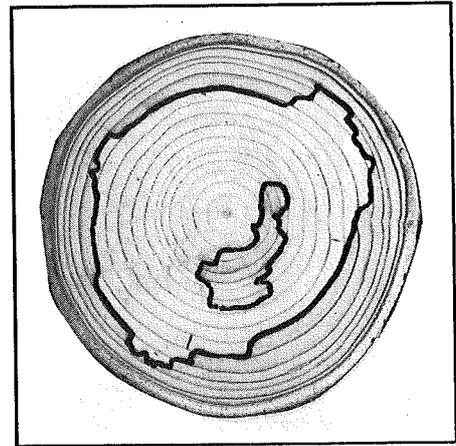
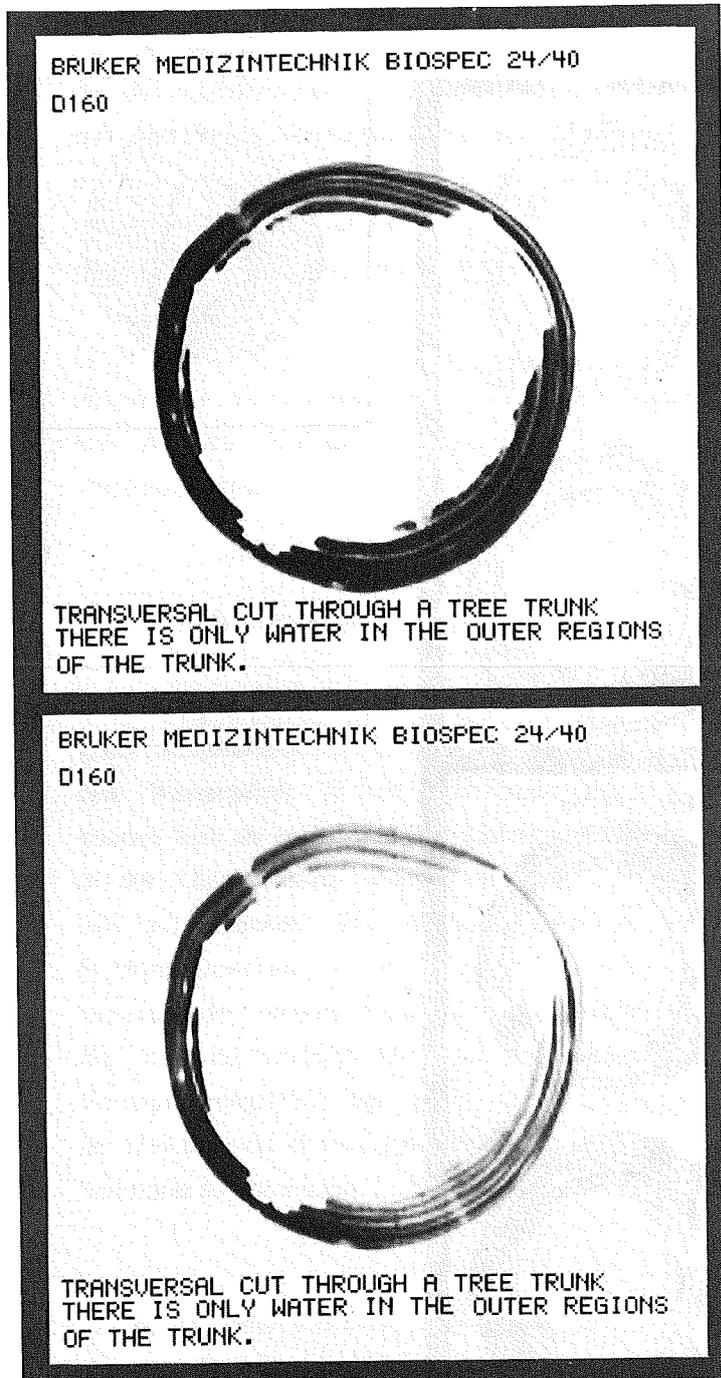
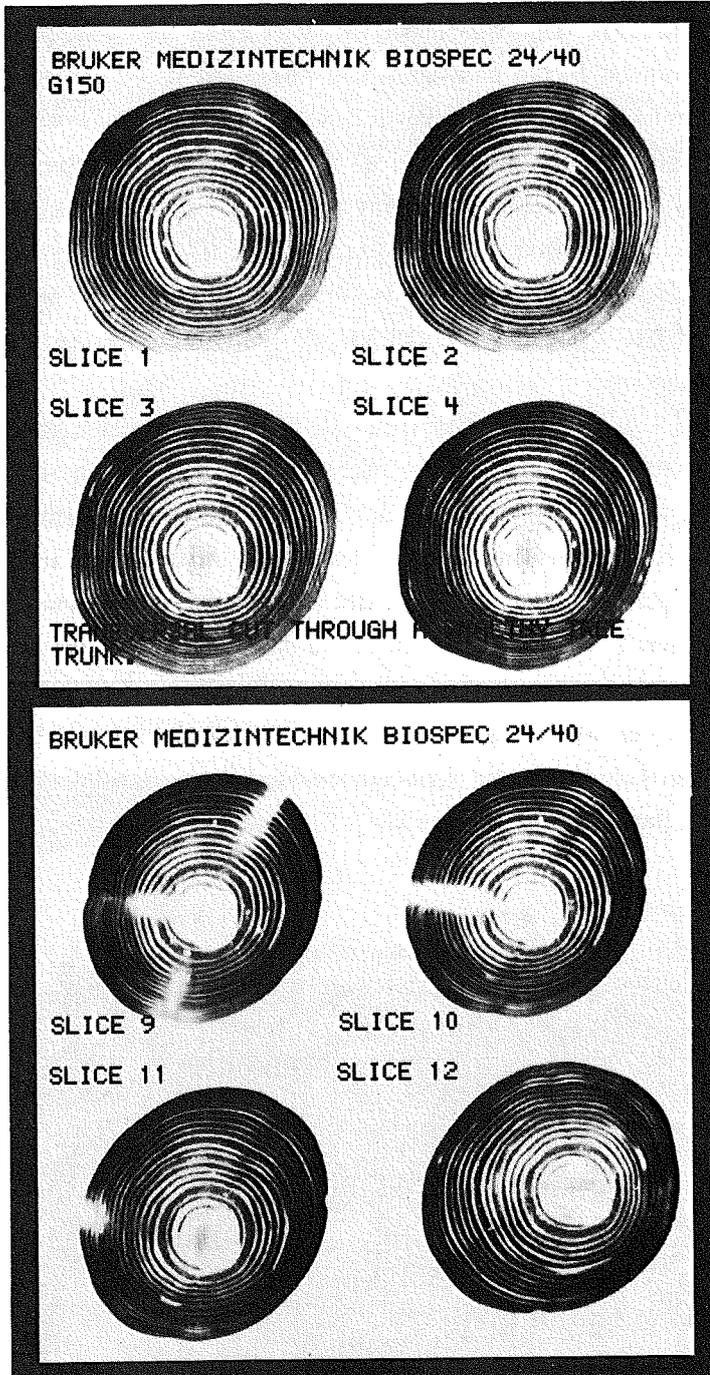


Abb. 4-21: Kernspintomographische Aufnahme des gesunden Referenzbaumes G (Schad-
 stufe 0). Die Abbildung zeigt mehrere Schnitte durch einen Stammab-
 schnitt mit Vergleich zu einer fotografischen Aufnahme einer Stamm-
 scheibe.



4.5.3. Bewurzelung

Bei der Frage nach der Ursache einer vorzeitigen Verkernung im Stamm erkrankter Fichten kommt der Wurzel sehr wahrscheinlich eine Schlüsselrolle zu. So wurden nach dem Fällen der Versuchsbäume C und D die Wurzeln ausgegraben, um ihren Zustand und ihre Ausbildung beurteilen zu können. Abb. 4-22 zeigt die Wurzeln des Paares an ihrem Standort. Die ausgegrabene Wurzel des kranken Baumes D (Abb. 4-24) ist im Gegensatz zu der des gesunden Versuchsbäumcs C (Abb. 4-23) von der Anlage her deutlich kleiner. Der Wurzelteller, der von den Grobwurzeln gebildet wird, hat bei der kranken Fichte eine ellipsoide Form mit Durchmessern von 200 und 140 cm. Demgegenüber bilden die Grobwurzeln der gesunden Fichte eine Ellipse mit Durchmessern von 300 und 210 cm. Die Grobwurzeln des kranken Baumes sind sowohl in Anzahl als auch in Stärke geringer ausgebildet. Auch der Anteil der Feinwurzeln, was in den Abbildungen nur noch zum Teil zu erkennen ist, ist beim kranken Baum wesentlich geringer als beim gesunden. Weiterhin ließ sich feststellen, daß das Wurzelsystem des kranken Baumes deutlich weniger Senkwurzeln aufweist als das des gesunden.

Im Vergleich zur Entwicklung der Wurzeln läßt sich die oberirdische Entwicklung der Versuchsbäume etwa wie folgt beschreiben: Beide Fichten ließen sich als herrschend klassifizieren. In der Höhenentwicklung waren keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Beide Bäume waren in der Gesamthöhe etwa gleich, und auch der Kronenansatz lag in gleicher Höhe. Die Äste des kranken Baumes D waren im Vergleich zum Versuchsbäum C von kürzerer Länge, so daß daraus ein geringerer Überschildungsgrad resultierte, der jedoch im Verhältnis nicht dem Unterschied entsprach, wie er bei der Wurzelaußbreitung beobachtet worden war. Im Dickenwachstum unterschieden sich die Bäume voneinander deutlicher. Der Stammdurchmesser lag beim kranken Baum D in 2 m Höhe bei 9,7 cm im Mittel, während er beim Baum C bei 13,2 cm lag.

Abb. 4-22: Ausgegrabene Wurzeln am Standort (Versuchsbäum C hinten, D vorne)



Abb. 4-23: Wurzelsystem des gesunden Versuchsbaumes C

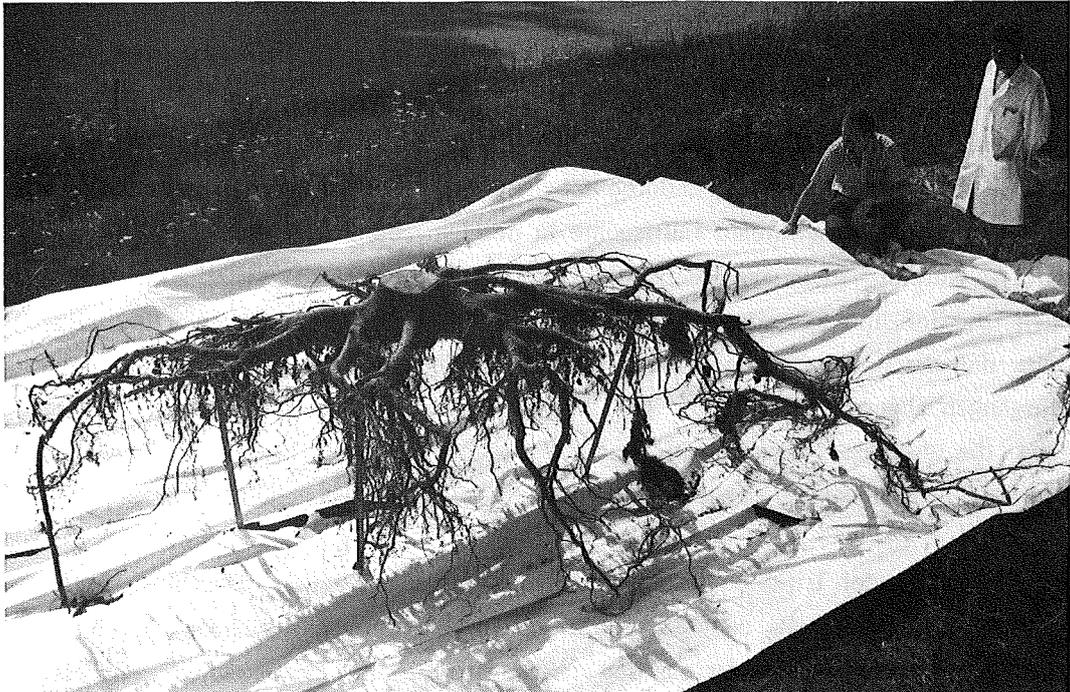


Abb. 4-24: Wurzelsystem des kranken Versuchsbaumes D



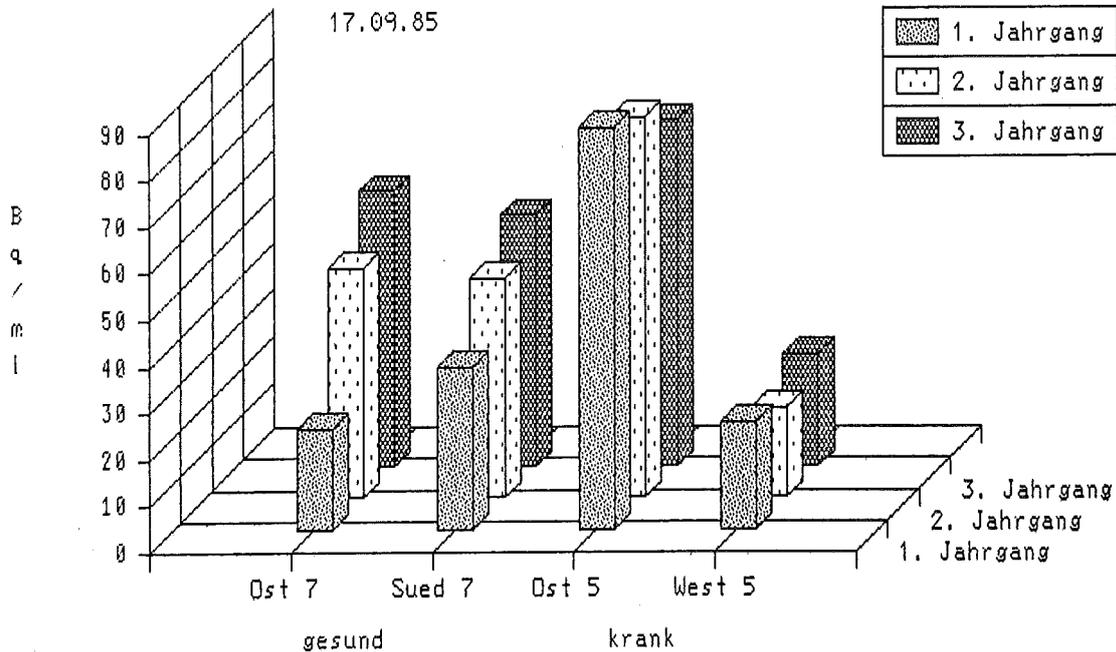
4.6. Wasserumsätze in Nadeln

4.6.1. Hydroregulation der Spaltöffnungen

Durch Messungen von Tritiumkonzentrationen im Nadelgewebewasser (durch Gefrier-trocknung gewonnen) können Aussagen über die Hydroregulation der Spaltöffnungen abgeleitet werden. Dies ist dadurch möglich, daß das tritiummarkierte Nadelwasser von der tritiumfreien Luftfeuchte in der Umgebung der Nadel durchmischt wird. So wurden Nadeln vom gesunden (C) und vom kranken (D) Versuchsbaum 10 Tage nach der Infusion jahrgangsweise für die Tritiummessung entnommen. Es zeigte sich, daß die Konzentrationen im Gewebewasser der gesunden Fichte deutlich nach Jahrgängen abgestuft sind (Abb. 4 - 25). In diesem Fall waren im jüngsten Jahrgang die niedrigsten Konzentrationen zu beobachten. In den Nadeln des kranken Baumes hingegen war keine systematische Differenzierung zu beobachten.

Die Abstufung der Tritiumkonzentrationen in den Nadeln kommt dadurch zustande, daß sich das Wasser aus dem Transpirationsstrom in unterschiedlichem Verhältnis mit dem tritiumfreien Wasser aus der Atmosphäre mischt. Der Gleichgewichtswert hängt dabei, wie oben gezeigt, von der Tageszeit oder genauer von der relativen Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre ab. Die Geschwindigkeit, mit der der Gleichgewichtswert erreicht wird, hängt von der Regulation der Stomata ab, denn mit zunehmendem Öffnungsgrad geht die Konzentration dem Gleichgewichtswert schneller entgegen. Die Abstufung kann deshalb in der Weise gedeutet werden, daß in den gesunden Nadeln die Regulation der Stomata für die verschiedenen Jahrgänge unterschiedlich ist, jedoch innerhalb des jeweiligen Jahrgangs einheitlich, während dies bei den kranken Nadeln nicht mehr der Fall ist.

Abb. 4-25: Tritiumkonzentrationen im Nadelwasser der jüngsten drei Nadeljahrgänge an je zwei Ästen (Quirl 7 und 5) der Versuchsbäume C und D. Das Gewebewasser wurde durch Gefrier Trocknung am 17.9. gewonnen, 10 Tage nach der Stamminfusion. Im Unterschied zur kranken Fichte ist bei den Nadeln des gesunden Baumes eine Abstufung nach Jahrgängen zu sehen (Erklärung siehe Text).



4.6.2. OBT in Nadeln

Die Wege des Wasserstoffs in den Bäumen lassen sich bei Markierung mit Tritium auch in der organischen Substanz verfolgen. Bei der Photosynthese wird das Tritiumwasser für den Aufbau organischer Substanzen verwendet, und zwar in der Konzentration, in der es jeweils aktuell im Gewebewasser, d.h. in den Chloroplasten vorliegt. Der Nachweis von organisch gebundenem Tritium in verschiedenen Pflanzenteilen kann somit Aufschluß über die Bildung der Assimilate in den Blattorganen und deren Abtransport geben.

So wurden zahlreiche Proben von Nadeln, Holz und Rinde auf den Gehalt an organisch gebundenem Tritium (OBT) hin untersucht. Die spezifischen Tritiumaktivitäten in der lyophilisierten Trockensubstanz (TS) in Becquerel (Bq) sind bezogen auf eine Menge an Verbrennungswasser, das bei der Oxidation der Trockensubstanz entsteht (angegeben in g bzw. ml). Bei diesen Proben sind jeweils kleine Mengen

an markierter Substanz zu einer nicht genau definierten Menge an bereits vorhandener - nicht markierter TS - hinzugekommen. Somit können die Konzentrationsangaben, zumal die Versuche nicht unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt wurden, nur für einen überblickmäßigen Vergleich herangezogen werden.

Abb. 4-26: Tritiumkonzentrationen in der organischen Substanz (OBT) der jüngsten drei Nadeljahrgänge an je zwei Ästen (Quirl 7 und 5) der Versuchsbäume C und D im Vergleich zum Gewebewasser (vergleiche Abb. 4-25).
(GF = Gewebewasser durch Gefrietrocknung gewonnen, OB = org.geb Tritium im Verbrennungswasser bestimmt, CO7/CS7 = Nadeln vom gesunden Baum, DO5/DW5 = Nadeln vom kranken Baum, Angaben Bq/g)

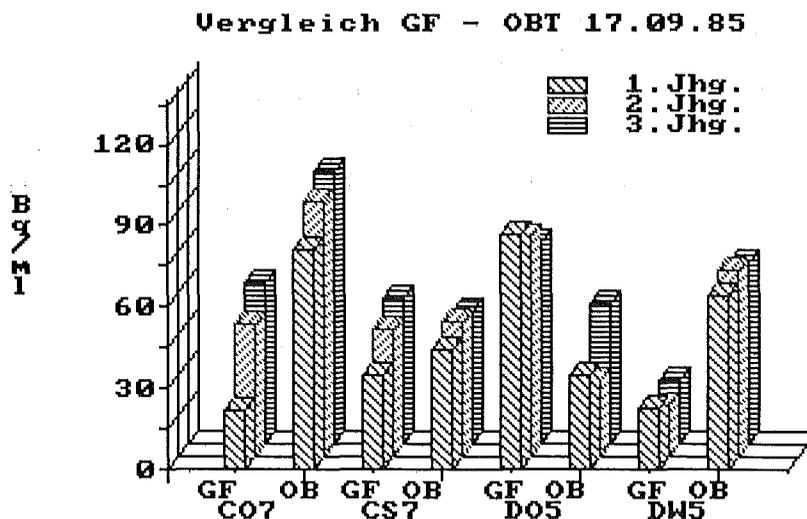
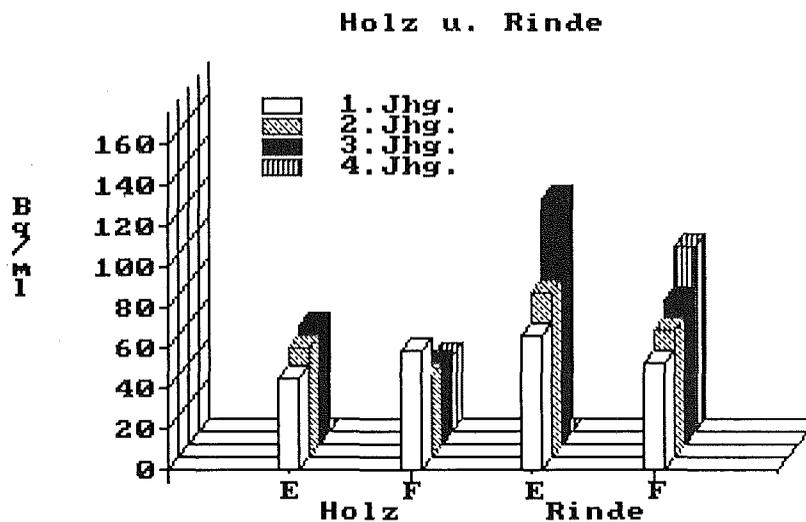


Abbildung 4-26 zeigt die OBT-Werte der Nadeln von je zwei Ästen der Versuchsbäume C und D im Vergleich zu den Tritiumkonzentrationen im Gewebewasser, wie sie bereits im Abschnitt 4.6.1 beschrieben wurden. Es ist zu erkennen, daß die OBT-Werte der Nadelproben allgemein in der gleichen Größenordnung liegen, wie die HTO-Werte. Zum Teil sind die OBT-Konzentrationen allerdings mehr als doppelt so hoch wie die entsprechenden HTO-Werte. Dies zeigt, daß hier auf jeden Fall Tritium in die neu synthetisierte organische Substanz der Nadeln eingebaut wurde. Austauschvorgänge zwischen dem austauschbaren Wasserstoff, der über den Sauerstoff bzw. den Stickstoff an die TS gebunden ist, können allenfalls zusätzlich eine Rolle spielen. Beim gesunden Ast ist analog zu den HTO-Werten

eine Abstufung nach Jahrgängen zu erkennen. Diese könnte allerdings auf derartige Austauschvorgänge zurückzuführen sein, so daß aus diesen Ergebnissen leider keine weiteren Schlüsse auf Unterschiede zwischen dem kranken und dem gesunden Ast gezogen werden können.

Abb. 4-27: Konzentrationen des organisch gebundenen Tritiums (OBT) in Holz und Rinde in Zweigen, nach dem Jahrgang ihrer Bildung unterschieden. Die Zweige wurden am Ende des in Abb. 4-3. beschriebenen Versuchs (29.9.85) entnommen (E = gesunder Versuchsbaum, Schadstufe 0, F = kranker Versuchsbaum, Schadstufe 2).



Mittlere OBT-Konzentrationen in Holz- und Rindenproben von Zweigen, nach dem Jahrgang ihrer Bildung unterschieden, sind in Abbildung 4-27 dargestellt. Die Zweige wurden am Ende des Versuchs entnommen, der in Abb. 4-3 beschrieben wurde, wobei abgeschnittene Äste der Versuchsbäume E und F (Schadstufe 0 bzw. 2) in der Zeit vom 24.9.85 bis 29.9.85 auf der Kälbelescheuer in Tritiumwasser mit bekannter Konzentration gestellt wurden. Es handelt sich hier nur um nicht-austauschbares Tritium. Das austauschbare wurde durch eine mehrtägige Behandlung entfernt. Die Holzproben setzen sich dabei aus dem Holz mehrerer Jahresringe zusammen, ausgenommen die Probe "1. Jhg.". Somit war zu erwarten, daß hier die spezifische Aktivität am höchsten ist. Dies deutet sich allerdings nur beim "kranken" Zweig (F) an. Bei der Rinde zeigt sich ein Anstieg der Konzentrationen mit dem Alter. Die Erklärungen hierfür können vielfältig sein. Sie reichen von der Möglichkeit, daß die an dieser Stelle gerade transportierten Assimilate, wie

oben angedeutet, stärker markiert sind, bis hin zu den Möglichkeiten, daß von den älteren Nadeln die Assimilate stärker abtransportiert werden oder daß sich hier in der Rinde die Assimilate der Jahrgänge addieren. Die Werte des "gesunden" Zweiges (E) liegen bei den Rindenproben etwas höher als beim "kranken", aber auch hier könnte nur eine Absicherung dieser Beobachtung durch weitere Meßreihen zu einer begründeten Aussage über Unterschiede zwischen "krank" und "gesund" führen.

Die beobachteten Unterschiede zwischen gesund und krank bei den OBT-Messungen waren im allgemeinen wenig ausgeprägt. Auch konnten eine sehr große Menge an Proben (auch aus dem Wurzelbereich) im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht mehr aufgearbeitet und damit ausgewertet werden. Somit ist es aufgrund der OBT-Messungen nicht möglich, auf krankhafte Veränderungen in bezug auf die Photosyntheseleistung oder des Assimilatabtransportes zu schließen.

5. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus der Literatur sind bereits Beschreibungen über die Verwendung von Tritiumwasser zur Untersuchung der Wasserumsätze in lebenden Bäumen bekannt, und zwar zur Messung der Transpiration [LUVALL, MURPHY, Jr. 1982] und zur Erfassung der Wasseraufnahme aus verschiedenen Tiefen des Wurzelbereichs [WOODS, O'NEAL 1964]. In beiden Fällen mußten jedoch Einschränkungen in bezug auf die Aussagekraft der Ergebnisse gemacht werden. So war es auch in der vorliegenden Studie zunächst wichtig, spezielle Verhaltensweisen des Tritiumwassers (HTO) experimentell abzuklären, die für die Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung sind. Dazu gehörte die Diffusion von Wasser aus der Luftfeuchtigkeit in die Blattorgane hinein, was bei einer ausschließlichen Betrachtung der Nettotranspiration im allgemeinen nicht berücksichtigt wird. Ist jedoch das Blattwasser oder die Luftfeuchtigkeit mit Tritium markiert, darf dieser Weg des Wassers nicht übersehen werden. Dabei konnte die Gültigkeit des beschriebenen theoretischen Ansatzes weitgehend bestätigt werden.

Die Sammlung von Transpirationswasser mit Hilfe von PVC-Beuteln, wobei die Tritiumkonzentration des Wassers anschließend direkt im Flüssig-Szintillationspektrometer bestimmt werden kann, hat sich als eine nützliche Methode bestätigt. Da sie allerdings nur an Tagen mit anhaltender Sonnenscheindauer anwendbar ist, sind quantitative Aussagen über Mengen an transpiriertem Wasser der Zweige praktisch nicht möglich. Auch konnte die Frage, in welchem Maße HTO bzw. Wasser durch die PVC-Beutel diffundiert, im Rahmen dieser Arbeiten nicht mehr geklärt werden.

Das Auspressen von Zweigen, die zuvor einige Zeit mit HTO versorgt wurden, mit Hilfe einer "Scholander-Druckkammer" bei unterschiedlichen Drücken ergab interessante Hinweise auf eine Kompartimentierung des Gewebewassers im Xylem. Hier wäre es sehr interessant, die gefundenen Ergebnisse durch die Aufnahme von Druck/Volumen Kurven unter Einsatz von markiertem Wasser zu vertiefen.

Die jeweils an Baumpaaren vorgenommenen Wasserpotential-Bestimmungen im Xylem und in den Nadeln hatten zunächst erkennen lassen, daß es den kranken Fichten nach Trockenperioden nicht mehr so gut gelingt, den Wasserverlust vom Tage in der Nacht wieder auszugleichen. Ihr Wasserhaushalt erwies sich gegenüber dem der gesunden Fichten zumindest als angespannter. Allerdings waren diese Unterschiede

nach ausreichender Wasserzufuhr nicht mehr zu erkennen.

So hatten auch die Wasserpotential-Bestimmungen 1985 an den Versuchsbäumen keine Anzeichen dafür ergeben, daß die kranke Fichte ernsthafte Probleme mit der Wasserversorgung hatte, obwohl ihr Wasserleitungssystem - wie sich später eindrucksvoll bestätigen ließ - gravierend verändert war. Offensichtlich ist die beobachtete Reduzierung des wasserführenden Splintholzes nicht mit einem chronisch erhöhten Wasserstreß verbunden. Ein Grund dafür könnte sein, daß sich der Wasserverbrauch bereits ebenfalls entsprechend verringert hat, indem sich durch einen Nadelabwurf die Transpirationsfläche der wasserleitenden Splintholzfläche angepaßt hat. Auch LANGE und ZELLNER [1985] vermuten solche Kompensationen und sich gegenseitig aufhebende Effekte unter Freilandbedingungen. Leider liegen über den Wasserverbrauch beider Bäume keine genaueren Meßdaten vor. Durch ein Fällen der Versuchsbäume nach den Experimenten mit einer anschließenden künstlichen Bewässerung [GROSS, PHAM-NGUYEN, UNGER 1980] wäre die Beantwortung dieser Frage wahrscheinlich möglich gewesen.

Die Bestimmungen der Saftflußgeschwindigkeiten im Stamm der Bäume mit Hilfe der Heiz-Puls-Methode zeigen stets eine starke Streuung an verschiedenen Meßpunkten, so daß für Bestimmungen der absoluten Saftflußgeschwindigkeit andere Methoden besser geeignet wären. Hingegen zeigen die Tagesgänge der so ermittelten Saftflußgeschwindigkeiten recht gut, daß es an Sonnentagen zu Mittagsdepressionen der Transpiration auch bei den kranken Bäumen kommt, und daß somit keine ungetriggerte Transpiration vorliegt.

Die mit der "Tritium-Methode" ermittelten durchschnittlichen Saftfluß-Geschwindigkeiten von überschlägig 55 cm pro Tag im gesunden und 130 cm pro Tag im kranken Baum erscheinen auch für Koniferen relativ langsam. Deswegen sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß das Tritiumwasser auf dem Weg bis zu den Nadeln auch in Bereiche diffundieren kann, die nicht an der Strömung teilnehmen. Bei der Bestimmung der Saftflußgeschwindigkeit in grünen Pflanzenteilen der Erbse ist dies beschrieben worden [HÜBNER 1959/60]. Das HTO kann so längere Zeit für einen Weg benötigen, als man aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers voraussagen würde. Inwieweit das auch für den Transport durch Stamm und Äste eines Baumes, zumal bei Koniferen, gilt und in welchem Maße, wäre noch zu klären. Im Gegensatz zu krautigen Pflanzen jedenfalls befindet sich das Gewebewasser bei Koniferen fast nur in den Tracheiden und nimmt damit an der Strömung teil.

Bei diesen Betrachtungen der absoluten Geschwindigkeiten kommt zu den Aspekten, die unter 4.3 bereits angesprochen wurden, noch hinzu, daß bei den Versuchen das HTO in Form einer Infusion den Fichten gewissermaßen zum "Nulltarif" angeboten wurde. Im Gegensatz zu dem Wasser, das die Bäume über die Wurzeln aus dem Boden gewinnen müssen, steht dieses Wasser im Xylem an der Infusionsstelle nicht unter einer Spannung sondern unter Atmosphärendruck, was sich natürlich auch auf eine Bestimmung der Fließgeschwindigkeit auswirken kann. Weiterhin ist zu bemerken, daß durch das Einhüllen von Teilen der Äste in Plastikbeutel dort der Gradient des Wasserpotentials künstlich verringert wird. Dieser methodisch bedingte Umstand kann sich reduzierend auf die absolute Fließgeschwindigkeit auswirken.

Der Unterschied bei den Saftflußgeschwindigkeiten zusammen mit der Beobachtung, daß das injizierte HTO beim kranken Baum nicht mehr in gedrehter Richtung in der Krone verteilt wird, führte zu dem Schluß, daß hier die wasserleitende Querschnittsfläche im Stamm reduziert ist. Es gab bereits Hinweise durch Kernspintomographie-Untersuchungen, wie sie von KUCERA und BRUNNER [1985] durchgeführt wurden, daß bei kranken Fichten im Splintholz tatsächlich mitunter nur noch ein einziger Jahresring wasserführend ist. KUCERA [1986] sieht in einer solchen vorzeitigen Verkernung einen Indikator für den Gesundheitszustand der Bäume und schreibt ihr eine wichtige Rolle im Verlauf der Erkrankung zu. Ein eigener Versuch in Zusammenarbeit mit der Fa. Bruker, mit Hilfe der Kernspintomographie die wasserführenden Bereiche in Ästen zu lokalisieren, hatte zunächst keine eindeutigen Ergebnisse gebracht. Spätere Experimente an den Stämmen der gefälltten Versuchsbäume haben allerdings auf sehr eindrucksvolle Weise die Vermutung bestätigt. Zwar war auch bei dem Baum, der noch zur Zeit der Experimente als gesund eingestuft wurde, eine im Vergleich zu einem Referenzbaum stärkere Verkernung zu beobachten gewesen, aber sein Zustand hatte sich bis zum Zeitpunkt des Fällens bereits deutlich verschlechtert.

Beim Ausgraben der Wurzeln beider Versuchsbäume zeigte sich nicht nur, daß das Wurzelsystem des kranken Versuchsbäumchens deutlich schwächer ausgebildet war, sondern auch daß der Wurzelanteil, der in die tieferen Horizonte reichte, im Verhältnis geringer war als beim gesunden. Das träffe sich mit den Beobachtungen von SCHULZE et al. [1986], die bei Fichten mit Schadsymptomen eine Verlagerung der Wurzelspitzen in den Auflagehumus festgestellt hatten. Dadurch kann die Gefahr steigen, daß es bei Trockenheit zu einer Verschlechterung der Wasserversorgung kommt.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse können im wesentlichen nur vorläufige Schlußfolgerungen gezogen werden. Für allgemeinere Aussagen müßten die hier angeführten Untersuchungen zunächst unter verschiedenen Witterungsbedingungen nachvollzogen und auf eine größere Anzahl von Untersuchungsobjekten ausgedehnt werden. Dennoch lassen sich die Beobachtungen in ein vereinfachtes Bild von der Rolle des Wasserleitsystems im Verlauf der Erkrankung einordnen. Dabei kann über die Primärursache der Erkrankung und ob sie von der Krone oder der Wurzel ausgeht, keine Aussage gemacht werden.

Nach den Vorstellungen von ZIMMERMANN [1983] ist wahrscheinlich der Verlust des Wassers in den Gefäßen der erste Schritt bei der Ausbildung des Kerns. Er sieht darin den Grund dafür, daß in den Wurzeln in der Regel nur eine relativ geringe Verkernung zu beobachten ist, während im oberen Bereich der Bäume, wo der Stress größer ist, die Verkernung im Verhältnis ausgeprägter ist. Für das Auftreten von Wasserstreß im Xylem des Stammes lassen sich zwei Ursachen denken:

1. eine gestörte Wassernachleitung von der Wurzel
2. ein übermäßiger Wasserbedarf bei der Transpiration

Zwar wurden Unterschiede bei der Hydroregulation der Nadeln beobachtet, jedoch wiesen Mittagsdepressionen auch beim kranken Baum auf eine geregelte Transpiration hin. Es könnte bei den Anspannungen des Wasserzustandes zwar auch ein größerer Wasserbedarf von Einfluß sein, jedoch ist nach dem festgestellten Zustand der Wurzel die Hauptursache wahrscheinlich hier zu sehen.

Bei starken Belastungen des Wasserhaushaltes könnte eine gestörte Wassernachleitung von der Wurzel her so hohe Saugspannungen im Xylem verursachen, daß es vom Mark ausgehend zu einer vorzeitigen Verkernung im Stamm kommt. Durch eine höhere Geschwindigkeit des Saftflusses in den verkernten Bereichen ließe sich dieser Verlust an wasserführender Querschnittsfläche im Splint zunächst ausgleichen, so wie es bei einem Baum nach einem einfachen oder gar nach einem doppelten Sägeschnitt zumindest eine Zeit lang vor sich gehen würde. VITÉ [1958] spricht im Zusammenhang mit der Frage nach der Bedeutung des "Drehwuchses" von einer transpirationsphysiologischen Notwendigkeit, und zwar um die unterschiedliche Saugkraft der einzelnen Transpirationsflächen auf den Gesamtquerschnitt zu verteilen. Wenn dies für einen gesunden Baum mit einem funktionstüchtigen Splint gilt, dann läßt sich vorstellen, daß ein geschwächter Baum mit einer einschnei-

denden Veränderung des Wasserleitsystems erheblich mehr Probleme hat und daß daraus sich eine eigene Dynamik entwickeln kann. Durch die höheren Geschwindigkeiten steigen auch die Fließwiderstände im Xylem, wobei bei anhaltender Belastung innerhalb von kurzen Zeitspannen die Schwelle erreicht werden könnte, die durch Kavitationen und Lufteintritt in den wasserführenden Tracheiden zu einer Ausdehnung der Blockierung des Splintholzes führt.

Durch Wasserpotentialmessungen wurde jedoch kein anhaltender Wasserstreß bei den kranken Bäumen beobachtet. Das kann - wie bereits erwähnt - durch eine Kompensation in Folge eines Abwurfs von Nadeln kommen, denn unter außergewöhnlichen Wasserstreßsituationen wurde nicht gemessen. Da bei Koniferen der Nadelabwurf ein rein mechanischer Vorgang ist [GRUBER 1984], der z.B. durch einen akuten Wassermangel ausgelöst werden kann, ist es unabhängig von der Verfärbung möglich, daß kranke Bäume bei extremen Witterungsbedingungen sehr viel eher ihre Nadeln verlieren als gesunde. Es läßt sich vorstellen, daß ein solcher Ablauf innerhalb von relativ kurzen Zeitspannen vor sich geht, so daß es mit Wasserpotentialmessungen sehr schwer sein kann, einen solchen Zustand zu erfassen.

6. LITERATUR

Bamber, R.K., K.Fukuzawa

Sapwood and Hartwood: A Review

Forestry Abstracts, 9,46 (1985) 567 - 580

Belot, Y., D.Gauthier, H.Camus, C.Caput

Prediction of the Flux of Tritiated Water from Air to Plant Leaves

Health Phys. 37 (1979) 575 - 538

Braun, H.J.

Die Organisation des Stammes von Bäumen und Sträuchern

Wissensch.Verlagsges. mbH., Stuttgart (1963)

Parameswaran, N., S. Fink, W. Liese

Feinstrukturelle Untersuchungen an Nadeln geschädigter Tannen und Fichten aus Waldschadensgebieten im Schwarzwald

Eur. J. For. Pathol. 15 (1985) 168 - 182

Burschel, P.

Waldschäden-Forstwirtschaft-Witterung

AFZ 3 (1985) 43 - 49

Cermak, J., J. Ulehla, J. Kucera, M. Penca

Sap Flow Rate and Transpiration Dynamics in the Full-grown Oak (*Quercus robur* L.) in Floodplain Forest Exposed to Seasonal Floods as Related to Potential Evapotranspiration and Tree Dimensions

Biologia Plantarum (Praha) 24, 6 (1982) 446 - 460

Cramer, H.H., Cramer-Middendorf, M.

Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen Schadensperioden und Klimafaktoren in mitteleuropäischen Forsten seit 1851

Pflanzenschutznachrichten BAYER 37, 55 (1984) 208-334

Grammel, R.H., G.Becker, M.Groß, B. Höwecke

Untersuchungen von anatomischen, physikalischen und elastomechanischen Holzeigenschaften erkrankter im Vergleich zu gesund erscheinenden Fichten und Tannen der wichtigsten baden-württembergischen Vorkommen

auf der Basis der Werkstoff- und Gebrauchsprüfung
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH,
KfK-PEF 4, April 1986, Band 1, 400 - 412

Gross, K., T. Pham-Nguyen, H. Unger

Tägliche und saisonale Änderungen des Wasserpotentials und seiner Komponenten in den Kronen von Fichten unterschiedlichen Alters
Allg. Forst- und J.-Ztg., Jg. 151, 4/5 (1980) 69 - 79

Gruber, F.

Morphologische und anatomische Untersuchungen an Terminaltrieben geschädigter und ungeschädigter Fichten
(Zwischenergebnis)
Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Göttingen ,
Hrgb. B.Ulrich, Band 3 (1984) 27 - 53

Huber, B., E. Schmidt

Eine Kompensationsmethode zur thermo-elektrischen Messung langsamer Saftströme
Ber.Deutsch.Bot.Ges. 55 (1937) 514 - 529

Hübner, G.

Zum Wassertransport in *Vicia faba*
Flora 148 (1959/60) 549 - 594

Kucera, L.J., P. Brunner

Kernspintomographie zur Untersuchung kranker Bäume
Neue Zürcher Zeitung 206, 252 (1985) 89

Kucera, L.J.

Kernspintomographie und elektrische Widerstandsmessungen als Diagnosemethoden der Vitalität erkrankter Bäume
Schweiz.Zeitschr.f.Forstwesen 157, 8 (1986) 673 - 690

Lange, O.L., H. Zellner

Physiologische Veränderungen bei geschädigten Bäumen
Statusseminar "Wirkungen von Luftverunreinigungen auf
Waldbäume und Waldböden" 2.-4.Dez.1985, KFA Jülich
Jül-Spez-396 (1986) 326 - 338

Luvall, J.C., C.E. Murphy, Jr.

Evaluation of the Tritiated Water Method for Measurement of Transpiration in Young *Pinus taeda* L.

Forrest Sci. 28, 1 (1982) 5 - 16

Mies, E., H.W. Zöttl

Zeitliche Änderung der Chlorophyll- und Elementgehalte in den Nadeln eines gelb-chlorotischen Fichtenbestandes

Forstw. Cbl. 104 (1985) 1 - 8

Nießlein, E.

Stand der Ursachenforschung

in: E.Nießlein, G. Voss (Hrsg.) Was wir vom Waldsterben wissen, , Köln, Deutscher Instituts-Verlag (1985) 26 - 62

Raney, F., Y. Vaadia

Movement and Distribution of THO in Tissue Water and Vapor Transpired by Shoots of *Helianthus* and *Nicotiana*

Plant Physiol. 40 (1965) 383 - 388

Rudinsky, J.A., J.P. Vité

Certain Ecological and Physiological Aspects of the Pattern of Water Conduction in Conifers

Forest Science 5,3 (1959) 259 - 266

Schubert, A.

Untersuchungen über den Transpirationsstrom der Nadelhölzer und den Wasserbedarf von Fichte und Lärche

Tharandter forstl. Jb. 90 (1939) 821 - 883

Schulze, E.-D., J. Cermak, R. Matyssek, M. Penka, R. Zimmermann, F. Vasicek

Canopy Transpiration and Water Fluxes in the Xylem of the Trunk of *Larix* and *Picea* Trees - a Comparison of Xylem Flow, Porometer and Cuvette Measurements

Oecologia 66 (1985) 475 - 483

Schulze, E.D., R. Oren, K. Werk, J. Meyer, R. Zimmermann

Kohlenstoff-, Wasser-, und Nährstoffhaushalt von Fichten stark belaste-

ter Hochlagenstandorte auf Phyllit in NO - Bayern
Statusseminar "Wirkungen von Luftverunreinigungen auf
Waldbäume und Waldböden" 2.-4.Dez.1985, KFA Jülich
Jül-Spez-396 (1986) 106 - 117

Sepall, O., S.G. Mason

Vapor/Liquid Partition of Tritium in Tritiated Water
Can. J. Chem. 38 (1960) 2024 - 2025

Siefermann-Harms, D.

Vorstellung der Probebäume und des Untersuchungsprogramms, in: Siefermann-Harms, D., E. Kilz (Red.) Interdisziplinärer PEF-Forschungsschwerpunkt Kälbelescheuer/Südschwarzwald, Quelldaten 1985, KfK-PEF 10 (1987)

Strack, S.

Biokinetische Untersuchungen über organisch gebundenes Tritium in Algenkulturen
Bundesgesundheitsamt, STH-Bericht 2/78, Dietrich Reimer Verlag (1978)

Strack, S.

Behavior of Tritium in the Water Pool and Organic Pool of the Leaves of a Beech Tree
Annales de l'Association Belge de Radioprotection 7, 3-4 (1982) 213 - 227

Strack, S., H. Unger

Wassertransport und Wasserumsätze in kranken und gesunden Fichten
Statusseminar "Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Waldbäume und Waldböden", 2.-4. Dezember 1985
Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Spez-369, 182 - 187

Strack, S., H. Unger

Untersuchungen des Wassertransports und der Wasserumsätze in Fichten mit Hilfe von Tritium
2.Statuskolloquium des PEF, 4.-7. März 1986, Karlsruhe, KfK-PEF 4, Vol. 1 (1986) 213 - 224

Ulrich, B.

Eine ökosystemare Hypothese über die Ursachen des Tannensterbens (*Abies alba Mill.*)

Forstw. Cbl. 100, 3-4 (1981) 228 - 236

Unger, H., P. Acker, S. Strack

Untersuchungen der Wasserversorgung von gesunden und kranken Bäumen

Jahresbericht 1984 der Hauptabteilung Sicherheit, Kernforschungszentrum

Karlsruhe, Red: Kiefer, H., W.Koelzer, L.A.König, KfK 3883 (1985) 127 -

132

Unger, H., S.Strack

Untersuchungen des Wasserzustandes von geschädigten und ungeschädigten Fichten mit Hilfe von Tritium

1. Statuskolloquium des PEF, 5.-7. März 1985, Karlsruhe,

KfK-PEF 2 (1985) 189 - 197

Unger, H., P.Acker, S.Strack

Wassertransport und Wasserumsätze in kranken und gesunden Fichten

Jahresbericht 1985 der Hauptabteilung Sicherheit, Kern-

forschungszentrum Karlsruhe, Red: Kiefer, H., W.Koelzer,

L.A.König, KfK 4067 (1986) 161 - 167

Vité, J.P.

Über die Transpirationsphysiologische Bedeutung des Drehwuchses bei Nadelhölzern

Forstw.Cbl. 77, 7/8 (1958) 193 - 256

Vité, J.P.

Observations on the Movement of Injected Dyes in *Pinus Ponderosa* and *Abies Concolor*

Contrib.Boyce Thompson Inst. 20 (I), (1959) 7 - 26

Woods, F.W., D. O'Neal

Tritiated Water as a Tool for Ecological Field Studies

Science 147 (1965) 148 - 149

Zimmermann, M.H., C.L. Brown

Trees, Structure and Function

Springer, New York, Heidelberg, Berlin (1971) 336 S.

Zimmermann, M.H.

Xylem Structure and the Ascent of Sap

Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo (1983) 107 - 122

DANKSAGUNG

Wir danken für die hilfreiche Mitarbeit bei der Durchführung der Experimente Frau **Petra Acker** und Herrn **Giorgio Pagliosa**. Herrn **Dipl.Biol. Peter Röhl** danken wir für seine Anregungen bei der Bestimmung des Wassergehaltes in Stammscheiben, wie die Verwendung von Kupfersulfat. Für die kernspintomographischen Aufnahmen an Stammabschnitten der Versuchsbäume sei an dieser Stelle nochmals Herrn **Dr. Dieter Höpfel** von der Fa. Bruker-Medizintechnik GmbH, Rheinstetten-Karlsruhe, gedankt.

Projekt "Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung"(PEF)

Bisher erschienene PEF-Berichte (ISSN 0931-2749) :

Bezug (z.T. gegen anteilige Kostenpauschale) über:

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Literaturabteilung, Fr. Michael, Postfach 3640, 7500 Karlsruhe, Tel. 07247/825811

- KfK-PEF 1 A. Seidel, M. Wiener (Redaktion)
Kolloquium Luftverunreinigungen und Atemwegserkrankungen beim Menschen, Karlsruhe, 4. Februar 1985
- KfK-PEF 2 F. Horsch, W.G. Filby, N. Fund, S. Gross, B. Hanisch, E. Kitz, A. Seidel (Redaktion)
1. Statuskolloquium des PEF vom 5. bis 7. März 1985 im Kernforschungszentrum Karlsruhe
- KfK-PEF 3 R. H. Grammel, G. Becker, M. Groß, B. Höwecke
Untersuchung der Holzqualität erkrankter Fichten und Tannen mit Schwerpunkt Schwarzwald auf der Basis von Werkstoff- und Gebrauchsprüfung
- KfK-PEF 4 F. Horsch, W.G. Filby, N. Fund, S. Gross, B. Hanisch, E. Kitz, A. Seidel (Redaktion)
2. Statuskolloquium des PEF vom 4. bis 7. März 1986 im Kernforschungszentrum Karlsruhe
- KfK-PEF 5 F. Horsch, W.G. Filby, S. Gross, B. Hanisch, E. Kitz, A. Seidel
Zusammenfassung der Projektleitung zum 2. Statuskolloquium des PEF vom 4. bis 7. März 1986
- KfK-PEF 6 S. Wittig, R. Kutz, K. Steinebrunner
Optimierung von ölgefeuerten Kleinbrenneranlagen: Reduktion von NO_x, Kohlenwasserstoffen und anderen Schadstoffen
- KfK-PEF 7 M. Conrads, M. Klar, D. Wurz
Verbesserte Tropfenabscheider in Rauchgaswäschern als Voraussetzung für Maßnahmen zur Emissionsminderung
- KfK-PEF 8 G. Ernst, N. Moussiopoulos, K. Zellner
Simulation der Diffusion von Schadstoffen und der Ausbildung photochemischen Smogs in Ballungsgebieten
- KfK-PEF 9 W. Funke et al.
Tiergesellschaften im Ökosystem "Fichtenforst" (Protozoa, Metazoa - Invertebrata) - Indikatoren von Veränderungen in Waldökosystemen
- KfK-PEF 10 D. Siefermann-Harms, E. Kitz (Redaktion)
Interdisziplinärer PEF-Forschungsschwerpunkt Kälbelescheuer/Südschwarzwald - Quelldaten 1985
- KfK-PEF 11 G. Hildebrandt, O. Grundmann, H. Schmidtke, P. Tepassé
Entwicklung und Durchführung einer Pilotinventur für eine permanente europäische Waldschadensinventur
- KfK-PEF 12 F. Horsch, W.G. Filby, N. Fund, S. Gross, B. Hanisch, E. Kitz, A. Seidel (Redaktion)
3. Statuskolloquium des PEF vom 10. bis 12. März 1987 im Kongreßzentrum Karlsruhe
- KfK-PEF 13 O. Rentz, H.-D. Haasis, Th. Morgenstern, J. Remmers, Th. Sautter, G. Schons
Entwicklung von technisch-wirtschaftlichen Strategien für Emissionsminderungsmaßnahmen für Schwefeldioxid und Stickoxide aus stationären Produktionsanlagen in Baden-Württemberg
- KfK-PEF 14 F. Horsch, W.G. Filby, S. Gross, B. Hanisch, E. Kitz, A. Seidel
Zusammenfassung der Projektleitung zum 3. Statuskolloquium des PEF vom 10. bis 12. März 1987
- KfK-PEF 15 D. Fengel
Strukturuntersuchungen an den Zellwänden im Holz erkrankter Nadelbäume zur Beurteilung der Holzqualität
- KfK-PEF 16 A. Schulz, H.-D. Behnke
Feinbau und Differenzierung des Phloem von Buchen, Fichten und Tannen aus Waldschadensgebieten
- KfK-PEF 17 W. Baumann, S. Jordan, H.-R. Paur, H. Mätzing, W. Schikarski, H. Wiens
Simultane Rauchgasreinigung durch Elektronenstrahl
- KfK-PEF 18 E. Nießlein, H.-J. Loosen, W. Wilkening, K. Günther, M. Tampe-Oloff, P. Saile
Ökonomische und politische Folgen des Waldsterbens
- KfK-PEF 19 R.H. Grammel, G. Becker, M. Groß, B. Höwecke
Untersuchungen der Holzeigenschaften erkrankter Fichten und Tannen aus Baden-Württemberg auf der Basis von Werkstoff- und Gebrauchsprüfung
- KfK-PEF 20 P. Wieser, H. Schreiber, W. Greiner
Quellenspezifische Merkmale partikelgebundener atmosphärischer Spurenstoffe der bodennahen Luft. Vergleichende Untersuchungen mit dem Lasermikrosonden-Massenanalysator LAMMA 500 bei der Röntgenfluoreszenzanalyse
- KfK-PEF 21 B. Boysen, R. Friedrich, Th. Müller, N. Scheierle, A. Voss
Erfassung stündlicher SO₂- und NO_x-Emissionen in Baden-Württemberg in einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km für die Zeit der TULLA-Meßkampagne
- KfK-PEF 22 R. Friedrich, A. Obermeier, A. Voss
Pilotstudie "Emissionskataster für flüchtige organische Verbindungen"
- KfK-PEF 23 W. Hübschmann, P. Thomas, S. Vogt
Meßkampagne zur Erfassung des Transports von Luftschadstoffen in Baden-Württemberg
- Experimentelle Beiträge -

- KfK-PEF 24 K. Adam, F. H. Evers, Th. Littek
Ergebnisse niederschlagsanalytischer Untersuchungen in südwestdeutschen Waldökosystemen 1981 - 1986
- KfK-PEF 25 G. Hildebrandt, A. Kadro, S. Kuntz, C. Kim
Entwicklung eines Verfahrens zur Waldschadensinventur durch multispektrale Fernerkundung
- KfK-PEF 26 L. Löffler, P. Gäng, K. Hedden, O. Balekdjian
Entwicklung von Verfahren zur kombinierten Abscheidung von Stäuben und gasförmigen Schadstoffen
- KfK-PEF 27 A. Voß, R. Friedrich, B. Boysen, M. Mattis, H. Bach, G. Claus, R. Bässler, U. Essers, R. Greiner, P. Besser
Kosten-Effektivitäts-Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung der SO₂- und NO_x-Emissionen in Ballungsräumen am Beispiel der Stadt Stuttgart
- KfK-PEF 28 E.E. Hildebrand
Zustand und Entwicklung chemischer Eigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen
- KfK-PEF 29 R. Dlugi, S. Jordan, S. Manegold, H. Mätzing
Die Entstehung sulfat- und nitrathaltiger Partikeln und Tropfen in der Atmosphäre
- KfK-PEF 30 G.W. Israel, R. Böhm
Verbesserung und Prüfung der Anwendbarkeit eines Meßverfahrens zur quasi-kontinuierlichen Messung von Schwefelsäure in Reingluftgebieten
- KfK-PEF 31 W. Weisweiler, R. Hoffmann, R. Stein
Trockene Rauchgasentschwefelung mit Kalkstein oder Dolomit: Verbesserung der Entschwefelungswirkung durch Optimierung der Feststoff-Porenstruktur, Pelletierung und chemische Aktivierung
- KfK-PEF 32 R. Hampp, W. Einig, R. Keil
Profile biochemischer Parameter in pflanzlichen Geweben und Zellen mit unterschiedlich ausgeprägten Schadsymptomen
- KfK-PEF 33 M. Kotter, H.-G. Lintz
Optimierung der Katalysatorzusammensetzung im Fall der selektiven Reduktion von Stickoxiden durch Ammoniak bei instationärer Reaktionsführung in einem weiten Temperaturbereich
- KfK-PEF 34 K.J. Kunert
Lipidperoxidation als phytotoxische Folge atmosphärischer Schadstoffwirkung
- KfK-PEF 35 F. Horsch, W.G. Filby, N. Fund, S. Gross, B. Hanisch, E. Kilz, A. Seidel (Redaktion)
4. Statuskolloquium des PEF vom 8. bis 10. März 1988 im Kernforschungszentrum Karlsruhe
- KfK-PEF 36 F. Nolting, C. Zetzsch
Simulation der Photooxidation von biogenen Kohlenwasserstoffen des Waldes unter Berücksichtigung der Luftbelastung durch NO_x und anthropogene Kohlenwasserstoffe
- KfK-PEF 37 S. Waldner-Sander, K. Botzenhart
Mikroorganismen als biologische Indikatoren für waldschädigende Luftverunreinigungen
- KfK-PEF 38 S. Strack, H. Unger
Untersuchungen zum Wassertransport und zur Wasserführung in Fichten