

Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen  
Department für Ökologie  
Technische Universität München

**Die Transpiration von Waldbäumen als Grundlage der  
Validierung und Modellierung der  
Bestandestranspiration in einem Wassereinzugsgebiet  
des Flusses 'Ammer'**

Katja Maria Patzner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Jörg Pfadenhauer

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Rainer Matyssek  
2. Univ.-Prof. Dr. Jörg Fromm  
3. Univ.-Prof. Dr. Bernd Huwe  
(Universität Bayreuth)

Die Dissertation wurde am 29.04.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 09.08.2004 angenommen.



*Meiner Familie*



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>II</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Grundlage	1
1.2	Methoden zur Ermittlung der Kronentranspiration	2
1.3	Anwendungsmöglichkeiten der Xylemflussmessungen	3
1.4	Hintergrund und Vernetzung der Untersuchung	4
1.5	Zielsetzung und Fragestellung	7
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Allgemeine Beschreibung der Untersuchungsgebiete</b>	<b>9</b>
2.1.1	Physiogeographische Beschreibung des Halbammergebietes	9
2.1.2	Physiogeographische Beschreibung des Kranzberger Forsts	12
<b>2.2</b>	<b>Auswahlkriterien der Standorte</b>	<b>14</b>
2.2.1	Auswahlkriterium Standort Sperrgraben	14
2.2.2	Auswahlkriterium Standort Kranzberger Forst	15
<b>2.3</b>	<b>Charakterisierung der Bestände</b>	<b>15</b>
2.3.1	Sperrgraben	15
2.3.1.1	Messfläche 1: Hochmontaner Fichten-Reinbestand	15
2.3.1.2	Messfläche 2: Hochmontaner Buchen-Fichten-Mischbestand	16
2.3.2	Kranzberg	16
2.3.2.1	Messfläche 3: Kranzberger Forst	16
<b>2.4</b>	<b>Biometrie der Baum- und Bestandesstruktur</b>	<b>18</b>
2.4.1	Erfassung allgemeiner Baum- und Bestandesdaten	18
2.4.2	Beschreibung des Ernteverfahrens	19
2.4.3	Hochrechnung der Laubbiomasse vom Pobeast zum Erntebaum	21
2.4.4	Hochrechnung der Anteile von Sonnen- und Schattenkrone an der Gesamt-Laubbiomasse eines Einzelbaums	21
2.4.5	Berechnung der Laub- bzw. Nadeloberfläche der Erntebäume und Abschätzung des Bestandes-LAI (leaf area index)	21
2.4.6	Bestimmung der Splintfläche	22
2.4.6.1	Splintflächenbestimmung durch Bohrkerne	23
2.4.6.2	Splintflächenbestimmung an Stammscheiben und Astbasisansätzen	24

<b>2.5</b>	<b>Meteorologische Datenerfassung</b>	<b>24</b>
2.5.1	Meteorologische Messungen	24
2.5.2	Mikroklimatisches Höhenprofil entlang einer Buche am Sperrgraben	24
2.5.3	Messung des Bestandesniederschlags und des Interzeptionsverlustes	25
2.5.3.1	Kronendurchlass	25
2.5.3.2	Stammabfluss	26
<b>2.6</b>	<b>Xylemflussmessungen</b>	<b>28</b>
2.6.1	Theorie	28
2.6.2	Sensorsystem	28
2.6.3	Installation der Sensoren	29
2.6.4	Stromversorgung und Datenaufzeichnung	30
2.6.5	Xylemflussberechnung	31
2.6.6	Messungen der Variabilität der Xylemflussdichte auf unterschiedlichen Stammseiten	32
2.6.7	Bestimmung der Variabilität der Flussdichte über den Stammquerschnitt	32
2.6.8	Auswahl und Beschreibung der Messbäume auf den Untersuchungsflächen	35
2.6.9	Hochrechnung des Safflusses vom Einzelbaum auf den Bestand	43
<b>2.7</b>	<b>Porometrie</b>	<b>44</b>
2.7.1	Das Gaswechsel-Meßsystem	44
2.7.2	Auswahl der Messzweige	44
2.7.3	Versuchsdurchführung	45
2.7.4	Berechnung der Gaswechselgrößen	46
2.7.5	Bestimmung des bauminternen Wasserspeichers	48
2.7.6	Kopplung zwischen Wasserverbrauch und Stoffproduktion	48
2.7.6.1	Berechnung des Kopplungsfaktors $g_{fac}$ für die stomatäre Leitfähigkeit	49
2.7.7	Statistische Auswertung	49
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Abhängigkeitsfaktoren der Kronentranspiration</b>	<b>50</b>
3.1.1	Bestandesstrukturanalyse	50
3.1.1.1	Charakterisierung der Bestandesstruktur	50
3.1.1.2	Biomasseerhebung vom Einzelbaum zur Bestandesebene	52
3.1.1.2.1	Laubbiomassenerfassung bei Buche und Fichte	52
3.1.1.2.2	Nadel- und Lauboberflächenermittlung	55
3.1.1.2.3	Bestimmung der Anteile von Sonnen- und Schattenlaub in der Krone von Einzelbäumen und auf Bestandesebene	60

3.1.1.3 Splintflächenanalyse	63
3.1.2 Klima der Untersuchungsflächen im Vergleich	66
3.1.2.1 Witterungsbedingungen im Sperrgraben	66
3.1.2.2 Witterungsbedingungen im Kranzberger Forst	69
3.1.2.3 Vertikalgradient des Mikroklimas im Mischbestand am Sperrgraben	72
<b>3.2 Untersuchungen der Xylemflussmessungen auf Einzelbaum- und Bestandesebene</b>	<b>74</b>
3.2.1 Variabilität der Flussdichte auf zwei Stammseiten	74
3.2.2 Xylemfluss in verschiedenen Splinttiefen	76
3.2.3 Abhängigkeit der Transpiration von der Strahlung	80
3.2.4 Tägliche Kronentranspiration während drei Vegetationsperioden	85
3.2.5 Skalieren des Saftflusses vom Einzelbaum auf den Bestand: Bestandestranspiration der Bestände im Vergleich	92
3.2.6 Modellparametrisierung für die Messstandorte am Sperrgraben	96
3.2.7 Sommerwasserbilanz am Sperrgraben und im Kranzberger Forst	99
<b>3.3 Gaswechselformen im Kranzberger Forst</b>	<b>102</b>
3.3.1 Witterungsbedingungen an den Messtagen	102
3.3.2 Anteil der Transpiration der Schattenkrone am Wasserverbrauch der Gesamtkrone	104
3.3.3 Ermittlung des bauminternen Wasserspeichers	107
3.3.4 Faktor für stomatäre Leitfähigkeit ( $g_{fac}$ )	113
<b>4 Diskussion</b>	<b>116</b>
<b>4.1 Specific leaf area am Sperrgraben und im Kranzberger Forst</b>	<b>116</b>
<b>4.2 Blattflächen-Splintflächen-Beziehung</b>	<b>117</b>
<b>4.3 Variabilität der Xylemflussdichte in Abhängigkeit von der Himmelrichtung</b>	<b>119</b>
<b>4.4 Radiale Variation des Saftflusses im Stamm</b>	<b>120</b>
<b>4.5 Kronentranspiration pro Baumklasse und Bestandestranspiration</b>	<b>123</b>
<b>4.6 Sommerwasserbilanzen der Wassereinzugsgebiete</b>	<b>131</b>
<b>4.7 Fragestellung 1:</b>	<b>133</b>
Ist unter den gegebenen Standortverhältnissen des Bergwaldes die für wechselgrüne Bäume gegenüber immergrünen Koniferen auf Einzelblattebene zu erwartende erhöhte Transpirationsrate auch auf Kronenebene feststellbar und für den Wasserverbrauch des Mischbestandes bestimmend - oder führen standörtliche Einflüsse zu ähnlichem Wasserverbrauch des Kronendaches in Fichtenreinbestand und Buchen-Fichten-Mischbestand?	

## **Inhaltsverzeichnis I**

---

Hypothese: Weisen in der montanen Höhenstufe der nördlichen Randalpen adulte Fichten-Reinbestände einen ähnlichen Wasserverbrauch auf wie Buchen-Fichten-Mischbestände?

<b>4.8 Fragestellung 2:</b>	<b>136</b>
Wie groß ist der Anteil der Transpiration der Schattenkrone am Wasserverbrauch der gesamten Krone?	
<b>4.9 Fragestellung 3:</b>	<b>136</b>
Welche Bedeutung hat die - meist auf den Vormittag beschränkte - Nutzung des bauminternen Wasserspeichers für die Bestimmung der Kronentranspiration aus Xylemflussmessungen?	
<b>4.10 Fragestellung 4:</b>	<b>137</b>
Lassen sich Transpiration und CO <sub>2</sub> -Aufnahme in Sonnen- und Schattenästen auf eine Weise korrelieren, welche auf der Basis der Kronentranspiration die Modellierung von Kohlenstoffgewinnen auf Bestandesebene eröffnet?	
<b>4.11 Folgerung und Ausblick</b>	<b>139</b>
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>142</b>
<b>6 Summary</b>	<b>146</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b>	<b>149</b>
<b>Anhang</b>	<b>164</b>
<b>Danksagung</b>	<b>169</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>171</b>
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>172</b>

## Abkürzungsverzeichnis II

<u>Abkürzung</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Einheit</u>
A	Netto-Photosyntheserate	$\mu\text{mol CO}_2 \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$
$A_L$	projizierte Lauboberfläche	$\text{m}^2$
$A_L/A_s$	„Huber-Value“ projizierte Lauboberfläche zu Splintquerschnittsflächen-Verhältnis	$\text{m}^2 \text{cm}^{-2}$
BH	Brusthöhe, Messhöhe von 1,3 m am Baumstamm	
BHD	Brusthöhendurchmesser, Stammdurchmesser in Brusthöhe (1,3 m)	cm
BHU	Brusthöhenumfang, Stammumfang in Brusthöhe (1,3 m)	cm
Bu	Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> )	
$c_c$	Molenbruch des $\text{CO}_2$ , das in die Kammer einströmt	
$c_e$	Molenbruch des $\text{CO}_2$ , das aus der Blattkammer strömt	
$c_i$	interzelluläre $\text{CO}_2$ -Konzentration	$\mu\text{mol CO}_2 \text{mol Luft}^{-1}$
$c_s$	$\text{CO}_2$ -Konzentration auf der Blattoberfläche = $c_a$ Außenluft-Konzentration an $\text{CO}_2$ bei Küvettenmessungen	ppm
$D_{\text{max}}$	maximales tägliches Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft	hPa
E	Transpirationsrate	$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$E_c$	Kronendachtranspiration	$\text{kg H}_2\text{O Zeit}^{-1}$ bzw. $\text{mm Zeit}^{-1}$
ET	Tagessumme der Verdunstung (Evapotranspiration)	mm
F	Messfläche	$\text{m}^2$
Fi	Fichte ( <i>Picea abies</i> )	
g	Grundfläche (= Stammquerschnittsfläche in Brusthöhe) des Messbaumes	$\text{m}^2$
G	Grundfläche (= Stammquerschnittsfläche in Brusthöhe) aller Bäume auf der Messfläche	$\text{m}^2$
$g_{\text{bw}}$	Leitfähigkeit der Blattgrenzschicht für Wasserdampf	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$

## Abkürzungsverzeichnis II

---

<b><u>Abkürzung</u></b>	<b><u>Bezeichnung</u></b>	<b><u>Einheit</u></b>
g <sub>fac</sub>	dimensionsloser Kopplungsfaktor zwischen Photosynthese- und stomatärer Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Blatt-/Zweigebene, beschreibt die stomatäre Sensitivität	
g <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	stomatäre Leitfähigkeit des Wasserdampfes	mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
g <sub>min</sub>	kutikuläre Leitfähigkeit bei geschlossenen Stomata	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
g <sub>tc</sub>	gesamte Leitfähigkeit des Blattes für CO <sub>2</sub>	mol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
g <sub>s</sub>	stomatäre Leitfähigkeit	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
g <sub>tw</sub>	gesamte Leitfähigkeit des Blattes für H <sub>2</sub> O	mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
h <sub>NS</sub>	Stammabflussmenge des Messbaumes	dm <sup>3</sup>
h <sub>s</sub>	relative Luftfeuchtigkeit als Fraktion = relative Luftfeuchtigkeit/100	
K	Flussindex (Granier Methode)	dimensionslos
k <sub>f</sub>	$(k^2+1)/(k*1)^2$ ; wobei K eine Schätzung des Verhältnisses der stomatären Leitfähigkeit der einen Blattseite zur anderen Blattseite ist. Für hypostomatäre Blätter, wie Buchenblätter muss k = 0 sein, für Fichte ist k = 1	
Klasse 1	„Kraft-Klasse 1“ der untersuchten Bäume: Spiegelt die soziale Stellung im Bestand wider, BHU > 120 cm	
Klasse 2	„Kraft-Klasse 2“ der untersuchten Bäume: Spiegelt die soziale Stellung im Bestand wider, BHU 60-120 cm	
Klasse 3	„Kraft-Klasse 3“ der untersuchten Bäume: Spiegelt die soziale Stellung im Bestand wider, BHU < 60 cm	
LAI	Blattflächenindex (leaf area index)	m <sup>2</sup> <sub>Blattfläche</sub> m <sup>-2</sup> <sub>Boden</sub>
MEZ	Mitteleuropäische Zeit	
n	Anzahl	
NN	Normalnull	
np	Nettokohlendioxidfixierungsrate	μmol cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

<b><u>Abkürzung</u></b>	<b><u>Bezeichnung</u></b>	<b><u>Einheit</u></b>
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung (400 bis 700 nm), (photosynthetically active radiation)	Wm <sup>2</sup>
PET	potentielle Evaporation	mm
PPFD	photosynthetische Photonenflussdichte	μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$Q_1$	Quotient aus dem Mittelwert der Xylemflussdichte des Standardsensors ( $\bar{X}_{u1}$ ) und dem Mittelwert der Xylemflussdichte des nächsttieferen Sensor (z. B. $\bar{X}_{u2}$ = Sensor in 20 bis 40 mm Tiefe)	dimensionslos
$Q_2$	Quotient aus den Mittelwerten der Xylemflussdichte der Granier-Sensors in 20-40 mm und 40-60 mm Tiefe	dimensionslos
s	Blattfläche	cm <sup>2</sup>
SD	Standardabweichung	
SLA	spezifische Blattfläche (specific leaf area)	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>
T	Transpiration	mm
TG	Trockengewicht	g
TG <sub>L</sub>	Laubtrockengewicht	kg
$T_{\Delta a}$	aktuelle Temperaturdifferenz innerhalb des Xylems (Granier-Methode)	°C
$T_{\Delta M}$	Temperaturdifferenz innerhalb des Xylems bei Xylemfluss = 0 (Granier-Methode)	°C
Tmax	maximale Lufttemperatur des Tages	°C
Tmin	minimale Lufttemperatur des Tages	°C
Tmittel	mittlere Lufttemperatur des Tages	°C
u	Flussdichte (Granier-Methode)	ml cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
u <sub>e</sub>	Molenflussrate der einströmenden Luft;	μmol s <sup>-1</sup>
V <sub>NS</sub>	Stammabflussmenge des Messbaumes	dm <sup>3</sup>

## Abkürzungsverzeichnis II

---

<b><u>Abkürzung</u></b>	<b><u>Bezeichnung</u></b>	<b><u>Einheit</u></b>
$w_c$	Molenbruch des Wasserdampfs in der Blattkammer	
$w_e$	Molenbruch des einströmenden Wasserdampfes	
$w_l$	Molenbruch des Wasserdampfs in den Spaltöffnungen	
$\bar{X}_{u1} =$	Xylemflussdichte des Standardsensors (Messtiefe 0 bis 20 mm)	ml cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
$\bar{X}_{u2} =$	arithmetisches Mittel der Xylemflussdichte der Granier-Sensoren 2 (Messtiefe 20 bis 40 mm)	ml cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
$\bar{X}_{u3} =$	arithmetisches Mittel der Xylemflussdichten der Granier-Sensoren 3 (Messtiefe 40 bis 60 mm)	ml cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>

# 1 Einleitung

## 1.1 Grundlage

Von grundlegender Bedeutung für das Verständnis komplexer Wechselbeziehungen zwischen Biosphäre, Atmosphäre und Hydrosphäre ist die Kenntnis der Größenordnung regionaler Stoffflüsse wie des Kohlendioxids und Wassers (ALSHEIMER 1997). Die Wasserflüsse nehmen hierbei eine Schlüsselrolle ein, da sie als Basis für Elementflüsse dienen (KÖSTNER 1999). Zudem ist die Evapotranspiration eng mit dem Kohlenstoffhaushalt und der pflanzlichen Produktion verbunden (LIETH 1976, KÖSTNER 1999). Die Vegetationsschicht ist innerhalb des Wasserkreislaufs das wichtigste Bindeglied zwischen Boden und Atmosphäre. Der durch das Wasserpotentialgefälle zwischen Boden und Atmosphäre erzeugte Transpirationsstrom bestimmt die Wasser- und Nährstoffversorgung und damit die physiologischen Prozesse der Pflanzen. Gleichzeitig beeinflusst die Verdunstung die Wasserbilanz des gesamten Ökosystems und wirkt sich auf die Stoffkonzentration in der Bodenlösung aus (LANG 1999). Änderungen der Nährstoffversorgung im Boden sind so direkt an Änderungen im pflanzlichen Stoffwechsel gekoppelt (FRITSCH & MAYER 1998). Die Verdunstungsaktivität eines Waldes ist nicht nur Grundlage für die Quantifizierung des Nährstoffkreislaufes (ELLENBERG ET AL. 1986), sondern bestimmt auch über Gasaustauschvorgänge mit der Atmosphäre die Aufnahme von Schadstoffen wie z. B. Ozon und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) oder Stickstoffkomponenten (KOCH ET AL. 1992, MAURER & MATYSSEK 1997). Wasser-, Energie- und Nährstoffkreislauf bestimmen aber die Kohlenstoffbilanz des Ökosystems (ALSHEIMER 1997). Vom ökologischen Standpunkt aus beeinflusst die Transpiration in Beziehung zur Wasserverfügbarkeit die Baumverteilung und Bestandesdichte (LANG 1999). Als Folge von Bestandesöffnungen durch Sturmwurf oder einer intensiven Durchforstung ändert sich die Wasserverfügbarkeit, wodurch Trockenstress auftreten kann (MATYSSEK ET AL. 1991). Weiterhin kann die Veränderung der Vegetationsstruktur die Erosion verstärken und die Gefahr von Überschwemmungen erhöhen. Um Auswirkungen dieser Strukturänderungen und des globalen Klimawandels auf den Wasserhaushalt eines Ökosystems nachvollziehen zu können, ist daher ein Verständnis der räumlichen und zeitlichen Heterogenität der Transpiration der Baumschicht notwendig (PINOEL ET AL. 1991). Eine große Rolle spielen hierbei Computermodelle, die Vorhersagen über den Einfluss sich ändernder Umweltbedingungen auf den Wasserhaushalt eines Waldökosystems gestatten (TENHUNEN ET AL. 1998).

### 1.2 Methoden zur Ermittlung der Kronentranspiration

Für die Ermittlung des Wasserverbrauches von Waldbeständen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Den meisten Methoden ist allerdings nur eine indirekte Bestimmung der Wasserdampfabgabe aus dem Kronendach gemeinsam, wie sie z. B. hydrologische Wasserbilanzmodelle bieten (Input/Output-Analysen, z. B. BENECKE 1976). Allerdings lassen sich mit hydrologischen Wasserbilanzmodellen bei der Bestimmung des Wasserflusses durch den Baumbestand das variable Wasserspeichervermögen der Baumstämme und die Transpiration des Unterwuchses nicht von der Kronentranspiration der Bäume trennen (KÖSTNER 1999). Zudem ist die zeitliche Auflösung gering.

Anhand mikrometeorologischer Methoden, die auf Messungen der Gesamtverdunstungsraten beruhen, wurden in den vergangenen Jahrzehnten Kronendachtranspiration und -leitfähigkeit geschätzt (JARVIS & STEWART 1979, BERNHOFER & GRAY 1990). Vorteile dieser Verfahren sind eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung und die mögliche Integration auf Landschaftsebene. Aufgrund des hohen Messaufwandes, es werden langjährige Messreihen benötigt (SWANK & CROSSLY 1988), stehen solche mikrometeorologischen Erhebungen zur Berechnung des Wasserverbrauches von Waldbeständen nur begrenzt zur Verfügung. Weiterhin ist die Anwendbarkeit durch den advektiven Energie- und Massenaustausch (z. B. durch Berg- und Talwind) bei den meist nicht idealen topographischen Gegebenheiten eingeschränkt (JARVIS ET AL. 1976).

Methoden der optischen Fernerkundung messen die spektralen Eigenschaften der von der Erdoberfläche abgestrahlten und reflektierten Strahlung, die mit der Vegetation, dem Boden und der Atmosphäre in Wechselwirkung tritt (KURZ 2003). In Abhängigkeit von der Topographie und damit der Überfliegbarkeit des Geländes stützt sich die Bestimmung der Bestandestranspiration nur auf das spektrale Erscheinungsbild der obersten, sonnenexponierten Laubschicht. Die Eigenschaften tieferer Laubschichten und damit die Transpiration der Schattenkrone werden aus technischen Gründen vernachlässigt, was zu einer fehlerhaften Einschätzung des Wasserverbrauchs im Bestand führen kann. Über den Blattflächenindex LAI (Gesamtsumme der grünen Blattfläche bezogen auf die Grundfläche) erfolgt eine Verschneidung zwischen den Methoden der Fernerkundung und den Methoden der Atmosphären-, Boden- und Pflanzenkunde. Für die flächenhafte Struktur-Interpretation und Kalibrierung benötigen die optischen oder Radar-Signale der Fernerkundung neben dem LAI auch andere bodengestützte forstliche Strukturaufnahmen (KÖSTNER 1999), wodurch diese Verfahren zur Bestimmung des Wasserverbrauches von Waldbeständen sehr aufwendig werden.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Kronendachtranspiration bieten Gaswechselfmessungen auf Blatt- oder Astebene. Auf der Basis von Schätzformeln oder der Vollbeerntung, die der Bestimmung der gesamten Blattfläche eines Baumes dient, wird die Transpiration des Einzelblattes- oder Zweiges auf die Gesamtkrone skaliert. Diese Hochrechnungen stoßen besonders bei Schattbaumarten wie Buche auf ihre Grenzen, da die hohe Variabilität der Einzelblätter (ANSLEY ET AL. 1994), der Einfluss von Lichtflecken (KÜPPERS ET AL. 1999) und der stomatären Patchiness nicht berücksichtigt wird. Noch fehlerhafter werden diese Transpirationsschätzungen bei

Skalierung auf die Bestandesebene (LEVERENZ ET AL. 1982, ALSHEIMER 1997). Physiologische Modelle versuchen diese Skalierungslücke zu schließen. Sie quantifizieren Einflüsse der spezifischen Blatt- bzw. Bestandesstruktur auf das Mikroklima und berücksichtigen deren Auswirkungen auf den Gasaustausch einer Gesamtpflanze oder eines Bestandes (KÖSTNER 1999, TENHUNEN ET AL. 2001a).

Dagegen stellen Xylemflussmessungen ein Verfahren dar, mit dem die Kronentranspiration und damit der Wasserverbrauch eines Baumes direkt quantitativ und zeitlich hochaufgelöst bestimmt werden kann (KAUFMANN & KELLIHER 1991, VON WILLERT ET AL. 1995). Nach dem Prinzip der thermischen 'Heat Balance' (CERMAK ET AL. 1973, SAKURATANI 1981, GRANIER 1985) wird der Transpirationsstrom in Einzelbäumen bei gegebenem, turbulentem Massenaustausch mit der Atmosphäre annähernd in 'Real-Zeit' erfasst.

### 1.3 Anwendungsmöglichkeiten der Xylemflussmessungen

Der mit Hilfe von Xylemflussmessungen ermittelte Wasserfluss durch den Stamm entspricht in täglicher und saisonaler Integration der transpirierten Wassermenge der gesamten Baumkrone (SCHULZE ET AL. 1985, VON WILLERT ET AL. 1995). Die Kapazität der Wasserspeicherung in Bäumen variiert im tages- und jahreszeitlichen Verlauf (ZIMMERMANN 1983), wobei die Bedeutung dieses Speichers zur Deckung des Transpirationsbedarfs unterschiedlich beurteilt wird (SCHULZE ET AL. 1985, KÖSTNER ET AL. 1992). Während die Speicherkapazität des Laubes eher unbedeutend ist, konnte gespeichertes Wasser im Stammbereich und in Ästen der belaubten Krone bis zu 25 % der sommerlichen Tagestranspiration von Lärchen und Fichten decken (SCHULZE ET AL. 1985). Unabhängig von der Größe des Speichers können so die Transpiration der Krone und die Wasseraufnahme über die Wurzeln zeitlich voneinander entkoppelt sein. Mit beginnender Sonneneinstrahlung werden bei der Kronentranspiration zuerst die Wasserreserven des Kronenraums mobilisiert. Zeitlich verzögert setzt der Xylemfluss im Stammbereich ein und führt schließlich zur Wasseraufnahme über die Wurzeln (SCHUBERT 1999). Der Wasserspeicher wird meist vormittags genutzt und nachts wieder aufgefüllt, wenn in der Krone keine Transpiration mehr stattfindet. Der bauminterne Wasserspeicher bewirkt vormittags bei ansonsten ähnlichen Witterungsverhältnissen eine deutlich höhere Transpiration als am Nachmittag. Die Nutzung dieses Wasserreservoirs sollte daher bei der mechanistischen Modellierung der Bestandestranspiration und des Bodenwasserhaushaltes berücksichtigt werden.

Verschiedene Konzepte stehen für das 'Skalieren' der Transpiration einzelner Bäume auf die Ebene des Bestandeskronendaches zur Verfügung. Dies kann auf der Basis von Stammumfang oder projizierter Kronenfläche (KÖSTNER ET AL. 1992), der Stammquerschnittsfläche (ARENTH ET AL. 1996) oder der „solaräquivalenten Laubfläche“ der Bestandesbäume (CERMAK 1989) erfolgen. Letzterer Ansatz gewichtet den Flächenanteil von Sonnen- und Schattenlaub in der Kronentranspiration auf der Basis der funktionellen Korrelation zwischen lichtabhängiger morphologischer Differenzierung der Blattoorgane (NIINEMETS & KULL 1995) und ihrer physiologischen Leistungsfähigkeit, und damit dem Wasserverbrauch (OREN ET AL. 1986). Durch die Kombination von Messungen des Xylemfluss an der Stammbasis und des

Blatt-/Zweig-Gaswechsels (mittels Porometrie und Gaswechselküvetten) ist die Ermittlung der Abstimmung zwischen den Wasserflüssen in Sonnen- und Schattenkronen sowie internen Wasserspeichern möglich (SCHULZE ET AL. 1985, GOULDEN & FIELD 1994).

Die Skalierungsfehler, beim Hochrechnen der Transpiration vom Einzelbaum auf den Bestand, liegen bei statistisch basierter Stichprobenauswahl der Messbäume bei ca. 10 bis 20 %. Dies stellt eine geeignete Basis für hydrologische Bilanzierungen auf Landschaftsebene dar (KÖSTNER 1999). Die Xylemflussmessung ist somit prädestiniert unter natürlichen atmosphärischen Bedingungen die Transpiration auf Einzelbaumebene zu bestimmen (KÖSTNER 1999) und diese bei Berücksichtigung einer repräsentativen Stichprobenzahl, auf der Basis von verschiedenen Größenklassen der Bäume sowie struktur-biometrischen Angaben, auf den Bestand zu übertragen (OREN ET AL. 1998).

### 1.4 Hintergrund und Vernetzung der Untersuchung

Der bayerische Alpenraum ist das wichtigste Wassereinzugsgebiet der bayerischen Flüsse. Aufgrund der großen Flächenausdehnung und hohen Niederschläge dieser Region kommt allen Faktoren, die auf das Abflussverhalten einwirken, große Bedeutung zu. Hierbei spielt der Wald eine herausragende Rolle und ist unbestritten die beste Vegetationsform für den Schutz vor Hochwasser, Erosion, Murgang und Lawinen. Rund die Hälfte des bayerischen Alpenraums ist mit Wald bedeckt (ca. 250.000 ha), wovon ca. 60 % (fast 150.000 ha) als Schutzwald nach dem Bayerischen Waldgesetz ausgewiesen sind. Der typische Bergmischwald besteht aus Fichte, Tanne und Buche und ist vielfach nur noch in Beständen älter als 130 Jahre vorhanden. In den 20 bis 80 Jahre alten Wäldern ist der für die Erhaltung des Bodens wichtige Anteil von Tanne auf fast 1 % zurückgegangen. Gleichzeitig nehmen gleichförmige und labile Fichtenreinbestände in dieser Altersspanne einen besonders großen Anteil ein. Insgesamt entfallen im Staatsforst in den bayerischen Alpen auf die Hauptbaumarten Fichte und Buche ca. 60 % bzw. 20 % der Baumartenanteile (BROSINGER & ROTHE 2003).

Die vorliegende Untersuchung zur Transpiration von Waldbäumen als Grundlage der Validierung und Modellierung der Bestandstranspiration in einem Wassereinzugsgebiet des Flusses „Ammer“, war Bestandteil eines durch die DFG geförderten interdisziplinären Projektes, dem ferner die Lehrstühle der Bodenphysik, Klimatologie, Hydrologie und Geographie angeschlossen waren (Abb. 1-1 und A1). Zentrale Aufgabe des Gesamtkonzeptes war es eine Grundlage zur Entwicklung eines Wasserhaushaltmodells für den Voralpenraum zu schaffen.

Die Forschungsgruppen waren mit folgenden Teilprojekten beteiligt:

- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Dr. Alfred Becker) und Lehrstuhl für Hydrologie und Klimatologie der Universität Potsdam (Prof. Dr. A. Bronstert):

***Die modellgestützte Erforschung der lateralen Abflüsse und ihrer Wechselbeziehungen zur Bodenfeuchteverteilung. (DFG-Aktenzeichen: BE 1575/4-3)***

- Lehrstuhl für Meteorologie, Institut für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden (Prof. Dr. Chr. Bernhofer):

***Analyse und Simulation der Rolle der atmosphärischen Rückkopplung von Landoberflächen für den Wasserhaushalt auf Landschaftsebene anhand des Ammergebietes (DFG-Aktenzeichen: BE 1721/2-1-4)***

- Abteilung Bodenphysik der Universität Bayreuth (Prof. Dr. B. Huwe):

***Modellierung der Wasser-, Wärme- und Stickstoffdynamik von Böden in Landschaften: Analyse zu Komplexität, Dimensionalität und Parameterqualität (DFG-Aktenzeichen: HU 636/6-3)***

- Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen der Technischen Universität München (Prof. Dr. R. Matyssek):

***Die Transpiration von Waldbäumen als Grundlage der Validierung und Modellierung der Bestandstranspiration in einem Wassereinzugsgebiet des Flusses Ammer (DFG-Aktenzeichen: MA 1763/3-3)***

- Institut für Geographie der Ludwig-Maximilian-Universität München (Prof. Dr. W. Mauser):

***The Application of Remote Sensing for the Determination of Plant Nitrogen – a Contribution to IGBP/BAHC Research in Germany (MA 875/6-1 to 6-3)***

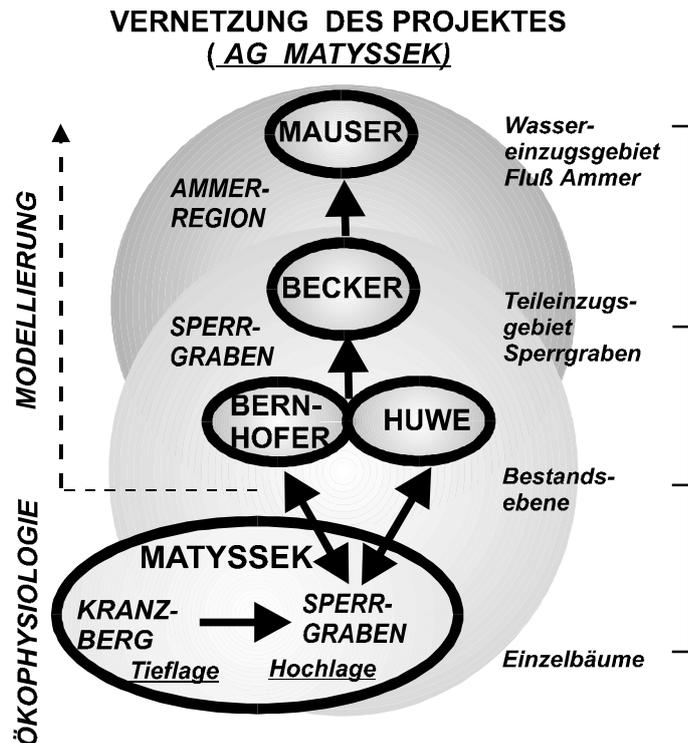


Abb. 1-1: Einbindung der Arbeitsgruppe (AG) Matyssek in das „Ammer“-Verbundprojekt. Die Pfeile kennzeichnen Richtung des Informationsflusses in der Datenintegration: AG Matyssek stellte durch Messungen erhobene ökophysiologische Befunde auf Einzelbaum- und Bestandesebene den modellierenden Arbeitsgruppen zur Verfügung, unmittelbar den AGs Huwe (Bodenphysik) und Bernhofer (Meteorologie) – erhielt von letzteren AGs gemessene Datensätze für die Analyse der Xylemflussmessungen. AG Becker (Hydrologie) modellierte die lateralen Hangabflüsse und die Bodenfeuchteverteilung im Sperrgrabengebiet. Die AG Mauser (Geographie) skalierte die Daten auf das Wassereinzugsgebiet der Ammer (Abbildungsentwurf: MATYSSEK 2003).

Die vorliegende Untersuchung diente nicht der Vertiefung und mechanistischen Deutung von Xylemfluss und Transpiration auf der Einzelbaumebene, sondern vielmehr der Erarbeitung einer ökophysiologischen Datenbasis für die hydrologische Modellierung (und deren Validierung) auf Bestandes- und Landschaftsebene. Die Zielsetzung des Projektes war auf Relevanz für die in Deutschland durchgeführten „International Geosphere-Biosphere Programme“ (IGBP) und „Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle“(BAHC)-Forschungsprogramme ausgerichtet. Ziel dieser Programme und des „Ammerprojektes“ ist es vertikale Austauschprozesse (Wasser, Energie, Gas) zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre sowie die Wasser- und Stoffflüsse in den Untergrund hinein (Versickerung, Grundwasserbildung) zu beschreiben und auf spezifische Standorte und Bestandestypen zu beziehen.

### 1.5 Zielsetzung und Fragestellung

Für die montane Höhenstufe der Nordalpen waren die Charakteristika der Bestandestranspiration von Buchen/Fichten-Wäldern bislang ungeklärt. Generell sind Kenntnisse zum Wasserverbrauch montaner Altbestände – ganz im Gegensatz zu Tieflagen-Beständen – sehr begrenzt. Bestimmen die ökologischen Gegebenheiten (inkl. Hangneigung) des montanen Standortes mit ihren Wirkungen auf Kronendifferenzierung und Bestandesstruktur eher den Wasserverbrauch als die blattphysiologischen Charakteristika der wechselgrünen Buche und der immergrünen Fichte? Kenntnisdefizite hierzu und eine variable Topographie stellen die prozessorientierte, hydrologische Modellierung montaner Wassereinzugsgebiete vor eine Herausforderung. Die Xylemflussmessung in Bäumen ermöglicht es, die Modellierung der Bestandestranspiration auf eine prozessgestützte, ökophysiologische Basis zu stellen. Ein solcher Bedarf besteht insbesondere für die Extrema ökologischer Gradienten, wozu auch die hydrologisch erst ansatzweise charakterisierten Wälder der montanen Stufe zu rechnen sind.

In der Literatur stehen den Übereinstimmungen zwischen Ermittlungen der Bestandeskronentranspiration mittels Xylemflussmessungen und anderen indirekten Methoden (KÖSTNER ET AL. 1992), aber auch Befunden über große Abweichungen gegenüber (ARENTH ET AL. 1996). Daher sollte für die montane Höhenstufe der nördlichen Randalpen (1) die direkte Messung des Wasserflusses im Stammxylem von Waldbäumen eine Datenbasis zur Validierung der aus Modellen berechneten Evapotranspiration von Waldbeständen erstellen und den Anteil der Bestandeskronentranspiration bestimmen (es wird auf geschlossene Bestände validiert, in der Annahme, dass die Evapotranspiration = der Transpiration ist). (2) Gleichzeitig sollte die Grundlage für eine prozessorientierte Modellierung der Bestandeskronentranspiration geschaffen werden.

Die Untersuchung fand im Wassereinzugsgebiet Sperrgraben des Flusses „Halbammer“ (Forstamt Oberammergau) statt (1220 m ü. NN.; 10° 56' 51" E / 47° 37' 33" N; HÄBERLE ET AL. 2001), in einem jeweils repräsentativen Buchen-Fichten-Mischbestand und Fichten-Reinbestand (*Picea abies*, *Fagus sylvatica*). Die Buche ist von Bedeutung, da diese Art die potentiell natürliche Baumvegetation prägen würde und infolge der gegenwärtigen Umgestaltung der Forste in Laubholz/Nadelholz-Mischbestände wieder an Verbreitung zunimmt. Es galt folgende zentrale **Hypothese** zu prüfen: ***In der montanen Höhenstufe der nördlichen Randalpen weisen adulte Fichten-Reinbestände einen ähnlichen Wasserverbrauch auf wie Buchen-Fichten-Mischbestände.***

Hieraus ergaben sich die abgeleiteten **Fragestellungen**:

- (1) ***Ist unter den gegebenen Standortverhältnissen des Bergwaldes die für wechselgrüne Bäume gegenüber immergrünen Koniferen auf Einzelblattebene zu erwartende erhöhte Transpirationsrate auch auf Kronenebene feststellbar und für den Wasserverbrauch des Mischbestandes bestimmend - oder führen standörtliche Einflüsse zu ähnlichem Wasserverbrauch des Kronendaches in Fichten-Reinbestand und Buchen/Fichten-Mischbestand?***
- (2) ***Wie groß ist der Anteil der Transpiration der Schattenkrone am Wasserverbrauch der gesamten Krone? Diese Frage besitzt Relevanz für die Ermittlung der Bestandeskronentranspiration auf der Basis der spektralen Eigenschaften der abgestrahlten und reflektierten Strahlung der oberen Sonnenkrone (z. B. aus „Remote Sensing“).***
- (3) ***Welche Bedeutung hat die - meist auf den Vormittag beschränkte - Nutzung des bauminternen Wasserspeichers für die Bestimmung der Kronentranspiration aus Xylemflussmessungen?***
- (4) ***Lassen sich Transpiration und CO<sub>2</sub>-Aufnahme in Sonnen- und Schattenästen auf eine Weise korrelieren (z. B. durch das gfac-Konzept nach HARLEY & TENHUNEN 1991; FALGE et al. 1996), welche auf der Basis der Kronentranspiration die Modellierung von Kohlenstoffgewinnen auf Bestandesebene eröffnet?***

Die Kopplung an die CO<sub>2</sub>-Aufnahme (via gfac) sowie die Klärung des Ausmaßes der Schattenkronentranspiration und der Bedeutung des bauminternen Wasserspeichers wurden exemplarisch im **Kranzberger Forst** bearbeitet (edaphisch und strukturell ähnlicher Buchen-Fichten-Mischbestand bei Freising; 485 m ü. NN; 11° 39' 41" E / 48° 25' 08" N; HÄBERLE ET AL. 2001), dessen intensive Instrumentierung und Gerüst-Installationen/Kran (Messfläche im SFB 607, vgl. Kap. 2) den Kronenraum für direkte Messungen auf Blatt-/Astebene zugänglich machten. Die Befunde aus dem Kranzberger Forst wurden (in erster Näherung) in die Modellierungen (durch Partnergruppen, s. Abb. 1-1) der Gegebenheiten des Hochlagenstandortes Sperrgraben integriert.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Allgemeine Beschreibung der Untersuchungsgebiete

#### 2.1.1 Physiogeographische Beschreibung des Halbammergebietes

Das Einzugsgebiet der Halbammer befindet sich am Nordrand der Bayerischen Alpen, etwa 60 km südwestlich von München (Abb. 2-1A und 2-1B). Es umfasst bis zum Pegel in Unternogg 43.5 km<sup>2</sup> und gehört zum Ammer-Einzugsgebiet. Ein Teil der vorliegenden Untersuchungen wurde am Sperrgraben (Koordinaten: O 10° 56' 51''; N 47° 37' 33''), einem Seitental des hochmontanen Wassereinzugsgebiets der Halbammer, unterhalb des Hochwildfeuerbergs (Erhebung 1541 m ü. NN) auf der Gemarkung der Gemeinde Wildsteig durchgeführt. Der Sperrgraben besitzt eine Fläche von 1.1 km<sup>2</sup> und erstreckt sich über einen Höhengradienten von 600 m.

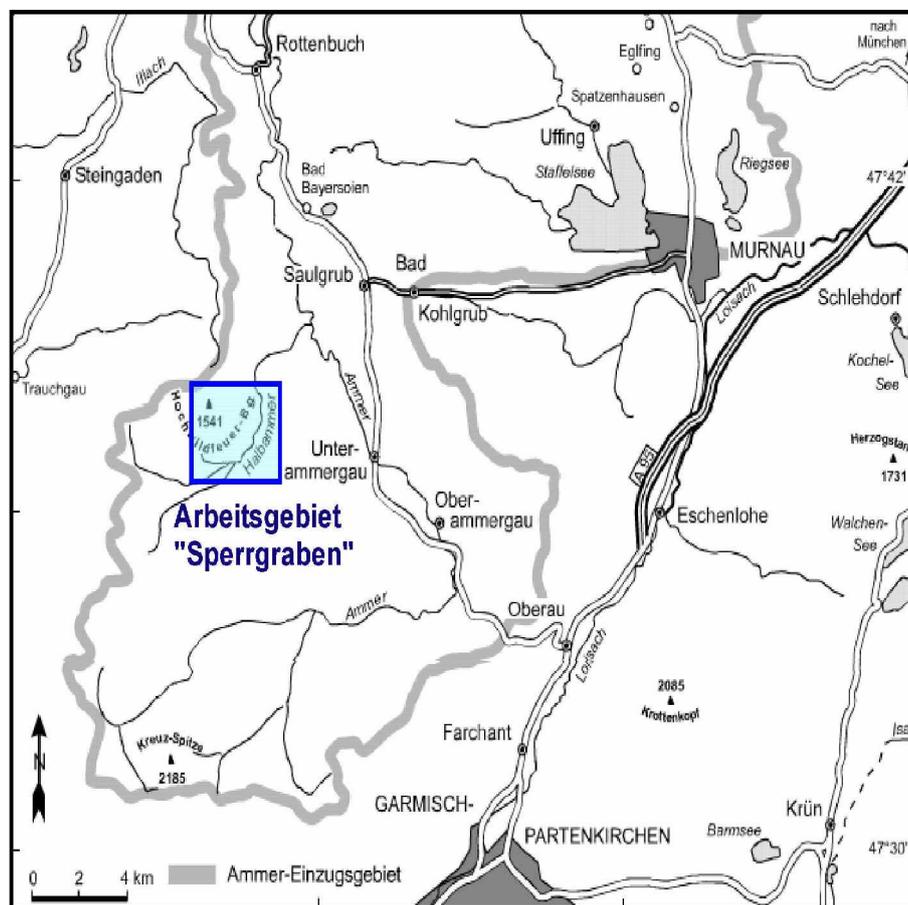


Abb. 2-1A: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes Sperrgraben (aus HUWE ET AL. 2003, DFG-Abschlussbericht).

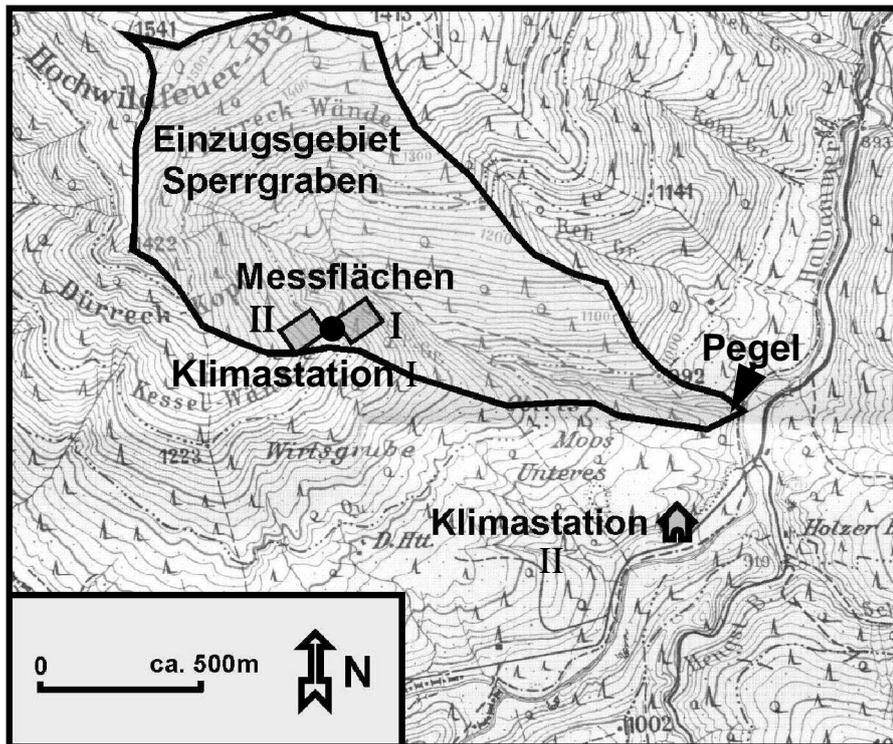


Abbildung 2-1B: Lage der Messflächen am Sperrgraben in der topographischen Karte. Messfläche I = Fichten-Reinbestand, Messfläche II = Buchen-Fichten-Mischbestand, Klimastation II = AG Bernhofer, Klimastation II = AG Huwe, Pegel = AG Becker (verändert nach HUWE ET AL. 2003, DFG-Abschlussbericht).

Das Einzugsgebiet der Halbammer durchstreicht zwei geologische Einheiten des Alpennordrands (STOLZ 1998). Von Süd nach Nord sind dies:

- Die kalkalpine Randzone der Nördlichen Kalkalpen
- Die Vorbergzone des bayerischen Flysch

### Kalkalpine Zone

Der südlichste Bereich des Einzugsgebietes wird zu den Nördlichen Kalkalpen gerechnet und ist durch die Überschiebung zweier Gesteinspakete gekennzeichnet, die als Lechtal- und Allgäu-Decke bezeichnet werden (JERZ 1993a, 1993b). Hauptanteile der Lechtal-Decke sind die durch die Gebirgsbildung auflagernden, älteren Sedimentgesteine des Trias, die das im Süden liegende schroffe Hochgebirge bilden (Gipfel bis zu 2000 m ü. NN, Bereich Garmisch). Dominiert werden die Lechtal-Sedimentgesteine durch den Wettersteinkalk und den Hauptdolomit. Die Allgäu-Decke wird aus den jüngeren, bei der Gebirgsbildung teilweise überlagerten Sedimentgesteinen der Jura- und Kreidezeit gebildet. Im allgemeinen sind diese Sedimentgesteine durch ihren Tongehalt weicher und weniger verwitterungsbeständig.

### **Flyschzone**

Die Kalkalpen wurden im Laufe ihrer Entwicklungsgeschichte auf die Vorbergzone des bayerischen Flysch, einem kreidezeitlichen Sediment, geschoben. Die Flyschzone grenzt nördlich an das Kalkalpin und bildet einen breiten aus Mergeln und Sandsteinen zusammengesetzten Saum (LUDWIG 2000). Morphologisch ist dieser Bereich durch Runde bewaldete Gipfel (Hohe Bleick, 1662 m) und Kammlagen gekennzeichnet. Entwässerungsrinnen, die aus dem Gebiet kommen, führen sehr viel Schutt mit sich und bauen am Gebirgsrand mächtige Schwemmkegel auf.

Am Nordrand des Ammereinzugsgebietes hat die Flyschzone ihrerseits ein jüngerer Trümmergestein, die Molasse, überschoben. Die Eiszeit formte aus diesem Gesteinsschutt das nördliche Alpenvorland (STEINBACH'S NATURFÜHRER, ALPEN-BLUMEN 1984).

### **Böden**

Die Entwicklung der Böden setzte sich erst nach Rückzug des Eises im Spät- und Postglazial fort und befindet sich im frühen bisweilen sogar erst initialen Stadium (LUDWIG 2000). In der südlichen Gebirgsregion ist die Bodenbildung infolge der hangerosiven Aktivität der extremen topographischen Verhältnisse durch periglaziale Fließerden und Hangschuttbildungen charakterisiert. Auf dem stark kalkhaltigen Untergrund der kalkalpinen Randzone haben sich primär Mull- und Moderrendzinen gebildet (RIEKEL 1983). Der mergelig-tonige Untergrund der Flyschzone liefert tiefgründige zergraste, mittelschwere bis schwere Böden in Form von Braunerden und Pelosolen. Die hohen Niederschläge führen in Hanglagen vielerorts zu Staunässe, wodurch Hanggleye entstehen. Im Bereich von Hangverflachungen treten Vermoorungen auf. Das Spektrum der Bodentypen reicht hier von Tonmergel-Rendzinen, über Pseudogleye bis hin zu Moorböden.

### **Klima**

Im regionalen Überblick kann das Klima des Gebietes als kühlgemäßigt und immerfeucht mit einem sommerlichen Niederschlagsmaximum beschrieben werden (LUDWIG 2000). Das Gebiet liegt dabei im Grenzbereich der Klimabezirke „Oberbayerisches Alpenvorland“ und „Alpen“ (KLIMA-ATLAS VON BAYERN 1996). Die wesentlichen Klimaelemente unterliegen, infolge von Relief und geographischer Breite, einem ausgeprägten breiten- und höhenabhängigen Gradienten. Ausschlaggebend ist die unmittelbare Nähe zu den Alpen, die sich sowohl in der Temperatur- als auch in der Niederschlagsverteilung deutlich bemerkbar macht. Die Jahresmitteltemperaturen liegen in den Talbereichen bei etwa 6,5 °C und sinken in den Bergregionen auf 4,5 °C ab. Das Gebiet wird häufig von feuchten Luftmassen aus west- und nordwestlicher Richtung getroffen, was zu einer ausgesprochenen Stauwirkung am Alpenrand führt. Die jährlichen Niederschlagssummen betragen je nach Höhenlage 1500 bis 2000 mm, wobei das Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlägen bei über 2 liegt. Infolge der Höhenlage ist eine langanhaltende Schneebedeckung vorhanden (i. d. R. von November bis Mai im Gebirge). Die Anzahl der jährlichen Frosttage liegt in der Gebirgsregion bei 160 (STOLZ 1998), die Dauer der Vegetationsperiode (Anzahl der Tage mit Temperaturen  $\geq 10$  °C) bei ca. 130 Tagen.

### Landnutzung, Vegetation

Das Untersuchungsgebiet wird infolge der Höhenlage und der damit verbundenen klimatischen Gegebenheiten sowie des Reliefs und der Bodenverhältnisse primär forstwirtschaftlich genutzt. Als Resultat der meist wassergesättigten Böden und der damit verbundenen eingeschränkten Wasserspeicherkapazität, der extremen Hangneigungen sowie der häufigen sommerlichen Starkregenereignisse ist das Einzugsgebiet stark hochwasser- und erosionsgefährdet. Das Statistische Landesamt gibt den Anteil der forstwirtschaftlichen Nutzung im Fylsch und Nördlichen Kalkalpenrand mit 60,9 % an. Auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen entfallen 12,6 %, die sich hauptsächlich auf kleinflächige Bereiche mit Grünland- bzw. Almenwirtschaft beschränken. In tieferen Lagen sind die Waldflächen vornehmlich an staunasse, stark reliefierte Standorte oder Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität gebunden (LUDWIG 2000, FETZER ET AL. 1986). In den Bergregionen steigt der Waldanteil. Große Teile dieser Region entfallen auf reine Nadelwälder (v. a. Fichte), geringere Teile auf Buchen-Fichten-Mischwälder, die mit Tanne beigemischt der potentiellen natürlichen Vegetation entsprechen (ELLENBERG 1996, WALTER & BRECKLE 1994).

### 2.1.2 Physiogeographische Beschreibung des Kranzberger Forsts

Der Versuchsbestand Kranzberger Forst befindet sich nördlich vom „Freisinger Moos“ auf der Gemarkung Thalhausen, die Teil der Gemeinde Kranzberg ist (Koordinaten: O 11° 39' 41'', N 48° 25' 08'', BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT 1995). Thalhausen befindet sich etwa 7 km westlich von Freising (Abb. 2-2A und 2-2B) und ca. 35 km nord-östlich von München.

### Geologie

Der Kranzberger Forst liegt im Oberbayerischen Tertiären Hügelland, das im Süden in die Münchner Schotterebene übergeht (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1978). Den geologischen Untergrund bildet die Obere Süßwassermolasse, ein Tertiär-Sedimentgestein, das kleinräumig wechselnd von einer 70 bis 80 cm dicken Lößauflage überdeckt ist, die z. T. auch mehr als 1 m betragen kann.

### Böden

Der lehmig-tonige Untergrund des Lösses liefert je nach Stauwirkung der Bodenschichten Braunerden mit Tendenzen zur Tonverlagerung (Parabraunerden) und Pseudovergleyung. Bei den Pseudogleyen befindet sich unterhalb von 30 cm Bodentiefe eine wasserstauende Schicht. Die Ausprägung der Hydromorphiemerkmale variiert im Untersuchungsgebiet sehr kleinräumig (SCHAD & HIRSCH 1998). Die Humusformen wechseln unter Fichte von mullartigem Moder bis Moder, unter Buche von Mull bis mullartigem Moder.

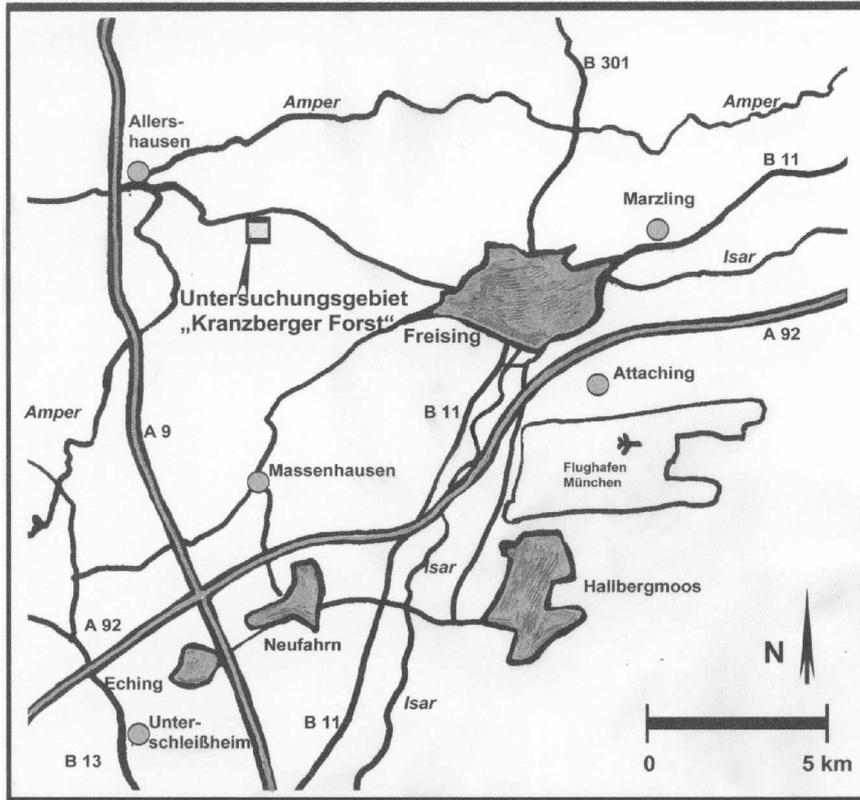


Abb. 2-2A: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes Kranzberger Forst.

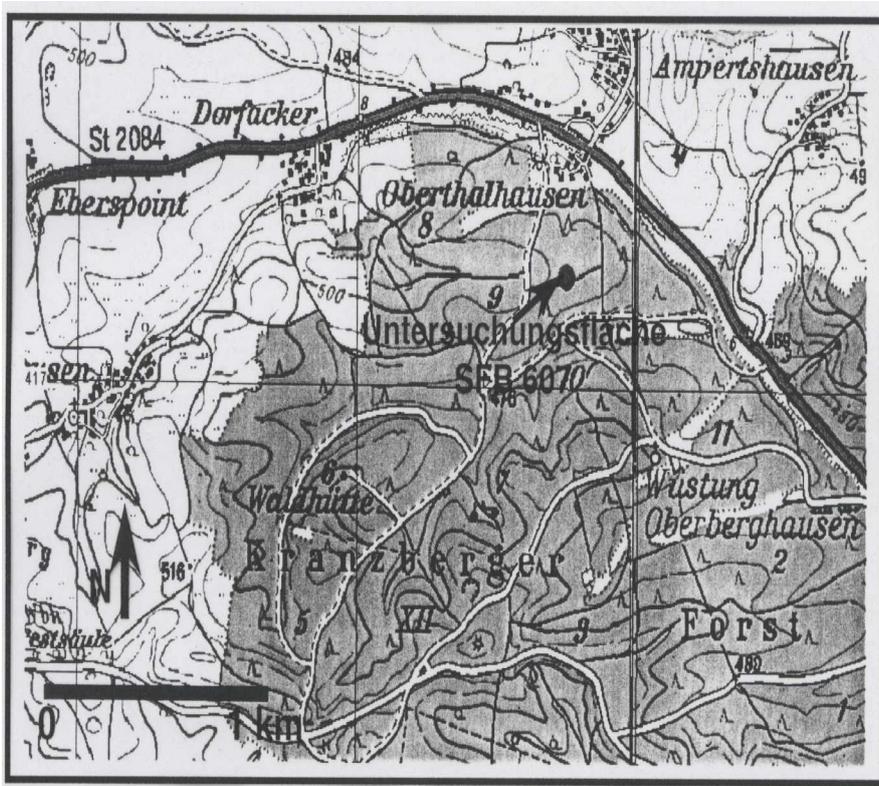


Abbildung 2-2B: Lage der Untersuchungsfläche des SFB 607 in der topographischen Karte.

### Klima

Das Klima des Untersuchungsgebietes Kranzberger Forst ist subatlantisch bis subkontinental geprägt (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT 1997). Die Jahresmitteltemperaturen liegen zwischen 7 und 7,5 °C, die Jahresniederschläge summieren sich auf 730 bis 890 mm. In der Vegetationszeit liegen die entsprechenden Werte bei einem Temperaturmittel von 14,5 bis 15 °C und einer Niederschlagssumme von 410 bis 520 mm (PRETZSCH ET AL. 1998). Die Jahrestemperaturamplitude liegt bei 19 bis 19,5 °C. Die Vegetationsperiode beträgt ca. 150 Tage.

### Landnutzung, Vegetation

Die umliegenden Fluren des Kranzberger Forsts werden landwirtschaftlich genutzt. Die trockeneren Standorte hauptsächlich für den Ackerbau, die vernässten Bereiche als Grünland. Der Hauptanteil des Gebietes wird forstwirtschaftlich genutzt, wobei der Kranzberger Forst aufgrund seines Bodenwasserhaushaltes zeitweise zur Vernässung neigt (RODENKIRCHEN & GÖTTLEIN, pers. Mitteilung). Die Vegetation wird durch forstliche Mischpflanzungen mit Buche und Fichte geprägt, in die partiell andere Baumarten eingemischt sind. Als potentielle natürliche Waldgesellschaft gilt der Waldmeister-(Tannen)-Buchenwald (Galio-odorati-Fagetum) bzw. der Stieleichen-Buchenwald mit Tannenbeimischung (ELLENBERG 1996).

## 2.2 Auswahlkriterien der Standorte

### 2.2.1 Auswahlkriterium Standort Sperrgraben

Für die interdisziplinären Arbeiten des Halbammerprojektes auf der Bestandes- und Prozessebene, zur Erhebung von Validierungsdaten zu Abflussbildung, Hangwasserbewegung und Pflanzenökologie und zur Integration der Messergebnisse wurde eine gemeinsam nutzbare Fläche gesucht, die das Einzugsgebiet der Halbammer in geeigneter Weise repräsentiert. Die Wahl fiel auf das Teil-Einzugsgebiet des Sperrgrabens, innerhalb dessen zwei Messflächen unterschiedlicher Bestandestypen festgelegt wurden. Die in enger Nachbarschaft gelegenen Messflächen gestatten, bei gleichen edaphischen und klimatischen Gegebenheiten, die Entwicklung und den Vergleich von Wasserbilanzen für einen Fichten-Rein- und Buchen-Fichten-Mischbestand im Voralpenraum. Trotz der hochmontanen Lage ist durch ein gut ausgebautes Forstwegenetz eine verhältnismäßig gute Zugänglichkeit in die beiden gleichaltrigen ausgewählten Messflächen und die umliegenden Bestände gegeben.

### 2.2.2 Auswahlkriterium Standort Kranzberger Forst

Der dem Sperrgraben edaphisch ähnliche Bestand des Kranzberger Forsts bei Freising wurde aufgrund seiner guten Infrastruktur ausgewählt, die Gaswechsellmessungen zur Beantwortung ökophysiologischer Teilfragen dieser Arbeit ermöglichten. Die ausgewählte Messfläche verfügt über ein ca. 30 m hohes System aus Gerüsten, das aus 4 Türmen besteht, die teilweise in verschiedenen Höhen mit Laufstegen verbunden sind. Aufgrund dieser Konstruktion ist der Kronenraum von Buchen und Fichten in 17,5 m, 19,5 m, 21,5 m, und 23,5 m Höhe zugänglich. Es handelt sich um eine Messfläche im Rahmen des SFB 607 (PRETZSCH ET AL. 1998) zur Untersuchung des Konkurrenzverhaltens zwischen adulten Buchen und Fichten. Die Bestandesstruktur ist durch geringe Beimischungen u. a. von *Acer pseudoplatanus* und *Pinus sylvestris* etwas vielfältiger als am Sperrgraben, wird aber auch hier von *Fagus sylvatica* und *Picea abies* dominiert.

## 2.3 Charakterisierung der Bestände

### 2.3.1 Sperrgraben

#### 2.3.1.1 Messfläche 1: Hochmontaner Fichten-Reinbestand

Dieser ca. 80-jährige (REVIERBUCH, FORSTAMT OBERAMMERGAU) NO-exponierte hochmontane Fichten-Reinbestand liegt ca. 1260 m ü. NN. Die Messfläche hat eine mittlere Hangneigung von ca. 25°. Die projizierte Messfläche beträgt 3066 m<sup>2</sup>, die Baumdicke beträgt 440 Bäume pro ha und die mittlere Baumhöhe 30,9 m (Tab. 2-3). Der geologische Untergrund besteht aus tonig-mergeligem Flysch, auf dem sich ein Pseudogley entwickelt hat, mit Moder als Haupthumusform. Die hohen Niederschläge haben zu einer vollständigen Entkalkung der kalkhaltigen Schichten im Flysch geführt, so dass die Böden als vergleichsweise sauer gelten. Die Bodenanalysen der Arbeitsgruppe HUWE (BODENPHYSIK BAYREUTH, unveröffentlicht) ergaben für den Oberboden (Bodentiefe 0 bis 30 cm) pH-Werte (CaCl<sub>2</sub>) zwischen 3,17 und 3,38, für den Unterboden um die 3,92 (Bodentiefe 60 bis 90 cm). Die Ammonium- und pflanzenverfügbaren Nitratgehalte der Bodenlösung betragen 7,17 kg NH<sub>4</sub>-N ha<sup>-1</sup> und 3,09 kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup>. Das C/N-Verhältnis liegt zwischen 10 und 12 im Oberboden. Der Deckungsgrad des Unterwuchses beträgt weniger als 5 % und besteht aus Moosen, Fichtenkeimlingen und *Oxalis acetosella*: Die Deckungsgradschätzung erfolgte nach der von REICHELT & WILLIAMS (1973) erweiterten Methode von BRAUN-BLANQUET (1928).

### 2.3.1.2 Messfläche 2: Hochmontaner Buchen-Fichten-Mischwald

Der laut Revierbuch des Forstamtes Oberammergau ca. 80-jährige Buchen-Fichten-Mischbestand ist ca. 200 m Luftlinie von der Messfläche 1 entfernt und wird von dieser durch eine kleine Forststrasse getrennt. Die Messfläche 2 ist ebenfalls NO exponiert und liegt etwa auf 1220 m ü. NN. Die mittlere Hangneigung beträgt ca. 55° (Tab. 2-3). Die projizierte Messfläche beträgt 3897 m<sup>2</sup> und die Baumdichte umfasst 559 Bäume pro ha. Die mittlere Baumhöhe liegt für Fichten bei 25,8 m und für Buchen bei 21,5 m. Als Bodenart tritt ein Pseudogley über tonig-mergeligem Flysch auf. Die Humusformen wechseln zwischen mullartigem Moder unter Fichten und Mull unter Buchen. Bodenanalysen (Arbeitsgruppe HUWE, Bodenphysik, Bayreuth, unveröffentlicht) zeigen für den Oberboden (Bodentiefe 0 bis 30 cm) einen mittleren pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>) von ca. 4 und für den Unterboden (Bodentiefe 60 bis 90 cm) von 4,5. Die Ammonium- und pflanzenverfügbaren Nitratgehalte unterscheiden sich kaum von dem benachbarten Fichten-Reinbestand und liegen bei 8,02 kg NH<sub>4</sub>-N ha<sup>-1</sup> und 2,78 kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup>. Das C/N-Verhältnis für den Oberboden beträgt 11 bis 14. Der Deckungsgrad (Methode: BRAUN-BLANQUET 1928, erweitert nach REICHELT & WILLIAMS 1973) des Unterwuchses ist sehr gering (ca. 5 %) und wird u. a. von Moosen sowie *Lysimachia nemorum* und *Homogyne alpina* gestellt.

### 2.3.2 Kranzberg

#### 2.3.2.1 Messfläche 3: Kranzberger Forst

Der Versuchsbestand Kranzberger Forst ist Teil einer Wuchsreihe aus Fichten/Buchen-Mischbeständen im Forstamt Freising und eine Versuchsfläche des SFB 607: „Wachstum und Parasitenabwehr“. Die Messfläche liegt auf 490 m ü. NN und ist bei einer Hangneigung von 1,8° nur schwach nach Norden exponiert (Tabelle 2-3). Die Flächengröße beträgt bei einer Ausdehnung von ca. 50 m x 100 m in der Horizontalprojektion 5308 m<sup>2</sup> (R. GROTE, pers. Mitteilung). Die Buchen wurden horstweise im Vorkauf (7 Jahre vor der Fichte der 2. Generation) in einen inzwischen geernteten Fichtenbestand gemischt. Das Bestandesalter der Fichten der 2. Generation liegt bei 51 und für Buchen bei ca. 58 Jahren (bezogen auf das Jahr 2003). Die Baumdichte beträgt 776 Bäume pro ha, die mittlere Baumhöhe für Fichten 24,5 m und für Buchen 23,2 m. Über dem sandig-tonigen Untergrund des Lösses haben sich Bodentypen wie Pseudogley und Pseudogley-Parabraunerden gebildet. In einer Bodentiefe unterhalb von 30 cm kommt es zu Staunässe (SCHAD & HIRSCH 1998). Die Humusformen wechseln von mullartigem Moder bis Moder unter Fichte, unter Buche von Mull bis mullartigem Moder. Bodenanalysen ergaben für den Oberboden (Bodentiefe 0 bis 30 cm) pH-Werte (CaCl<sub>2</sub>) zwischen 3 und 4. Im Unterboden (Bodentiefe 60 bis 90 cm) steigt dieser Wert auf über 4,0 an (RODENKIRCHEN & GÖTTLEIN, pers. Mitteilung). In der organischen Auflage sinkt der pH-Wert unter 3,0. Laut Messungen der Bayerischen Waldklimastation Freising betragen die Stoffeinträge für das Jahr 1996 mit im Mittel 767 mm Niederschlagssumme für Ammonium 5,4 kg NH<sub>4</sub>-N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> und für Nitrat 4,4 kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (PRETZSCH ET AL. 1998, BAYERISCHE

LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT 1996). Das C/N-Verhältnis für den Oberboden beträgt 10 bis 15. Der Deckungsgrad des Unterwuchses wechselt, ist aber im Bereich der Hauptversuchsfläche, wo die Untersuchungen dieser Arbeit stattfanden, gering (zwischen 5 und 10 %) und besteht u. a. aus Moosen und Jungwuchs von *Picea abies*. Die Schätzung des Deckungsgrades erfolgte nach der von REICHELT & WILLIAMS (1973) erweiterten Methode von BRAUN-BLANQUET (1928).

Tabelle 2-3: Allgemeine Bestandescharakteristika der Messflächen.

	<b>Buchen-Fichten- Mischbestand Sperrgraben</b>	<b>Fichten- Reinbestand Sperrgraben</b>	<b>Buchen-Fichten- Mischbestand Kranzberger Forst</b>
Bestandesalter (Jahre)	ca. 80	ca. 80	Fichte 51 Buche 58
Exposition	Nord-Ost	Nord-Ost	Nord
Hangneigung Grad (°)	55	25	1,8
Geologischer Untergrund	tonig-mergeliger Flysch	tonig-mergeliger Flysch	Löss über Obere Süßwassermolasse
Bodentyp	Pseudogley	Pseudogley	Pseudogley Pseudogley- Parabraunerde
projizierte Messfläche (m <sup>2</sup> )	3897	3066	5308
hangparallele Messfläche (m <sup>2</sup> )	6803	3398	5312
Baumdicke (Bäume ha <sup>-1</sup> )	559.36	440.25	776.18
Mittlere Baumhöhe (m)	Fichte 27.84 Buche 21.45	Fichte 30.89	Fichte 24.48 Buche 23.17

### 2.4 Biometrie der Baum- und Bestandesstruktur

#### 2.4.1 Erfassung allgemeiner Baum- und Bestandesdaten

In den drei untersuchten Beständen wurden verschiedene biometrische Daten an Einzelbäumen erhoben, um die Bestände zu charakterisieren und um die Ergebnisse der physiologischen Messungen von der Baum- auf die Bestandesebene skalieren zu können. Eine dieser Messungen ist die Bestimmung des **Brusthöhendurchmessers (= BHD)**. Die Messung des **BHD** erfolgte in 1,3 m Stammhöhe als Mittelwert aus einer zweimaligen um 180° versetzten Klappung. Später wurden die Brusthöhendurchmesser in **Brusthöhenumfänge (= BHU)** umgerechnet. Zur repräsentativen Erfassung der Brustdurchmesser-Verteilung der Bäume im jeweiligen Bestand wurde in Abhängigkeit von seiner Homogenität und der Größe der Untersuchungsfläche die Stichprobenzahl festgelegt (W. FALTIN, pers. Mitteilung). Am Sperrgraben wurden im Fichten-Reinbestand 135, im Buchen-Fichten-Mischbestand 218 (Datenerhebung: W. FALTIN, Lehrstuhl für Pflanzenökologie, Universität Bayreuth) und im Buchen-Fichten-Mischbestand im Kranzberger Forst 412 Bäume vermessen (Datenerhebung: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München). Zur Berechnung der **Baumdicke** wurde die Anzahl der Bäume auf die projizierte Untersuchungsfläche bezogen (Tab. 2-3).

Die **mittlere Baumhöhe** (Tab. 2-3) wurde in allen Beständen korrelativ aus BHD und Baumhöhen von Baumerntedaten der Untersuchungsflächen sowie bekannten Literaturdaten (BURGER 1947, 1950) bestimmt. Zur Berechnung der **projizierten Kronenflächen** der Xylemflussmessbäume wurde mit einem Peilkompass von der Nordrichtung ausgehend die Astenden entsprechend der Himmelsrichtungen in fortlaufenden 45° Winkeln, abgelotet (ergibt 8 Messrichtungen). Die Ablotung der Astenden wurde mit Peilstäben markiert und der Abstand zum Stamm sowie zum benachbarten Peilstab mit einem Maßband vermessen. Die projizierte Kronenfläche konnte so aus der Grundfläche der vermessenen Teildreiecke als unregelmäßiges Achteck berechnet werden.

Genauere Kenntnisse zur **Kronenstruktur, Nadel- und Laubbiomasse der Bäume** konnten mit Hilfe von **Baumernten** gewonnen werden (s. Kap. 2.4.2).

## 2.4.2 Beschreibung des Ernteverfahrens

Die Baumernten wurden von drei Arbeitsgruppen zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt (Tab. 2-4).

Tabelle 2-4: Übersicht über die Baumernten **am Sperrgraben und im Kranzberger Forst**.

	<b>Sperrgraben</b>	<b>Sperrgraben</b>	<b>Kranzberger Forst</b>	<b>Kranzberger Forst</b>
Arbeitsgruppe	Lehrstuhl für Pflanzenökologie, Univ. Bayreuth	Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, TU München	Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, TU München	Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München
Bezeichnung	Erntedaten „Faltin“	Erntedaten „Patzner“	Teil-Ernte „Patzner“	Erntedaten „Grote“
Erntezeitpunkte	Juli 1998	Juli 2001	Juli 2002	(jeweils Juni-Juli) 1999 2000
Baumart	Fichte	Buche	Fichte	Fichte Buche
Anzahl der geernteten Bäume	8	4	1	6 je Baumart

Alle Erntebäume sowohl am Sperrgraben als auch im Kranzberger Forst wurden nicht direkt auf den Untersuchungsflächen, sondern in angrenzenden Bereichen entnommen. Die Auswahl der Erntebäume erfolgte unter Berücksichtigung der BHD-Verteilung in den Beständen. Die Erntebäume sollten ohne direkten Eingriff auf den Untersuchungsflächen deren vorhandene Baumklassen repräsentieren (KRAFT 1984).

Vor dem Fällen wurden die Himmelsrichtungen am Schaft des zu erntenden Baumes gekennzeichnet und die projizierte Kronenfläche vermessen. Im Kranzberger Forst wurde zusätzlich die Position und die Dimension der nächsten Nachbarn aufgenommen (GROTE 2002). Die weitere Ernte erfolgte in allen Fällen am liegenden Baum, methodisch vergleichbar mit der Arbeit von Freiherr v. DROSTE ZU HÜLSHOFF (1969).

## Material und Methoden

---

Der gefällte Baum wurde in seiner Länge vermessen und die Hauptachse festgelegt. Von der Hauptachse ausgehend wurde jeder nachfolgende Ast aufsteigend nummeriert und seine Astansatzhöhe bestimmt. Gleichzeitig erfolgte eine Vermessung des Durchmessers an der Astbasis, des Astwinkel und der Himmelsrichtung am Stamm. Danach wurde der Ast vom Stamm getrennt, die Gesamtlänge und deren belaubte Teillänge, die vertikale und horizontale Ausdehnung des Astes sowie der Durchmesser am Beginn des belaubten Abschnitts notiert. Alle Durchmessermessungen erfolgten ohne Korrektur der Rinde durch zweimalige um 180° versetzte gemittelte Messung mit einem digitalen Messschieber (Digital-Messschieber 16 ES, Mahr GmbH Esslingen). Bei der Buchenernte am Sperrgraben wurden von allen Ästen eine dünne ca. 1 bis 2 cm breite Holzprobe der Astbasis entnommen und die noch im frischen Zustand erkennbare Grenze zwischen Splint- und Reifholz markiert. Vergleichbar wurde mit Stammscheiben in Brusthöhe verfahren.

Nach Aufnahme der Basisdaten des Baumes wurde eine Anzahl von Probeästen zur Biomassenbestimmung ausgesucht. Im Kranzberger Forst wurde pro Fichte ein Ast von jedem zweiten Astquirl und pro Buche jeder zweite bis vierte Ast entlang der Hauptachse ausgewählt (GROTE 2002). Die Biomassenbestimmung für Fichte (FALTIN, unveröffentlicht) am Sperrgraben erfolgte ähnlich, hier wurden 20 % der Äste untersucht. Bei Bestimmung der Buchenbiomasse am Sperrgraben beschränkte man sich auf die reine Laubmasse der Probeäste ohne Holz- und Feinreisig-Anteil. Die Anzahl der ausgewählten Probeäste lag bei der Blatternte zwischen 40 bis 50 % der Gesamtastzahl und wurde für den kleinsten Baum auf eine Blattvollernte ausgedehnt. Das Laub aller vermessenen Buchenäste wurde visuell nach morphologischen Typen in Sonnen- und Schattenlaub sowie einen intermediären Übergangstyp unterteilt und ihr jeweiliger Anteil prozentual geschätzt.

In den Arbeitsgruppen Grote und Faltin wurde das Astholz im Gelände gewogen und kleinere Anteile ins Labor mitgenommen, wo sie 7 Tage bei 65 °C trockneten und anschließend erneut gewogen wurden. Der Gesamtanteil an Feinreisig mit Nadeln bzw. Blättern wurde in den beiden Arbeitsgruppen zur weiteren Verarbeitung ins Labor mitgenommen und dort, bei Fichte unter Vortrocknung, voneinander getrennt.

In der Arbeitsgruppe Patzner wurden schon im Gelände das Feinreisig und die Blätter der gefällten Buchen voneinander getrennt und nur die Blattproben in Papiertüten, morphologisch unterteilt nach Sonnen-, Intermediär- und Schattenlaub, zur Trockengewichtsbestimmung ins Labor gebracht.

In allen Fällen wurden anschließend die Proben bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und auf einer Laborwaage (Sartorius Typ. 1413) mit einer Auflösung von 0,01 g gewogen. In der Regel dauerte bei 65 bis 70 °C der Trockenvorgang im Trockenschrank 72 Stunden.

Im Sommer 2002 ergab sich im Kranzberger Forst die Möglichkeit eine innerhalb der Messfläche stehende Fichte mit Hilfe einer Kran-Gondel anzufahren und teilweise zu beernten. Entlang eines Höhenprofils wurde pro Quirl an einem Ast, ähnlich wie am

liegenden Baum, die Basisdaten erhoben (siehe oben). Zur Abschätzung des Anteils an Sonnen-, Intermediär- und Schattenbelaubung wurde hier ähnlich wie bei den Buchen am Sperrgraben eine prozentuale Schätzung anhand der morphologischen Merkmale vorgenommen. Anschließend wurden 20 % der vermessenen Äste geerntet, nach Laubart getrennt eingetütet und, wie oben beschrieben, aufgearbeitet.

### **2.4.3 Hochrechnung der Laubbiomasse vom Probeast zum Erntebaum**

ECKMÜLLER (1987) und GROTE (2002, unveröffentlicht) fanden hohe Korrelationen zwischen den Astbasisdurchmessern und der Laubbiomasse der Äste bei Fichte und bei Buche. Ähnlich enge Beziehungen wurden bei den Probeästen der Erntebäume im Kranzberger Forst und am Sperrgraben gefunden. Anhand aller im Gelände erhobenen Astbasisdurchmesser eines jeden Erntebaumes konnte eine Hochrechnung der Laubbiomasse für jeden einzelnen Ast erfolgen. Durch Aufsummieren der beprobten und errechneten Laubbiomassen aller Äste eines Baumes wurde dessen Gesamtblaubung bestimmt. Die Beziehung zwischen den BHD und der ermittelten Laubbiomasse eines Erntebaumes (vgl. OREN ET AL. 1986) diente als Grundlage zur Hochrechnung der Laubbiomasse eines Bestandes über seine bekannte BHD-Verteilung (s. Kap. 2.4.1).

### **2.4.4 Hochrechnung der Anteile von Sonnen- und Schattenkrone an der Gesamt-Laubbiomasse eines Einzelbaums**

Die prozentuale Einschätzung der Anteile an Sonnen-, Intermediär- und Schattenlaub aller Äste eines Erntebaumes im Gelände und die getrennte Trockengewichtsbestimmung dieser drei Laubarten bei den geernteten Ästen im Labor ermöglichten ihre Biomassenanteile auf den Gesamtbaum hochzurechnen. Anhand dieser Hochrechnung und der im Kapitel 2.4.5 beschriebenen Lauboberflächenbestimmung konnten bei den Erntebäumen die Oberflächen von Sonnen- und Schattenkrone bestimmt werden.

### **2.4.5 Berechnung der Laub- bzw. Nadeloberfläche der Erntebäume und Abschätzung des Bestandes- LAI (leaf area index)**

Sowohl bei den Fichten als auch bei den Buchen wurden bei der Baumernte zur Blatt- bzw. Nadeloberflächenbestimmung Laubproben entnommen und im Frischzustand auf einem Flachbettscanner (Microtek ScanMaker E<sub>6</sub>) im Labor eingescannt. Bei den Fichten und Buchen im Kranzberger Forst sowie den Fichten am Sperrgraben wurden von jedem Probeast proximale und distale Blatt- bzw. Nadelproben der einzelnen Jahrgänge eines Astes entnommen. Die Größenordnung der gescannten Blattproben betrug im Kranzberger Forst 50 Stück, die der Nadelproben beider Messstandorte 50 bis 100 Stück. Im Falle der Frischprobennahme der Buchen am Sperrgraben wurden

die drei Belaubungstypen (Sonne, Intermediär und Schatten) berücksichtigt und je 40 Blätter aus diesen Bereichen des Probeastes entnommen und gescannt.

Alle gescannten Proben wurden bei 65 °C im Trockenschrank 72 Stunden getrocknet und anschließend zur Abkühlung in Exsikkatoren gelegt. Später erfolgte die Wägung der Proben auf einer Laborwaage (Sartorius Typ. 1773) mit einer Auflösung von  $10^{-4}$  g.

Mit Hilfe des Computerprogramms Delta-T SCAN (Version V2.03 03 03/11/95 von G. Kirchhof und C.W. Pender, Programmfehler +/- 3 %) wurden die eingescannten Proben ausgewertet und die projizierten Oberflächen bestimmt. Durch Division der projizierten Oberflächen durch das Trockengewicht wurde die „spezifische Blattfläche“ (=SLA, **s**pecific **l**eaf **a**rea) errechnet.

Durch Multiplikation mit den Faktoren 3,25 für Sonnennadeln und 2,32 für Schattennadeln (Methode von PERTERER & KÖRNER (1990) kann bei Fichtennadeln die projizierte Nadeloberfläche in die allseitige Oberfläche umgerechnet werden. Diese Umrechnung erfolgte bei Fichte bei allen Gaswechselfmessungen an Sonnen- und Schattenlaub, da die Blätter dieser Baumart äquifazial sind (s. Kap. 2.8.3 und 3.3.4). Buchen besitzen bifaziale Blätter, d. h. die Spaltöffnungen treten nur auf der Blattunterseite auf. Aus diesem Grund bezogen sich alle Gaswechselfmessungen auf die projizierte Blattfläche.

In die Regressionsgleichung (Polynom 2. Grades) der Korrelation zwischen BHD der Erntebäume und deren Lauboberfläche wurden die bekannten BHD-Werte (s. Kap 2.4.1) der Bäume der Bestände eingesetzt und deren Lauboberfläche bestimmt. Die Summe aller Lauboberflächen eines Bestandes bezogen auf die projizierte Bestandesfläche gibt den Blattflächenindex (LAI = **l**eaf **a**rea **i**ndex) an. In der Regel wird der LAI als „projizierter LAI“ (d. h. bei Fichten und Buchen auf die projizierte Blattoberfläche bezogen) angegeben (PEARCY ET AL. 1989).

### 2.4.6 Bestimmung der Splintfläche

Im Stammquerschnitt unterscheidet man zwischen Splint- und Reifholz. Unter Splintholz versteht man laut der *International Association of Wood Anatomists* (aus BOSSHARD 1974b zit. nach LANG 1999) den äußersten Teil des Holzes, der an der Wasserleitung beteiligt ist. In lebenden Parenchymzellen enthält er noch Speicherstoffe wie z. B. Stärke. Im Reifholz sind hingegen die Reservestoffe größtenteils abgebaut worden und die Parenchymzellen abgestorben. In diesem zentralen Holzanteil des Stamms findet kein Wassertransport mehr statt. Demzufolge ist die Splintfläche die wasserleitende Querschnittsfläche eines Baumstammes. Für die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Saftflussmessungen nach Granier ist zur Quantifizierung des Wasserflusses im Baum die Bestimmung der Splintfläche notwendig.

### 2.4.6.1 Splintflächenbestimmung durch Bohrkern

Am Sperrgraben wurden an allen mit Saftflussfühlern ausgestatteten Messbäumen (Anzahl 42) Bohrkern mit Hilfe eines Zuwachsbohrers (Typ: Mora-Coretax, Kern-Ø 5,15 mm, Bohrtiefe 300 mm) entnommen, da die Splintholzanteile von Baum zu Baum trotz gleicher biometrischer Daten stark schwanken (CERMAK pers. Mitteilung, ALSHEIMER 1997).

Im Kranzberger Forst wurden außerhalb der Messfläche in direkt angrenzenden Bereichen jeweils 10 repräsentative Buchen und Fichten verschiedener Durchmesserklassen beprobt, da die eigentlichen Messbäume wegen Zugehörigkeit zu anderen Messgruppen geschont werden mussten.

Im Anschluss an die Bohrung wurden die Bohrlöcher mit einem Holzdübel verschlossen und mit einem fungiziden Wundbalsam (Lac Balsam plus E, CELAFLORE GmbH) abgedeckt, um ein Eindringen von Pathogenen zu verhindern.

Alle Bohrungen fanden in ca. 1,3 m Höhe an zwei Seiten der Bäume statt und führten wenn möglich bis zum Reifholzmittelpunkt. Die gewonnenen Bohrkern wurden sofort nach der Entnahme hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Lichtreflexion bei Durchfeuchtung makroskopisch begutachtet und der Übergang von Splint- zum Reifholz mit einem Stift dauerhaft markiert. Bei Fichten kann kurz nach der Bohrkernentnahme der durch seinen Wassergehalt deutlich dunkler gefärbte Splint gut vom helleren Reifholz unterschieden werden (ALSHEIMER 1997). Bei Buchen jüngeren Alters ohne Rotkernbildung im Reifholzbereich fällt die Lichtreflexion weniger stark aus (bei ca. 1/3 aller Buchen am Sperrgraben und bei allen Buchen im Kranzberger Forst). Die entnommenen und markierten Bohrkern wurden in klare eng anliegende PVC-Schläuche gesteckt, beschriftet und für zwei Tage luftdicht verschlossen bei Raumtemperatur aufbewahrt. In der Regel bildete sich genau über den markierten Splintbereichen ein kondensierter Wasserfilm auf dem PVC-Schlauch, der als Bestätigung der makroskopischen Begutachtung im Gelände gesehen wurde und besonders bei der Bestimmung der Buchensplinte hilfreich war.

Die gefundenen Splinttiefen der beiden Bohrkern eines Baumes wurden gemittelt und die Splintquerschnittsfläche als Kreisringfläche berechnet.

Um die Splintflächen der Messbäume auf der Untersuchungsfläche im Kranzberger Forst abschätzen zu können, wurden für Buche und Fichte getrennt eine Regressionsanalyse zwischen den Umfängen der außerhalb der Untersuchungsfläche beprobten Bäume und ihrer gefundenen Splinttiefe gerechnet. In die so gefundenen Gleichungen wurden die Umfänge der Messbäume eingesetzt und ihre Splinttiefe errechnet.

### 2.4.6.2 Splintflächenbestimmung an Stammscheiben und Astbasisansätzen

Bei der Baumernte am Sperrgraben wurden Stammscheiben in 1,3 m Höhe gewonnen und bei diesen noch im frischen Zustand die Grenze zwischen Splint- und Reifholz markiert. Ähnlich wurde mit den 1 bis 2 cm langen gewonnenen Probestücken der Astbasisansätze verfahren (s. Kap. 2.4.2). Im Labor erfolgte an den Proben eine Vermessung der Splinttiefe an vier um 90° versetzten Stellen. Die gewonnenen Werte wurden gemittelt und der Durchmesser der Stammscheibe bzw. Astprobe bestimmt. Im folgenden konnte die Splintfläche als Kreisring berechnet werden.

## 2.5 Meteorologische Datenerfassung

### 2.5.1 Meteorologische Messungen

Am 02.10.1998 wurde durch die Arbeitsgruppe Bernhofer (Lehrstuhl für Meteorologie, TU Dresden) eine automatische Klimastation im Testgebiet Halbammer-Sperrgraben installiert. Der Standort der Station befand sich auf einer Freifläche am Waldrand in unmittelbarer Nachbarschaft zu dem Buchen-Fichten-Mischbestand und dem Fichten-Reinbestand, an denen die Saftflussmessungen durchgeführt wurden.

Es wurden 10-min-Werte von Globalstrahlung, photosynthetisch aktiver Strahlung (= PAR), Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag sowie Stundenwerte der Schneehöhe (akustischer Schneehöhensensor) gemessen.

Im Kranzberger Forst erfolgten die meteorologischen Messungen im Rahmen des SFB 607 an einem Referenzturm der Untersuchungsfläche durch die Arbeitsgruppe Fabian (Lehrstuhl für Bioklimatologie, TU München). In verschiedenen Höhen des Turmes, im und über dem Bestand, wurden im 10 Sekunden-Intervall Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und –Richtung aufgezeichnet. Dies ermöglichte die mikroklimatischen Veränderungen entlang eines Vertikalprofils in den Baumkronen aufzunehmen. Die auf Plausibilität geprüften Messdaten wurden als 10 min- bzw. 1 h-Mittel in einer Datenbank des SFB abgelegt und allen Arbeitsgruppen zur Verfügung gestellt.

Auf beiden Standorten wurde aus gemessener Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte das Wasserdampf-sättigungsdefizit (D) der Luft basierend auf der Funktion für Sättigungsdampfdruck nach GOFF & GRATCH berechnet (von WILLERT ET AL. 1995).

### 2.5.2 Mikroklimatisches Höhenprofil entlang einer Buche am Sperrgraben

Im September 1998 wurde mit Hilfe eines Baumsteigers ein Höhenprofil an Temperatur- und Lichtfühlern entlang einer Buchenkrone auf der Buchen-Fichten-Mischbestandesfläche installiert. Die Buche stand zentral auf der Untersuchungsfläche

und gehörte der Kraft'schen Klasse 1 an. Es wurden insgesamt 8 Lichtfühler des Typus Hamamatsu G1118 (Spektralbereich 300 bis 680 nm) eingebaut. Die Fühler wurden in Bodennähe, auf Brusthöhe (1,3 m), im Bereich der Baumkrone (in 6 m, 8 m, 12 m, 15 m und 17 m Höhe) und über dem Bestand (in 22 m Höhe) waagrecht an Holzlatten befestigt, die an dem Baum festgenagelt wurden. Mit Ausnahme der Höhen bei 8 m und 15 m erfolgte in direkter Nachbarschaft zu den Lichtfühlern die Installation von 6 Temperaturfühlern (Typus: Thermor I, Vertrieb UP GmbH Landshut, Eichung: 20 °C entspricht 1 kOhm), die zum Schutz gegen thermische Einstrahlung mit Stanniolpapier abgedeckt wurden. Zur Datenerfassung wurden sowohl die Licht- als auch die Temperaturfühler an einen Delta-T-Datenlogger (Typ: DL2e, Delta-T-Devices, Burwell, Cambridge, U. K.) angeschlossen. Das Messintervall betrug 10 Sekunden, wobei alle Werte als 10-min-Mittelwerte verdichtet und gespeichert wurden. Die Datenauslese erfolgte in der Regel alle 14 Tage mit Hilfe eines Notebooks.

### 2.5.3 Messung des Bestandesniederschlags und des Interzeptionsverlustes

In dichten Pflanzenbeständen kommt nicht die gesamte auf eine freie Fläche auftreffende Niederschlagsmenge (**Freilandniederschlag**) am Boden an, sondern nur jene Menge, die durch Lücken der Pflanzendecke fällt (**Kronendurchlass**), die nach Benetzung an den Pflanzenoberflächen zeitverzögert von diesen abtropft (**Kronentrauf**) und am Sproß abrinnt (**Stammabfluss**) (LARCHER 2001). Diese Niederschlagsmenge, die den Pflanzen für ihren Wasserhaushalt zur Verfügung steht, wird **Bestandesniederschlag** genannt (LARCHER 2001). Der Teil des Niederschlags, der an Pflanzenoberflächen haften bleibt und von diesen verdunstet, wird als **Interzeptionsverlust** bezeichnet (DVWK, MERKBLATT ZUR WASSERWIRTSCHAFT 211/1986).

#### 2.5.3.1 Kronendurchlass

Für die Messung des Kronendurchlasses wurden im Kranzberger Forst und am Sperrgraben Regenrinnen, die in ein Fass münden, als Niederschlagssammler aufgestellt. Jede Kunststoffrinne bestand aus vier je 2 m langen Einzelstücken, die durch Rinnenverbinder zusammengefügt und mit Silikon abgedichtet wurden. Das Kopfende der Rinne mündete in einem Wasserfass (225 l) mit Deckel als Verdunstungsschutz und mit Ablaufhahn zur Entleerung. Die Aussparung im Deckel für den Ablauf der Rinne von 10 cm Durchmesser war mit einem engmaschigen Netz versehen, um Streu zurückzuhalten. Die Länge jeder einzelnen Rinne betrug 8 m und ihre Breite 12,5 cm, wodurch eine projizierte Auffangfläche von je 1 m<sup>2</sup> entstand. Die Befestigung der Rinne erfolgte durch Rinnenhalter an Pfosten. Bezogen auf die Gesamtlänge der Rinne betrug ihre Längsneigung durchschnittlich etwa 10°. Am Sperrgraben wurden insgesamt 6 Rinnen aufgestellt. Eine Rinne diente als Referenz für den Freilandniederschlag und befand sich auf dem Forstweg, der die beiden Untersuchungsflächen räumlich voneinander trennte. Zwei Rinnen wurden im Fichten-Reinbestand aufgestellt und drei weitere über den Buchen-Fichten-Mischbestand

verteilt. Die Rinnen standen in allen Fällen unterhalb der Baumkronen parallel zum Hang. In einem Intervall von 14 Tagen wurde der Wasserstand mit einem Meterstab abgelesen, das Fass entleert und die Wassermenge über die Fass-Geometrie hochgerechnet.

Im Kranzberger Forst wurden vergleichbar konstruierte Rinnen aufgebaut, jedoch aufgrund der Homogenität des Bestandes die Gesamtanzahl verringert. Auf der Untersuchungsfläche des SFB 607 wurden je eine Rinne im Bereich der Kronentraufe unter Fichten und eine unterhalb von Buchen aufgebaut. Auf einer 500 m entfernt liegenden Lichtung, auf der eine Klimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft aufgebaut ist, wurde eine Referenzrinne zum Sammeln des Freilandniederschlags errichtet. Der Auslesezyklus betrug im Kranzberger Forst durchschnittlich 7 Tage. Der Wasserstand im Fass wurde mit einem Meterstab bestimmt und die Wassermenge über die Fass-Geometrie errechnet.

### 2.5.3.2 Stammabfluss

Bei glattrindigen Baumarten mit aufrecht stehenden Ästen fließt ein beachtlicher Teil des Niederschlags am Stamm, wie an einem Trichter, ab. Laut LARCHER (2001) dringt am Fuß von Buchenstämmen mehr als 1,5 mal so viel Wasser in den Boden als im Freien. Je borkiger die Rinde und je größer der Astwinkel um so eher kann der **Stammabfluss** als Teil des Bestandesniederschlags vernachlässigt werden. Je häufiger Niederschläge von mehr als 10 mm/Tag in einem Gebiet auftreten, desto bedeutsamer wird der Stammabfluss auch an weniger glattrindigen Bäumen (DVWK, MERKBLATT ZUR WASSERWIRTSCHAFT 211/1986).

Für die Konstruktion der Stammabflussrinne wurden am Stamm des Untersuchungsbaumes zwei ca. 1,5 m voneinander entfernte Ketten ringförmig um den Stamm befestigt. Zwischen den beiden Ketten wurde mit Hilfe eines Drahtes ein ca. 6 cm breiter PVC-Schlauch 1 ½ mal um den Stamm gewunden und fixiert. Unterhalb und neben den PVC-Schlauch wurde eine in Folie eingepackte Schaumstoffmanschette mit Expandern angelegt, an deren unteren Ende eine auf den Kopf stehende PE-Flasche eingesetzt wurde, deren Boden abgeschnitten und deren Innenraum mit Papier ausgestopft war. Der zwischen Schaumstoffmanschette und PVC-Schlauch entstandene Hohlraum wurde mit einem handelsüblichen 2 Komponenten-Bauschaum aufgefüllt (Abb. 2-5). Nach 2 h war der Bauschaum ausgehärtet und die Schaumstoffmanschetten und der PVC-Schlauch konnten herausgeschält werden. Das Papier wurde aus der PE-Flasche entfernt und an ihrem Kopfende ein Schlauch mit Hilfe einer Schlauchklemme befestigt, welcher in ein 200 l Wasserfass führte. Zur Glättung und Abdichtung der Stammabflussrinne wurde diese mit Silikon ausgeschmiert.

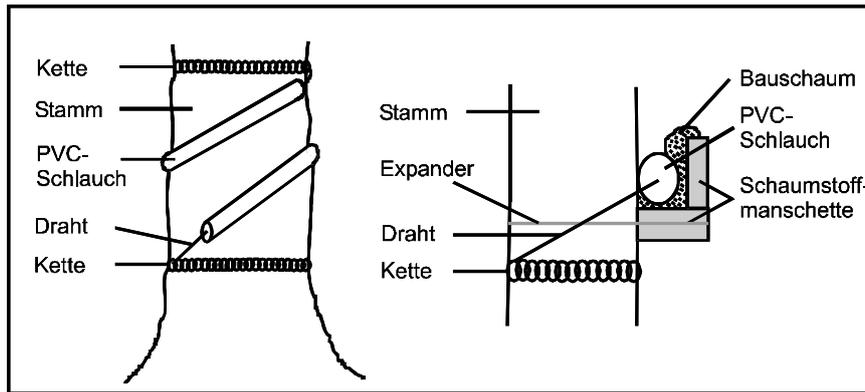


Abb. 2-5: Schema der Installation der Stammabflussrinne.

Im Kranzberger Forst wurden 4 Buchen unterschiedlicher Durchmesserklassen mit Stammabflussrinnen ausgestattet. Einmal wöchentlich erfolgte die Leerung der Fässer, nachdem der Wasserstand mit einem Metermass bestimmt worden war. Mit Hilfe der Fass-Geometrie konnte die kumulative Wassermenge pro Fass berechnet werden.

Am Sperrgraben wurden zwei Buchen unterschiedlicher Durchmesserklassen mit einer Stammabflussrinne ausgestattet, deren Wasserstand in den Fässern in einem 14-tägigen Messzyklus mit Hilfe eines Meterstabs bestimmt wurde. Die Wassermenge in der Fässern wurde wie oben beschrieben errechnet.

Die auf den Stammabfluss entfallende Niederschlagshöhe  $h_{NS}$  kann über das Verhältnis von Grundfläche  $G$  zu Messfläche  $F$  nach folgender Formel abgeschätzt werden (DVWK, MERKBLATT ZUR WASSERWIRTSCHAFT 211/1986):

$$h_{NS} = \frac{V_{NS}}{g} \times \frac{G}{F}$$

Mit:	$h_{NS}$	Niederschlagshöhe des Stammabflusses	in mm
	$V_{NS}$	Stammabflussmenge des Messbaumes	in $dm^3$
	$g$	Grundfläche (= Stammquerschnittsfläche in Brusthöhe) des Messbaumes	in $m^2$
	$G$	Grundfläche (= Stammquerschnittsfläche in Brusthöhe) aller Bäume auf der Messfläche	in $m^2$
	$F$	Messfläche	in $m^2$

### 2.6 Xylemflussmessungen

#### 2.6.1 Theorie

Der Wassertransport in der Pflanze verläuft über weite Strecken entgegen der Schwerkraft und wird durch die saugende Wirkung der Transpiration verursacht (Kohäsionstheorie). Die Transpiration ist eine Folge des zwischen dem feuchten Boden und der trockenen Luft bestehenden Dampfdruckdefizits, in das die Pflanze ohne eigenen Energieverbrauch eingeschaltet ist (SPAC = soil-plant-atmosphere continuum nach KRAMER & BOYER (1995)). Dieses Potentialgefälle wird von der Sonne immer wieder hergestellt. Infolge der ständigen Wasserabgabe der Pflanze an die Atmosphäre, sei es durch die cuticuläre oder die stomatäre Transpiration, weisen die Zellen des Blattgewebes ein Wasserdefizit auf, das sie entweder auf osmotischen Wege von Zelle zu Zelle oder auf dem Wege des kapillaren Wassertransportes in den Zellwänden durch Wasserentnahme aus den Leitbündelendigungen ersetzen (Ferntransport). Nährstoffe in gelöster Form werden über den Transpirationsstrom (Xylemfluss) zu den Blattorganen und den lebenden Zellen transportiert.

Unter den äußeren transpirationsbeeinflussenden Faktoren sind Wind, Strahlung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie Verfügbarkeit von Bodenwasser am wichtigsten (BORRIS & LIBBERT 1985). Die Intensität der Transpiration wird über einen Regelmechanismus der Stomata gesteuert. Bei Trockenheit des Bodens wird der Transpirationsstrom durch Schließen der Stomata eingeschränkt. Bei einem typischen Tagesgang der Transpiration, welcher mit dem Sonnenaufgang beginnt, wird kurz vor Mittag ein Maximum der Transpiration erreicht. Im weiteren Tagesverlauf sinkt die Transpiration ab und strebt in der Nacht gegen Null. Für die gesamte Wasserbilanz mehrerer Tage gilt in der Regel, dass die über die Xylembahnen transportierte Wassermenge gleich der transpirierten Menge an Wasser ist. Nach einer Trockenperiode ist die transportierte Wassermenge größer als die transpirierte, da zuerst der Stammspeicher wieder gefüllt werden muss. Xylemflussmessungen an Bäumen dienen der Quantifizierung des Wasserflusses innerhalb des wasserleitenden Gewebes (Stammxylem) des Baumstammes (ALSHEIMER 1997) und geben auf Tagesbasis die Kronentranspiration des jeweiligen Messbaumes an. Für ökosystemare Studien des Wasserhaushalts ist die Bestimmung der Transpiration eine wichtige Größe.

#### 2.6.2 Sensorsystem

Für die Xylemflussmessungen am Sperrgraben und im Kranzberger Forst wurde die Temperatur-Gleichgewichtsmethode („tissue heat balance“, THB) nach Granier (1985) verwendet.

Ein Standard-Xylemfluss-Sensor nach Granier besteht in der Regel aus zwei baugleichen nadelförmigen Sonden von 20 mm Länge und 2 mm Durchmesser. In unserem Fall wurden die Sensoren leicht modifiziert und nur einer der Sensoren,

gebaut aus einer medizinischen Kanüle (Sterickanüle aus der Apotheke: 0,9 x 40 mm und 0,9 x 70 mm), erhielt eine Wicklung aus Konstantan-Heizdraht (Firma Newport Omega: Typ TFCC-005-100 FT). Der Konstantan-Heizdraht ermöglicht die Erwärmung des Fühlers nach Anschluss an eine Stromversorgung. In beiden Sensoren wurde ein Kupfer-Konstantan-Thermoelement (Firma Newport Omega, Thermodraht: Typ TFCC-003-100 FT, Kupferdraht: Ø 0,1 mm) integriert, mit dessen Hilfe die jeweilige Sonden-Temperatur gemessen werden konnte. Der Konstantan-Referenzsensor ohne Heizdraht bestand aus einem 20 mm langen Transparenzschlauch (Firma Bürklin, W-S: Typ: KYNAR F 164.500, 91 F 300). Die Konstantan-Drähte beider Sonden wurden miteinander verbunden, was die Bestimmung der Differenztemperatur zwischen beiden Einheiten an den Kupferdrähten ermöglichte. In der Regel wurden die Temperaturdifferenzen als Spannungen in  $\mu\text{V}$  gemessen und aufgezeichnet, wobei  $40 \mu\text{V}$  einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin (K) entspricht.

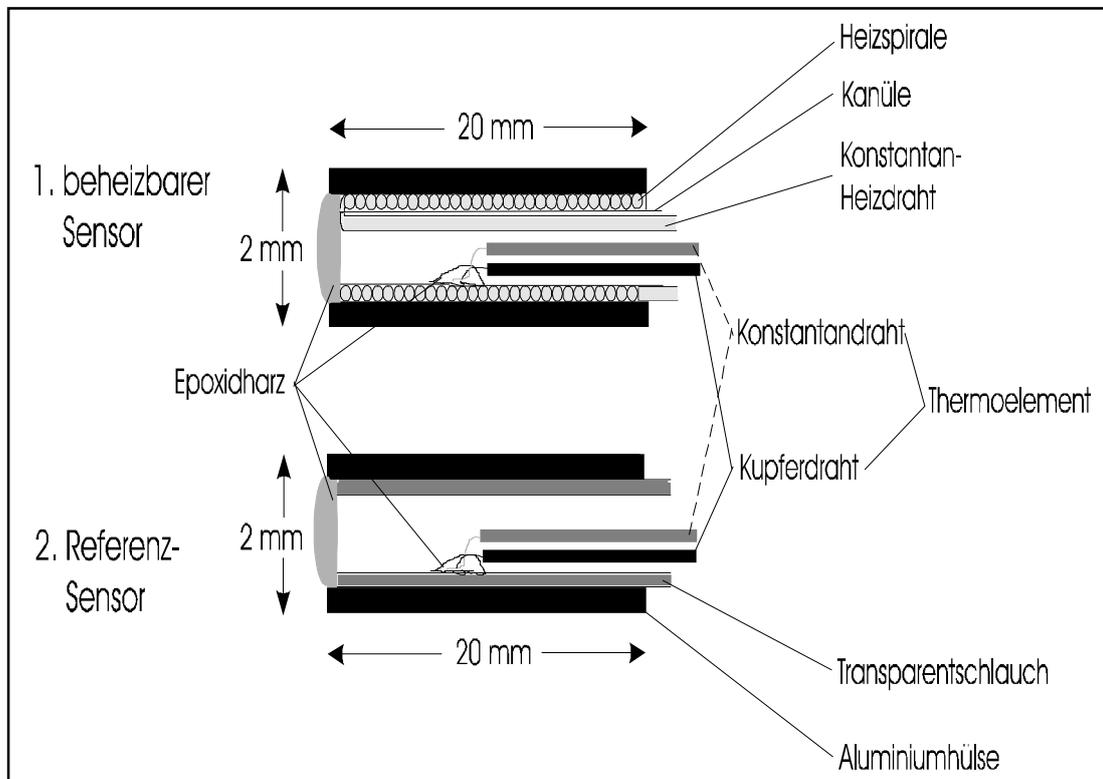


Abb. 2-6: Technischer Aufbau eines Granier-Sensor-Paars.

### 2.6.3 Installation der Sensoren

Die beiden Sensoren wurden in Brusthöhe, in einen vertikalen Abstand von ca. 10 bis 15 cm zueinander, in einem Baumstamm installiert. Für die Installation wurden zwei senkrecht übereinander stehende Löcher von 2 mm Durchmesser gebohrt und mit einem Einführwerkzeug ca. 2,1 cm lange Aluminiumhülsen in die Bohrlöcher geschoben. Die Bohrlochtiefe hing von der Borkendicke ab, da die Aluminiumhülse mit dem Holzkörper abschließen und nicht in das Kambium reichen sollte. Auf diese Weise

wurde verhindert, dass unabhängig vom Xylemfluss Wärme über die Rinde und das Rindenparenchym abgeleitet wurde. Die Sensoren wurden vor dem Einsetzen ca. 2 cm tief in eine silikonfreie Thermoheizpaste (Elektronikfachhandel) getaucht und vorsichtig in die Aluminiumhülle eingeführt. Die Aluminiumhülle hatte eine zweifache Schutzfunktion. Erstens ermöglichte sie eine gute Einführung des Sensors ohne die Thermoheizwicklung zu beschädigen und zweitens konnte eine gleichmäßige Weitergabe der Heizleistung an das Holz gewährleistet werden, da Hohlräume abgedichtet wurden. Die überschüssige Heizpaste, die aus der Aluminiumhülle quoll, wurde entfernt. Grundsätzlich wurde der beheizte Sensor oberhalb des unbeheizten angebracht, damit die Referenztemperatur nicht durch den Transport der Wärme mit dem vertikal verlaufenden Xylemfluss beeinflusst wurde. Um die Sensoren vor thermischen Effekten der Sonneneinstrahlung zu schützen, sollten sie nach Möglichkeit auf der Nordseite eines Baumes eingebaut werden. Im Kranzberger Forst wurden alle Messbäume sowohl auf der Nord- als auch der Südseite mit Sensoren versehen, um die Variabilität des Xylemflusses auf verschiedenen Stammseiten zu untersuchen. Am Sperrgraben konnten die Xylemfluss-Sensoren nur auf der Südseite, der dem Hang zugeneigten Seite installiert werden, da aufgrund der starken Hangneigung auf der Nordseite die Bäume nicht in Brusthöhe erreicht werden konnten. Der Steilhang schloss für die südmontierten Xylemfluss-Sensoren eine starke Sonneneinstrahlung aus, da die Fühler gut beschattet wurden. Um die Möglichkeit einer punktuellen Erwärmung der Sensoren durch die Sonneneinstrahlung zu minimieren, wurden diese auf allen Untersuchungsflächen mit einer ca. 40 cm langen Styrodurabdeckung geschützt, die nach oben mit Silikon versiegelt wurde, um Stammabflusswasser abzuhalten.

### 2.6.4 Stromversorgung und Datenaufzeichnung

Die Konstantan-Drähte des beheizbaren Fühlers wurden mit einer Steuerelektronik verbunden, die die Heizwedel bei einer Betriebsspannung von 12 V mit 120 mA Strom versorgte, wodurch eine konstante Heizleistung von 0,2 W erzielt wurde. Die Steuerelektronik wurde im Kranzberger Forst durch das normale Stromnetz gespeist. Am Sperrgraben wurde sie hingegen über Solarakkus bzw. LKW-Batterien versorgt. Um einen Dauerbetrieb der Batterien am Sperrgraben zu ermöglichen und eine Tiefentladung zu verhindern, wurde ein Tiefentladungsschutz eingebaut und die Akkus und Batterien durch Solarpaneele gespeist.

Zwei weitere Kabel des Xylemfluss-Sensors führten zu einem Datenlogger (Typ: DL2e, Delta-T-Devices, Burwell, Cambridge, U. K.), auf dem die Temperaturdifferenz zwischen dem geheizten und unbeheizten Fühler in Form von Spannungssignalen aufgezeichnet wurde. Die Temperaturdifferenz zwischen den Sensoren konnte Maximalwerte von 10 bis 13 K annehmen, was den durch den Datenlogger aufgezeichneten Werten von 400 bis 520  $\mu\text{V}$  entsprach (zit. nach ALSHEIMER 1997). Die Umrechnung der Spannungssignale in Temperaturwerte sowie die weitere Datenverarbeitung erfolgte im Labor durch ein Tabellenkalkulationsprogramm (EXCEL 2000, Microsoft Corporation).

Das Messintervall betrug auf den Untersuchungsflächen 10 Sekunden, aus denen alle 10 Minuten ein Mittelwert gebildet und aufgezeichnet wurde. Die Übertragung der Daten auf Disketten erfolgte im Kranzberger Forst einmal wöchentlich mit Hilfe eines vor Ort stehenden Personal-Computers und am Sperrgraben mit einem Notebook in einem 14-tägigen Rhythmus.

### 2.6.5 Xylemflussberechnung

Als Berechnungsgrundlage für den Xylemfluss (= Safffluss) dient die Änderung der Temperaturdifferenz zwischen dem beheizten und dem unbeheizten (Referenz-) Sensor. Das tagsüber durch den Stamm nach oben fließende Xylemwasser kühlt den oberen Sensor ab und verringert damit die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Sensoren. Wenn kein Transpirationsstrom auftritt wird die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Sensoren maximal.

Das allgemeine Prinzip der Methode beruht darauf, dass die in den Stamm applizierte Wärme über den Massenfluss des Xylemsaftes (**Konvektion**) schneller transportiert wird als durch Wärmeleitung im Gewebe (**Konduktion**) (KÖSTNER 1999), somit ist der Grad der Abkühlung des beheizten Sensors proportional zur Flussrate des Safflusses (ALSHEIMER 1997).

Die Formel zur Berechnung des Xylemflusses wurde von Granier (1985) empirisch über Durchflusseexperimente mit Stammsegmenten verschiedener Baumarten (*Pseudotsuga menziesii*, *Pinus nigra*, *Quercus robur*, *Castanea sativa* und *Prunus domestica*) und an einem Modellstamm, der aus Sägemehl und Nylonfasern gebaut worden war, ermittelt. Für alle untersuchten Baumarten wurde die gleiche Beziehung zwischen gravimetrisch bestimmter Flussdichte (Fluss pro Splintflächeneinheit und Zeitintervall) und Flussindex (K) gefunden.

Hierbei wird der Saffflussindex (K) wie folgt beschrieben:

$$(1) \quad K = \frac{T_{\Delta M} - T_{\Delta a}}{T_{\Delta a}}$$

$T_{\Delta M}$  = Temperaturdifferenz bei Xylemfluss = 0

$T_{\Delta a}$  = aktuelle Temperaturdifferenz

Folgende Gleichung beschreibt die von Granier empirisch gefundene Beziehung zwischen Xylemflussdichte  $u$  und Saffflussindex  $K$ :

$$(2) \quad u = 0,714 \times K^{1,231} \quad [\text{ml cm}^{-2} \text{ min}^{-1}]$$

Für die Berechnung des gesamten Saftflusses ( $F$ ) eines Baumes wird die in Gleichung (2) berechnete Xylemflussdichte  $u$  mit der durch die Bohrkerne (Kapitel 2.4.6.1) bestimmten Splintfläche  $SF$  ( $\text{cm}^2$ ) multipliziert:

$$(3) \quad F = u \times SF \quad [\text{ml min}^{-1}]$$

Wie schon im Kapitel 2.6.4 beschrieben, wurden die auf den Datenloggern aufgezeichneten Spannungssignale im Labor in Temperaturwerte in Kelvin umgerechnet. Die weiteren Berechnungen (Gleichung 1-3) erfolgten mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL 2000 (Microsoft Corporation).

Um die tägliche große Varianz von  $T_{\Delta M}$  zu minimieren und eine Quantifizierung der Methode vorzunehmen, wird von einigen Autoren empfohlen (KÖSTNER 1999),  $T_{\Delta M}$  bei Regen oder Taufall zu bestimmen. In unserem Fall wurde der wöchentlich niedrigste  $T_{\Delta M}$  -Wert für die Berechnung der Gleichung (1) zugrunde gelegt, um zwar einerseits nächtliche Transpirationen wie sie bei warmen Witterungen vorkommen zuzulassen, andererseits aber diese nicht zu überschätzen. Die Saftflüsse wurden als Stundenmittelwerte und Tagessummen berechnet.

### 2.6.6 Messungen der Variabilität der Xylemflussdichte auf unterschiedlichen Stammseiten

Das Sensorsystem von Granier bietet nur die Möglichkeit einer punktuellen Messung des Xylemflusses im Stamm und wird in der Regel auf einer Stammseite des Baumes installiert. Innerhalb eines Baumes kann die Flussdichte zusätzlich zur thermischen Einstrahlung aufgrund baumanatomischer Begebenheiten auf den verschiedenen Stammseiten stark schwanken. Zur genaueren Untersuchung dieser Variabilität im Stamm wurden im Kranzberger Forst Granier-Sensoren auf zwei Stammseiten installiert. Somit standen sich in Brusthöhe zwei Sensorpaare gegenüber (Nord- und Südseite), deren Signaldifferenzen bei der Berechnung des Saftflusses eines Baumes gemittelt wurden.

Am Sperrgraben war eine erweiterte Ausstattung der Bäume mit einem zweiten Sensorpaar nicht möglich, da aufgrund der starken Hangneigung die Nordseite der Bäume in Brusthöhe nicht erreicht werden konnte (vgl. Kap. 2.6.3).

### 2.6.7 Bestimmung der Variabilität der Flussdichte über den Stammquerschnitt

Neben der Kenntnis der Flussvariabilität auf zwei Stammseiten eines Baumes war die Änderung der Xylemflussdichte mit zunehmender Splintholztiefe von Interesse. Zu diesem Zweck wurden langstielige Granier-Sensoren (medizinische Kanülenlänge 40 und 60 mm) gebaut, deren Thermowicklung in Splinttiefen von 20 bis 40 mm und 40 bis 60 mm reichten. Die „längeren“ Granier-Sensoren wurden in ca. 10 bis 15 cm horizontaler Entfernung zum Standardsensor eines Baumes eingesetzt, wodurch eine

gegenseitige thermische Beeinflussung ausgeschlossen werden konnte. Die Installation der langstieligen Sensoren war mit dem Einbau des Standard-Sensors vergleichbar (Kap. 2.6.3), gleiches galt für die Datenauflösung und Bearbeitung (Kap. 2.6.4).

Im Kranzberger Forst wurden zusätzlich zum Standard-Sensor zwei Buchen und zwei Fichten mit jeweils einem 40 mm und einem 60 mm langen Sensor ausgestattet.

Am Sperrgraben war die Anzahl der so ausgestatteten Probestämme höher. Insgesamt wurden 5 Buchen und 4 Fichten im Buchen-Fichten-Misch- bzw. im Fichten-Reinbestand mit tiefer reichenden Granier-Sensoren bestückt.

Die Stichproben des Radialprofils wurden nach Messtiefe und Baumart getrennt gemittelt. Anschließend wurde ein Quotient ( $Q$ ) aus dem Mittelwert der Xylemflussdichte des Standardsensors ( $\bar{X}_{u1}$ ) zum jeweiligen Mittelwert der Xylemflussdichte des nächsttieferen Sensor (z. B.  $\bar{X}_{u2}$  = Sensor 20 bis 40 mm) gebildet:

$$Q_1 = \frac{\bar{X}_{u1}}{\bar{X}_{u2}}$$

$$Q_2 = \frac{\bar{X}_{u2}}{\bar{X}_{u3}}$$

$Q_1$  = Quotient 1

$Q_2$  = Quotient 2

$\bar{X}_{u1}$  = Xylemflussdichte des Standardsensors [ $\text{ml cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ]  
(Messtiefe 0 bis 20 mm)

$\bar{X}_{u2}$  = arithmetisches Mittel der Xylemflussdichte der Granier-Sensoren 2 [ $\text{ml cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ]  
(Messtiefe 20 bis 40 mm)

$\bar{X}_{u3}$  = arithmetisches Mittel der Xylemflussdichten der Granier-Sensoren 3 [ $\text{ml cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ]  
(Messtiefe 40 bis 60 mm)

Die Quotienten ( $Q$ ) bildeten die Berechnungsgrundlage für die Änderung des Xylemflusses über die gesamte Splintquerschnittsfläche der nicht mit einem Radialprofil, sondern nur mit einem Standard-Sensor ausgestatteten Bäume. Hierfür wurde die gesamte Splintquerschnittsfläche des Untersuchungsbaumes in aufeinanderfolgende ringförmige Kreisflächen aufgeteilt, deren Breite jeweils 2 cm betragen. Die ringförmigen Kreisflächen in der Tiefe von 20 bis 40 mm und 40 bis 60 mm wurden durch  $Q_1$  bzw.  $Q_2$  dividiert und mit der in 0 bis 20 mm gemessenen Flussdichte multipliziert. Diese Methode wurde über die gesamte

## Material und Methoden

---

Splintquerschnittsfläche für alle weiteren Quotienten durchgeführt. Ab Splinttiefen von 60 mm lagen keine Flussdichtemessungen mehr vor. Behelfsweise wurde  $Q^3$  für die Tiefe von 60 bis 80 mm aus Addition von  $Q^1$  und  $Q^2$  gebildet. Bei jeder weiteren Splinttiefe (> 80 mm) wurde nur noch der vorherige Quotient mit  $Q^2$  addiert. Da die innersten Splintquerschnittsflächen einen bedeutend geringeren Anteil an der Gesamtsplintfläche ausmachen als vergleichsweise äußere Splintquerschnittsflächen, wirken sich die synthetisch gebildeten Quotienten zur Berechnung der Xylemflussdichte in diesen Splintquerschnittsbereichen nur wenig auf den Gesamt-xylemfluss aus.

$$Q_3 = Q_1 + Q_2$$

$$Q_4 = Q_3 + Q_2$$

$$Q_n = Q_{n-1} + Q_{n-2}$$

Die Summe aller aus den Teilkreisflächen separat bestimmten Xylemflüsse ergab den Gesamt-xylemfluss eines Baumes. Diese Art der Hochrechnung (s. Tab. 2-7) fand nur für den Kranzberger Forst und nicht für den Sperrgraben statt, da dort keine Tendenz in der Abnahme des Xylemflusses mit zunehmender Splinttiefe ausgemacht werden konnte (genauer s. Kap. 3.2.2).

Tabelle 2-7: Übersicht der für den Kranzberger Forst verwendeten Quotienten ( $Q$ ) zur Bestimmung der Änderung des Xylemflusses bei Buche und Fichte mit zunehmender Splinttiefe:

Name	Splinttiefe [mm]	$Q_{\text{Buche}}$	$Q_{\text{Fichte}}$
$Q_1$	20-40	1,16	2,96
$Q_2$	40-60	2,31	4,71
$Q_3$	60-80	3,47	7,67
$Q_4$	80-100	5,78	
$Q_5$	100-120	8,09	
$Q_6$	120-140	10,40	
$Q_7$	140-160	12,71	
$Q_8$	160-180	15,02	

### 2.6.8 Auswahl und Beschreibung der Messbäume auf den Untersuchungsflächen

Die Messbäume für die Xylemflussmessungen sollten die auf den Untersuchungsflächen vorhandenen Baumklassen entsprechend ihres Brusthöhenumfangs (vgl. Kap. 2.4.1), ihrer „sozialen Stellung“ und Häufigkeit im Bestand repräsentieren. Maximal konnten drei Baumklassen in den untersuchten Beständen unterschieden werden, deren Einteilung anhand einer an KRAFT (1884) orientierten Baumklassenskala erfolgte. KRAFT (1884) unterschied mit Hilfe einer fünfteiligen Klassenskala Bestandesbäume anhand ihrer „sozialen Stellung“, die sich auf den Habitus und die Dominanz im Bestandeskronendach stützte. Die eigene dreiteilige Skala berücksichtigte neben der „sozialen Stellung“ den BHU als weiteres Klassifikationsmerkmal (Tab. 2-8).

Tabelle 2-8: Klassifikationsmerkmale der Baumklassen nach KRAFT in ursprünglicher und modifizierter Form .

Klassenskala	Einteilungskriterien nach Kraft (ursprünglich)	Einteilungskriterien nach Kraft (modifiziert)
1	Vorherrschende Bäume mit kräftig entwickelten Kronen.	Dominate Bäume („Übersteher“) mit kräftig entwickelten Kronen. Brusthöhenumfang > 120 cm
2	Herrschende, den Hauptbestand bildende Bäume mit noch gut entwickelten Kronen.	Subdominante Bäume, d.h. den Hauptbestand bildende Bäume mit noch gut entwickelter Krone, teilweise eingeengt stehend. Brusthöhenumfang 60 bis 120 cm
3	Gering mitherrschende Bäume; die Kronen schwächer entwickelt als bei der Klasse 2 und eingeengt.	Unterdrückte Bäume mit verkümmerter, häufig fahnenförmig ausgebildeter noch lebensfähiger Krone. Brusthöhenumfang < 60 cm
4	Beherrschte Bäume, Kronen verkümmert und entweder allseitig zusammengedrückt oder fahnenförmig entwickelt.	
5	Ganz unterständige Bäume, teilweise mit lebensfähiger oder mit absterbender Krone.	

## Material und Methoden

Tabelle 2-9 zeigt die Anzahl der Messbäume je Bestand und modifizierter Kraft-Klasse.

Tabelle 2-9: Einteilung der Messbäume am Sperrgraben und im Kranzberger Forst in die modifizierten Kraft-Klassen 1-3 auf Basis des Brusthöhenumfangs: Klasse 1 = dominant, Klasse 2 = subdominant, Klasse 3 = unterdrückt im Bestandeskronendach entsprechend der Brusthöhenumfänge > 120 cm, 60 bis 120 cm bzw. < 60 cm. Im Frühjahr 2000 mussten einige der Fichten-Messbäume am Sperrgraben infolge Schneebruchs während des vorangegangenen Winters aufgegeben werden.

Baumart	Kraft-Klasse 1 Brusthöhenumfänge: > 120 cm	Kraft-Klasse 2 Brusthöhenumfänge: 60-120 cm	Kraft-Klasse 3 Brusthöhenumfänge: < 60 cm
<b>Sperrgraben: Fichten-Reinbestand</b>			
Fichte	bis Jahr 2000: 7 Bäume später 5	bis Jahr 2000: 5 Bäume später 4	
<b>Sperrgraben: Buchen-Fichten-Mischbestand</b>			
Fichte	bis Jahr 2000: 13 Bäume später: 12	2 Bäume	
Buche	5 Bäume	5 Bäume	5 Bäume
<b>Kranzberger Forst: Buchen-Fichten-Mischbestand</b>			
Fichte	1 Baum	9 Bäume	
Buche	1 Baum	4 Bäume	5 Bäume

Im Jahr 1998 wurden im homogenen Fichten-Reinbestand am Sperrgraben 12 und im variantenreicheren Buchen-Fichten-Mischbestand 15 Fichten ausgewählt. Auf beiden Flächen entfielen die ausgewählten Fichten auf die Kraft-Klassen 1 und 2. Im Buchen-Fichten-Mischbestand erfolgte gleichzeitig die Auswahl von 15 Buchen, die auf drei Kraft-Klassen (1 bis 3) verteilt werden konnten (s. Tab. 2-9). Die Stichprobengröße betrug ursprünglich für die Fichten im Reinbestand  $n = 7$  für die Kraft-Klasse 1 und  $n = 5$  für die Kraft-Klasse 2. Im Frühjahr 2000 verringerte sich durch Schneebruch die Anzahl der untersuchten Fichten von 12 auf 9. Alle Ausfälle waren in der Kraft-Klasse 2 zu beklagen. Bei der Fichte im Buchen-Fichten-Mischbestand entfielen ursprünglich 13 Bäume auf die Kraft-Klasse 1 und 2 Bäume auf die Kraft-Klasse 2. Nach dem Schneebruch im Winter 1999/2000 fiel eine Fichte der Kraft-Klasse 1 aus. Die ausgefallenen Bäume wurden nicht ersetzt, da die freigewordenen Logger-Plätze mit Radialprofilen besetzt wurden und damit die Energie-Versorgungskapazität der

Messflächen erschöpft war. Die Anzahl der untersuchten Buchen blieb auf der Buchen-Fichten-Mischfläche in allen Jahren identisch. Auf jede Kraft-Klasse entfiel eine Stichprobengröße von je 5 Bäumen (s. Tab. 2-9).

Im Kranzberger Forst wurden die 10 Buchen und 10 Fichten als Xylemflussmessbäume ausgewählt, die in unmittelbarer Nähe zum Gerüst standen und schon für andere Fragestellungen des SFB 607 genauer untersucht wurden. In Anpassung an die Kraft-Klassen des Sperrgrabens entfiel bei der Fichte 1 Baum auf die Kraft-Klasse 1 und 9 Bäume auf die Kraft-Klasse 2. Die Stichprobengröße betrug bei den über drei Kraft-Klassen verteilten Buchen 1 Baum für die 1., 4 Bäume für die 2. und 5 Bäume für die 3. Kraft-Klasse (Tab. 2-9).

Den Tabellen 2-10 bis 2-14 können die Charakteristika der ausgewählten Xylemflussmessbäume entnommen werden.

Tabelle 2-10: Größenklasse der Fichte nach Kraft, Brusthöhendurchmesser (= BHD, Brusthöhe entspricht einer Messhöhe am Stamm von 1,3 m), Splintfläche in Brusthöhe (= BH), Baumhöhe, projizierte Kronenfläche der Xylemflussmessbäume im ca. 80-jährigen **Fichten-Reinbestand am Sperrgraben**.

<u>Fichte</u> Messbaum	Kraft- Klasse	BHD (cm)	Splintfläche in BH (cm <sup>2</sup> )	Anteil Splintfläche zur Gesamtquer- schnittsfläche in BH (%)	Baumhöhe (m) korreliert	Projizierte Kronenfläche (m <sup>2</sup> )
201	1	48	539	29	35,60	34,82
202	2	37	821	77	29,90	29,20
203	1	51	645	32	36,36	28,56
204	2	36	357	35	29,34	10,79
205	1	49	1175	62	35,60	28,99
206	1	44	612	40	33,47	23,42
207	2	36	875	84	29,34	26,22
208	1	49	846	44	35,60	43,29
209	1	38	538	47	30,45	18,82
210	1	56	1211	50	38,02	37,94
211	2	25	214	45	22,24	19,38
212	2	24	331	72	21,52	19,13

## Material und Methoden

Tabelle 2-11: Größenklasse der Fichte nach Kraft, Brusthöhendurchmesser (= BHD, Brusthöhe entspricht einer Messhöhe am Stamm von 1,3 m), Splintfläche in Brusthöhe (= BH), Baumhöhe, projizierte Kronenfläche der Xylemflussmessbäume im ca. 80-jährigen **Buchen-Fichten-Mischbestand am Sperrgraben.**

<b>Fichte</b> Messbaum	Kraft- Klasse	BHD (cm)	Splintfläche in BH (cm <sup>2</sup> )	Anteil Splintfläche zur Gesamtquer- schnittsfläche in BH (%)	Baumhöhe (m) korreliert	Projizierte Kronenfläche (m <sup>2</sup> )
1	2	36	676	68	29,34	30,23
2	1	50	1198	61	35,99	37,13
3	1	54	713	32	37,40	41,20
4	1	47	901	52	34,79	53,31
5	1	58	744	28	38,59	45,79
6	1	54	874	38	37,40	38,88
7	1	40	226	18	31,51	24,94
8	2	21	150	43	19,25	10,82
9	1	57	1047	41	38,32	48,69
10	1	67	2072	59	40,48	55,54
11	1	46	635	38	34,36	26,65
12	1	50	881	46	35,99	49,04
13	1	46	762	46	34,36	71,01
14	1	55	1288	53	37,72	43,81
15	1	55	904	38	37,72	62,04

Tabelle 2-12: Größenklasse der Buche nach Kraft, Brusthöhendurchmesser (= BHD, Brusthöhe entspricht einer Messhöhe am Stamm von 1,3 m), Splintfläche in Brusthöhe (= BH), Baumhöhe, projizierte Kronenfläche der Xylemflussmessbäume im ca. 80-jährigen **Buchen-Fichten-Mischbestand am Sperrgraben.**

<b>Buche</b> Messbaum	Kraft- Klasse	BHD (cm)	Splintfläche in BH (cm <sup>2</sup> )	Anteil Splintfläche zur Gesamtquer- schnittsfläche in BH (%)	Baumhöhe (m) korreliert	Projizierte Kronenfläche (m <sup>2</sup> )
101	3	13	124	97	16,48	17,30
102	2	26	495	90	27,66	39,79
103	2	26	493	94	27,66	32,07
104	1	48	394	21	34,50	106,31
105	1	59	1176	44	32,21	101,27
106	3	17	207	93	20,49	14,32
107	1	61	1256	42	31,39	144,82
108	2	27	530	92	28,30	87,09
109	3	18	243	91	21,41	26,18
110	1	48	1290	72	34,50	129,33
111	1	44	1053	68	34,39	112,54
112	2	20	179	58	23,16	22,23
113	3	18	216	87	21,41	14,95
114	2	23	376	94	25,55	50,11
115	3	13	120	94	16,48	34,60

Tabelle 2-13: Größenklasse der Fichte nach Kraft, Brusthöhendurchmesser (= BHD, Brusthöhe entspricht einer Messhöhe am Stamm von 1,3 m), Splintfläche in Brusthöhe (= BH), Baumhöhe, projizierte Kronenfläche der Xylemflussmessbäume im ca. 60-jährigen **Buchen-Fichten-Mischbestand im Kranzberger Forst.**

<b>Fichte</b> Messbaum	Kraft- Klasse	BHD (cm)	Splintfläche in BH (cm <sup>2</sup> )	Anteil Splintfläche zur Gesamtquer- schnittsfläche in BH (%)	Baumhöhe (m) korreliert	Projizierte Kronenfläche (m <sup>2</sup> )
373	2	17	181	76	20,85	8,76
374	2	33	480	57	26,15	17,88
521	2	27	342	58	24,85	14,58
535	2	39	712	60	27,30	21,95
537	2	39	703	60	27,40	21,82
419	2	28	344	58	24,80	14,64
483	1	42	884	63	27,82	24,27
484	2	35	547	58	26,57	19,23
485	2	24	266	61	23,51	12,21
486	2	25	289	60	23,99	12,99

Tabelle 2-14: Größenklasse der Buche nach Kraft, Brusthöhendurchmesser (BHD, Brusthöhe entspricht einer Messhöhe am Stamm von 1,3 m), Splintfläche in Brusthöhe (= BH), Baumhöhe, projizierte Kronenfläche der Xylemflussmessbäume im ca. 60-jährigen **Buchen-Fichten-Mischbestand im Kranzberger Forst.**

<b>Buche</b> Messbaum	Kraft- Klasse	BHD (cm)	Splintfläche in BH (cm <sup>2</sup> )	Anteil Splintfläche zur Gesamtquer- schnittsfläche in BH (%)	Baumhöhe (m) korreliert	Projizierte Kronenfläche (m <sup>2</sup> )
399	3	18	236	76	23,13	15,33
408	2	26	473	79	24,35	29,32
409	2	29	594	83	24,59	34,90
410	3	14	150	87	21,94	8,66
412	3	17	204	79	22,78	12,92
437	2	19	254	75	23,37	16,61
439	3	15	162	84	22,24	9,63
443	3	22	231	75	23,83	20,99
480	2	33	837	92	24,92	44,20
482	1	37	1111	98	25,19	52,31

Die Lage der Messbäume in den Messflächen zeigen die folgenden schematischen Darstellungen (Abb. 2-15 bis 2-17).

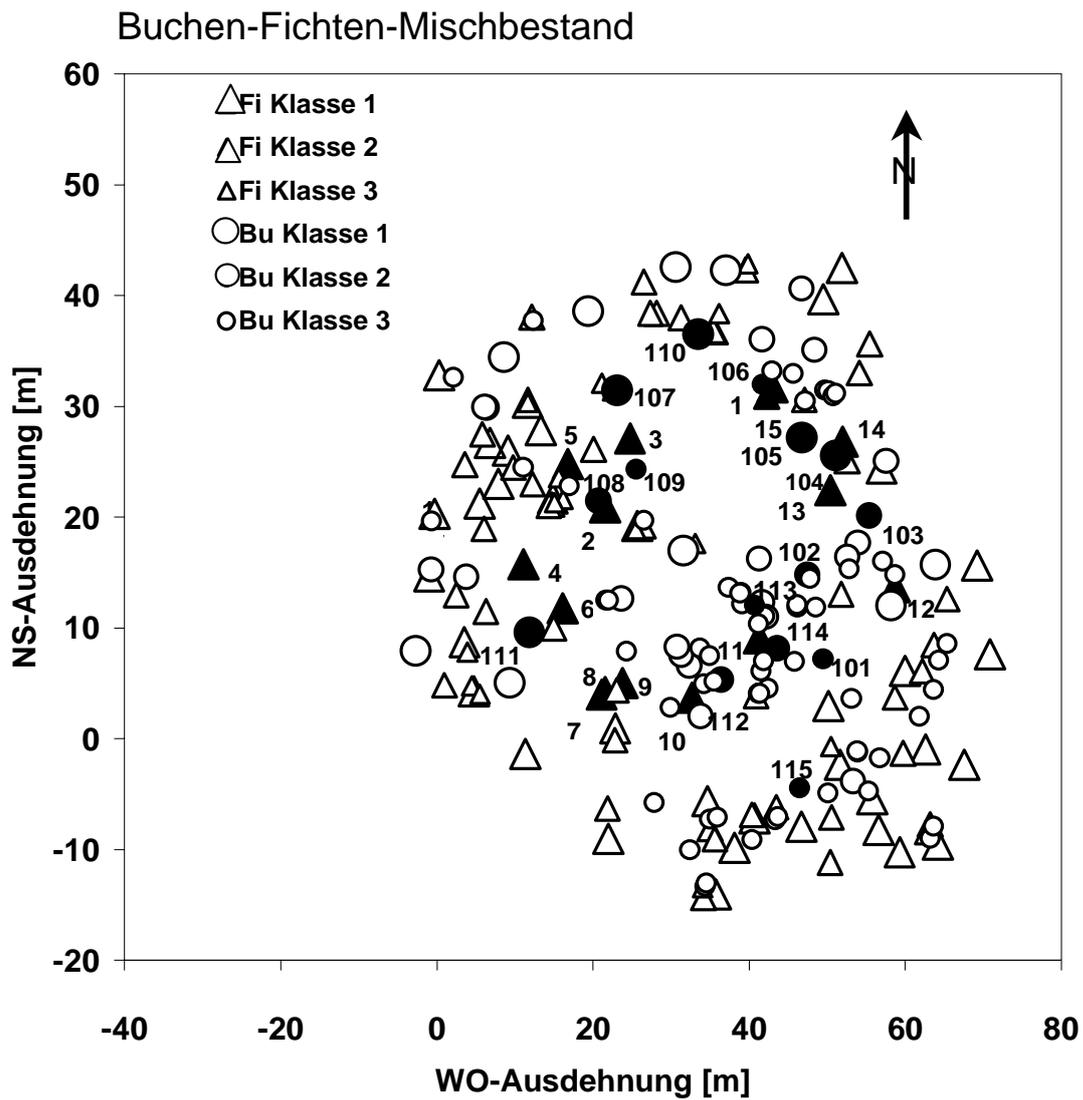


Abb. 2-15: Schematische Darstellung der Messfläche des Buchen-Fichten-Mischbestandes am Sperrgraben. Die Dreiecke zeigen Fichten und die Kreise Buchen an. Die Xylemflussmessbäume sind mit geschlossenen, schwarzen Symbolen und Nummern gekennzeichnet worden. Die Größe der Symbole spiegelt die Baumklassenverteilung nach Kraft wider.

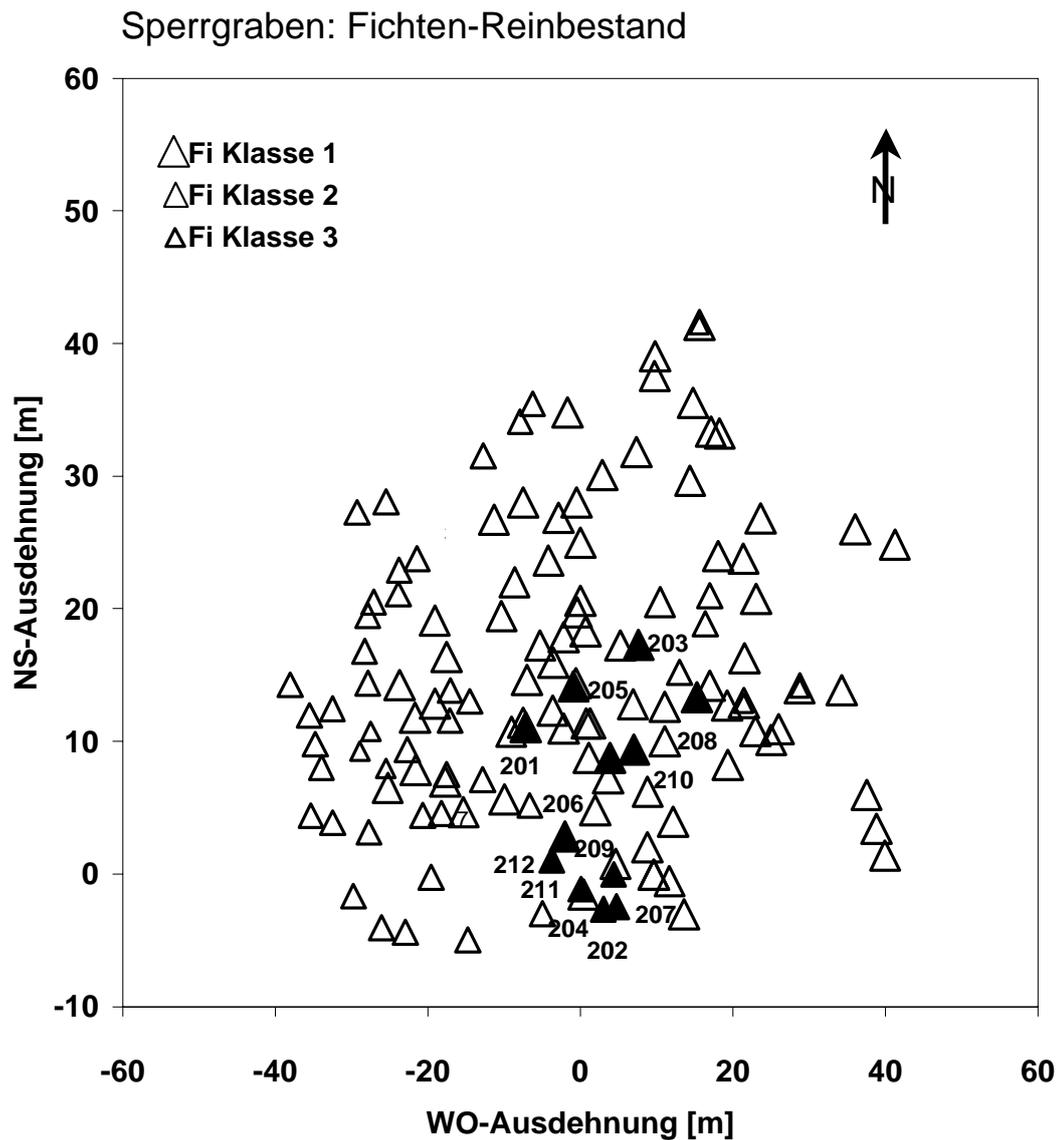


Abb. 2-16: Schematische Darstellung der Messfläche des Fichten-Reinbestandes am Sperrgraben. Die Dreiecke zeigen Fichten an. Die Xylemflussmessbäume sind mit geschlossenen, schwarzen Symbolen und Nummern gekennzeichnet worden. Die Größe der Symbole spiegelt die Baumklassenverteilung nach Kraft wider.

Kranzberger Forst: Versuchsfläche des SFB 607

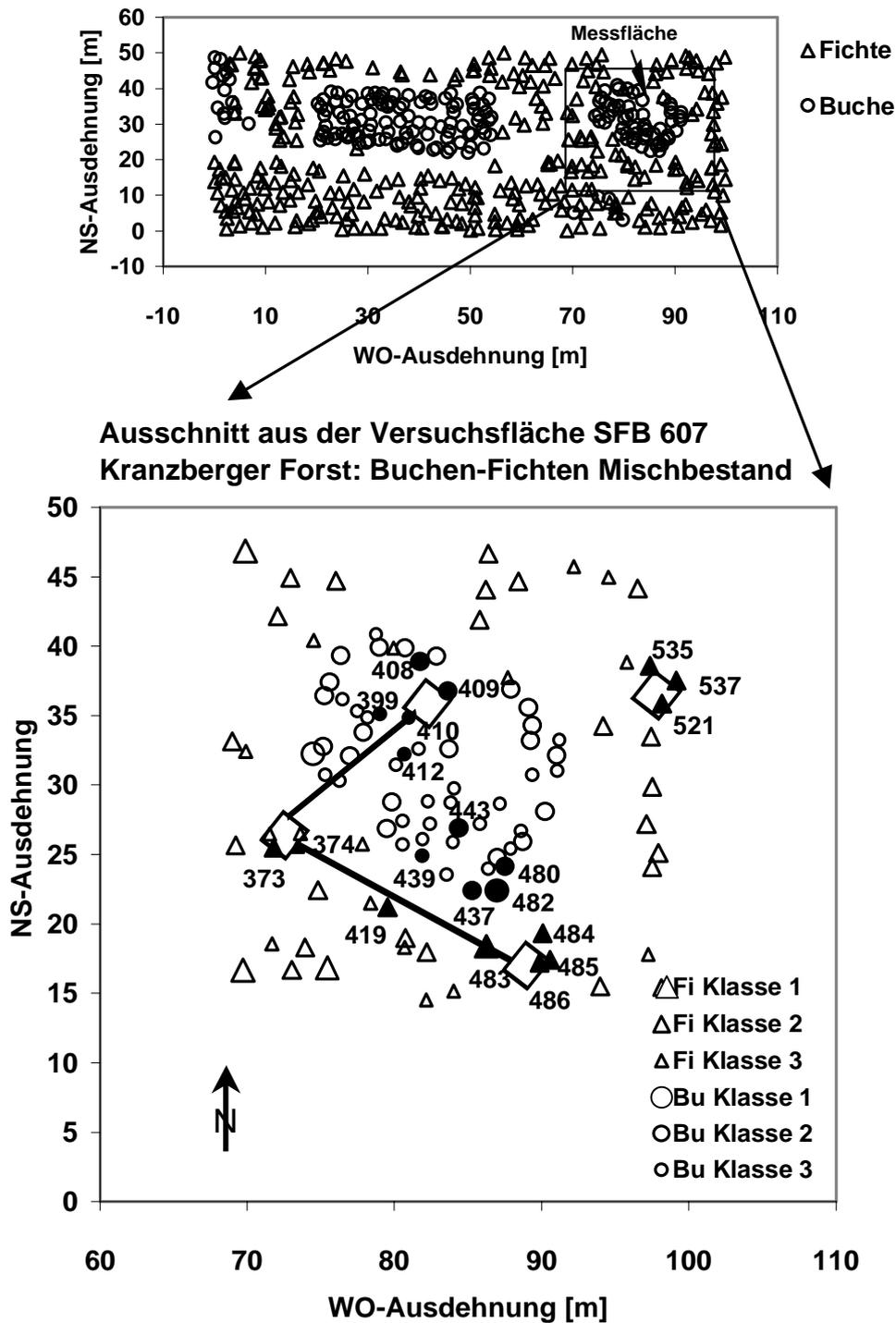


Abb. 2-17: Darstellung der Messfläche des Buchen-Fichten-Mischbestandes im Kranzberger Forst. Die Dreiecke stellen Fichten und die Kreise Buchen dar. Die obere Abbildung zeigt eine Übersicht über die gesamte SFB 607 Untersuchungsfläche. Die untere Abbildungen ist ein vergrößerter Ausschnitt der obigen Darstellung und zeigt die eigentliche Messfläche. Das Messgerüst wurde nur schematisch eingezeichnet. Die Xylemflussmessbäume sind mit durch geschlossene, schwarze Symbole und Nummern gekennzeichnet worden. Die Größe der Symbole spiegelt die Baumklassenverteilung nach Kraft wider.

Die Xylemflussdichte wurde in der Regel an allen Messbäumen der drei Messflächen synchron bestimmt. Es kam allerdings am Sperrgraben öfters als im Kranzberger Forst zu Messausfällen einzelner Bäume oder ganzer Messflächen. Die Gründe für die Datenausfälle lagen bei defekten Sensoren oder Unterbrechungen der Stromversorgung (z. B. durch Korrosion der Regelsysteme und Sicherungen, Blitz- bzw. Steinschlag oder Mäusefraß). Auf der Fichten-Reinbestand-Fläche am Sperrgraben sorgten die elektrischen Tensiometer, die an den gleichen Logger wie die Granier-Sensoren angeschlossen waren, vermehrt für Datenausfälle. Erst ein Abklemmen der Tensiometer im Sommer 2000 brachte einen bleibenden Erfolg. In allen Fällen wurden die Unterbrechungen so schnell wie möglich behoben, so dass während der Vegetationszeit lange Zeitreihen gewonnen werden konnten. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Zeiträume während denen Saftfluss-Messungen in den drei Beständen erfolgten.

Tabelle 2-18: Messperioden der Saftflussmessungen in den untersuchten Beständen.

Jahr	Fichten-Reinbestand am Sperrgraben	Buchen-Fichten-Mischbestand am Sperrgraben	Buchen-Fichten- Mischbestand im Kranzberger Forst
1999	16.05. – 10.10.	16.05. – 10.10.	02.06. – 01.11.
2000	13.05. – 14.09.	13.05. – 14.09.	11.04. – 23.10.
2001	10.05. – 10.10.	10.05. – 10.10.	03.04. – 06.11.

Bei der Auswertung konnten fehlende Messtage mit Hilfe einer durch lineare Regression gewonnenen Funktion ergänzt werden. Hierfür wurde für jeden Messbaum die tägliche Abhängigkeit des Xylemflusses mit dem photosynthetisch aktiven Licht (PPFD) bestimmt. Bei auf Tagesbasis vorhandenen Lichtmessungen konnte so der Xylemfluss jedes Einzelbaums durch die ermittelte Funktion berechnet werden.

### **2.6.9 Hochrechnung des Saftflusses vom Einzelbaum auf den Bestand**

Die Saftflussmessungen auf Einzelbaumebene boten die Möglichkeit die Kronendachtranspiration der untersuchten Bestände abzuschätzen. Grundlage hierfür waren die an den Messbäumen pro Baumklasse einer Baumart kontinuierlich bestimmten Beziehungen zwischen BHD und Xylemfluss. In die so pro Kraft'sche Klasse an den Messbäumen gewonnen Regressionsgleichungen wurden die BHD-Werte aller im Bestand in Bruthöhe erfassten Bäume eingesetzt (s. Kap. 2.4.1) und der Saftfluss auf Einzelbaumbasis bestimmt. Anschließend wurden die Einzelsaftflüsse zum Gesamtsaftfluss eines Bestandes aufsummiert. Um Flächenbezüge herzustellen, wurde der Bestandessaftfluss auf die gesamte Bestandeslaub- und -splintfläche sowie auf die projizierte und hangparallele Messfläche bezogen. Die gleichen Betrachtungen erfolgten für die pro Bestand nach Baumart getrennt gebildete Summe der Saftflüsse.

### 2.7 Porometrie

#### 2.7.1 Das Gaswechsel-Meßsystem

In den Vegetationsperioden 1999 bis 2001 sind im Kranzberger Forst über einen Zeitraum von Juni bis Oktober Gaswechselfmessungen mit einem LI-6400 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Diffusions-Porometer (LICOR inc., Lincoln, Nebraska, USA) an zwei Buchen und einer Fichte, die gut vom Gerüst aus erreichbar waren, durchgeführt worden. Bei dem LI-6400 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Diffusions-Porometer handelt sich um ein offenes Gaswechselsystem in einem tragbaren Gerät mit wahlweise netzabhängiger oder unabhängiger Stromversorgung. Das Messprinzip beruht auf der spezifischen, quantitativen Analyse der Absorption im Spektrum infraroter Wellenlängen von Kohlendioxid und Wasserdampf (von WILLERT ET AL. 1995). Ein Infrarot-Gasanalysator (IRGA) im Messkopf des Gerätes analysiert die Messungen. Parallel dazu werden in und außerhalb der Messkammer mikroklimatische Daten mittels Licht- und Temperatursensoren automatisch erfasst.

#### 2.7.2 Auswahl der Messzweige

Das LI-6400 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Diffusions-Porometer ist in der Standardausführung mit einem Messkopf ausgestattet, der Gaswechselfmessungen an Blättern bzw. kleinen Ästchen ermöglicht. Der Messkopf des Gerätes besteht aus einer Blattkammer, in die mittels eines gefederten Handgriffs ein Blatt zwischen zwei Dichtungen eingeklemmt werden kann (Blattkammerfläche 2 cm x 3 cm). In der Regel wurden pro Buche 4 Blätter aus der Sonnen- und 4 Blätter aus der Schattenkrone ausgewählt, an denen ganztags Gaswechselfmessungen durchgeführt wurden.

Bei der Fichte erfolgten alle Messungen an 1-jährigen Trieben, da sich im Laufe der Messsaison deren Nadeloberfläche nicht mehr veränderte. Auch hier wurden in der Sonnen- und Schattenkrone je 4 Messzweige ausgewählt und nummeriert. Bei der Fichte musste zum Einspannen in die Blattkammer an der unteren Dichtung zwei sich gegenüberliegende kleine Abschnitte entfernt werden. Am 1-jährigen Messzweig wurden jeweils die Enden, die im Bereich des Dichtungsabschnitts der Messkammer lagen, von Nadeln befreit. Die so gewonnenen nadelfreien Holzabschnitte wurden anschließend in die ausgeschnittenen Dichtungsabschnitte der Blattkammer eingeklemmt und die Messkammer mit Terostat abgedichtet. Die Nadeln des Messabschnittes wurde zu Beginn einer jeden Messung gezählt, um nachträglich die während der Messung in der Küvette vorhandene Nadeloberfläche bestimmen zu können und die Gaswechselfmessungen auf diese zu korrigieren (s. Kap. 2.4.5 und 2.7.3). Da keine einzelnen Nadeln in die Kammer eingedichtet werden konnten, sind der Gasaustausch von Nadeln und Zweigholz nicht trennbar, jedoch dominiert die Photosyntheseleistung des Nadelmaterials über der Atmungsrate des Zweiges. Aus diesem Grund wurde der Gasaustausch benadelter Zweige stets nur auf Nadelparameter bezogen (MATYSSEK 1985).

### 2.7.3 Versuchsdurchführung

Alle Gaswechselfmessungen sowohl an Buche als auch an Fichte erfolgten im Tagesgang (d. h. bei CO<sub>2</sub>-Konzentration der Umgebungsluft (ambient) und gegebenem natürlichen Licht) bei verschiedenen Witterungen. Für die Tagesgangmessung wurde am Messkopf die obere Hälfte der Blattkammer mit einer PAR-durchlässigen Folie abgedeckt und das Mess- und Referenzgas aus einem Puffergefäß angesaugt. Ein Messtag erstreckte sich in der Regel von Sonnenaufgang bis -untergang. Pro Messtag erfolgten zeitversetzte, stündliche Messungen an Sonnen- und Schattenblättern eines Baumes. Bei morgendlichem hohen Taufall wurden die Blätter und Nadeln vorsichtig trocken getupft und das Mess- und Referenzgas vorübergehend über ein im LI-6400 integriertes Trocknungsmittel geleitet, wodurch die Luftfeuchtigkeit in der Messkammer gesenkt werden konnte und die Messungen keine erhöhten Signale im H<sub>2</sub>O-Kanal anzeigten. Als Messprogramm wurde ein vorgegebenes Aufzeichnungsprogramm des CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Diffusions-Porometers verwendet, in dem die Anzahl der Messungen (30 bei Buche, 50 bei Fichte), die Häufigkeit der Messungen (alle 5 Sekunden) und Nullabgleiche (nach allen 10 Messungen erfolgte ein Abgleich des Proben- und Referenzanalysators) eingestellt werden konnten. Sowohl bei Buche als auch bei Fichte wurden für die Auswertung nur die jeweils letzten 10 Messungen mit stabilen Messwerten betrachtet. Aus diesen Messungen wurde ein Mittelwert gebildet und die Standardabweichung berechnet. Je nach Art der Stomataverteilung auf den Blattorganen der beiden untersuchten Baumarten erfolgte im Messprogramm für die Buche die Eingabe 0 (= einseitige Stomataverteilung) und für die Fichte 1 (= beidseitige Stomataverteilung). Als Blattfläche wurde bei Buche 6 cm<sup>2</sup> (vorgegeben durch Blattkammerfläche des Messkopfes) und bei Fichte 1 cm<sup>2</sup> (eine Dummy-Fläche) angegeben. Diese Dummy-Fläche wurde später bei Fichte durch die Realfläche ersetzt, indem gegen Ende der Vegetationsperiode die Messzweige geerntet und im Labor die Gesamtnadeloberflächen von Schatten- bzw. Sonnenlaub bestimmt wurden (s. Kap. 2.4.5). Vorherige Nadelverluste konnten durch die zu Beginn einer jeden Messung gezählte Anzahl der Nadeln nachvollzogen und die Nadeloberfläche gegebenenfalls korrigiert werden. Anschließend konnten die bei Fichte im Gelände aufgezeichneten Dummy-Messwerte auf die reale Nadeloberfläche umgerechnet und der Realmesswert bestimmt werden (s. Kap. 2.4.5). Dies geschah mit Hilfe eines von LICOR mitgelieferten Softwareprogramms (Open 2.01).

## Material und Methoden

---

Im Messprotokoll wurden u.a. folgende Messgrößen direkt aufgezeichnet\* bzw. durch Open 2.01 berechnet\*\* (kursiv geschriebene Bezeichnungen sind LICOR intern):

$C_i^*$	interzelluläre $CO_2$ -Konzentration; $\mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{mol Luft}^{-1}$
$C_a^*$	extrazelluläre $CO_2$ -Konzentration; $\mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{mol Luft}^{-1}$
$JCO_2^{**}$	= $A = \textit{Photo}$ = Netto-Photosyntheserate; $\mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
$g_{H_2O}^{**}$	$\textit{Cond}$ = stomatare Leitfähigkeit für $H_2O$ ; $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$JH_2O^{**}$	= $E = \textit{Tmmol}$ = Transpirationsrate; $\text{mmol } H_2O \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$T_{\text{air}}^*$	Außentemperatur °C
$T_{\text{leaf}}^*$	Blatttemperatur °C
$PAR_i^*$	Photosynthetisch aktive Strahlung in der Messkuvette; $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$PAR_o^*$	Photosynthetisch aktive Strahlung außerhalb der Messkuvette; $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$CO_2R^*$	Referenz-Kohlendioxid-Konzentration in ppm
$CO_2S^*$	Kohlendioxid-Konzentration in ppm in der Messkuvette
$RH_s^*$	Luftfeuchtigkeit in % in der Messkuvette
$RH_r^*$	Luftfeuchtigkeit in % in der Referenz
Stomata	Stomataverteilung auf der Blattfläche
Area	Blattflächengröße in der Messkuvette in $\text{cm}^2$
Flow	Durchflussrate
$H_2O_R^*$	Referenz-Wasserdampf-Konzentration; $\mu\text{mol } H_2O \cdot \text{mol Luft}^{-1}$
$H_2O_S^*$	Wasserdampf-Konzentration in der Messkuvette; $\mu\text{mol } H_2O \cdot \text{mol Luft}^{-1}$

### 2.7.4 Berechnung der Gaswechselgrößen

Das für die Untersuchungen verwendete LI-6400 der Firma LICOR (Kap. 2.7.1) misst mittels IRGA-Analysatoren die Differenz der  $CO_2$ - und Wasserdampfmolenbrüche in der Luft zwischen Blattinnerem und Umgebungsluft ( $\Delta CO_2$  und  $\Delta H_2O$ ). Weiterhin werden die Blatttemperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Strahlung gemessen. Alle weiteren Kenngrößen des Gaswechsels werden mit Hilfe der LICOR eigenen Software (Open 2.01) wie folgt berechnet (Angaben aus LI-6400 Handbuch, Formeln nach FARQUHAR & CAEMMERER 1982):

Transpiration (E):

$$E = \frac{ue(w_c - w_e)}{s * 10^5 \left(1 - \frac{w_c}{1000}\right)}$$

Netto-Photosyntheserate (A):

$$A = \frac{ue(c_e - c_c)}{100s} - c_c E$$

Stomatäre Leitfähigkeit ( $g_{H_2O}$ ):

$$g_{H_2O} = \frac{1}{\frac{1}{g_{tw}} - \frac{k_f}{g_{bw}}}$$

Gesamte Leitfähigkeit des Blattes für Wasser ( $g_{tw}$ ):

$$g_{tw} = \frac{E(1000 - \left(\frac{w_l + w_c}{2}\right))}{w_l - w_c}$$

Gesamte Leitfähigkeit des Blattes für  $CO_2$  ( $g_{tc}$ ):

$$g_{tc} = \frac{1}{\frac{1,6}{g_{H_2O}} + \frac{1,37k_f}{g_{bw}}}$$

Interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration ( $c_i$ ):

$$c_i = \frac{\left(g_{tc} - \frac{E}{2}\right)c_c - A}{g_{tc} + \frac{E}{2}}$$

Hierbei ist:

A	Netto-Photosyntheserate; $\mu\text{mol } CO_2 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
$c_c$	Molenbruch des $CO_2$ , das in die Kammer einströmt
$c_e$	Molenbruch des $CO_2$ , das aus der Blattkammer strömt
$c_i$	interzelluläre $CO_2$ -Konzentration: $\mu\text{mol } CO_2 \text{ mol Luft}^{-1}$
E	Transpirationsrate; $\text{mmol } H_2O \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$g_{bw}$	Leitfähigkeit der Blattgrenzschicht für Wasserdampf; $\text{mol } H_2O \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$g_{H_2O}$	stomatäre Leitfähigkeit des Wasserdampfes; $\text{mol } H_2O \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$g_{tc}$	gesamte Leitfähigkeit des Blattes für $CO_2$ ; $\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$g_{tw}$	gesamte Leitfähigkeit des Blattes für $H_2O$ ; $\text{mol } H_2O \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
kf	$(k^2+1)/(k*1)^2$ ; wobei K eine Schätzung des Verhältnisses der stomatären Leitfähigkeit der einen Blattseite zur anderen Blattseite ist. Für hypostomatäre Blätter, wie Buchenblätter muss $k = 0$ sein, für Fichte ist $k = 1$
s	Blattfläche; $\text{cm}^2$
$u_e$	Molenflussrate der einströmenden Luft; $\mu\text{mol s}^{-1}$
$w_c$	Molenbruch des Wasserdampfes in der Blattkammer
$w_e$	Molenbruch des einströmenden Wasserdampfes
$w_l$	Molenbruch des Wasserdampfes in den Spaltöffnungen

### 2.7.5 Bestimmung des bauminternen Wasserspeichers

Zur Bestimmung der Größe des bauminternen Wasserspeichers wurde auf Stundenbasis während der in Tabelle 2-19 aufgelisteten Messtage mit sonnig-warmer Witterung der im Tagesgang in Brusthöhe gemessene Xylemfluss mit der durch Porometrie ermittelten Transpirationsrate der Sonnen- und Schattenbelaubung verglichen. Als Eingangsgröße für die Modellierung (durch die Partnergruppe Bernhofer) wurde der Vergleich auf prozentualer Basis vorgenommen, d. h. die Maxima von Xylemfluss und Blatt-/Nadeltranspiration wurden jeweils gleich 100 % gesetzt (SCHULZE ET AL. 1985, KÖSTNER ET AL. 1992). Je Baumart wurden über sämtliche Messtage hinweg pro Stundenintervall die Mittelwerte von Xylemfluss und Transpirationsrate gebildet und auf dieser Basis die in Kapitel 3.3 gezeigten „Standard-Tage“ als Grundlage des zeitlichen Versatzes zwischen Wasserfluss in Brusthöhe und Belaubung abgeleitet. Die eigentliche Größe des zeitlichen Versatzes konnte anhand der übereinanderprojizierten Kurven von Wasserfluss in Brusthöhe und Transpirationsrate als Flächenintegral berechnet werden.

Tabelle 2-19 Porometrietage zur Darstellung des bauminternen Wasserspeichers im Kranzberger Forst.

	Buche	Buche	Fichte
Messjahr	1999	2000	2001
Messtage	10. Juni	16. Juni	02. Juli
	27. Juli	19. Juni	01. August
	28. Juli	29. Juni	02. August
		25. Juli	06. August

### 2.7.6 Kopplung zwischen Wasserverbrauch und Stoffproduktion

Die Verknüpfung der Messungen des Stammxylemflusses (= Kronentranspiration) und des Gaswechsels einzelner Blätter oder benadelter Zweige ermöglicht die Brutto-Primärproduktion aus der Bestandestranspiration auf Bestandeskronenebene abzuleiten. Voraussetzung hierfür ist die Bestimmung des Kopplungsfaktor  $g_{fac}$  zwischen Photosynthese- und stomatärer Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Blatt-/Zweigebene (HARLEY & TENHUNEN 1991). In der Regel weisen die Photosynthese und die stomatäre Leitfähigkeit eine enge, positive Korrelation miteinander auf (SCHULZE & HALL 1982), welche als Ausdruck der „Water-Use-Efficiency“ die Grundlage für  $g_{fac}$  bildet. Die stomatäre Leitfähigkeit ergibt sich bei Kenntnis des Feuchtegradienten zwischen Blatt und Umgebungsluft aus der Transpirationsrate.

### 2.7.6.1 Berechnung des Kopplungsfaktors $g_{fac}$ für die stomatäre Leitfähigkeit

Die Ermittlung von  $g_{fac}$  erfolgte mittels der durch Porometrie im Kranzberger Forst erhobenen Gaswechseldaten. BALL ET AL. (1987) beschrieb die stomatäre Leitfähigkeit durch folgendes empirisches Modell:

$$(1) \quad g_s = g_{\min} + \frac{g_{fac} \times 1000 \times (np + 0,5 \times rd) \times h_s}{c_s}$$

Dabei ist:

$g_s$	stomatäre Leitfähigkeit; $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$np$	Nettokohlendioxidfixierungsrate; $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
0,5	geschätzter Anteil der Dunkelatmung; $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei Lichtbedingungen
$h_s$	relative Luftfeuchtigkeit als Fraktion = relative Luftfeuchtigkeit/100
$c_s$	$\text{CO}_2$ -Konzentration auf der Blattoberfläche in ppm = $c_a$ Außenluft-Konzentration an $\text{CO}_2$ bei Küvettenmessungen in ppm
$g_{\min}$	kutikuläre Leitfähigkeit bei geschlossenen Stomata; $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$g_{fac}$	dimensionsloser Kopplungsfaktor zwischen Photosynthese- und stomatärer Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Blatt-/Zweigebene, beschreibt die stomatäre Sensitivität
1000	der Faktor in $\text{mmol } \mu\text{mol}^{-1} \text{ppm}$ konvertiert die Einheit von $(np + 0,5 r_d) / c_s$ ( $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ppm}^{-1}$ ) und damit von $g_s$ nach $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Der Kopplungsfaktor  $g_{fac}$  wurde getrennt für Sonnen- und Schattenlaub als Steigung aus Gleichung (1) bestimmt (s. Kap. 3.3.4). Hierfür wird für Buche und Fichte die stomatäre Leitfähigkeit (y-Achse) mit der Netto- $\text{CO}_2$ -Aufnahmerate (korrigiert auf Luftfeuchte und  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Außenluft, x-Achse) bei sättigender PPFD korreliert ( $> 400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  jeweils für Sonnenblätter im Kranzberger Forst, Schattenblätter  $> 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).  $g_{fac}$  ergibt sich aus dem Anstieg der Regression,  $g_{\min}$  aus dem Schnittpunkt mit der Ordinate (zit. nach FALGE 1997). Im Ergebnisteil werden zwei Regressionen gezeigt; eine mit variablen  $g_{\min}$  [ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] und eine mit einem  $g_{\min} = 1$  [ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]. Aufgrund der unterschiedlichen Morphologie der Blattorgane wurden die Gaswechselfparameter bei Buche auf die projizierte Blattfläche und bei Fichte auf die allseitige Blattoberfläche bezogen.

### 2.7.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Messdaten (Mittelwert, Standardabweichung, Regressionsanalysen) erfolgte mit Hilfe der Computerprogramme Excel (Version 2000, Microsoft Corporation) und Sigma Plot (Version 2000, SPSS Science Marketing). Für einen t-Test für unabhängige Stichproben wurde das Statistik-Programm-Paket SPSS 10.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, USA) verwendet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Abhängigkeitsfaktoren der Kronendachtranspiration

##### 3.1.1 Bestandesstrukturanalyse

###### 3.1.1.1 Charakterisierung der Bestandesstruktur

Die Untersuchung der Brusthöhendurchmesser (BHD-Verteilung) in den verschiedenen Beständen (Abb. 3-1) nach der sowohl die Erntebäume als auch die Xylemflussmessbäume ausgewählt wurden, zeigt dass die Häufigkeit der verschiedenen Baumklassen für Fichte im Reinbestand am Sperrgraben und im Mischbestand im Kranzberger Forst annähernd normalverteilt ist. Das gilt auch für die Buche im Mischbestand des Kranzberger Forsts. Im Gegensatz hierzu steht der Mischbestand am Sperrgraben: Die Häufigkeitskurve der verschiedenen Baumklassen weist für Fichte zwei Gipfel auf und ist für die Buche überproportional zugunsten kleinerer Brusthöhendurchmesser verschoben (Abb. 3-1).

Der Fichtenbestand am Sperrgraben zeigte einen hohen Anteil an toten Stämmen (ca. 100 von insgesamt 230 kartierten Bäumen waren tot, hierbei handelte es sich um unterdrückte Individuen). Die Brusthöhendurchmesser-Verteilung der lebenden Bäume weist ein Maximum bei 44 cm Durchmesser auf und erstreckt sich von 8 bis 72 cm.

Die BHD-Verteilung für Fichte im Mischbestand am Sperrgraben zeigt ein erstes Maximum bei 32 cm Durchmesser und ein zweites bei 48 cm. Die BHD-Klassen liegen in einem Bereich zwischen 16 und 68 cm.

Die Buche im Mischbestand am Sperrgraben weist eine BHD-Verteilung zwischen 8 bis 72 cm auf mit einem ausgeprägtes Maximum bei einem BHD von 16 cm. Die höheren Durchmesserklassen sind gleichmäßig, aber vergleichsweise gering vertreten. Dies bedeutet, dass eine große Anzahl junger oder unterdrückter Buchen anzutreffen ist; größere Buchen sind eher versprengt zu finden, liefern aber durch ihre im Vergleich zu den kleineren Bäumen deutlich größeren Laubflächen (Kap. 3.1.1.2.3, Tab. 3-16) einen überproportional hohen Anteil an der Bestandestranspiration (Kap. 3.2.4).

Im Kranzberger Forst liegt das Maximum der BHD-Häufigkeitsverteilung für Fichte bei 32 cm und für Buche bei 20 cm. Die Abbildung 3-1 zeigt, dass die Fichte stärker im Bestand vertreten ist als die Buche und letztere kleinere Brusthöhendurchmesser aufweist. Die Stammdurchmesserverteilung in Brusthöhe für Fichte liegt im Bereich zwischen 8 und 54 cm und bei Buche zwischen 8 und 44 cm.

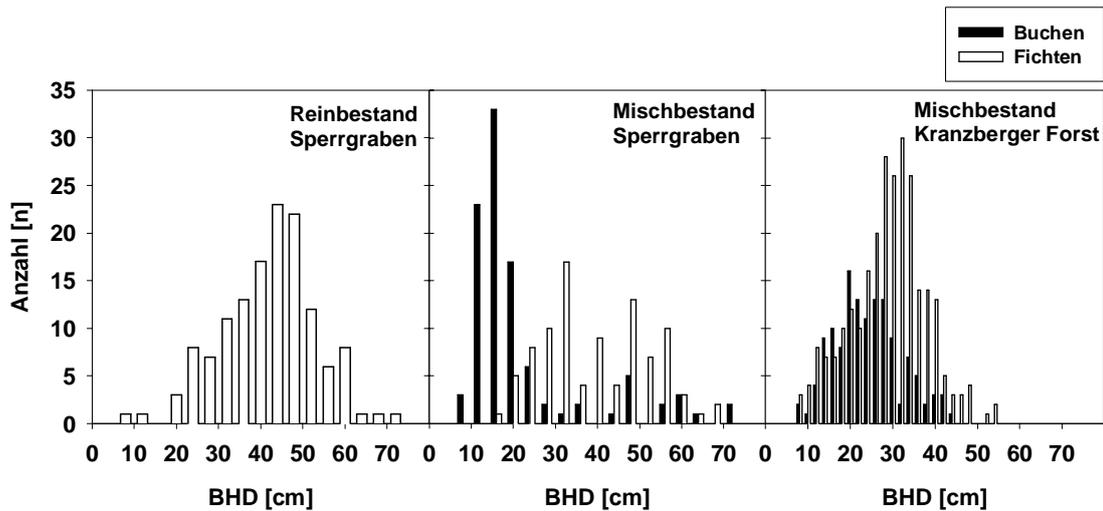


Abb. 3-1: Häufigkeitsverteilung der Brusthöhendurchmesser-Klassen für Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand am **Sperrgraben** sowie im Mischbestand des **Kranzberger Forsts**.

Auf der Grundlage des BHD wurde über eine Regressionsfunktion die Baumhöhe für Fichte und Buche zur weiteren Charakterisierung der Bestände abgeleitet (Abb. 3-2, Tab. 3-3). Datengrundlagen für die gezeigten Beziehungen sind Baumernten am Sperrgraben und im Kranzberger Forst (s. Kap. 2.4.2) sowie Literaturdaten nach BURGER (1941, 1950, 1953). Die Abbildungen zeigen für Buche eine engere Korrelation zwischen Baumhöhe und BHD ( $r^2 = 0,93$ ) als für Fichte ( $r^2 = 0,90$ ). Die mittlere Baumhöhe konnte pro Baumart anhand der BHD der vermessenen Einzelbäume bestimmt werden (vgl. Kapitel 2.4.1) und als ein Validierungsparameter für die Modellierung der Bestandestranspiration mit Hilfe von PSN 6 einfließen (BERNHOFER ET AL. 2003, Kap. 3.2.6).

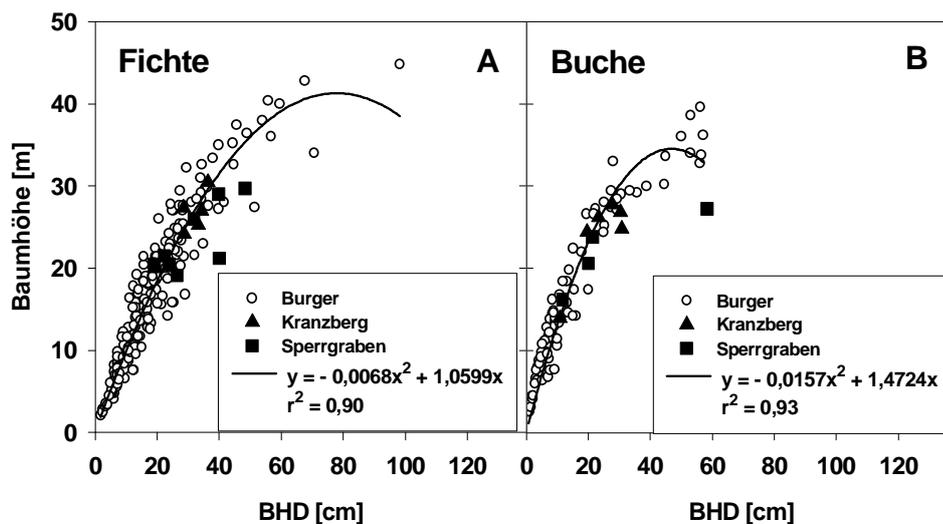


Abb. 3-2: Korrelation zwischen Brusthöhendurchmesser (BHD) und Baumhöhe bei Fichte und Buche. Die Regression zeigt die Beziehung zwischen BHD und Baumhöhe der Erntebäume **aller Bestände** und der Literatur-Daten nach Burger (1941, 1950, 1953).

## Ergebnisse

Die mittleren Baumhöhen sowie weitere Bestandescharakteristika wie mittlerer BHD, mittlerer Umfang in Brusthöhe, mittlere projizierte Kronenfläche und Grundfläche (kumulative Stammquerschnittsfläche in Brusthöhe pro Hektar) sind je Baumart in der Tabelle 3-3 zusammengestellt.

Tabelle 3-3: Allgemeine Charakteristika der Bestandesstruktur der untersuchten Bestände.

	Buchen-Fichten- Mischbestand <b>Sperrgraben</b>	Fichten-Reinbestand <b>Sperrgraben</b>	Buchen-Fichten- Mischbestand <b>Kranzberger Forst</b>
Baumdicke (Bäume ha <sup>-1</sup> )	559.36	440.25	776.18
Mittlere Baumhöhe (m)	Fichte 27,84 Buche 21,45	Fichte 30,89	Fichte 24,48 Buche 23,17
Mittlerer BHD (cm)	Fichte 36,06 Buche 22,05	Fichte 40,65	Fichte 28,46 Buche 23,81
Mittlerer Umfang in Brusthöhe (cm)	Fichte 113,23 Buche 69,25	Fichte 127,70	Fichte 89,41 Buche 74,80
Mittlere projizierte Kronenfläche (m <sup>2</sup> )	Fichte 29,02 Buche 47,61	Fichte 32,15	Fichte 15,59 Buche 23,18
Grundfläche (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Fichte 35,41 Buche 14,67	Fichte 63,06	Fichte 34,82 Buche 12,23

### 3.1.1.2 Biomasseerhebung vom Einzelbaum zur Bestandesebene

#### 3.1.1.2.1 Laubbiomassenerfassung bei Buche und Fichte

Die Laubbiomasse der stichprobenartig gefällten Buchen und Fichten konnten mit Hilfe der bei der Fällung vermessenen Astbasisdurchmesser aller Äste eines Baumes berechnet werden (Kapitel 2.4.2). Grundlage hierfür war die gefundene enge Beziehung zwischen Astbasisdurchmesser und Laubtrockengewicht repräsentativ ausgewählter Probeäste. Die Abbildungen 3-4 und 3-5 zeigen beispielhaft vier „Erntebäume“ der Untersuchungsgebiete. Die Korrelationen der zwei Buchen und zwei Fichten des Untersuchungsgebietes Sperrgraben erreichen Bestimmtheitsmaße von 0,7 bis 0,9. Die in den Abbildungen dargestellten Gleichungen dienten zur Hochrechnung des Gesamt-Laubtrockengewichts für jeden im Gelände an der Astbasis vermessenen Ast. Abbildung 3-5 zeigt die Beziehungen für je zwei „Erntebäume“ der

Baumarten Buche und Fichte des Kranzberger Forsts. Die Bestimmtheitsmaße für Buche liegt in ähnlichen Größenordnungen wie die am Sperrgraben (0,8 bis 0,9). Für Fichte ist bei der kleinen Stichprobe die Beziehung weniger eng. Die Bestimmtheitsmaße liegen in Bereichen von 0,6 bis 0,7. Schon auf Astbasis fällt auf, was sich später auf Baumebene bestätigt, dass das Laubtrockengewicht von Buche und Fichte am Sperrgraben bei vergleichbaren Astbasisdurchmessern höher ist als im Kranzberger Forst (vgl. Kap. 4.2).

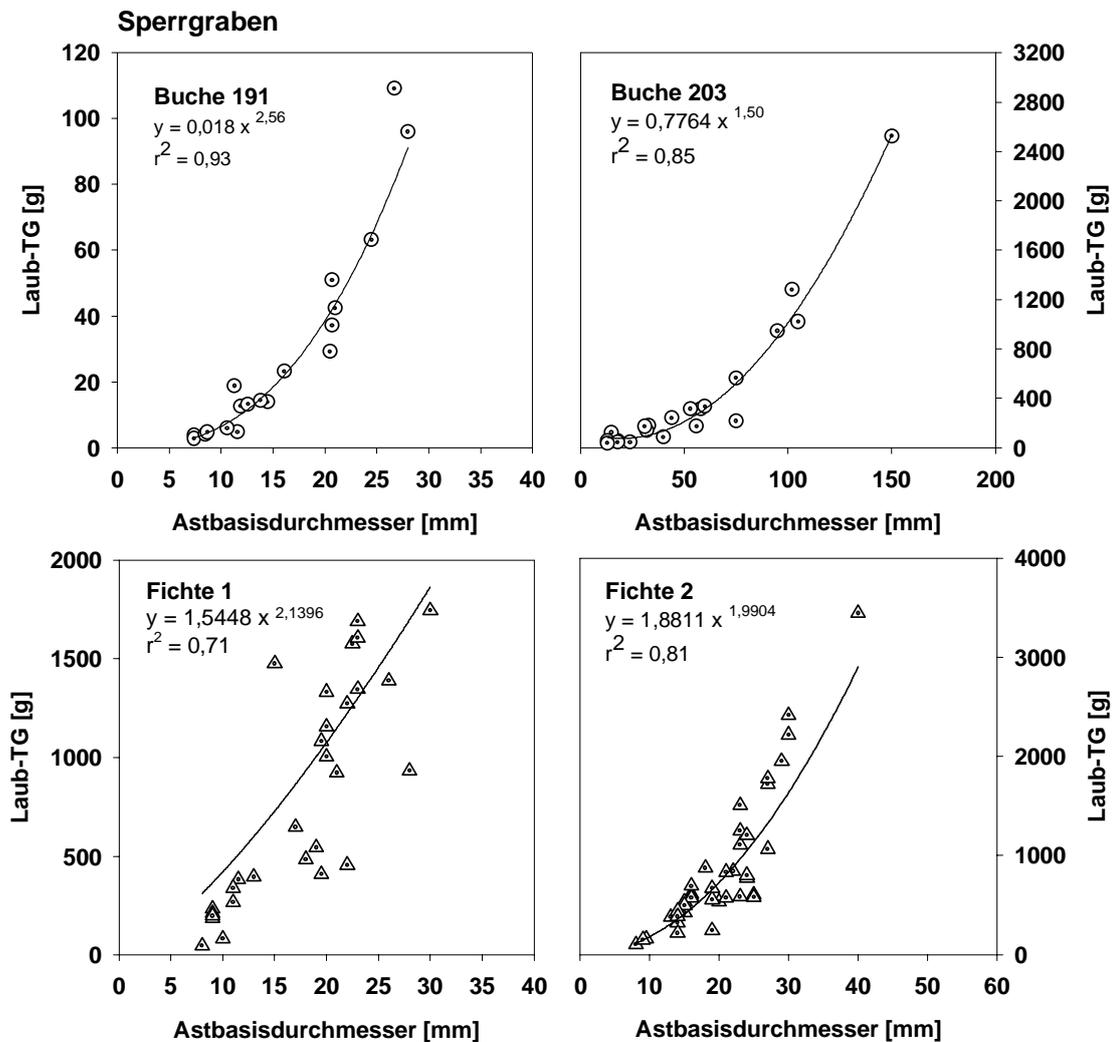


Abb 3-4: Beziehung zwischen Astbasisdurchmesser (Astdurchmesser ca. 20 mm von Astansatzstelle am Stamm entfernt) und Laubtrockengewicht bei je zwei geernteten Buchen und Fichten des Buchen-Fichten-Mischbestandes am **Sperrgraben**.

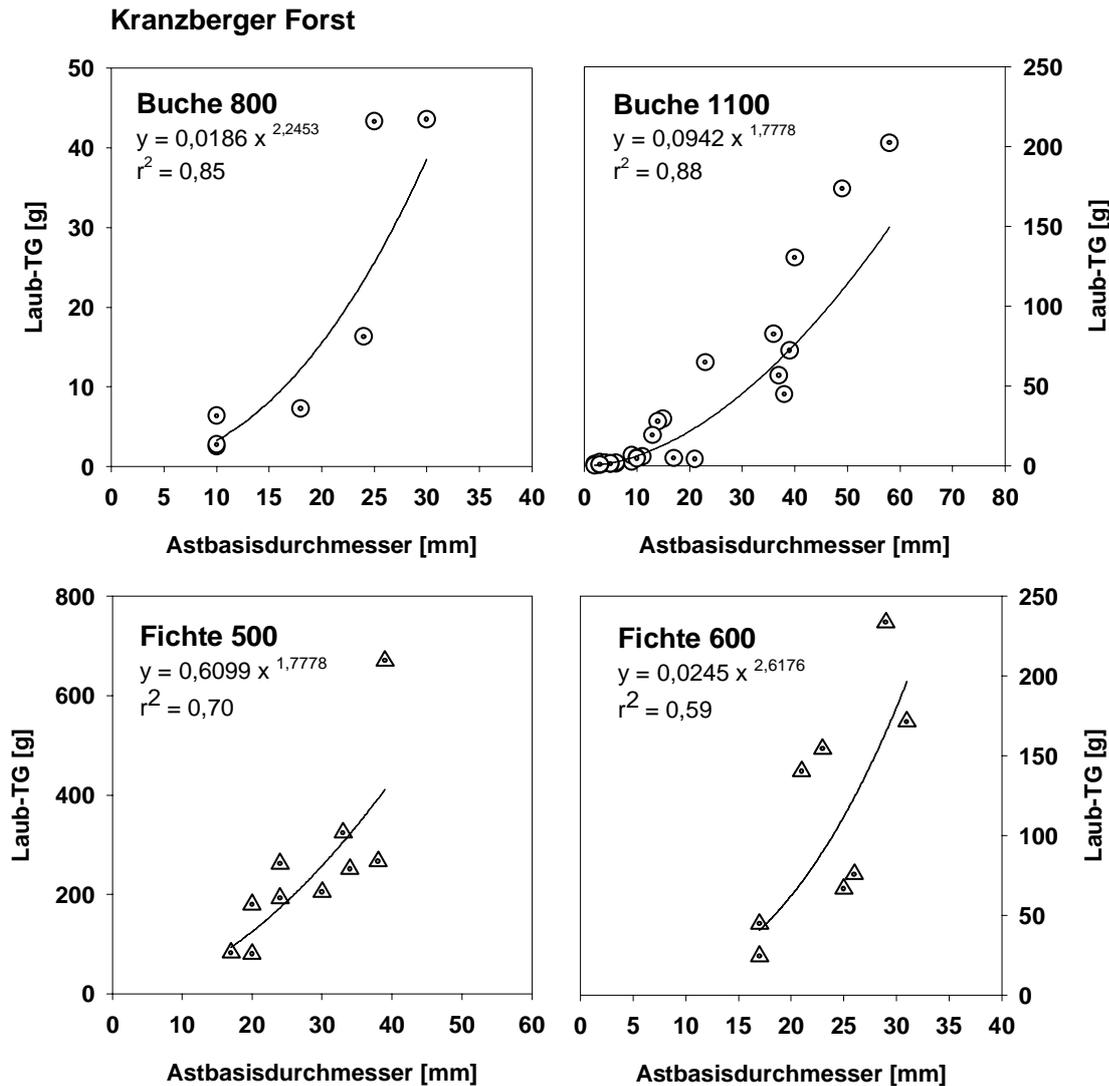


Abb 3-5: Beziehung zwischen Astbasisdurchmesser (Astdurchmesser ca. 20 mm von Astansatzstelle am Stamm entfernt) und Laubtrockengewicht der Probeäste von je zwei geernteten Buchen und Fichten des Buchen-Fichten-Mischbestandes im **Kranzberger Forst**.

Die korrelativ bestimmten Laubbiomassen pro Ast eines Baumes wurden über alle Äste eines Baumes aufsummiert (Abb. 3-6). Ein Vergleich der Beziehung zwischen Gesamt-Laubbiomasse und BHD der Fichten-Erntebäume am Sperrgraben und Kranzberger Forst mit Literaturdaten nach BURGER (1941, 1953) zeigt, dass die Fichten am Sperrgraben bei gleichen BHD eine höhere Laubbiomasse aufweisen als die Fichten von BURGER und dem Kranzberger Forst (s. Teilabbildung A). Diese Tendenz steigt mit zunehmendem BHD. Die Bestimmtheitsmaße der angegebenen Funktionen liegen zwischen 0,8 und 0,9. Im Gegensatz zu den Fichten zeigt die Beziehung der Buchen am Sperrgraben keine Auffälligkeiten (s. Teilabbildung B). Die geernteten Buchen liegen im gleichen Funktionsbereich wie die BURGER-Daten (1950). Allerdings weisen die Buchen im Kranzberger Forst geringere Laubbiomassen bei gleichem BHD auf als Buchen ähnlicher Dimension am Sperrgraben oder bei den

Literaturangaben von BURGER (1950). Die Bestimmtheitsmaße der dargestellten Funktionen liegen zwischen 0,9 und 1.

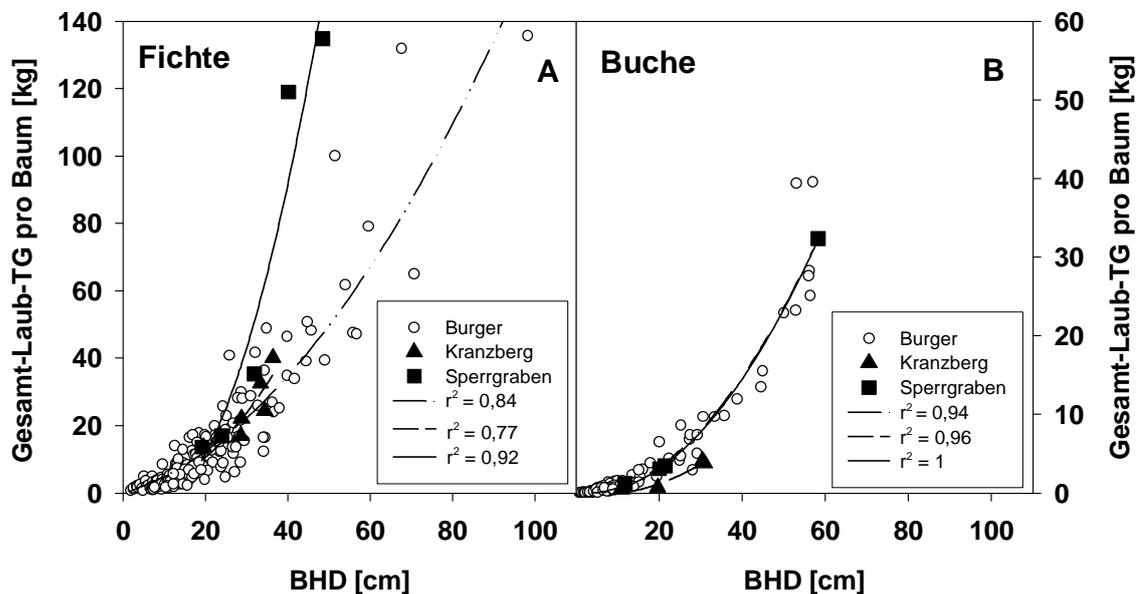


Abb. 3-6: Beziehung zwischen Gesamt-Laubtrockengewicht und Brusthöhendurchmesser (BHD) je Baum für Fichte und Buche in den untersuchten Beständen. Erntedaten vom **Sperrgraben und dem Kranzberger Forst** werden mit Literaturangaben von Burger (1941, 1950, 1953) verglichen.

### 3.1.1.2.2 Nadel- und Lauboberflächenermittlung

Zur Ermittlung der Gesamt-Lauboberfläche bei Buchen und Fichten wurden die Oberflächen der Laubproben aus den unterschiedlichen Kronenbereichen pro Gramm Trockengewicht ermittelt (vgl. Kap. 2.4.5). Über das Verhältnis der Masse zur Fläche der Proben konnte eine Hochrechnung auf die projizierte Lauboberfläche eines jeden Astes eines Erntebaumes aufgrund seiner bekannten Laubbiomasse erfolgen. Durch Addition der einzelnen Oberflächen eines jeden Astes konnte die projizierte Gesamt-Lauboberfläche eines Baumes berechnet werden. Das Diagramm 3-7 stellt diese Ergebnisse für alle untersuchten Erntebäume dar. Der Vergleich der Beziehung zwischen projizierter Gesamt-Lauboberfläche und BHD der Fichten-Erntebäume am Sperrgraben und im Kranzberger Forst mit Literaturdaten nach BURGER (1941, 1953, Teilabbildung A) zeigt weitgehende Konsistenz der Erntedaten mit den Literaturdaten. Dagegen weisen die geernteten Buchen am Sperrgraben und im Kranzberger Forst geringere Blattflächen auf als die Literaturdaten von BURGER (1950, Teilabbildung B). Die Bestimmtheitsmaße der angegebenen Funktionen liegen sowohl für Fichte als auch für Buche in den Bereichen von 0,8 bis 1.

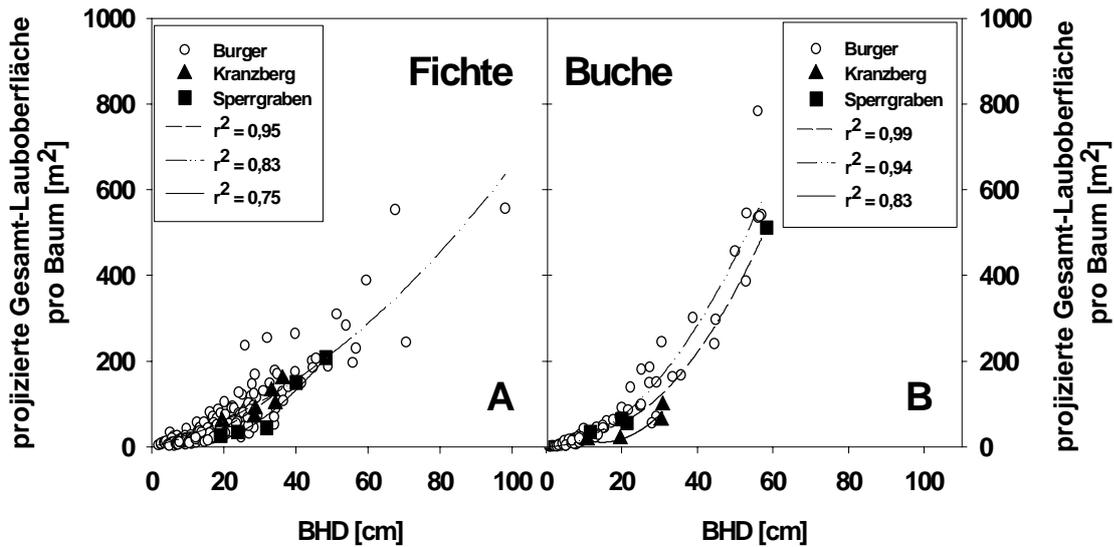


Abb. 3-7: Beziehung zwischen projizierter Gesamt-Lauboberfläche und Brusthöhendurchmesser (BHD) je Baum für Fichte und Buche in den untersuchten Beständen. Erntedaten vom **Sperrgraben und dem Kranzberger Forst** werden mit Literaturangaben von Burger (1941, 1950, 1953) verglichen.

Die in den Abbildungen 3-6 und 3-7 dargestellten Beziehungen wurden zur Ermittlung der Laub-Biomasse bzw. -Oberfläche der untersuchten Bestände herangezogen. Mit zunehmendem Brusthöhendurchmesser (BHD) nimmt die Laub-Biomasse und ihre Oberfläche bei beiden Baumarten entsprechend der angegebenen Polynomfunktionen zu (Tab. 3-8 und 3-9). Die Funktionsgleichungen dienen zur Hochrechnung der Laubfläche eines Bestandes über den BHD der vermessenen Bäume der jeweiligen Untersuchungsflächen (Kap. 3.1.1.1)

Tabelle 3-8: Polynomfunktionen der Korrelationen zwischen Brusthöhendurchmesser (BHD) und Laubtrockengewicht ( $TG_L$ ) bzw. projizierte Lauboberfläche ( $A_L$ ) bei den geernteten **Buchen in Kranzberg und am Sperrgraben** sowie den Literaturangaben nach Burger (1950) mit ihrem Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ).

Buche	$TG_L = ax^2 + bx$			$A_L = ax^2 + bx$		
	a	b	$r^2$	a	b	$r^2$
Kranzberg	0,0063	-0,0669	0,96	0,1051	-0,6675	0,83
Sperrgraben	0,0104	-0,0525	0,99	0,1449	0,0201	0,99
Burger	0,0102	0,0386	0,93	0,1748	0,1037	0,94

Tabelle 3-9: Polynomfunktionen der Korrelationen zwischen Brusthöhendurchmesser (BHD) und Laubtrockengewicht ( $TG_L$ ) bzw. projizierte Lauboberfläche ( $A_L$ ) bei den geernteten **Fichten in Kranzberg und am Sperrgraben** sowie den Literaturangaben nach Burger (1941, 1953) mit ihrem Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ).

Fichte	$TG_L = ax^2 + bx$			$A_L = ax^2 + bx$		
	a	b	$r^2$	a	b	$r^2$
Kranzberg	0,0266	-0,0027	0,76	0,0936	0,42	0,75
Sperrgraben	0,0857	-1,1307	0,92	0,1233	-1,6296	0,95
Burger	0,0125	0,3687	0,84	0,0438	2,1756	0,83

In Abhängigkeit von der projizierten oder die hangparallelen Messflächengröße als Bezugsgröße (s. Kap. 2.3) ergeben sich für den hochmontanen Buchen-Fichten-Mischbestand am Sperrgraben unterschiedliche Laub-Trockenmassendichten auf Bestandesebene (Tab. 3-10). Bei projizierter Fläche beträgt die gemeinsame Laubmassendichte von Fichte und Buche für den 80-jährigen Bestand  $28,3 \text{ t ha}^{-1}$ , und bei hangparallelem Bezug (d.h. bei Berücksichtigung der Geländeneigung von  $55^\circ$ )  $16,2 \text{ t ha}^{-1}$ . Für den gleichaltrigen hochmontanen Fichten-Reinbestand am Sperrgraben weisen projizierter und die hangparalleler Bezug (Geländeneigung  $25^\circ$ )  $47,4 \text{ t ha}^{-1}$  bzw.  $42,8 \text{ t ha}^{-1}$  auf. Bei  $1^\circ$  Neigung liegen im jüngeren Buchen-Fichten-Mischbestand (Alter: ca. 60 Jahre) der Tieflage im Kranzberger Forst die Laubmassendichte bei projiziertem und hangparallelem Bezug bei je  $12,4 \text{ t ha}^{-1}$ .

## Ergebnisse

Tabelle 3-10: Laubtrockenmassendichte von **Fichten und Buchen** der untersuchten Bestände.

	Bezugsfläche	Buchen-Fichten- Mischbestand	Fichten- Reinbestand	Buchen-Fichten- Mischbestand
		<b>Sperrgraben</b>	<b>Sperrgraben</b>	<b>Kranzberg</b>
<b>Fichte:</b>	projiziert	26,7	47,4	11,8
Laubtrocken- massendichte [t ha <sup>-1</sup> ]	hangparallel	15,3	42,8	11,8
<b>Buche:</b>	projiziert	1,6		0,6
Laubtrocken- massendichte [t ha <sup>-1</sup> ]	hangparallel	0,9		0,6
<b>Fichte + Buche:</b>	projiziert	28,3	47,4	12,4
Gesamt- Laubtrocken- massendichte [t ha <sup>-1</sup> ]	hangparallel	16,2	42,8	12,4

Der projizierte Blattflächenindex (LAI = projected leaf area index) der Bestände wurde mit Hilfe der in Tabellen 3-8 und 3-9 aufgeführten Regressionsgleichungen berechnet und auf eine projizierte Grundfläche bezogen. Hierbei ergab sich für die gleichaltrigen 80-jährigen Untersuchungsbestände am Sperrgraben ein LAI von 6,6 (Buchen-Fichten-Mischbestand) bzw. 6,8 (Fichten-Reinbestand) (Tab. 3-11). Den niedrigsten LAI (= 6) weist der ca. 60-jährige Buchen-Fichten Mischbestand des Kranzberger Forsts auf.

Tabelle 3-11: Projizierte Blattflächenindecies (LAI = leaf area index) ( $m^2_{\text{Blattfläche}} m^{-2}_{\text{Boden}}$ ) der untersuchten Bestände **am Sperrgraben und im Kranzberger Forst.**

Gelände- betrachtung		Buchen-Fichten- Mischbestand	Fichten-Reinbestand	Buchen-Fichten- Mischbestand
		<b>Sperrgraben</b>	<b>Sperrgraben</b>	<b>Kranzberg</b>
LAI	projiziert	6,6	6,8	6,0

Die Tabellen 3-12 und 3-13 bieten eine Übersicht über die projizierten Oberflächen und Trockengewichte des Laubes aller Erntebäume im Kranzberger Forst und am Sperrgraben sowie Kraft-Klasse, Brusthöhendurchmesser, Splintfläche, Baumhöhe, projizierte Kronenfläche und SLA.

Tabelle 3-12: Strukturdaten und projizierte Lauboberfläche der geernteten **Buchen und Fichten im Kranzberger Forst** (Bearbeiter: \* R. Grote, \*<sup>1</sup> K. Patzner).

Baum- nummer	Kraft- Klasse	BHD [cm]	Splintfläche [m <sup>2</sup> ]	Baumhöhe [m]	projizierte Kronenfläche [m <sup>2</sup> ]	projizierte Lauboberfläche (A <sub>L</sub> ) [m <sup>2</sup> ]	Trockengewicht aller Blätter (TG <sub>L</sub> ) [kg]	SLA [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ]
<b>Kranzberger Forst: Buche*</b>								
700	2	30,8	0,06	24,8	34,6	97,1	3,8	26
800	3	10,8	0,01	13,9	17,9	15,0	0,5	30
900	2	19,6	0,02	24,4	22,4	18,4	0,7	26
1000	2	30,4	0,06	26,8	26,4	60,7	4,1	15
1100	2	23,3	0,03	26,2	13,2	41,5	1,7	24
1200	2	27,8	0,05	27,7	27,1	62,7	4,2	15
<b>Kranzberger Forst: Fichte*</b>								
100	2	36,3	0,06	30,5	19,3	158,4	40,1	4
200	2	34,3	0,05	27,0	19,6	99,8	24,4	4
300	2	28,5	0,04	27,0	15,4	68,9	17,0	4
400	2	28,7	0,04	24,1	10,5	87,9	22,1	4
500	2	33,3	0,05	25,2	17,9	130,2	32,5	4
600	2	19,5	0,02	20,0	11,9	59,0	13,5	4
374* <sup>1</sup>	2	32,7	0,05	26,4	17,9	238,5	33,3	7

Tabelle 3-13: Strukturdaten und projizierte Lauboberfläche der geernteten **Buchen und Fichten am Sperrgraben** (Bearbeiter: \*<sup>1</sup> K. Patzner, \*<sup>2</sup> W. Faltin).

Baum- nummer	Kraft- Klasse	BHD [cm]	Splintfläche [m <sup>2</sup> ]	Baumhöhe [m]	projizierte Kronenfläche [m <sup>2</sup> ]	projizierte Lauboberfläche (A <sub>L</sub> ) [m <sup>2</sup> ]	Trockengewicht aller Blätter (TG <sub>L</sub> ) [kg]	SLA [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ]
<b>Sperrgraben: Buche*<sup>1</sup></b>								
191	3	11,5	0,02	15,4	10,1	34,8	1,2	29
203	1	55,1	0,12	25,8	115,9	511,9	32,4	16
207	2	20,5	0,03	22,8	47,2	55,5	3,5	16
215	2	19,7	0,03	19,6	23,6	64,3	3,1	21
<b>Sperrgraben: Fichte*<sup>2</sup></b>								
1	2	19,1	0,01	20,5	15,1	27,2	13,6	2
2	2	23,9	0,02	20,5	18,9	34,8	16,9	2
3	1	40,1	0,05	21,2	31,7	149,9	119,0	1
5	1	48,4	0,07	29,7	38,3	207,7	134,9	2
6	2	31,8	0,03	26,0	25,2	44,5	35,3	1

### 3.1.1.2.3 Bestimmung der Anteile von Sonnen- und Schattenlaub in der Krone von Einzelbäumen und auf Bestandesebene

An gefälltten Buchen- und Fichten-Vergleichsbäumen (s. Kap. 3.1.1.2) wurde jeweils die Laubbiomasse einzelner Äste nach makroskopischen Kriterien (Nadel-/Blattgröße, -festigkeit und -farbe) prozentual in Sonnen-, Intermediär- und Schattenlaub unterteilt. Auf dieser Basis und gestützt auf die enge Korrelation zwischen Basisdurchmesser und Laubbiomasse der Äste (ECKMÜLLER 1987) wurden die Biomassen- und Flächenanteile (mittels SLA) der drei Laubtypen je Baumkrone berechnet.

Abbildung 3-14 zeigt exemplarisch für die Fichte 374 im Kranzberger Forst die Flächenanteile von Sonnen-, Intermediär- und Schattenlaub der Äste jedes Kronenabschnittes (Abschnittslänge ein Meter) innerhalb der gesamten, projizierten Kronennadelfläche. Der Anteil von Sonnen- und Intermediärbelaubung stieg mit zunehmender Baumhöhe an, entlang der obersten vier Stammhöhenmeter existierte ausschließlich Sonnenlaub. Zunehmende Anteile an Intermediärlaub vermittelten in den proximal gelegenen Astbereichen zur unteren Baumkrone, in der das Schattenlaub dominierte. Im gezeigten, repräsentativen Beispiel einer co-dominanten Bestandesfichte nahmen innerhalb der gesamten Kronenlaubfläche (ca. 239 m<sup>2</sup>) die Flächenanteile des Sonnenlaubs etwa 28 %, des Intermediärlaubs 25 % und des Schattenlaubs 47 % ein. Sonnen- und Intermediärlaub wiesen entlang der Stammhöhe ein ähnliches SLA auf (Abb. 3-14 B), so dass in weiteren Untersuchungen (z. B. Gaswechsel) der Flächenanteil des Intermediärlaubs jenem der Sonnenbelaubung zugerechnet wurde.

Abbildung 3-15 zeigt die Flächenanteile der drei Laubtypen für eine repräsentative Bestandesbuche (Nummer 215) am Sperrgraben. Das Verteilungsmuster entlang der Stammhöhe ähnelte dem bei Fichte, jedoch war das Sonnenlaub auf die obersten 30 cm der Stammlänge beschränkt. Nach einer kurzen Übergangszone mit Intermediärbelaubung trat innerhalb der unteren 2/3 der belaubten Stammlänge fast ausschließlich Schattenbelaubung auf. Innerhalb der projizierten Gesamtlaubfläche (ca. 64 m<sup>2</sup>) entfielen etwa 5 % auf das Sonnenlaub, 18 % auf das Intermediär- und 77 % auf das Schattenlaub. Ähnlich wie bei der Fichte war das projizierte Blattoberflächen- zu Blatttrockengewicht-Verhältnis (= specific leaf area; SLA) zwischen Sonnen- und Intermediärlaub entlang der Stammhöhe nicht unterscheidbar (Abb. 3-15 B), so dass auch bei Buche der Flächenanteil des Intermediärlaubes dem der Sonnenbelaubung zugerechnet wurde.

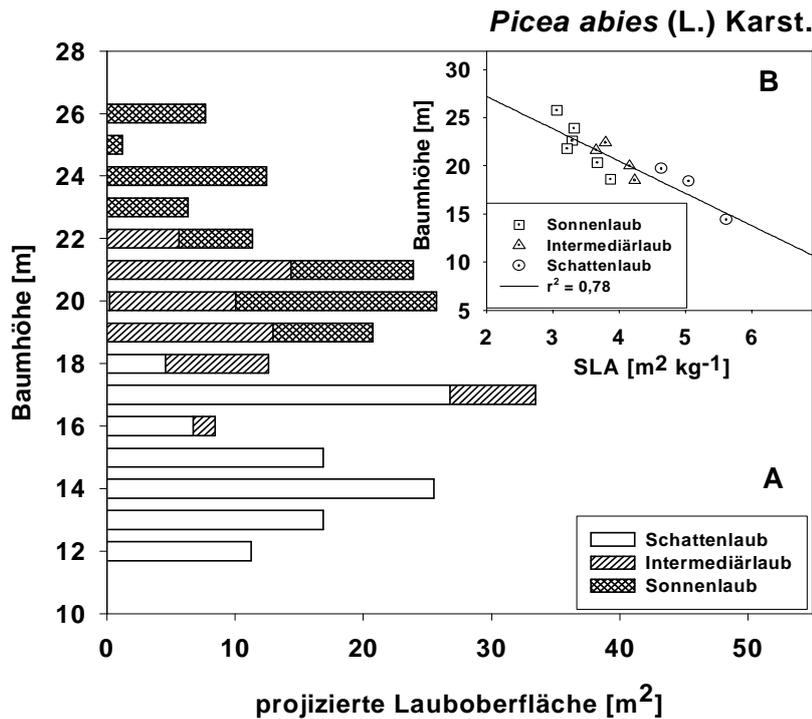


Abb. 3-14: A, Anteile von Sonnen-, Intermediär- und Schattenlaub an der projizierten Lauboberfläche der den einzelnen Meterabschnitten ansitzenden Äste entlang der Stammhöhe einer repräsentativen Bestandesfichte (Nr. 374, **Kranzberger Forst**). B, Beziehung zwischen SLA (specific leaf area) der drei Belaubungstypen und der Stammhöhe.

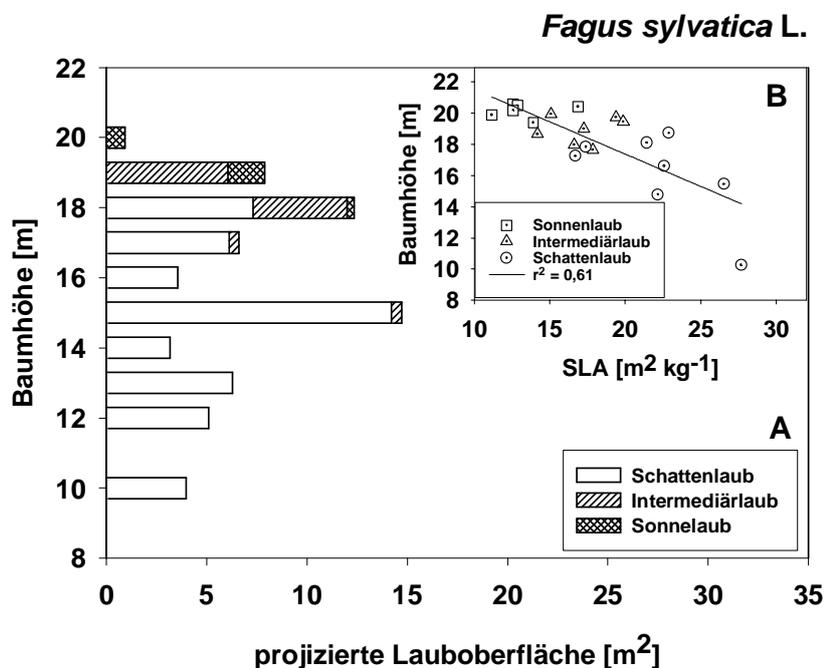


Abb. 3-15: A, Anteile von Sonnen-, Intermediär- und Schattenlaub an der projizierten Laubfläche der den einzelnen Meterabschnitten ansitzenden Äste entlang der Stammhöhe einer repräsentativen Bestandesbuche (Nr. 215, **Sperrgraben**). B, Beziehung zwischen SLA (specific leaf area) der drei Belaubungstypen und Stammhöhe.

## Ergebnisse

Die Abschätzung der Anteile von Sonnen-, Intermediär- und Schattenlaub erfolgte an vier Buchen am Sperrgraben und einer Fichte im Kranzberger Forst (Erntedaten Patzner, vgl. Tab. 3-12 und 3-13). Die zur Verfügung gestellten Daten anderer Bearbeiter ließen keine Aufschlüsselung der Blattoberflächen nach verschiedenen Laubtypen zu. Trotz der asymmetrischen Kronenausbildung durch die Hangneigung am Sperrgraben legten die ähnlichen Beziehungen zwischen Lauboberfläche und BHD im Kranzberger Forst als auch am Sperrgraben die Vermutung nahe, dass sich die Bäume weniger in der Laubfläche unterscheiden als ursprünglich angenommen. Unter dieser Annahme wurden gleiche Verteilungsmuster zwischen Sonnen- und Schattenlaub zugrunde gelegt. Die folgende Tabelle 3-16 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der Belaubungstypen an den vier Buchen unterschiedlicher Kraft-Klassen am Sperrgraben und einer Fichte (Kraft-Klasse 2) im Kranzberger Forst. Mit steigender Kraft-Klasse (3 bis 1) nimmt der Anteil der Sonnen-, und Intermediärbelaubung auf Kosten der Schattenbelaubung zu. So weist die Buche der Kraft-Klasse 3 100 % Schattenlaub auf, bei Buchen der Kraft-Klasse 2 sinkt hingegen der Schattenlaub-Anteil auf 63 und 77 % der Gesamtbelaubung ab. Die Anteile für das Sonnenlaub liegen in dieser Klasse zwischen 4 und 7 % und die der Intermediärbelaubung zwischen 18 und 30 %. Die Buche der Kraft-Klasse 1 weist 63 % Schatten-, 23 % Intermediär und 14 % Sonnenlaub auf. Bei der im Kranzberger Forst beprobten Fichte lagen die Anteile von Sonnenlaub an der Gesamtbelaubung bei 28 %, von Intermediärlaub bei 25 % und von Schattenlaub bei 47 %.

Tabelle 3-16: Prozentuale Anteile der drei Belaubungstypen an der Gesamt- Lauboberfläche der geernteten **Buchen am Sperrgraben** und der **Fichte im Kranzberger Forst**.

Baum- nummer	Kraft- Klasse	Sonnen- laub- oberfläche [%]	Intermediär- laub- oberfläche [%]	Schatten- laub- oberfläche [%]	Sonnen- laub- oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Intermediär- laub- oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Schatten- laub- oberfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>Sperrgraben: Buchen</b>							
191	3			100			19,9
203	1	6,9	29,9	63,1	31,5	136,3	287,6
207	2	4,4	18,3	77,3	2,6	10,8	41,4
215	2	13,8	23,1	63,1	8,4	14,0	38,2
<b>Kranzberger Forst: Fichte</b>							
374	2	27,9	24,7	47,4	66,5	58,9	113,0

Die in Tabelle 3-16 dargestellten Ergebnisse bildeten die Grundlage zur Hochrechnung der Flächenanteile von Sonn- und Schattenlaub auf Bestandesebene auf Basis der BHD vermessenen Bäume der Untersuchungsflächen (Tab. 3-17, s. auch Kap. 2.4.1). In Ermangelung weiterer Fichtendaten wurde für die Fichten-Klasse 1 und 3 jeweils Laubverteilungen analog zu entsprechenden Buchen angenommen (Kraft-Klasse 1 =

Umfang > 120 cm: 60 % Sonnen- und 40 % Schattenlaub, Kraft-Klasse 3 = Umfang < 60 cm wurden 100 % Schattenbelaubung). Bei Bezug auf die Belaubungsflächen der untersuchten Bestände entfallen unabhängig vom untersuchten Standort bei Fichten 41 bis 47 % und bei Buchen 71 bis 72 % der Gesamtblaubungsfläche auf das Schattenlaub (Tab. 3-17).

Tabelle 3-17: Prozentuale und absolute Anteile von Sonnen- und Schatten-Laub an der projizierten Gesamt- Lauboberfläche der Bestände **am Sperrgraben und im Kranzberger Forst.**

Bestandes- Sonnenlauboberfläche [%]	Bestandes- Schattenlauboberfläche [%]	Bestandes- Sonnenlauboberfläche (projiziert) [m <sup>2</sup> ]	Bestandes- Schattenlauboberfläche (projiziert) [m <sup>2</sup> ]
<b>Sperrgraben Mischbestand: Buchen</b>			
28,4	71,5	3126	7843
<b>Sperrgraben Mischbestand: Fichten</b>			
58,4	41,6	8747	6230
<b>Sperrgraben Reinbestand: Fichten</b>			
58,9	41,1	12319	8594
<b>Kranzberger Forst Mischbestand: Buchen</b>			
28,8	71,2	1901	4693
<b>Kranzberger Forst Mischbestand: Fichten</b>			
52,6	47,4	13252	11957

### 3.1.1.3 Splintflächenanalyse

Die Splintquerschnittsfläche im Stamm der Einzelbäume sowie die kumulative Bestandessplintfläche stellen Basis-Parameter für die Ermittlung der Baum- und Bestandestranspiration aus Xylemflussdaten dar (Granier 1985): Je Einzelbaum ist die punktuell gemessene Xylemflussdichte mit der entsprechenden Splintquerschnittsfläche zu multiplizieren. Aus diesem Grund wurden sowohl am Sperrgraben als auch im Kranzberger Forst Bohrkerne auf Höhe der Xylemfluss-Sensoren entnommen und visuell der Übergang von Splint- zum Reifholzbereich bestimmt (s. Kap. 2.4.6.1).

## Ergebnisse

Auf der Basis der aus beiden Bohrkernen je Baum gemittelten Splintbreiten wurden kreisförmige Splintquerschnittsflächen berechnet.

Für Fichte und Buche besteht eine enge Beziehung zwischen der in Brusthöhe bestimmten Splintquerschnittsfläche und dem Brusthöhenumfang (= BHU) des Stammes (Abb. 3-18). Diese Beziehung ist für den Tieflagen-Bestand Kranzberger Forst enger als für den montanen Bestand am Sperrgraben. Da auch eine getrennte Betrachtung der beprobten Fichten des Misch- und Reinbestandes am Sperrgraben keine Änderung im Bestimmtheitsmaß erbrachte, wurden die Datensätze beider Bestände vereint. Des weiteren ergab ein Vergleich dominanter Individuen beider Baumarten, dass in der Hochlage bei gegebenem BHU eine geringere Splintquerschnittsfläche vorhanden war als in der Tieflage.

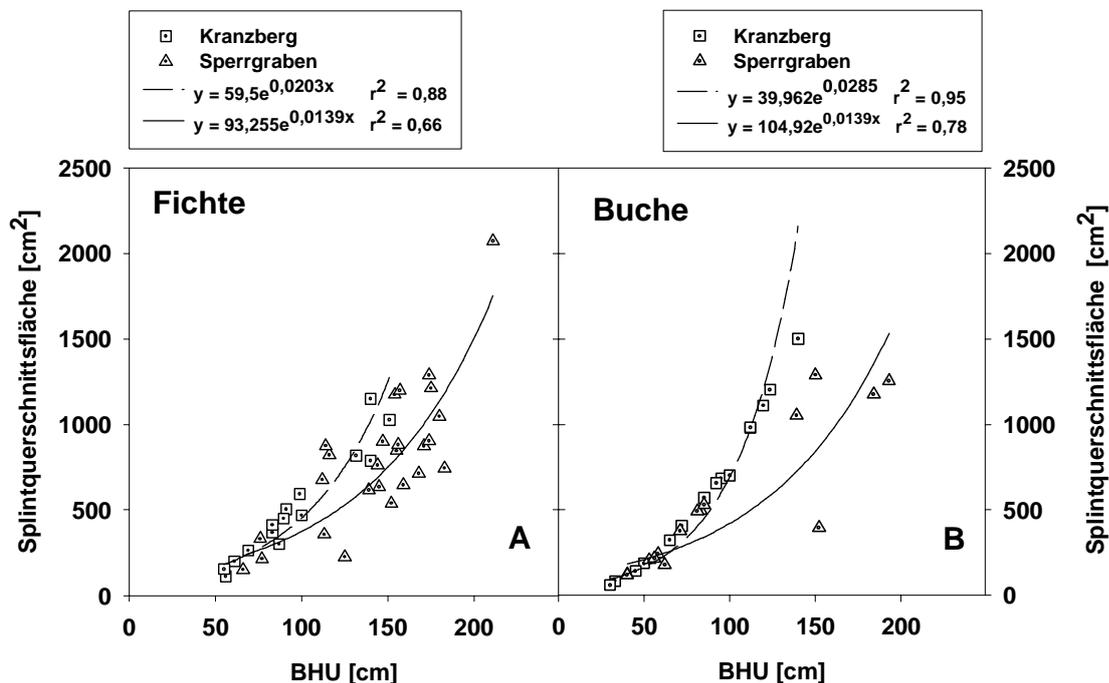


Abb. 3-18: Beziehung zwischen Brusthöhenumfang (BHU) und den aus Bohrkernanalysen in Brusthöhe bestimmten Splintquerschnittsflächen bei Fichte und Buche **im Kranzberger Forst und am Sperrgraben**.

Die Splintquerschnittsfläche in Brusthöhe der untersuchten Bestände wurde anhand einer pro Baumart und Standort getrennt durchgeführten Regressionsanalyse ermittelt (Abb. 3-18). Die höchste kumulative Splintquerschnittsfläche in Brusthöhe wurde im ca. 60-jährigen Kranzberger Forst mit  $32,15 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  gemessen (s. auch Kapitel 3.2.5 Tabelle 3-46). Davon entfielen  $10,81 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  auf Buche und  $21,34 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  auf Fichte. Im 80-jährigen Mischbestand am Sperrgraben war die kumulative Querschnittsfläche mit  $26,46 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  die niedrigste der verglichenen Bestände: Es entfielen auf die Buche  $9,99 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , was 92 % des Splintquerschnittsanteils der Buche im Kranzberger Forst entsprach. Fichte erreichte auf der Mischbestandesfläche am Sperrgraben mit  $16,47 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  77 % ihres Splintquerschnittsanteils im Kranzberger Forst. Im 80-jährigen Fichten-Reinbestand am Sperrgraben betrug die kumulative Querschnittsfläche  $29,69 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ .

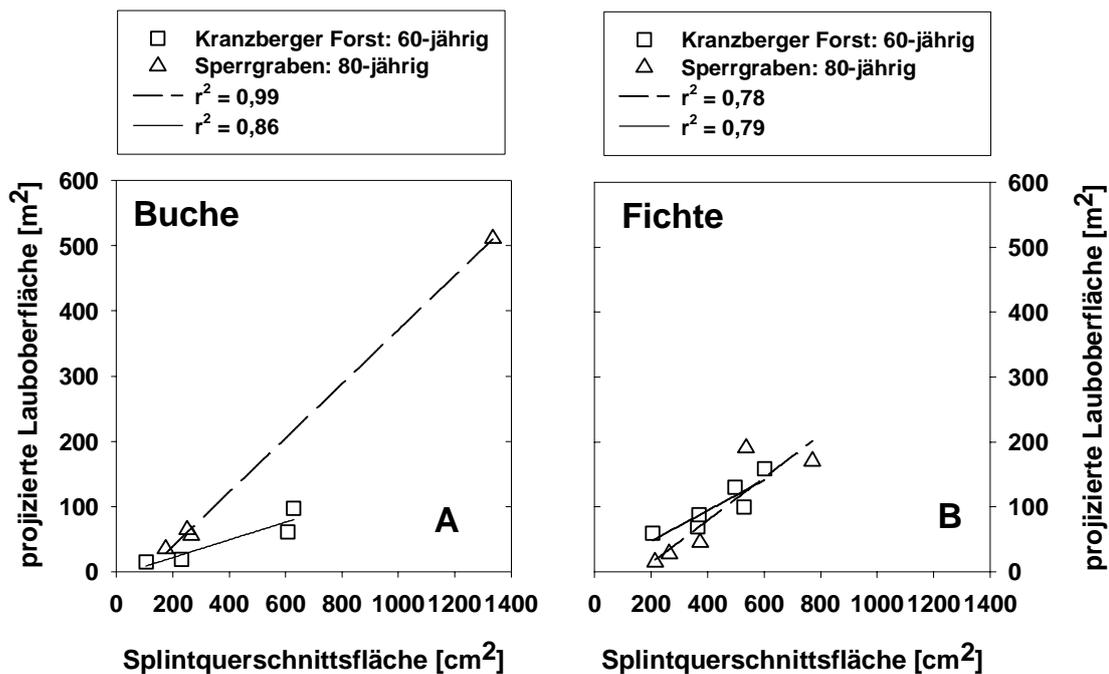


Abb. 3-19: Korrelation von Splintfläche mit der projizierten Lauboberfläche der Erntebäume unterschiedlichen Alters und Brusthöhendurchmessers bei Fichte und Buche im **Kranzberger Forst und Sperrgraben**.

Die Wasserleitung über die Splintfläche muss eine ausreichende Wasserversorgung der transpirierenden Baumkrone gewährleisten, um Wasserdefizite im Laub zu vermeiden. Folglich gibt es eine lineare Beziehungen zwischen der Größe der Splintquerschnittsfläche und der gesamten am Baum befindlichen Lauboberfläche, welche über die entsprechende Splintfläche mit Wasser versorgt wird (Abb. 3-19). Die korrelativen Beziehungen für die Erntebäume im Kranzberger Forst und Sperrgraben sind sehr eng und die Bestimmtheitsmaße liegen für Buche zwischen 0,9 und 1 und für Fichte bei 0,8. Ein Vergleich der beiden Untersuchungsflächen zeigt, dass bei Buche am Sperrgraben bei gleicher Splintquerschnittsfläche tendenziell eine größere Lauboberfläche versorgt wird als im Kranzberger Forst. Bei Fichte sind keine standortsspezifischen Effekte erkennbar (Abb. 3-19).

Um Unterschiede zwischen den drei untersuchten Beständen herauszuarbeiten, wurden die mittleren projizierten  $A_L/A_S$ -Verhältnisse (projizierte Lauboberflächen zu Splintquerschnittsflächen-Verhältnis = „Huber-Value“, TYREE & ZIMMERMANN 2002) in Beziehung zu den Bestandesdichten gesetzt (Abb. 3-20). Der Quotient zeigte keine Höhenabhängigkeit und ist unabhängig von der Bestandesdichte. Zwar nahm tendenziell mit zunehmender Bestandesdichte bei den Buchen-Fichten-Mischbeständen das mittlere projizierte  $A_L/A_S$ -Verhältnis ab, jedoch waren sich die Quotienten in dem ca. 60-jährigen dichten Bestand des Kranzberger Forsts (776 Bäume  $ha^{-1}$ ) und dem lichterem ca. 80-jährigen Mischbestand am Sperrgraben (559 Bäume  $ha^{-1}$ ) mit 0,18  $m^2$  zu 0,21  $m^2$  Lauboberfläche pro  $cm^2$  Splintfläche (gemessen in Brusthöhe) sehr ähnlich. Beim Vergleich der beiden Bestände am Sperrgraben zeigt sich, dass der Mischbestand trotz höherer Bestandesdichte ein vergleichbares

## Ergebnisse

$A_L/A_S$ -Verhältnis wie der Reinbestand aufweist. Sowohl beim Reinbestand (440 Bäume  $ha^{-1}$ ) als auch beim Mischbestand lag das  $A_L/A_S$ -Verhältnis bei je  $0,21 m^2$ .

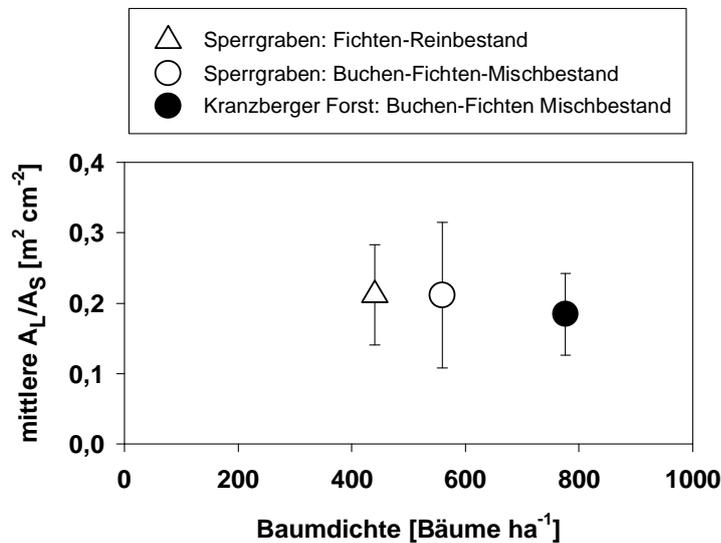


Abb. 3-20: Beziehung zwischen Bestandesdichte und den pro Grundfläche bezogenen mittleren projizierten Lauboberflächen zu Splintquerschnittsflächen-Verhältnis ( $A_L/A_S$ -Verhältnis = „Huber-Value“) der drei untersuchten Bestände. (Fehlerbalken = Standardabweichung).

### 3.1.2 Klima der Untersuchungsflächen im Vergleich

#### 3.1.2.1 Witterungsbedingungen im Sperrgraben

Abbildung 3-23 zeigt den saisonalen Verlauf der Witterung während der Vegetationsperioden (1. Mai bis 10. Oktober) der Jahre 1999-2001 am Sperrgraben, während Tab. 3-21 und 3-22 die Witterungsbedingungen als Monatsmittelwerte für die Monate Mai bis September zusammenfasst.

Die drei Vegetationsperioden unterschieden sich nur geringfügig in den mittleren Monatstemperaturen (Tab. 3-22, entsprechend maximale und minimale Temperaturen). Nur 2001 traten im Juni und im September Spät- bzw. Frühfröste auf, die jedoch in diesen Monaten in der montanen Stufe nicht ungewöhnlich sind. Die höchsten mittleren Monatstemperaturen wurden 2000 und 2001 jeweils im August und 1999 im Juli erreicht. Im Mai 1999 traten die Niederschläge des „Pfungsthochwassers“ mit monatlichen 431 mm deutlich zutage (Tab. 3-21; allein am 20./21. 5.1999 über 240 mm, sonst der Monatssumme entsprechend). Der Mai 2000 sowie der September 1999 und 2000 waren niederschlagsarm (7,2, 46,6 bzw. 3,6 mm). Hingegen wies das Jahr 2001 gleichmäßig hohe Niederschläge während der gesamten Vegetationsperiode auf. Das mittlere monatliche Tagesmaximum des Wasserdampfdefizits ( $D_{max}$ ) war während der Vegetationsperiode 2000 deutlich höher als in den Jahren 1999 und 2001, auch in Monaten mit hohem Niederschlag. Die mittleren über den Tag integrierten Summen der Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD) waren besonders

im September 2001 niedrig (Abb. 3-23), was auf die zahlreichen Regentage (20 Tage mit mehr als 1 mm Niederschlag) zurückzuführen war.

Tabelle 3-21: Mittlere Tagessumme der Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD), mittleres Tagesmaximum des Wasserdampfsättigungsdefizits ( $D_{max}$ ) und Niederschlagsmenge je Monat während der Vegetationsperioden 1999, 2000 und 2001 im **Sperrgraben**.

	mittlere, tägliche Photonenflussdichte PPFD [mol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]			mittleres tägliches $D_{max}$ [hPA]			monatliche Niederschlagssumme [mm]		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001	1999	2000	2001
Mai	18,9	18,5	24,6	7,0	11,7	8,0	431,2	7,2	151,1
Juni	19,7	24,2	21,6	5,9	13,9	7,2	224,4	225,4	302,8
Juli	19,7	19,9	22,5	7,2	13,7	9,5	182,8	242,2	154,5
August	16,8	21,6	20,9	7,2	15,3	9,2	124,4	102,4	216,2
September	17,2	17,0	9,9	7,6	10,7	3,3	3,6	46,6	253,2

Tabelle 3-22: Maximale, minimale und mittlere Lufttemperatur ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_{mittel}$ ) je Monat während der Vegetationsperioden 1999, 2000 und 2001 im **Sperrgraben**.

	$T_{max}$ [°C]			$T_{min}$ [°C]			$T_{mittel}$ [°C]		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001	1999	2000	2001
Mai	22,8	22,8	22,8	1,5	-0,4	2,3	11,3	10,1	11,5
Juni	24,0	25,2	26,5	2,0	3,6	-0,4	10,7	14,1	10,9
Juli	27,8	24,0	26,2	6,0	2,5	6,6	14,4	11,4	14,9
August	24,3	27,7	25,7	6,0	8,8	6,4	13,8	16,0	15,3
September	22,5	22,4	19,9	5,2	3,9	0,0	13,3	11,7	7,4

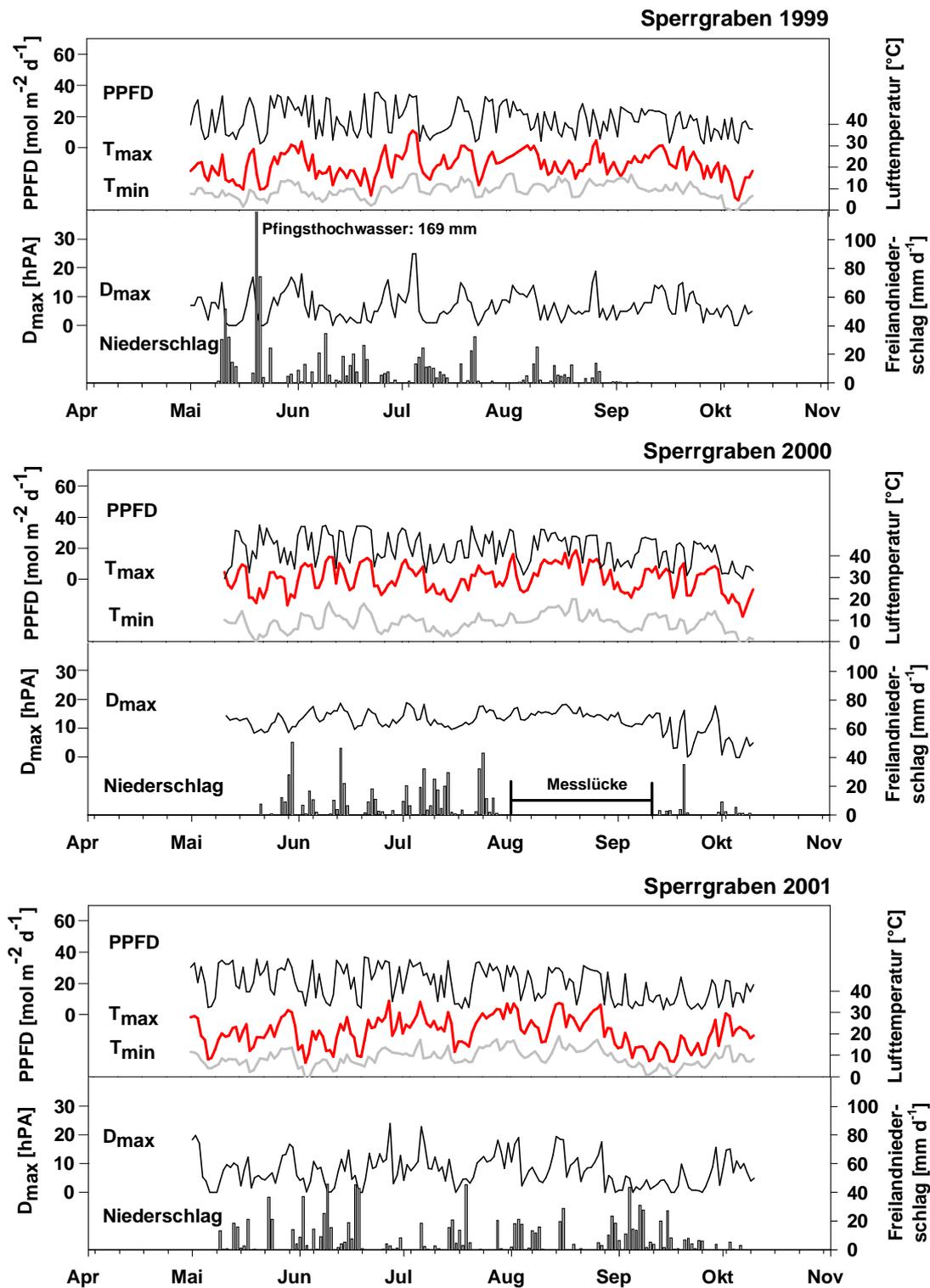


Abb. 3-23: Saisonaler Verlauf der Tagessummen der photosynthetischen Photonflussdichte (PPFD), der maximalen und minimalen Lufttemperatur, des maximalen Wasserdampfsättigungsdefizits (D<sub>max</sub>) sowie des Freiland-Niederschlags während der Vegetationsperioden 1999, 2000 und 2001 am **Sperrgraben**. Je Messjahr wird jeweils der Zeitraum von 1. Mai bis 10. Oktober dargestellt.

### 3.1.2.2 Witterungsbedingungen im Kranzberger Forst

Abbildung 3-26 zeigt den saisonalen Verlauf der Witterung während der Vegetationsperioden (31. März bis 31. Oktober) der Jahre 1999-2001 im Kranzberger Forst. Ausgeprägter als bei den Witterungsverläufen im Sperrgraben, war in den drei Untersuchungs Jahren im Kranzberger Forst von Ende März bis Ende Juli ein kontinuierlicher Anstieg und ab August und September ein fortlaufender Abfall der maximalen und minimalen Temperaturen zu beobachten.

Die Tabellen 3-24 und 3-25 stellen für den Kranzberger Forst die Witterungsbedingungen als Monatsmittelwerte während der Vegetationsperioden der Jahre 1999-2001 (Zeitraum April bis Oktober) dar. Ähnlich wie am Sperrgraben unterschieden sich die drei Vegetationsperioden nur geringfügig in den mittleren, maximalen und minimalen Monatstemperaturen. In den Jahren 2000 und 2001 traten im Juli und Juni um ca. 3 °C niedrigere Temperaturen auf als in den Monaten der Vergleichsjahre. Die höchsten mittleren Monatstemperaturen wurden 1999 im Juli und 2000 und 2001 jeweils im August erreicht. Die mittlere Temperatur des Septembers 1999 war im Vergleich zu den anderen Messjahren deutlich erhöht. Im vergleichsweise niederschlagsarmen Jahr 1999, lagen die höchsten Niederschläge im Mai mit 110 mm, hierbei fiel das Pfingsthochwasser vom 21. Mai mit 43 mm am Stärksten ins Gewicht. (vgl. Abb. 3-26) Eine ähnlich hohe monatliche Niederschlagsmenge fiel im Jahr 2000 im Juli (129 mm). Das Jahr 2001 wies innerhalb der Vegetationsperiode höhere Niederschläge auf als die Jahre 1999 und 2000. In den Monaten Juni, August und September wurden jeweils monatliche Niederschlagssummen von über 100 mm erreicht. Vergleichbar zu den Niederschlägen fiel das mittlere monatliche Tagesmaximum des Wasserdampfdefizits ( $D_{max}$ ) während der Vegetationsperiode 1999 häufig niedriger aus als in den Jahren als 2000 und 2001. Im Gegenzug wies das niederschlagsreiche Jahr 2001 ein meist höheres mittleres monatliche Tagesmaximum des Wasserdampfdefizits ( $D_{max}$ ) auf. Ähnlich wie am Sperrgraben war auch im Kranzberger Forst die mittlere über den Tag integrierte Summe der Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD) im September 2001 am niedrigsten (Abb. 3-26), was auf die ebenfalls zahlreichen Regentage (19 Tage mit mehr als 1 mm Niederschlag) zurückzuführen war.

## Ergebnisse

Tabelle 3-24: Mittlere Tagessumme der Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD), mittleres Tagesmaximum des Wasserdampfsättigungsdefizits ( $D_{\max}$ ) und Niederschlagsmenge je Monat während der Vegetationsperioden 1999, 2000 und 2001 im **Kranzberger Forst**.

	mittlere, tägliche Photonenflußdichte PPFD [mol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]			mittleres tägliches $D_{\max}$ [hPA]			monatliche Niederschlagssumme [mm]		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001	1999	2000	2001
April	32,3	32,1	28,4	6,3	9,6	6,6	73,1	68,0	53,4
Mai	38,0	38,9	41,7	8,5	11,0	12,8	110,6	96,9	51,6
Juni	41,9	47,2	40,1	9,7	13,0	10,9	79,0	69,6	118,4
Juli	42,2	34,0	39,7	11,0	7,5	15,5	76,0	129,3	52,5
August	32,7	37,8	35,7	5,0	12,2	15,7	60,6	68,6	103,3
September	28,4	24,0	17,0	11,2	7,5	4,7	65,1	97,6	139,4
Oktober	17,5	11,1	16,8	5,8	4,4	7,01	41,1	84,8	46,8

Tabelle 3-25: Maximale, minimale und mittlere Lufttemperatur ( $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{mittel}}$ ) je Monat während der Vegetationsperioden 1999, 2000 und 2001 im **Kranzberger Forst**.

	$T_{\max}$ [°C]			$T_{\min}$ [°C]			$T_{\text{mittel}}$ [°C]		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001	1999	2000	2001
April	14,7	17,6	16,0	0,8	2,2	0,3	8,7	9,9	6,9
Mai	21,7	21,2	22,0	9,4	8,9	8,8	14,5	14,7	15,6
Juni	21,2	23,3	21,0	11,4	11,8	8,0	15,5	17,5	14,4
Juli	25,6	21,7	23,1	13,3	9,9	12,4	18,8	15,1	18,0
August	22,3	24,2	24,0	13,9	14,7	13,3	17,3	18,3	18,6
September	18,9	17,6	15,1	12,4	9,7	8,2	16,2	13,5	10,9
Oktober	13,0	15,4	18,7	3,8	5,6	9,4	8,8	9,8	12,1

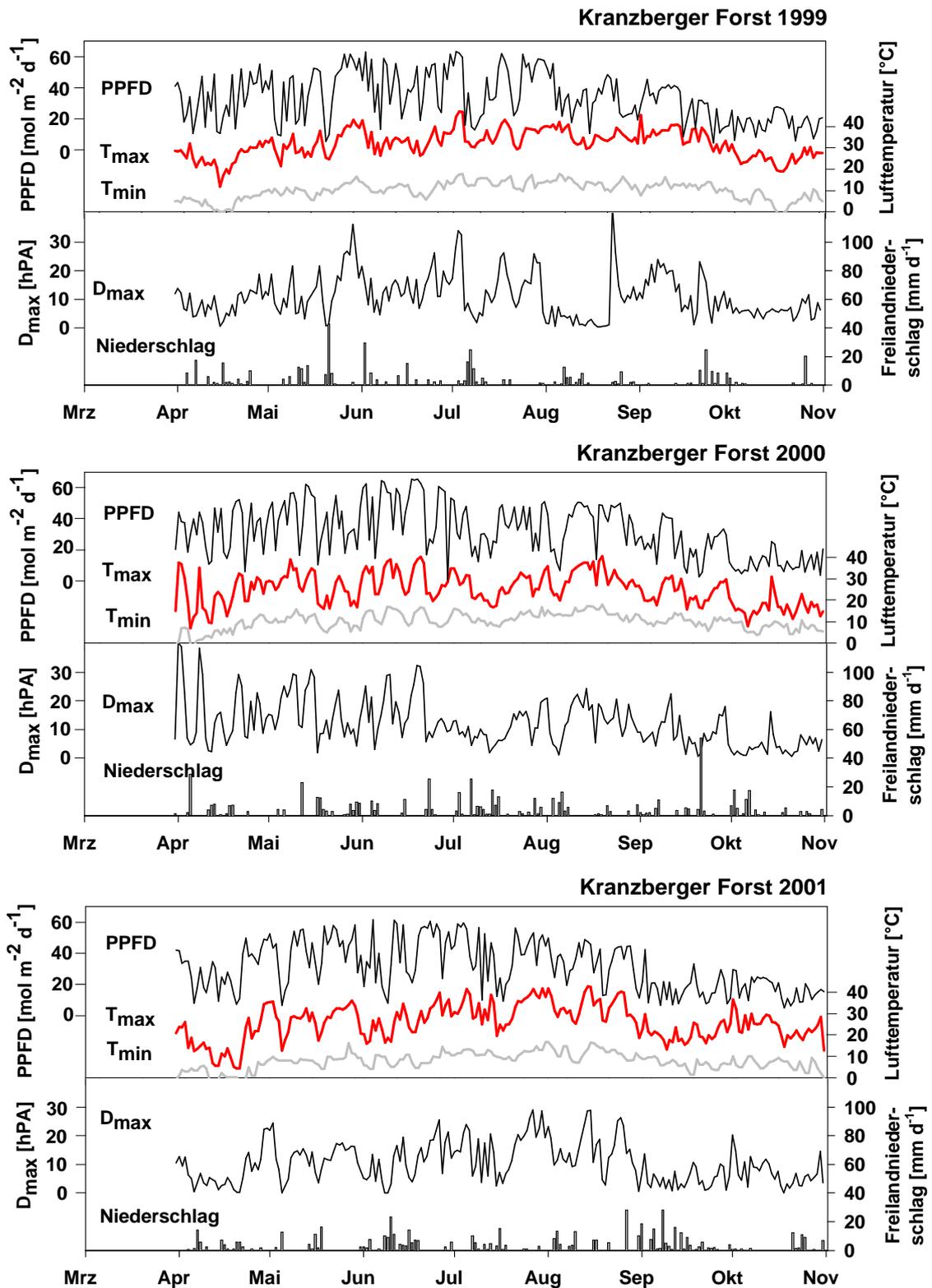


Abb. 3-26: Saisonaler Verlauf der Tagessummen der photosynthetischen Photonenflussdichte (PPFD), der maximalen und minimalen Lufttemperatur, des maximalen Wasserdampfsättigungsdefizits ( $D_{\text{max}}$ ) sowie des Freiland-Niederschlags während der Vegetationsperioden 1999, 2000 und 2001 im **Kranzberger Forst**. Je Messjahr ist jeweils der Zeitraum von 31. März bis 31. Oktober dargestellt.

### 3.1.2.3 Vertikalgradient des Mikroklimas im Mischbestand am Sperrgraben

Die Abbildungen 3-27 und 3-28 stellen die mittleren Stundenwerte der Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD) sowie der Lufttemperatur entlang eines Höhenprofils einer im Zentralbereich der Mischbestandesfläche am Sperrgraben stehenden Buche (s. Kap. 2.5.2) dar. Gleichzeitig findet ein Vergleich der Ergebnisse der eigenen Höhenprofilmessungen und der Klimaaufzeichnungen der benachbarten Klima-Station der TU-Dresden statt. Beide Abbildungen zeigen für den Beispieltag am 11.06.1999 einen synchronen Witterungsverlauf zwischen Klimastation und den Messfühlern des Buchenhöhenprofils. Allerdings weist die Klimastation gedämpftere mittlere Strahlungsdichten und Temperaturen auf als die oberhalb und innerhalb der Baumkrone (22 m bis 15 m ) installierten Fühler des Höhenprofils. Diese Dämpfung tritt bei der Strahlung besonders stark während des frühen Nachmittags (ca. gegen 14:00 Uhr) auf. Abbildung 3-27 zeigt, dass die mittleren Strahlungsdichten der Klima-Station der TU-Dresden zu dieser Zeit fast um die Hälfte niedriger sind. Bei der Lufttemperatur (Abb. 3-28) ist diese Tendenz weniger stark ausgeprägt, aber auch hier liegen in der Mittagszeit die in 22 m, oberhalb der Buchenkrone gemessenen Temperaturen leicht über denen der Klimastation. Tendenziell zeigt das Höhenprofil entlang der Buche eine Abnahme der Strahlungsdichte und Lufttemperatur mit sinkender Messfühlerhöhe, wobei es aber zu keiner klaren Abstufung kommt (Abb. 3-27 und 3-28). Vielmehr ist zu erkennen, dass sich in Messhöhen von 17 m bis 12 m und 8 m bis 0,2 m die Strahlungsdichte kaum unterscheidet (maximale Unterschiede in der Mittagszeit bei ca.  $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Bei den Lufttemperaturen liegen die Temperaturkurven von 17 m bis 0,2 m noch näher zusammen und zeigen maximale Unterschiede von  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

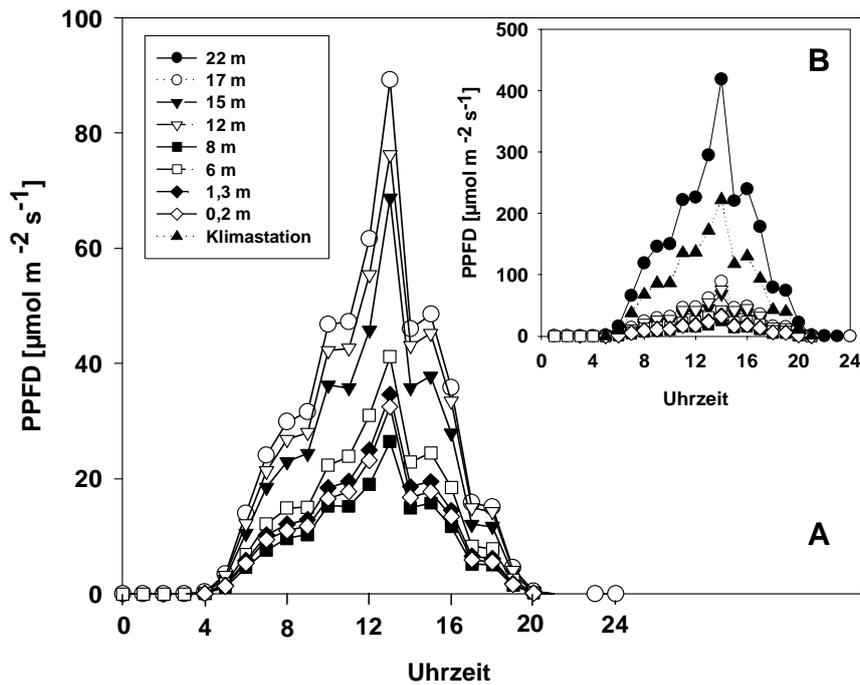


Abb. 3-27: A, Detailstudie des Strahlungsprofils in einer Messhöhe von 17 bis 0,2 m. B, Vergleich der entlang eines Buchenhöhenprofils im Mischbestand von Bodennähe (0,2 m) bis über den Bestand (22 m) gemessenen mittleren Photonendichte der photosynthetisch aktiven Strahlung mit Strahlungsdaten der Klimastation der TU-Dresden am **Sperrgraben** für einen Beispieltag im Juni 1999 (11.06.1999).

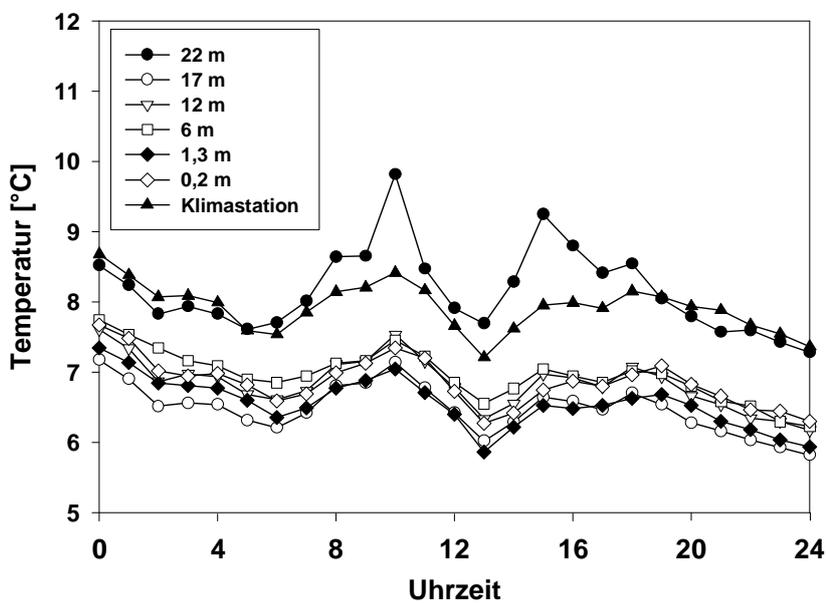


Abb. 3-28: Vergleich der mittleren stündlichen Lufttemperatur entlang eines Buchenhöhenprofils im Mischbestand von Bodennähe (0,2 m) bis über den Bestand (22 m) mit Temperaturwerten der Klimastation der TU-Dresden am **Sperrgraben** für einen Beispieltag im Juni 1999 (11.06.1999).

### 3.2 Untersuchungen der Xylemflussmessungen auf Einzelbaum- und Bestandesebene

#### 3.2.1 Variabilität der Flussdichte auf zwei Stammseiten

Auf allen Untersuchungsflächen wurden die Xylemflussmessungen auf der Nordseite der Stämme durchgeführt, um mögliche thermische Einflüsse, die trotz Schutzverkleidung um die Fühler auftreten können, zu minimieren. Schon mehrere Autoren (GRANIER 1987a, LU ET AL. 2000, OREN ET AL. 1999) haben die Variabilität der Xylemflussdichte innerhalb eines Stammes beschrieben, was bei Integration der Flussdichte vom Messbereich eines einzelnen Sensors auf die gesamte Splintquerschnittsfläche des Baumes zu unterschiedlichen Transpirationsergebnissen führen kann. Um diese Variabilität zu berücksichtigen, wurden die Messbäume im Kranzberger Forst mit zusätzlichen Fühlern auf der Südseite der Stämme ausgestattet. Tatsächlich traten unterschiedliche Flussdichten auf beiden Stammseiten auf. In der Regel lag die gemessene Xylemflussdichte auf der Südseite eines Baumes über den Messungen der Nordseite. Abbildung 3-29 zeigt dies für die Buche 408 und Fichte 521 im Kranzberger Forst. Die dargestellten Messtage zeigen sowohl bei Buche als auch bei Fichte, dass die Unterschiede der Xylemflussdichten auf beiden Stammseiten während einzelner Tage schwanken können. So lag die Differenz zwischen dem Nord- und Südfühler bei fast konstanten Witterungsverhältnissen im Darstellungszeitraum vom 01. - 03.07.1999 bei Buche zwischen 33 bis 40 % und bei Fichte bei 3 bis 29 %. Bei nicht konstanten Witterungsverhältnissen steigen diese Unterschiede innerhalb eines Stammes an. Im großen und ganzen sind die Unterschiede der Xylemflussdichten innerhalb eines Stammes geringer als die Unterschiede, die zwischen verschiedenen Individuen einer Baumart bei gleichbleibender Witterung gemessen werden können (Abb. 3-30). Die Unterschiede zwischen den Individuen einer Baumart reichten von minimalen Unterschieden von ca. 6 bis 7 % bei Buche und Fichte bis zu über 120 % bei Fichte und 150 % bei Buche (Bezugsgröße jeweils Nordfühler). Die über alle Bäume einer Art (Anzahl jeweils  $n = 10$ ) gemittelten Unterschiede der Xylemflussdichte zwischen den Messungen der Nord- und Südseite betragen für Fichte 29 % (+/- 11 % Standardabweichung) und bei Buche 36 % (+/- 8 % Standardabweichung).

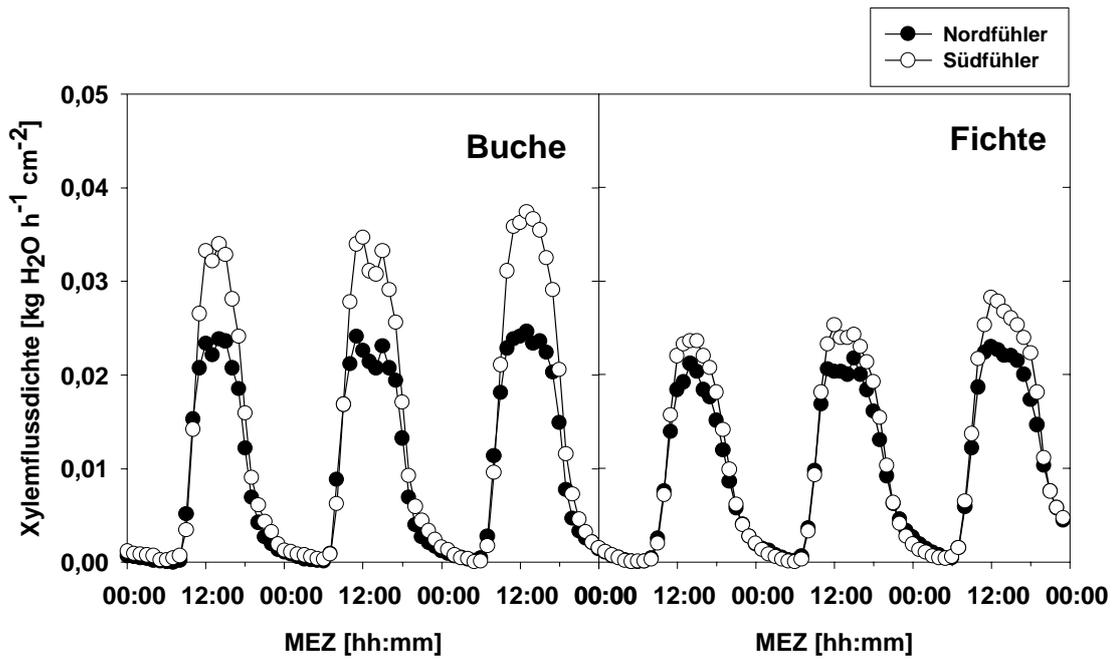


Abb. 3-29: Vergleich der auf zwei Stammseiten gemessenen Xylemflussdichten im Tagesverlauf dreier Messtage ähnlicher Witterung (Messzeitraum 01. - 03.07.1999). Die Messungen erfolgten bei der Buche 408 und der Fichte 521 in Brusthöhe des Stammes (ca. 1,3 m). Die Xylemflussdichte ist als Xylemfluss pro cm<sup>2</sup> Splintfläche angegeben. (MEZ = mitteleuropäische Zeit).

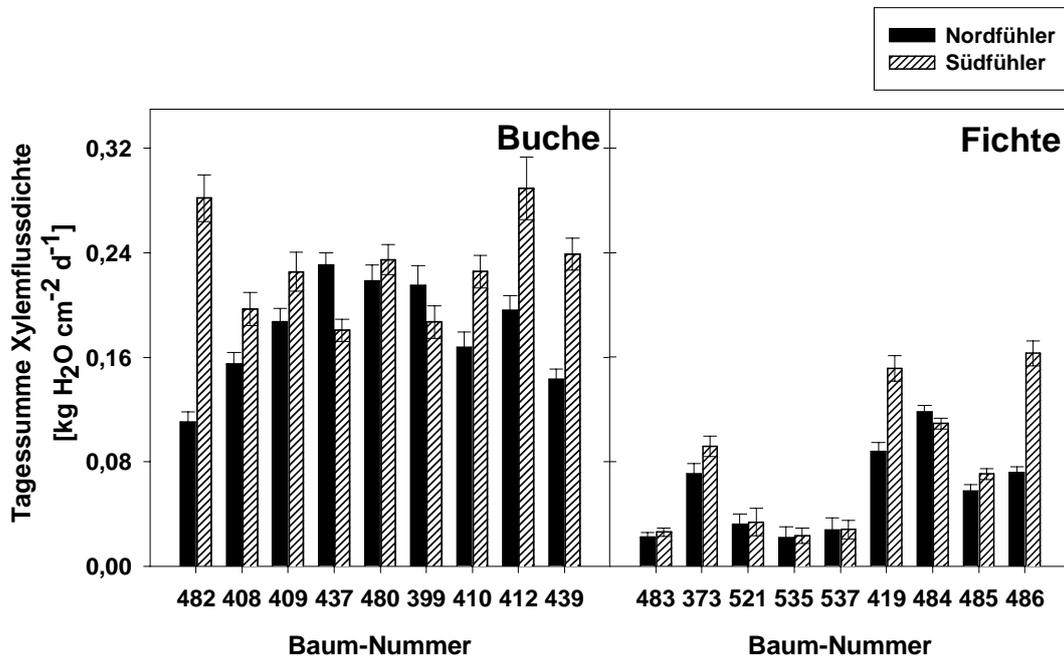


Abb. 3-30: Darstellung der Flussdichtenvariabilität zweier Stammseiten (Messhöhe in ca. 1,3 m) innerhalb verschiedener Buchen und Fichten im **Kranzberger Forst**. Gezeigt werden mittlere Flussdichten pro Baum bei vergleichbarer Witterung während der Woche vom 29.07. - 04.08.1999 und ihre Standardabweichungen.

## 3.2.2. Xylemfluss in verschiedenen Splinttiefen

Das Sensorensystem nach Granier ist auf die punktuelle Messung des Xylemflusses in den äußeren 2 cm des Splintholzes eines Stammes ausgelegt. Meist wird daher die ermittelte Flussdichte bei der Berechnung des Gesamt-Xylemflusses im Baum als repräsentativ für die gesamte Splintfläche angenommen (GRANIER 1985, LANG 1999). Angesichts der bekannten Variabilität des Xylemflusses im Stamm, wurden in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Tenhunen (Pflanzenökologie, Universität Bayreuth), Sensoren mit verlängertem Schaft gebaut, um exemplarisch die Xylemflussdichte auch in Splinttiefen von 20 bis 40 mm und 40 bis 60 mm messen zu können.

Abbildung 3-31 stellt Tagesmittelwerte der Xylemflussdichte in drei verschiedenen Splintholzstiefen bei je zwei Buchen und Fichten des Kranzberger Forsts dar. Die Mittelwerte und Standardabweichungen wurden von 93 Messtagen der Jahre 1999 bis 2001 berechnet. Die angegebenen Exponentialfunktionen beschreiben die mittlere Abnahme der Xylemflussdichte mit zunehmender Entfernung vom Kambium. Die Bestimmtheitsmaße liegen für Buche im Bereich von 0,9 und für Fichte bei 1. Bei Buche liegt das Verhältnis vom äußeren Fühler (Messtiefe = 2 cm) zum mittleren (Messtiefe = 4 cm) bei 1,16 und zum inneren (Messtiefe = 6 cm) bei 2,31. Bei Fichte sind die Verhältnisse höher und bewegen sich vom äußeren Fühler zum mittleren in einer Größenordnung von 2,96 und zum inneren von 4,71 (s. auch Kap. 2.7.7).

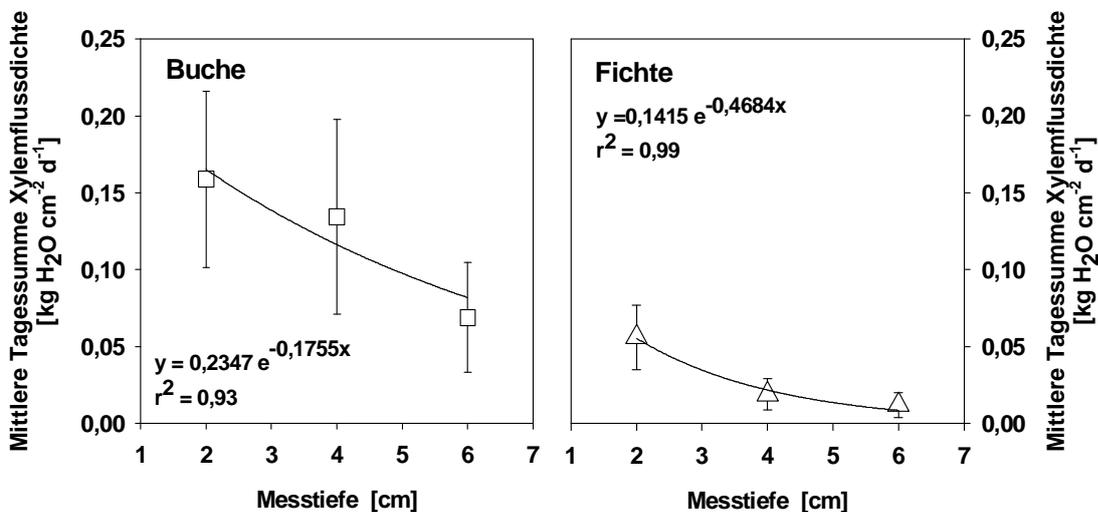


Abb. 3-31: Tagesmittelwerte der Xylemflussdichte in drei verschiedenen Splintholzstiefen bei je 2 Buchen und Fichten des Kranzberger Forsts. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichungen von 93 Tagen der Jahre 1999 bis 2001. Die Funktion beschreibt die mittlere Abnahme der Xylemflussdichte mit zunehmender Entfernung vom Kambium.

In Abbildung 3-32 werden für Fichten im Kranzberger Forst und im Sperrgraben die über ganze Tage integrierten Flußdichten im äußeren Splintbereich (0 bis 20 mm) mit den entsprechenden Summen der inneren Splintbereiche verglichen. Im Kranzberger Forst nahm die Xylemflussdichte mit zunehmender Splinttiefe ab (Abb. 3-32A, C), was

sich mit Beobachtungen anderer Autoren deckt (ALSHEIMER 1997, KÖSTNER ET AL. 1998, LANG 1999, LU ET AL. 2000, WULLSCHLEGER ET AL. 2000). In 40 bis 60 mm Tiefe beträgt die Abnahme etwa 70 % des Niveaus des äußeren Splints (Tab. 3-33). Dagegen zeigten am Sperrgraben nur einige Fichten eine ähnliche Tendenz (Abb. 3-32B, D). In den übrigen Individuen blieb die Flussdichte entweder im gesamten Splintbereich annähernd konstant oder stieg in Richtung Reifholzbereich an, z. T. um bis zu 100 % im Vergleich zum äußeren Splint (Tab. 3-35). Auch Buche zeigte im Kranzberger Forst eine Abnahme der Flussdichte in zentripetaler Richtung (Abb. 3-34A, C), wenn auch unregelmäßig um ca. 3 bis 49 % (Tab. 3-33). Im Sperrgraben ergab sich kein einheitliches Bild: Die Flussdichte konnte in der gesamten Splintbreite unverändert sein, in 20 bis 40 mm Splinttiefe abfallen oder beständig und deutlich (manchmal erst in der Tiefe 40 bis 60 mm) zunehmen (Abb. 3-34B, D; Tab. 3-35).

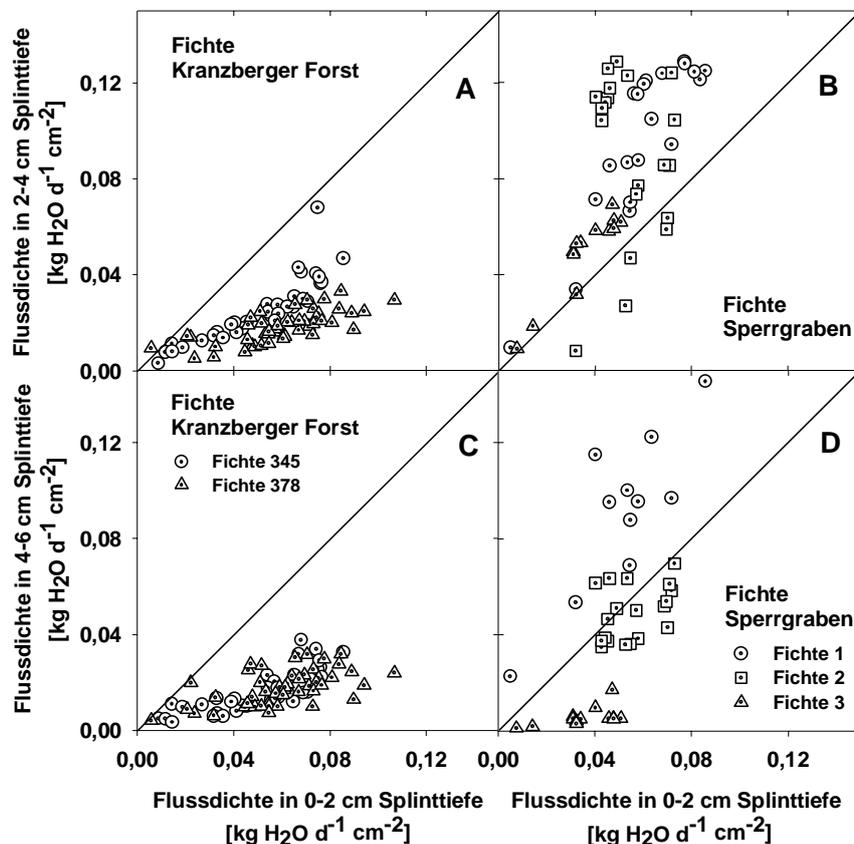


Abb. 3-32: Vergleich der in Fichte in 0 - 20 mm Splinttiefe gemessenen, über den Tag integrierten Xylemflussdichte mit der entsprechenden und gleichzeitig (im selben Stamm und in gleicher Stammhöhe, BHD) in 20 - 40 mm (A, B) und 40 - 60 mm Splinttiefe (C, D) ermittelten Summe (A, C, zwei dominante Individuen im **Kranzberger Forst**, und B, D, drei am **Sperrgraben**; Messungen vom Spätsommer 1999 und Frühjahr 2002 im Kranzberger Forst, und Spätsommer 2001 am Sperrgraben; Diagonale stellt 1:1 Hilfslinie dar).

## Ergebnisse

Tabelle 3-33: Prozentuale Abweichung der Xylemflussdichte in den Splinttiefen 20 - 40 und 40 - 60 mm von der Flussdichte im äußeren Splintbereich (0 - 20 mm) von Buche und Fichte im **Kranzberger Forst**. Berechnungsgrundlage sind Mittelwerte der in Abb. 3-29 und 3-30 dargestellten Tagessummen.

<b>Kranzberger Forst</b>	Fühlertiefe 20 - 40 mm	Fühlertiefe 40 - 60 mm
Baumnummer	Abweichung vom äußeren Messfühler (0 - 20 mm) in %	Abweichung vom äußeren Messfühler (0 - 20 mm) in %
Fichte 345	-52	-70
Fichte 378	-71	-70
Buche 464	-49	-52
Buche 465	-3	-41

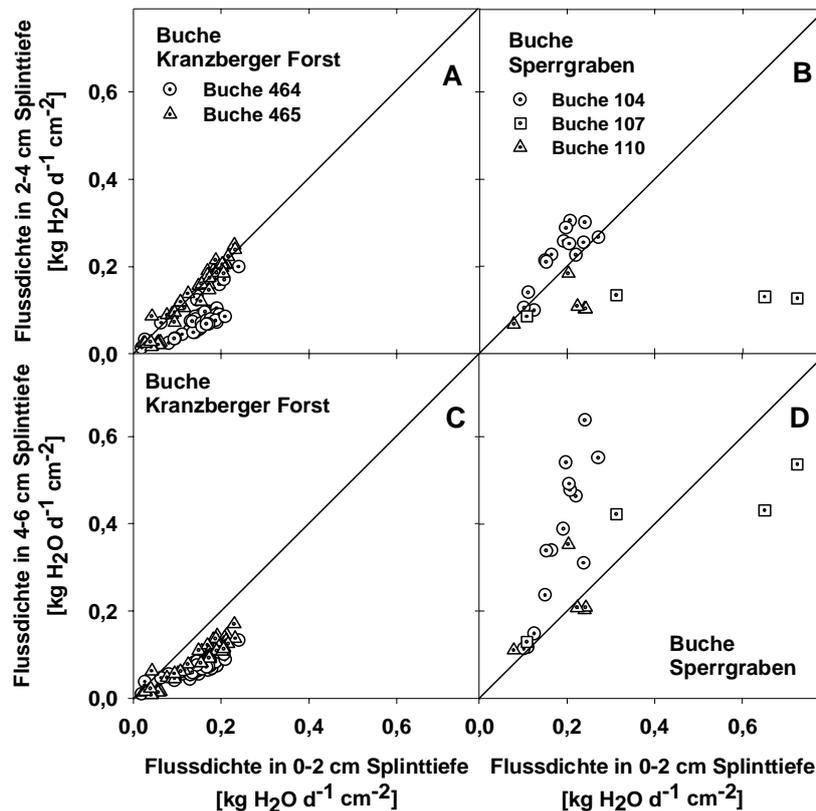


Abb. 3-34: Vergleich der in Buche in 0 - 20 mm Splinttiefe gemessenen, über den Tag integrierten Xylemflussdichte mit der entsprechenden und gleichzeitig (im selben Stamm und in gleicher Stammhöhe, BHD) in 20 - 40 mm (A, B) und 40 - 60 mm (C, D) ermittelten Summe (A, C, zwei dominante Individuen im **Kranzberger Forst**, und B, D, drei am **Sperrgraben**; Messungen vom Spätsommer 1999 und Frühjahr 2002 im Kranzberger Forst, und Spätsommer 2001 am Sperrgraben; Diagonale stellt 1:1 Hilfslinie dar).

Tabelle 3-35: Prozentuale Abweichung der Xylemflussdichte in den Splinttiefen 20 - 40 und 40 - 60 mm von der Flussdichte im äußeren Splintbereich (0 - 20 mm) von Buche und Fichte am **Sperrgraben**. Berechnungsgrundlage sind Mittelwerte der in Abb. 4 und 5 dargestellten Tagessummen.

<b>Sperrgraben</b>	Fühlertiefe 20 - 40 mm	Fühlertiefe 40 - 60 mm
Baumnummer	Abweichung vom äußeren Messfühler (0 – 20 mm) in %	Abweichung vom äußeren Messfühler (0 – 20 mm) in %
Fichte 1	+62	+103
Fichte 2	+65	-14
Fichte 3	+37	-85
Buche 104	+22	+99
Buche 107	-78	-17
Buche 110	-43	+9

### 3.2.3 Abhängigkeit der Transpiration von der Strahlung

Bei Analyse der Abhängigkeiten der Kronentranspiration von klimatischen Faktoren wies die Strahlung die engste Beziehung auf. Abbildung 3-37 A-G zeigt diese Beziehung zwischen den täglichen Transpirationsmittelwerten aller Messbäume je Art und „sozialer Stellung“ im Bestand (Klasseneinteilung in Anlehnung an Kraft 1884) hinsichtlich Brusthöhenumfang und Dominanzgrad im Bestandeskronendach) am Sperrgraben und der gleichzeitig aufgetretenen PPF-D-Tagessumme (exemplarisch für gesamte Vegetationsperiode 1999; Tab. 3-36 mit Anzahl der Messbäume je Bestand und Kraft-Klasse).

Tabelle 3-36: Einteilung der Messbäume **am Sperrgraben und im Kranzberger Forst** in die Kraft-Klassen 1 - 3 auf Basis des Brusthöhenumfangs: Klasse 1 = dominant, Klasse 2 = subdominant, Klasse 3 = unterdrückt im Bestandeskronendach entsprechend der Brusthöhenumfänge > 120 cm, 60 - 120 cm bzw. < 60 cm. Am Sperrgraben mussten im Frühjahr 2000 einige der Messbäume (hauptsächlich im Fichten-Reinbestand) infolge Schneebruchs während des vorangegangenen Winters aufgegeben werden.

	Kraft-Klasse 1 Brusthöhenumfänge: > 120 cm	Kraft-Klasse 2 Brusthöhenumfänge: 60 - 120 cm	Kraft-Klasse 3 Brusthöhenumfänge: < 60 cm
<b>Sperrgraben</b>			
Buchen- Mischbestand	5 Bäume	5 Bäume	5 Bäume
Fichten-Mischbestand	bis Jahr 2000: 13 Bäume später: 12	2 Bäume	
Fichten-Reinbestand	bis Jahr 2000: 7 Bäume später 5	bis Jahr 2000: 5 Bäume später 4	
<b>Kranzberger Forst</b>			
Buche-Mischbestand	1 Baum	4 Bäume	5 Bäume
Fichten- Mischbestand	1 Baum	9 Bäume	

Die in Abbildung 3-37 ermittelten Geradensteigungen der demonstrierten Beziehung spiegeln die „soziale Stellung“ (Kraft-Klasse) der Bäume wider: In Kraft-Klasse 1 (Abb. 3-37 A, C, E) waren die Steigungen unabhängig von der Baumart höher als in Klasse 2 (Abb. 3-37 B, D, F). Bäume der Kraft-Klasse 1 wiesen die ausgeprägteste Abhängigkeit der Kronentranspiration von der Strahlung auf. Dies galt nicht nur für den Fichten-Reinbestand, sondern auch für Buche und Fichte im Mischbestand. Im Fichten-Reinbestand gab es keine unterdrückten Individuen der Kraft-Klasse 3, jedoch war in Klasse 1 die Geradensteigung um einen Faktor von ca. 2,7 höher als in Klasse 2

(Abb. 3-37 A, B). Der entsprechende Vergleich für Fichte im Mischbestand ergab einen Faktor von 14 (Abb. 3-37 C, D), wobei in der letzteren Messfläche nur zwei subdominante Individuen vorhanden waren. Für Buche im Mischbestand war die Steigung der Klasse 1 um ca. den Faktor 3,7 höher als in Klasse 2 und etwa 9,6-mal höher als in Klasse 3 (Abb. 3-37 E-G). Steigung, Bestimmtheitsmaß  $r^2$  und individuelle Variation waren ähnlich in Buche und Fichte jeweils der Klasse 1 des Mischbestandes, für Fichte der Klasse 1 im Reinbestand erschien die Abhängigkeit der Kronentranspiration von der Strahlung weniger ausgeprägt. In Buche und Fichte jeweils der Klassen 2 und 3 waren die Abhängigkeit der Kronentranspiration von der Strahlung und die individuelle Variation deutlich reduziert. Die ähnlichen Steigungen innerhalb jeweils der Klassen 1 und 2 verdeutlichen auf Tagesbasis unabhängig von der Baumart und dem Bestandestyp eine konsistente, ökophysiologische Beziehung zwischen Kronentranspiration und Strahlung.

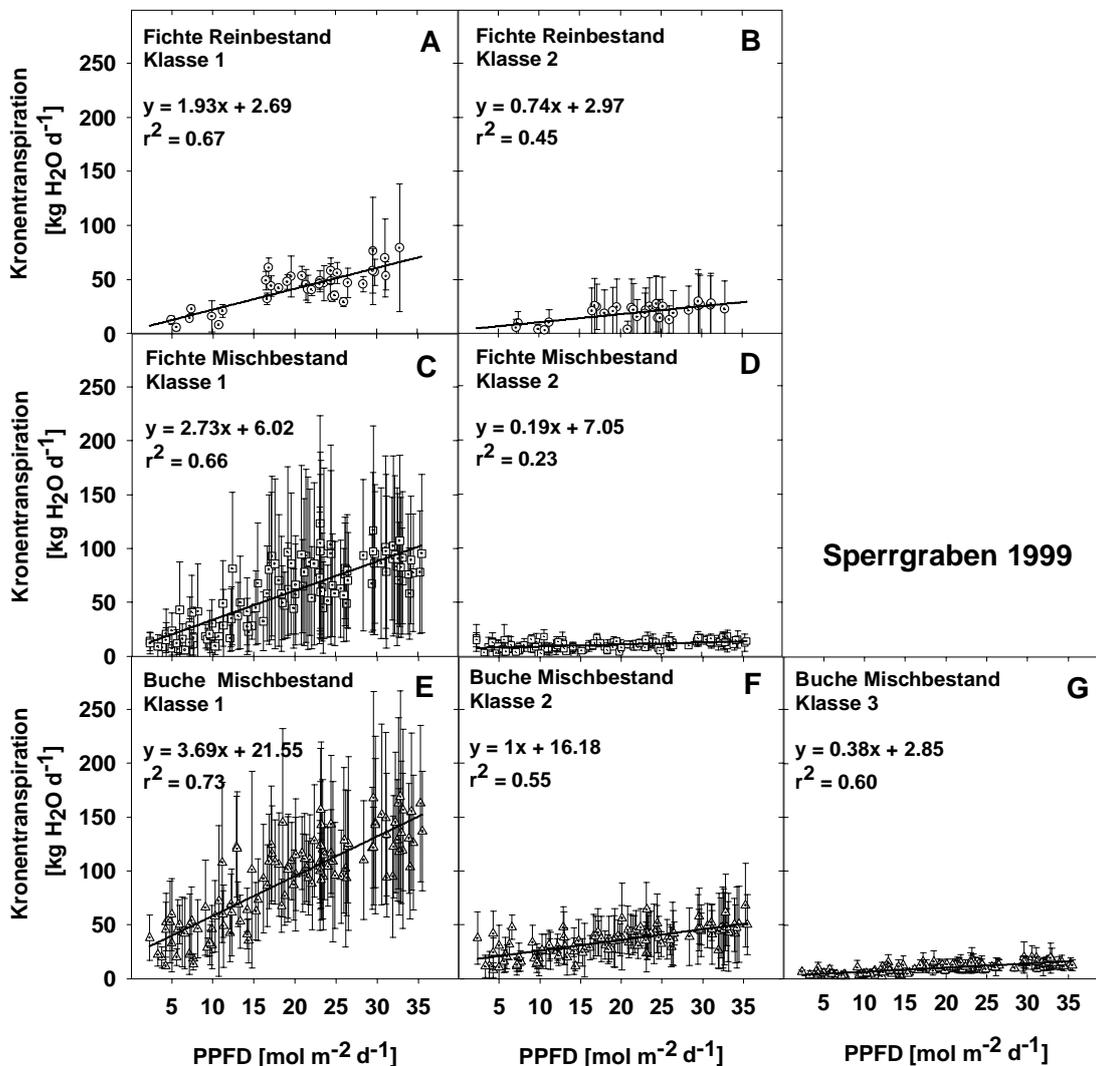


Abb. 3-37: Tägliche Kronentranspiration sämtlicher Messbäume am **Sperrgraben** in Abhängigkeit von der jeweiligen PPFD-Tagessumme, exemplarisch gezeigt für die gesamte Vegetationsperiode von Mai bis September 1999 (Mittelwerte  $\pm$  SD der Messbäume je Baumart, Kraft-Klasse und Bestandestyp).

## Ergebnisse

Abbildung 3-38 A-E stellt die Beziehung zwischen den täglichen Transpirationsmittelwerten aller Messbäume einer Art und „sozialer Stellung“ im Misch-Bestand (Klasseneinteilung nach Kraft hinsichtlich Brusthöhenumfang und Dominanzgrad im Bestandeskronendach) des Kranzberger Forsts und der gleichzeitig aufgetretenen PPFD-Tagessumme dar (wie in Abb. 3-37 exemplarische Darstellung der gesamten Vegetationsperiode 1999; Tab. 3-34 mit Anzahl der Messbäume pro Kraft-Klasse).

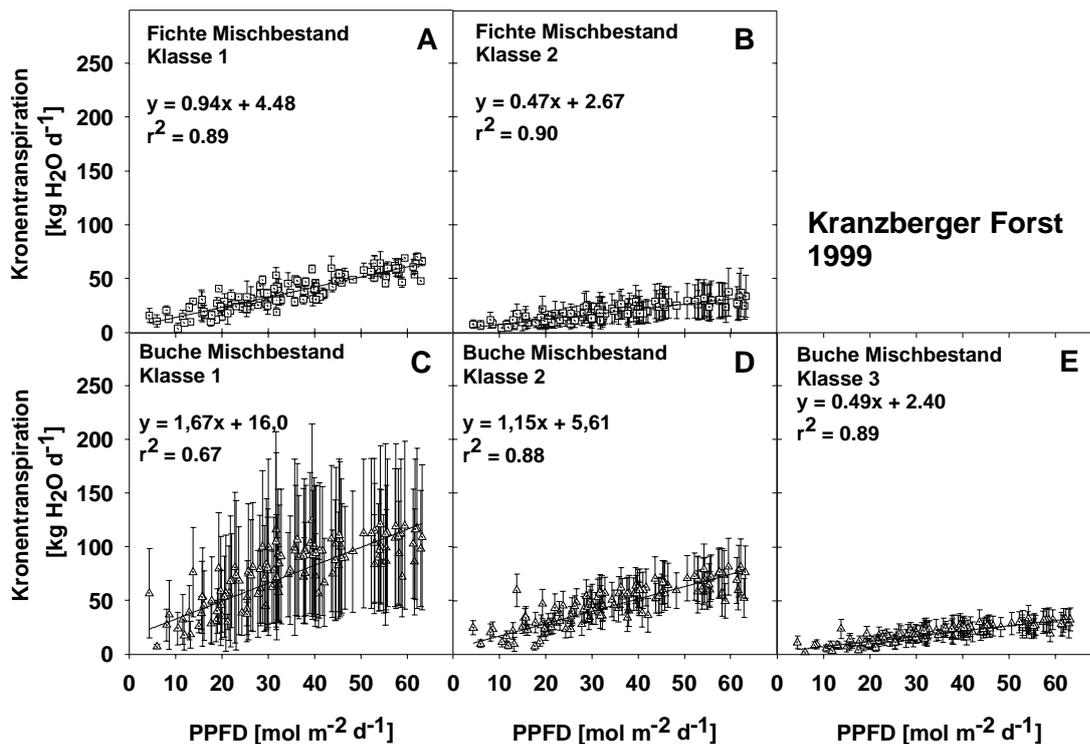


Abb. 3-38: Tägliche Kronentranspiration sämtlicher Messbäume im **Kranzberger Forst** in Abhängigkeit von der jeweiligen PPFD-Tagessumme, exemplarisch gezeigt für die gesamte Vegetationsperiode von Juni bis Oktober 1999 (Mittelwerte  $\pm$  SD der Messbäume je Baumart, Kraft-Klasse und Bestandestyp). (Maidaten fehlen, da Messfläche bis Ende Mai 1999 eingerichtet wurde).

Vergleichbar mit den Ergebnissen vom Sperrgraben spiegeln die in Abbildung 3-38 ermittelten Geradensteigungen der demonstrierten Beziehung die „soziale Stellung“ (Kraft-Klasse) der Bäume im Kranzberger Forst wider: Unabhängig von der Baumart waren in der Kraft-Klasse 1 (Abb. 3-38 A, C) die Steigungen am höchsten (Abb. 3-38 B, D, F), zeigten jedoch im Gegensatz zum Sperrgraben keine größere Abhängigkeit der Kronentranspiration von der Strahlung auf als Individuen der gleichen Art, aber kleineren Klasse. Die Fichten im Kranzberger Forst wurden nur in zwei Kraft-Klassen aufgeteilt. In Klasse 1 war die Geradensteigung um den Faktor 2 höher als in Klasse 2 (Abb. 3-38 A, B). Für die drei Kraft-Klassen der Buche lag die Steigung der Klasse 1 um den Faktor 1,6 höher als in Klasse 2 und etwa 3,5-mal höher als in Klasse 3 (Abb. 3-38 C-E). Der Vergleich der Bestimmtheitsmaße zwischen Buche und Fichte der Klasse 1 (Abb. 3-38 A und C) zeigte für Buche eine weniger ausgeprägte

Abhängigkeit der Kronentranspiration von der Strahlung (0,7 für Buche und 0,9 für Fichte). Beim Vergleich der Klassen 2 beider Baumarten waren die Bestimmtheitsmaße ähnlich (ca. 0,9, Abb. 3-38 B und D). Die Geradensteigung der Buche war im Gegensatz zur Fichte um den Faktor 1,8 in der Klasse 1 und um den Faktor 2,4 in der Klasse 2 erhöht. Alle dargestellten Steigungen zeigen auf Tagesbasis unabhängig von der Baumart eine konsistente, ökophysiologische Beziehung zwischen Kronentranspiration und Strahlung.

Die Tabellen 3-39 bis 3-41 bieten eine Übersicht über die aus Korrelationen zwischen PPF-D-Tagessummen und der täglichen Kronentranspiration pro Bestand, Baumklasse und Art ermittelten Regressionsgleichungen für alle drei Untersuchungsjahre. Der Kranzberger Forst weist im Gegensatz zum Sperrgraben konsistent für die drei Messjahre eine höhere Abhängigkeit der Kronentranspiration von der Strahlung auf (Bestimmtheitsmaße zwischen 0,6 bis 0,9), wobei sich die Bestimmtheitsmaße zwischen den Baum-Klassen einer Art kaum unterscheiden. Der Sperrgraben zeigt hingegen meistens einen klaren Anstieg der Abhängigkeiten mit steigender Baum-Klasse.

Tabelle 3-39: Geradengleichungen der Korrelationen zwischen PPF-D-Tagessummen und täglicher Kronentranspiration pro Bestand, Baumklasse und Art für das **Jahr 1999 am Sperrgraben und im Kranzberger Forst**. Am Sperrgraben wurden Messwerte im Zeitraum von Mai bis September, im Kranzberger Forst bis Oktober berücksichtigt.

Jahr 1999	Bestandesform	Baumart	Baumklasse	m	b	r <sup>2</sup>
<b>Sperrgraben</b>	Mischbestand	Buche	1	3.5	21.56	0.79
			2	1	16.18	0.55
			3	0.38	2.85	0.60
	Mischbestand	Fichte	1	2.73	6.02	0.66
			2	0.19	7.05	0.23
	Reinbestand	Fichte	1	1.93	2.69	0.67
2			0.74	2.97	0.45	
<b>Kranzberger Forst</b>	Mischbestand	Buche	1	1.67	15.99	0.67
			2	1.15	5.61	0.88
			3	0.49	2.40	0.89
	Mischbestand	Fichte	1	0.94	4.48	0.89
			2	0.47	2.67	0.90

## Ergebnisse

Tabelle 3-40: Geradengleichungen der Korrelationen zwischen PPF-D-Tagessummen und täglicher Kronentranspiration pro Bestand, Baumklasse und Art für das **Jahr 2000 am Sperrgraben und im Kranzberger Forst**. Am Sperrgraben wurden Messwerte im Zeitraum von Mai bis September, im Kranzberger Forst bis Oktober berücksichtigt.

Jahr 2000	Bestandesform	Baumart	Baumklasse	m	b	r <sup>2</sup>	
<b>Sperrgraben</b>	Mischbestand	Buche	1	2.47	19.13	0.43	
			2	0.93	14.02	0.47	
			3	0.3	3.2	0.15	
	Mischbestand	Fichte	1	2.23	1.38	0.64	
			2	0.47	0.06	0.26	
	Reinbestand	Fichte	1	0.84	33.57	0.21	
			2	0.46	11.89	0.12	
	<b>Kranzberger Forst</b>	Mischbestand	Buche	1	1.62	24.0	0.66
				2	1.205	4,41	0.79
3				0.51	1.50	0.85	
Mischbestand		Fichte	1	0.62	3.67	0.65	
			2	0.29	2.13	0.62	

Tabelle 3-41: Geradengleichungen der Korrelationen zwischen PPF-D-Tagessummen und täglicher Kronentranspiration pro Bestand, Baumklasse und Art für das **Jahr 2001 am Sperrgraben und im Kranzberger Forst**. Am Sperrgraben wurden Messwerte im Zeitraum von Mai bis September, im Kranzberger Forst bis Oktober berücksichtigt.

Jahr 2001	Bestandesform	Baumart	Baumklasse	m	b	r <sup>2</sup>	
<b>Sperrgraben</b>	Mischbestand	Buche	1	4.36	1.71	0.51	
			2	1.51	7.95	0.66	
			3	0.37	4.81	0.44	
	Mischbestand	Fichte	1	1.60	7.75	0.65	
			2	0.27	8.84	0.30	
	Reinbestand	Fichte	1	1.45	5.21	0.53	
			2	0.48	5.03	0.25	
	<b>Kranzberger Forst</b>	Mischbestand	Buche	1	2.40	-0.10	0.87
				2	1.17	-2.61	0.78
3				0.33	2.38	0.69	
Mischbestand		Fichte	1	0.88	2.02	0.75	
			2	0.35	-0.23	0.86	

### 3.2.4 Tägliche Kronentranspiration während drei Vegetationsperioden

Insgesamt wurden über einen Zeitraum von drei Vegetationsperioden (1999 - 2001) Xylemflussmessungen am Sperrgraben und im Kranzberger Forst durchgeführt. Kurzzeitige Ausfälle in der Datenaufzeichnung aufgrund von Interferenzen zwischen Messfühlern an Dataloggern, Korrosionsprobleme an elektrischen Kontakten der Dauerinstallationen, Lichtmangel an Solar-Panels am Sperrgraben konnten auf der Basis der lückenlos aufgezeichneten Klimadaten und umfangreichen, erfolgreich verlaufenen Xylemflussmessungen interpoliert werden. Dies erfolgte mittels Korrelationen wie in den Abbildungen 3-37 und 3-38 dargestellt, allerdings nun für jeden der 62 Messbäume separat berechnet. Mit den erhaltenen Funktionsgleichungen wurden die Datenlücken je Messbaum geschlossen.

Abbildung 3-42 A-G zeigt die täglichen Mittelwerte der Kronentranspiration je Baumart, Bestandestyp und Kraft-Klasse für das Jahr 1999 am Sperrgraben, wobei die schwarze Signatur reale Xylemflussmessungen, die rote interpolierte Messlücken darstellt. Der Vergleich zwischen den Kraft-Klassen je Baumart im Mischbestand ergab eine deutlich abgestuft abnehmende Transpirationsleistung (berücksichtigt wurde jeweils der Zeitraum 15. Mai bis 15. September) ausgehend von Klasse 1 in Richtung Klasse 2 und 3 (Abb. 3-42 C-G). Während Fichten der Kraft-Klasse 1 im Mittel ca. 62 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> während der Vegetationsperiode transpirierten, reichten der Kraft-Klasse 2 ca. 11 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup>. Bei der Buche (Abb. 3-42 E-G) lag die Transpirationsleistung der Kraft-Klasse 1 bei ca. 96 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup>, Kraft-Klasse 2 erzielte 36 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> und Kraft-Klasse 3 wies 5 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> auf. Beim Vergleich mit den folgenden Jahren 2000 und 2001 war dies die niedrigste Transpirationsleistung der Buche. Fichten der Kraft-Klasse 1 im Reinbestand transpirierten mit durchschnittlich 39 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> weniger, solche der Kraft-Klasse 2 mit ca. 19 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> jedoch mehr (Abb. 3-42 A, B) als entsprechende Individuen im Mischbestand.

Abbildung 3-43 gibt die Vegetationsperiode 2000 am Sperrgraben wieder, mit insgesamt ähnlichen Transpirationsleistungen pro Baumart, Bestandestyp und Kraft-Klasse wie 1999. Die Fichte im Reinbestand der Kraft-Klasse 1 zeigte gegenüber 1999 mit ca. 44 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> einen etwas höheren Wasserverbrauch. Fichten der Kraft-Klasse 2 (Reinbestand) wiesen hingegen kaum ein geändertes Transpirationsverhalten auf (18 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup>; Abb. 3-43 A, B). Nach wie vor war die Kronentranspiration der Fichte (Klasse 1) im Mischbestand mit 53 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (wenn auch nicht so deutlich wie 1999) gegenüber der Transpiration entsprechender Individuen des Reinbestandes erhöht (Abb. 3-43 A, C). Fichte der Kraft-Klasse 2 zeigte keine Änderung im Wasserverbrauch (11 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup>, Abb. 3-43 B, D). Die Transpirationsleistungen der Buche im Jahr 2000 war ähnlich wie die fürs Jahr 2001 (Abb. 3-42 und 3-44). Bei Buchen der Kraft-Klasse 1 im Mischbestand lag der mittlere Wasserverbrauch bei ca. 101 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (Abb. 3-43 E), bei der Kraft-Klasse 2 bei ca. 40 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> und die Kraft-Klasse 3 transpirierte ca. 14 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (Verdreifachung in Klasse 3 gegenüber 1999; Abb. 3-43 F, G). Alle Daten beziehen sich auf den Zeitraum vom 15. Mai bis 15. September 2000.

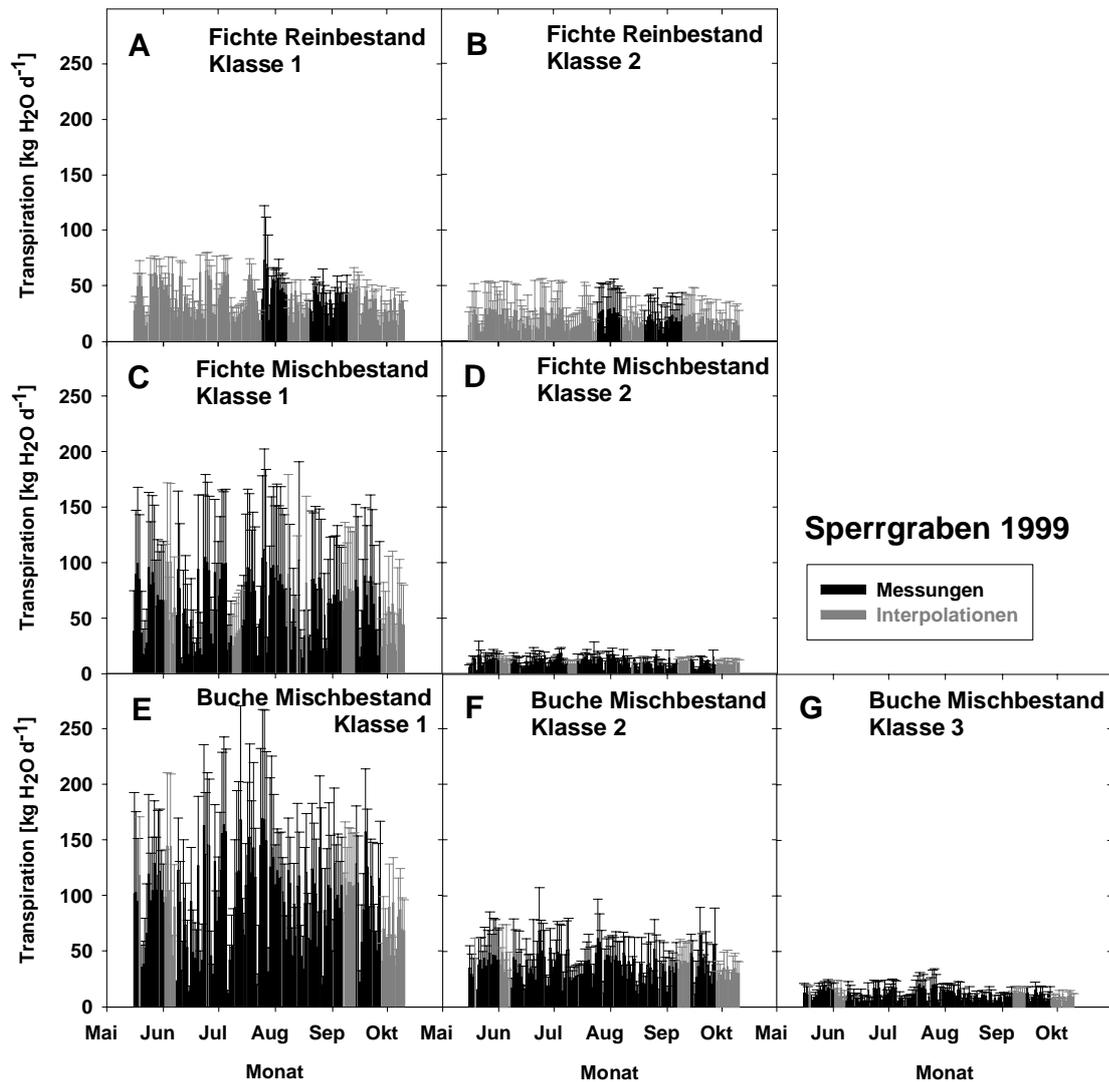


Abb. 3-42: Mittelwerte  $\pm$  SD der täglichen Kronentranspiration sämtlicher Messbäume am **Sperrgraben** während der Vegetationsperiode (Mitte Mai bis Mitte Oktober) 1999, getrennt dargestellt nach Bestandestyp, Baumart und Kraft-Klasse (schwarz = aktuelle Messungen, grau = interpoliert; s. Text).

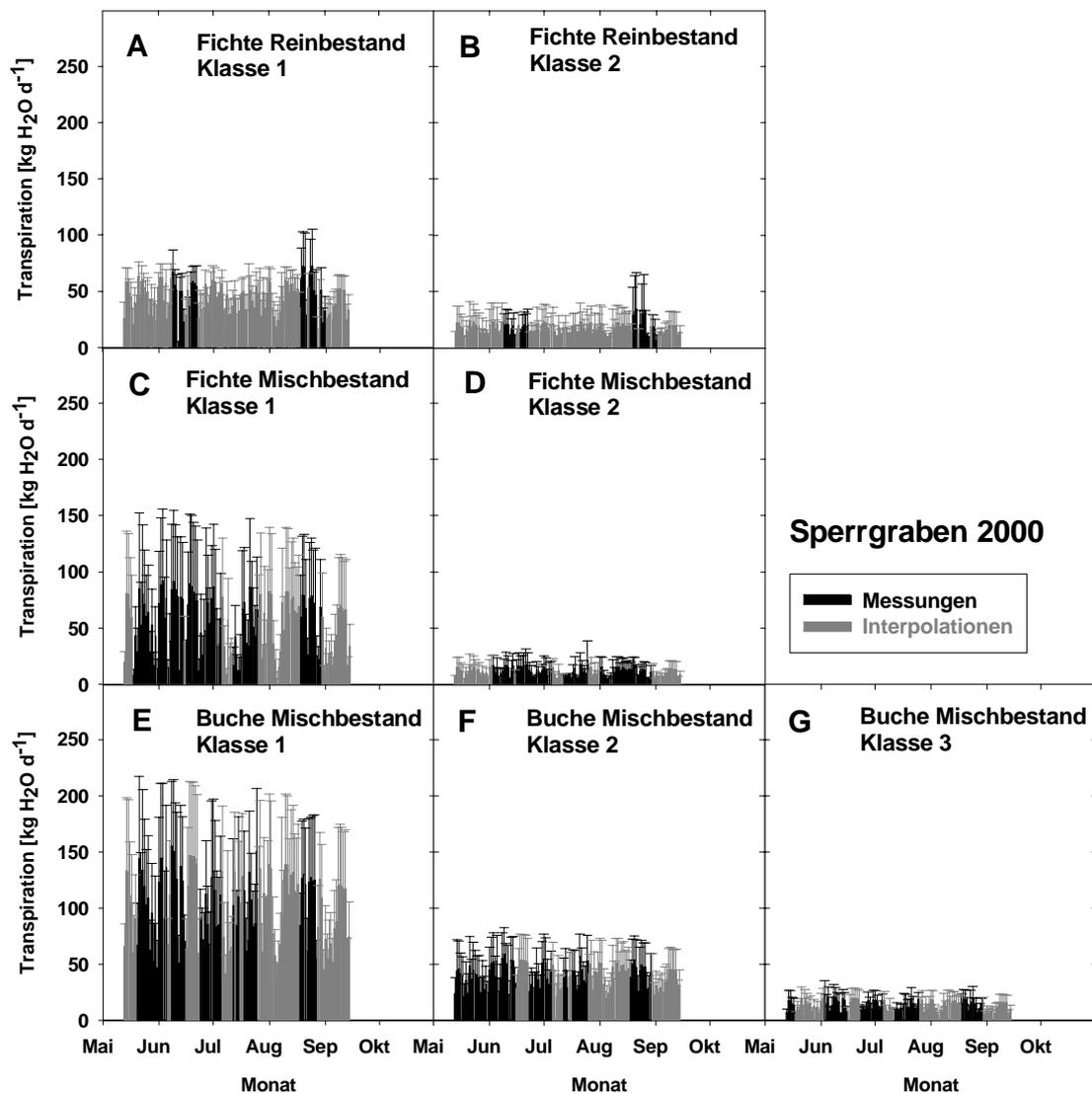


Abb. 3-43: Mittelwerte  $\pm$  SD der täglichen Kronentranspiration sämtlicher Messbäume am **Sperrgraben** während der Vegetationsperiode (Mitte Mai bis Mitte September) 2000, getrennt dargestellt nach Bestandestyp, Baumart und Kraft-Klasse (schwarz = aktuelle Messungen, grau = interpoliert; s. Text).

Abbildung 3-44 zeigt die Transpirationsleistungen der Vegetationsperiode 2001 am Sperrgraben pro Baumart, Bestandestyp und Kraft-Klasse. Fichten im Reinbestand der Kraft-Klasse 1 transpirierten im Jahresmittel (Daten beziehen sich auf den Zeitraum vom 15. Mai bis 15. September 2001) ca.  $40 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$ , Kraft-Klasse 2 ca.  $20 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  (Abb. 3-44 A, B). Der Trend, dass Fichte (Klasse 1) im Mischbestand eine höhere Transpiration aufwies ( $50 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ) als entsprechender Individuen des Reinbestandes blieb erhalten (Abb. 3-44 A, C), war aber beim Vergleich der drei Messjahre untereinander die niedrigste. Fichten der Kraft-Klasse 2 im Mischbestand zeigten eine leichte Erhöhung im mittleren Wasserverbrauch ( $14 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$ , Abb. 3-44 B, D). Buche der Kraft-Klasse 1 im Mischbestand wies die höchste mittlere Kronentranspiration pro Tag in den drei Messjahren auf (ca.  $102 \text{ kg H}_2\text{O}$ ; Abb. 3-44 E).

## Ergebnisse

Die mittlere Transpiration von Buche in Kraft-Klasse 2 lag 2001 bei ca. 39 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> und in Kraft-Klasse 3 bei ca. 13 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (Erhöhung in Klasse 3 gegenüber 1999; Abb. 3-44 F, G). Die Konsistenz der Ergebnisse (Abb. 3-42 bis 3-44) belegt die Repräsentativität der Befunde für die beiden Bestandestypen am Sperrgraben.

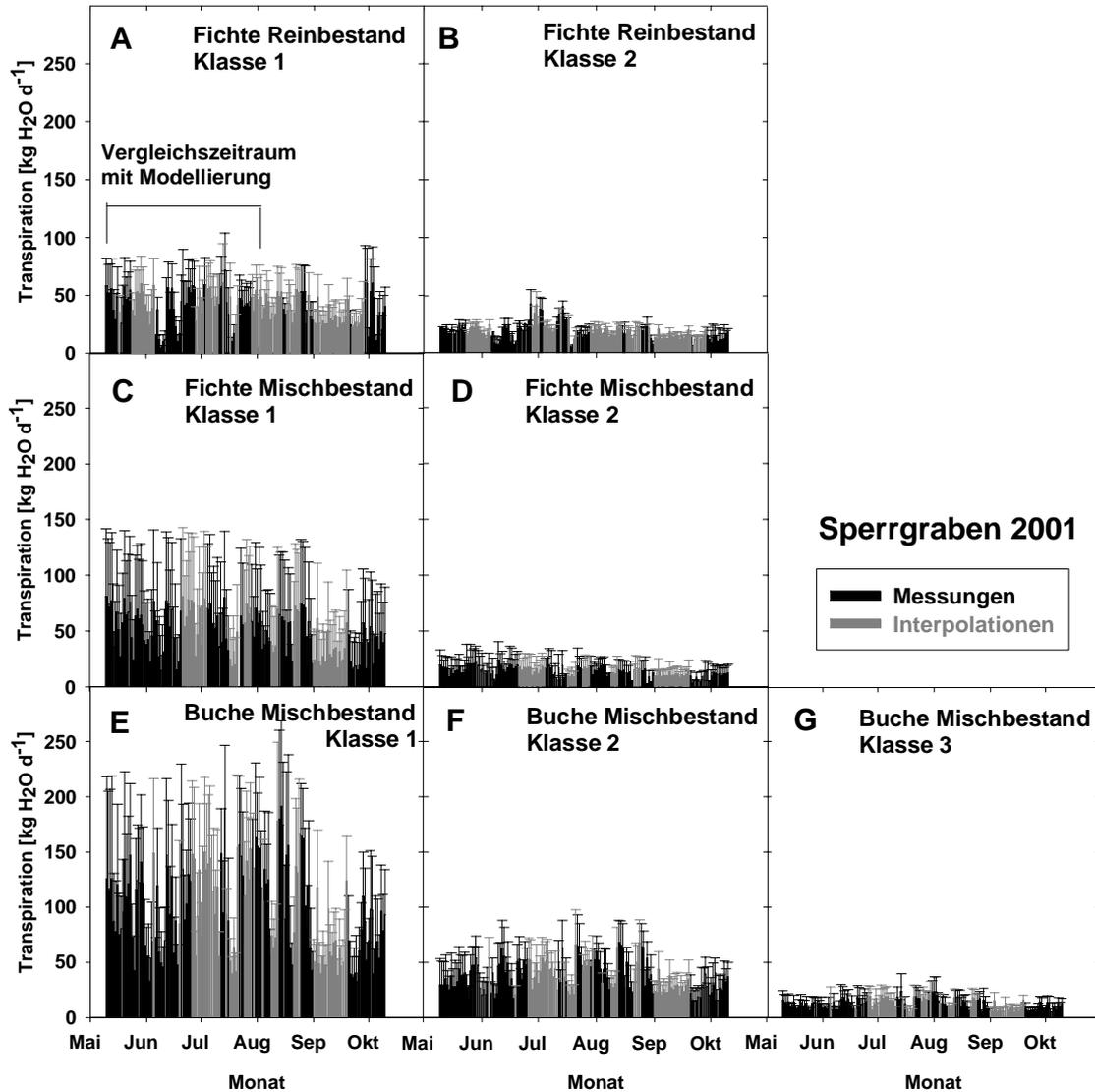


Abb. 3-44: Mittelwerte  $\pm$  SD der täglichen Kronentranspiration sämtlicher Messbäume am **Sperrgraben** während der Vegetationsperiode (Mitte Mai bis Mitte Oktober) 2001, getrennt dargestellt nach Bestandestyp, Baumart und Kraft-Klasse (schwarz = aktuelle Messungen, grau = interpoliert; s. Text). Klammer in A kennzeichnet den Zeitraum, der mit modellierten Transpirationswerten der Partnergruppe Bernhofer verglichen wird (20. Mai bis 31. Juli 2001).

Abbildung 3-45 A-E zeigt die täglichen Mittelwerte der Kronentranspiration je Baumart und Kraft-Klasse für die Vegetationsperiode im Jahr 1999 im Mischbestand des Kranzberger Forsts. Die schwarze Signatur stellt reale Xylemflussmessungen, die rote mit Hilfe der Strahlung interpolierte Messlücken dar. Für Buche ergab der Vergleich zwischen den Kraft-Klassen eine deutliche Abnahme der Transpirationsleistung

(berücksichtigt wurde der Zeitraum 2. Juni bis 15. September) ausgehend von Klasse 1 in Richtung Klasse 2 und 3 (Abb. 3-45 C-E). Bei Fichte waren die Unterschiede zwischen den Klassen weniger stark ausgeprägt (Abb. 3-45 A-B). Während Fichtenbäume der Kraft-Klasse 1 im Mittel ca. 38 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> während der Vegetationsperiode transpirierten, wies die Kraft-Klasse 2 ca. 17 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> auf. Damit lag die Transpirationsleistung der Fichten Klasse 1 im Kranzberger Forst ca. 63 % unterhalb der Fichten der gleichen Klasse des Mischbestandes am Sperrgraben. Die Fichten der Kraft Klasse 2 im Kranzberger Forst wiesen 58 % mehr Transpiration auf als Fichten am Sperrgraben. Bei der Buche (Abb. 3-45 C-E) lag die Transpirationsleistung der Kraft-Klasse 1 bei ca. 83 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup>, Kraft-Klasse 2 erreichte 51 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> und Kraft-Klasse 3 wies 23 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> auf, womit die Transpirationsleistungen der Klasse 1 um ca. 11 % niedriger und die der Kraft-Klasse 2 und 3 um 31 % und 78 % höher lagen als bei vergleichbaren Buchen-Individuen am Sperrgraben. Beim Vergleich mit den folgenden Jahren 2000 und 2001 im Kranzberger Forst war dies die niedrigste Transpirationsleistung der Buche Klasse 1, während Fichten der Kraft-Klasse 1 den höchsten Wasserverbrauch aufwiesen (Abb. 3-46 und 3-47 A, C).

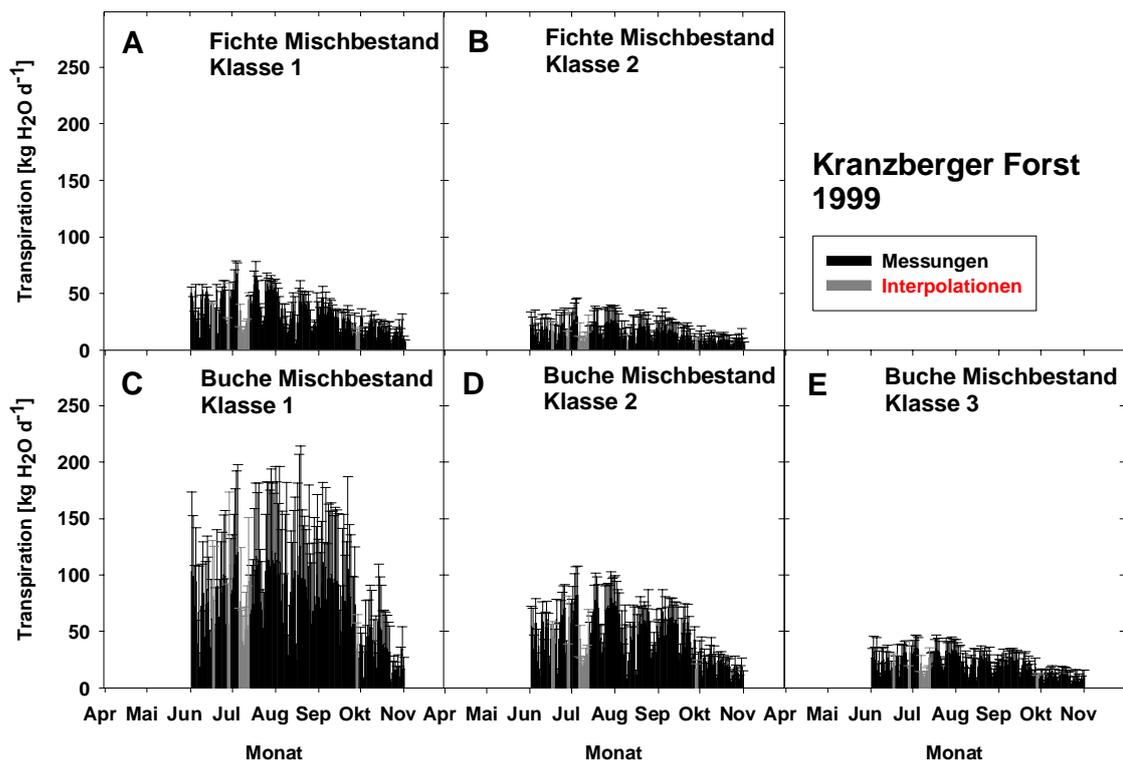


Abb. 3-45: Mittelwerte  $\pm$  SD der täglichen Kronentranspiration sämtlicher Messbäume im **Kranzberger Forst** während der Vegetationsperiode (Anfang Juni bis Ende Oktober) 1999, getrennt dargestellt nach Baumart und Kraft-Klasse (schwarz = aktuelle Messungen, grau = interpoliert; s. Text).

## Ergebnisse

Abbildung 3-46 gibt die Vegetationsperiode 2000 im Kranzberger Forst wieder, mit ähnlichen Transpirationsleistungen pro Baumart und Kraft-Klasse wie 1999. Die Fichten der Kraft-Klasse 1 zeigten gegenüber 1999 und 2001 mit ca.  $28 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  einen um 26 % bis 18 % niedrigeren Wasserverbrauch. Gegenüber den Fichten am Sperrgraben (Vergleichsjahr 2000) war der Wasserverbrauch um 53 % erniedrigt. Bei Fichten der Kraft-Klasse 2 nahmen die Transpirationsleistungen mit  $14 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  im Jahr 2000 gegenüber  $17 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  im Jahr 1999 leicht ab (Abb. 3-45 und 3-46 A-B). Die Transpirationsleistungen der Buche Kraft Klasse 1 und 2 im Jahr 2000 waren die höchsten der untersuchten Messjahre im Kranzberger Forst (Abb. 3-45 und 3-47 C-E). Bei Buchen der Kraft-Klasse 1 lag der mittlere Wasserverbrauch mit ca.  $93 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  (Abb. 3-46 E) um 11 % höher als 1999. Buchen der Kraft-Klasse 2 und 3 blieben im Jahr 2000 tendenziell in ihrem Wasserverbrauch mit ca.  $52 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  und ca.  $22 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  gleich (vgl. Abb. 3-45 und 3-46 D-E). Beim Vergleich der Buchen-Transpirationsraten vom Tieflagenbestand zum Bergwald zeigte sich, dass Buchen der Klasse 1 ca. 8 % weniger und Buchen der Klasse 2 und 3 jeweils 23 % bzw. 36 % mehr Wasser an die Atmosphäre abgaben (Abb. 3-43 und 3-46). Die Daten beziehen sich auf den Zeitraum vom 15. Mai bis 15. September 2000.

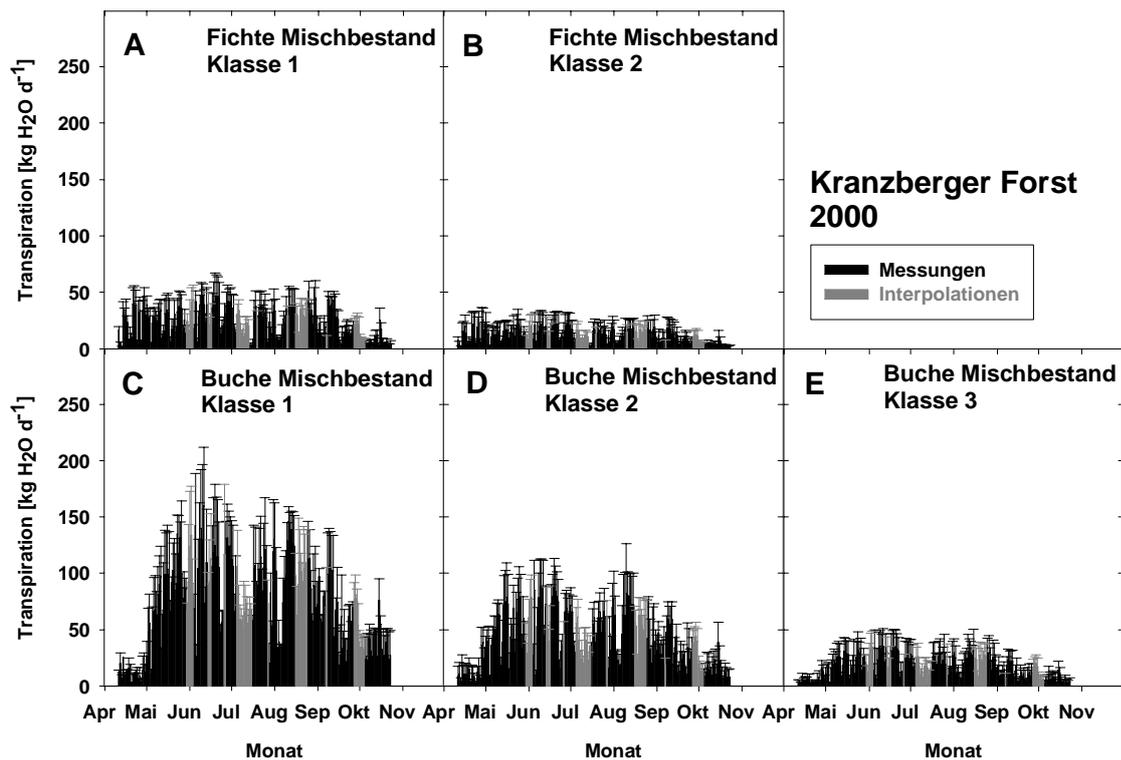


Abb. 3-46: Mittelwerte  $\pm$  SD der täglichen Kronentranspiration sämtlicher Messbäume im **Kranzberger Forst** während der Vegetationsperiode (Mitte April bis Mitte Oktober) 2000, getrennt dargestellt nach Baumart und Kraft-Klasse (schwarz = aktuelle Messungen, grau = interpoliert; s. Text).

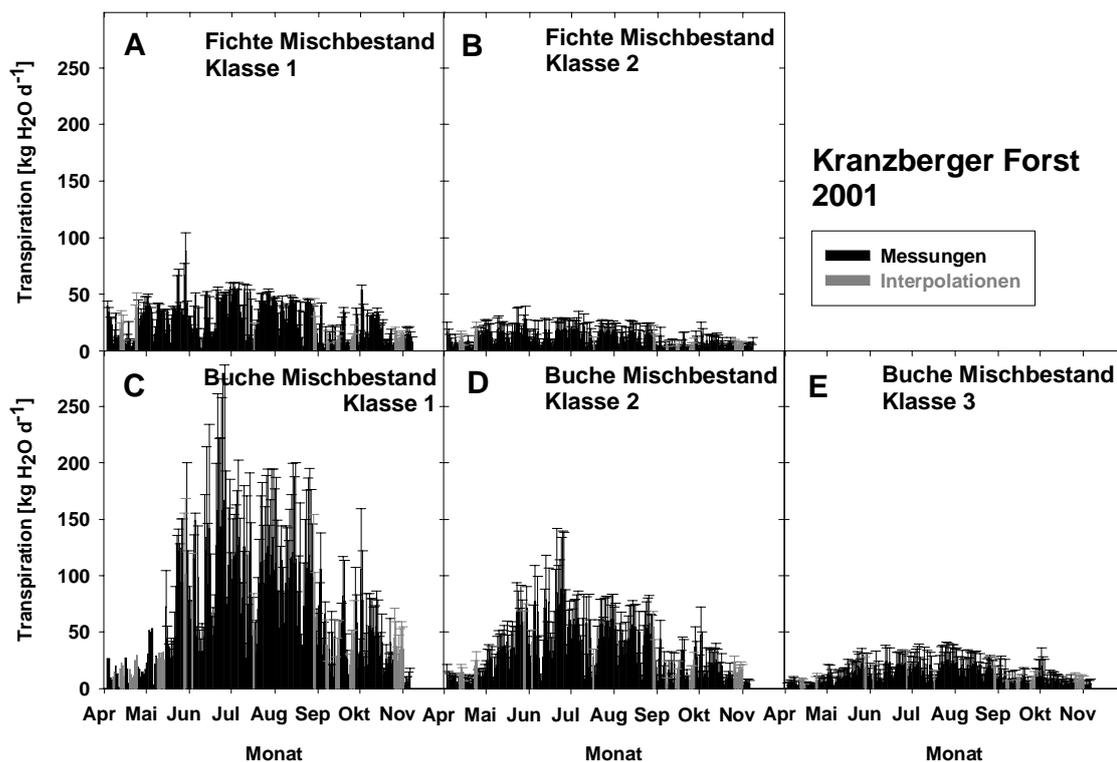


Abb. 3-47: Mittelwerte  $\pm$  SD der täglichen Kronentranspiration sämtlicher Messbäume im **Kranzberger Forst** während der Vegetationsperiode (Anfang April bis Anfang November) 2001, getrennt dargestellt nach Baumart und Kraft-Klasse (schwarz = aktuelle Messungen, grau = interpoliert; s. Text).

Abbildung 3-47 zeigt die Transpirationsleistungen pro Baumart und Kraft-Klasse des Mischbestandes im Kranzberger Forst für die Vegetationsperiode 2001. Fichten der Kraft-Klasse 1 transpirierten im Jahresmittel (Daten beziehen sich auf den Zeitraum vom 15. Mai bis 15. September 2001) ca.  $34 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$ , die der Kraft-Klasse 2 ca.  $13 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  und lagen damit in ihren Leistungen um ca. 10 % bzw. 23 % niedriger als im Jahr 1999 (Abb. 3-45 A, B), und bei der Klasse 1 um 18 % höher als im Jahr 2000. Fichten der Klasse 2 unterschieden sich in den Jahren 2000 und 2001 kaum in ihren Leistungen. Zum Vergleichsjahr 2001 am Sperrgraben lag der Wasserverbrauch bei Fichten der Kraft Klasse 1 im Kranzberger Forst um 32 % niedriger und war vergleichbar innerhalb der Klassen 2 beider Mischbestände (Abb. 3-44 und 3-47). Buche der Kraft-Klasse 1 im Kranzberger Forst wies eine mittlere Kronentranspiration von ca.  $86 \text{ kg H}_2\text{O}$  pro Tag und die der Kraft-Klasse 2 von ca.  $43 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  auf. Die Transpirationsleistung der Buche Klasse 1 im Jahr 2001 lag zwischen denen der Messjahre 1999 und 2000 im Kranzberger Forst und unterschieden sich um ca. 3 bis 7 % von dem Wasserverbrauch im Kranzberger Forst. Gegenüber dem Sperrgraben war die Kronentranspiration der Buche Klasse 1 um 26 % erniedrigt. Die Wasserverbräuche der Kraft-Klasse 2 und 3 waren mit je  $43$  bzw.  $16 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$  die niedrigsten der Untersuchungsjahre im Kranzberger Forst (Klasse 2 um ca. 13 bis 16 % und Klasse 3 um ca. 23 bis 30 %) und dem Sperrgraben am

ähnlichsten (Abb. 3-45-47 E und 3-44 G). Die Konsistenz der Ergebnisse zeigen eine hohe Vergleichbarkeit der drei Untersuchungsjahre im Kranzberger Forst (Abb. 3-45 bis 3-47).

### **3.2.5 Skalieren des Safflusses vom Einzelbaum auf den Bestand: Bestandestranspiration der Bestände im Vergleich**

Die pro Kraft-Klasse einer Baumart bestimmte Beziehung zwischen BHD und Xylemfluss bildete die Grundlage für die Hochrechnung der Kronentranspiration von der Baum- auf die Bestandesebene. Mittels der ermittelten Regressionsgleichung je Kraft-Klasse wurde auf der Basis der vermessenen BHD-Werte sämtlicher Bäume pro Versuchsfläche (Tab. 3-48) der tägliche Xylemfluss auf Einzelbaumbasis bestimmt und aufsummiert. Die auf diese Weise ermittelte Bestandeskronentranspiration wurde auf die Bestandesgrundfläche bezogen, pro Flächeneinheit entweder der hangparallelen Fläche (d. h. unter Berücksichtigung der Hangneigung) oder der projizierten, d. h. neigungskorrigierten Fläche.

Nach Tabelle 3-48 war am Sperrgraben während der drei Messjahre der Wasserverbrauch pro Einheit Splintfläche in Rein- und Mischbestand jeweils ähnlich, wenngleich im Mischbestand etwas erhöht. Letzteres war durch die Buche bedingt, welche splintflächenbezogen einen höheren Wasserverbrauch aufwies als die Fichte. Im Reinbestand war der Wasserverbrauch von Fichte geringfügig niedriger als jener von Fichte im Mischbestand. Bei gleichem jährlichen Beobachtungszeitraum war der splintflächenbezogene Wasserverbrauch von Buche und Fichte der Tieflage (Kranzberger Forst) wiederum ähnlich zum entsprechenden Verbrauch beider Baumarten in der Hochlage (Sperrgraben) – eine Feststellung, die auch bei Vergleich der beiden Mischbestände zwischen Hoch- und Tieflage erhalten bleibt.

Tabelle 3-48: Anzahl der **am Sperrgraben und im Kranzberger Forst** hinsichtlich Brusthöhendurchmesser (BHD) vermessenen Bäume (durch W. Faltin; AG Tenhunen bzw. R. Grote; AG Pretzsch); Baumdichte für projizierte und hangparallele Grundflächen sowie Splintflächen getrennt nach Baumarten am Sperrgraben und im Kranzberger Forst. Für die drei Standorte wird außerdem die Bestandestranspiration pro Splintfläche für die Vegetationsperioden (15. Mai - 15. September) der Jahre 1999 - 2001 gezeigt. Die Installation der Granierfühler war im Kranzberger Forst erst im Juni 1999 abgeschlossen.

	Buchen-Fichten-Mischbestand <b>Sperrgraben</b>			Fichten-Reinbestand <b>Sperrgraben</b>		Buchen-Fichten-Mischbestand <b>Kranzberg</b>		
Anzahl der BHD vermessenen Bäume	218			135		412		
Baumartenverteilung: Grundlage zur Hochrechnung auf Bestandesebene	114 Fichten 104 Buchen			135 Fichten		266 Fichten 132 Buchen  Rest andere Arten		
Baumdichte (projizierte Fläche) (Bäume ha <sup>-1</sup> )	559			440		776		
Baumdichte (hangparallele Fläche) (Bäume ha <sup>-1</sup> )	320			397		775		
kumulative Splintflächendichte im Bestand [m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> projiziert]	Fichte 16.47 Buche 9.99			Fichte 29.69		Fichte 21.34 Buche 10.81		
Bestandestranspiration pro Splintfläche [t m <sup>-2</sup> ] (Zeitraum: 15.5-15.9.)	Fichten-Anteil	Buchen-Anteil	Fi/Bu-Mischbestand	Fichte-Reinbestand	Fichten-Anteil	Buchen-Anteil	Fi/Bu-Mischbestand	
Jahr 1999	70.7	92.3	78.9	57.2				
Jahr 2000	58.3	102.6	75.0	58.1	69.2	126.4	86.1	
Jahr 2001	63.0	103.0	77.9	55.8	61.5	105.9	76.5	

## Ergebnisse

Tabelle 3-49: Bestandestranspiration der Bestände am Sperrgraben und im Kranzberger Forst für die Vegetationsperioden (15. Mai - 15. September) der Jahre 1999 - 2001. Dargestellt ist der Transpirationsbezug zur projizierten und zur hangparallelen Grundfläche. Im Kranzberger Forst war die Installation der Granierfühler erst im Juni 1999 abgeschlossen.

	Transpiration pro projizierte Grundfläche [mm]			Transpiration pro hangparallele Grundfläche [mm]		
	Jahr 1999	Jahr 2000	Jahr 2001	Jahr 1999	Jahr 2000	Jahr 2001
<b>Sperrgraben</b>						
Fichten- Reinbestand	168	172	164	153	155	148
Buchen- Fichten- Mischbestand	202	192	198	119	113	117
<b>Kranzberger Forst</b>						
Buchen- Fichten- Mischbestand		277	246		277	246

Tabelle 3-49 vergleicht die Kronentranspiration der untersuchten Bestände bei Bezug auf die projizierte oder hangparallele Fläche in den drei Vegetationsperioden. Die projizierte Bezugsfläche des Fichten-Reinbestandes am Sperrgraben betrug 3066 m<sup>2</sup> gegenüber 3398 m<sup>2</sup> bei gegebener, mittlerer Hangneigung von 25° (s. Kap. 2.3, Tab. 2-3). Im Mischbestand am Sperrgraben umfasste bei einer mittleren Hangneigung von 55° die projizierte Fläche 3897 m<sup>2</sup>, und die hangparallele 6803 m<sup>2</sup>. Im Kranzberger Forst war der Unterschied zwischen projizierter und hangparalleler Fläche (5308 m<sup>2</sup> zu 5312 m<sup>2</sup>) gering, da die Hangneigung der Untersuchungsfläche nur 1° betrug. Bei Addition der täglichen, auf die projizierte Grundfläche bezogenen Bestandestranspiration über einen Zeitraum von 4 Monaten (15. Mai – 15. September eines jeden Jahres) ergab sich 1999 für den Reinbestand am Sperrgraben ein Wasserverbrauch von 168 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm) und für den benachbarten Mischbestand von 202 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm). Tendenziell wies die auf die projizierte Grundfläche bezogenen Bestandestranspiration des Mischbestandes auch in den folgenden Jahren eine höhere Transpiration auf. So lag die Bestandestranspiration des Reinbestandes am Sperrgraben im Jahr 2000 bei 172 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm) und 2001 bei 164 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm) und erreichte damit zwischen 83 % und 90 % der Transpiration des Mischbestandes. Die Transpiration des Mischbestandes im Kranzberger Forst war in beiden Untersuchungsjahren mit 277 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm) für 2000 und 246 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm) für 2001 deutlich höher als die Transpirationen beider Bestände am Sperrgraben. So lag der Wasserverbrauch des Kranzberger Forsts im Schnitt

33 bis 38 % über dem des Reinbestandes bzw. 20 bis 30 % über dem des Mischbestandes am Sperrgraben (Tab. 3-49).

Zu einer Umkehrung der Ergebnisse des Sperrgrabens kam es bei Berechnung der Kronentranspiration auf Basis der hangparallelen (= realen) Bestandesfläche. Während der Kranzberger Forst aufgrund seiner geringen Inklination keine Veränderung des Wasserverbrauchs aufwies, verringerte sich im Fall des Mischbestandes die flächenbezogene Transpirationsdichte um ca. 41 % (s. Tab 3-49), was durch den Umrechnungsfaktor von projizierter zu hangparalleler Grundfläche von 1,7 bedingt ist und lag damit zwischen 113 (Jahr 2000) und 199 (Jahr 2001) kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm) (Tab. 3-47). Beim Reinbestand kam es zu einer Abnahme der Transpirationsdichte um 9 %, was einem Umrechnungsfaktor von 1,1 von projizierter zu hangparalleler Grundfläche gleichkam. Die hangparallele Bestandestranspiration lag damit für das Jahr 1999 bei 153 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm), für 2000 bei von 155 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> (= mm) und für 2001 bei 148 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>.

Die während der drei Vegetationsperioden gemessenen Transpirationsunterschiede zwischen den beiden Beständen am Sperrgraben (Tab. 3-49) liegen, bei Bezug auf den Fichten-Reinbestand und die projizierte Grundfläche (standardisiert), zwischen 12 und 21 %. Diese Unterschiede liegen nach KÖSTNER (1999) im Bereich des Gesamtfehlers (15 bis 23 %) bei Hochrechnungen der Kronendachtranspiration auf der Basis einzelbaumbezogener Xylemflussmessungen. ***Unter dieser Maßgabe lässt sich die zentrale Hypothese bestätigen, die von ähnlichem Wasserverbrauch im Fichten-Reinbestand und Buchen-Fichten-Mischbestand in der montanen Stufe der nördlichen Randalpen ausgeht.***

Vergleicht man die gemessenen Transpirationsunterschiede zwischen dem Buchen-Fichten-Mischbestand der Hochlage am Sperrgraben und dem Buchen-Fichten-Mischbestand in der Tieflage des Kranzberger Forsts (Tab. 3-49, Bezugsgröße Mischbestand am Sperrgraben und standardisiert auf die projizierte Grundfläche), so liegen diese zwischen 24 und 44 % und sind gegenüber des Gesamtfehlers (s. o.) erhöht. ***Damit ist der Wasserverbrauch in Buchen-Fichten-Mischbeständen der montanen Stufe der nördlichen Randalpen geringer als in Buchen-Fichten-Mischbeständen der Tieflage.***

### 3.2.6 Modellparametrisierung für die Messstandorte am Sperrgraben

Die Rahmen dieser Doktorarbeit gemessenen Bestandesparameter wie Bestandeshöhe, LAI, Bedeckungsgrad und  $g_{fac}$  (s. Kap. 3.1.1 und 3.3.4) dienen der Technischen Universität Dresden (Arbeitsgruppe Bernhofer, Institut für Hydrologie und Meteorologie), das gekoppelte Vegetations-Atmosphärenmodell HIRVAC, das u. a. Strahlungs- und Energiebilanzgrößen wie z. B. Evapotranspirationswerte liefert, an die Untersuchungsflächen am Sperrgraben anzupassen. Am Ende der Modellanpassung wurden die für den Vergleichszeitraum modellierten Evapotranspirationswerte mit den gemessenen Transpirationsergebnissen der beiden Untersuchungsflächen verglichen (Reinbestand Fichte, Mischbestand Buche und Fichte, s. Kap. 3.2.4, Abb. 3-44 und Tab. 3-52). Da die Bestände am Sperrgraben geschlossen waren, konnte der Anteil der Bodenverdunstung in den Ergebnissen vernachlässigt werden und ein direkter Vergleich mit den Transpirationsergebnissen der Xylemflussmessungen erfolgen. Als Vergleichszeitraum wurde das Zeitintervall vom 20.05. – 31.07.2001 (= 72 Tage) gewählt (s. Kap. 3.2.4, Abb. 3-44). Auswahlkriterium war, einen genügend großen Zeitraum zu finden, indem sowohl Xylemflussmessungen vom Fichten-Reinbestand als auch vom Buchen-Fichten-Mischbestand vorlagen.

Bei dem Vegetations-Atmosphärenmodell HIRVAC (**H**igh **R**esolution **V**egetation **A**tmosphere **C**oupler) handelt es sich um ein hochaufgelöstes eineinhalb-dimensionales atmosphärisches Grenzschichtmodell auf Basis einer Turbulenzschließung 1,5. Ordnung (HUB), das mit einem mechanistischen Photosynthesemodell (PSN 6, FALGE 1997) gekoppelt ist (GOLDBERG 1998, GOLDBERG ET AL. 2001). Im Rahmen des Gesamtprojektes wurde HIRVAC durch die Arbeitsgruppe Bernhofer in eine GIS-Umgebung (ArcView) eingebunden und auf den Sperrgraben validiert (Modell: HIRGIS; GOLDBERG ET AL. 2002).

Die für den Vergleichszeitraum modellierten Evapotranspirationswerte im HIRGIS wurden als Flächenmittel für die beiden Messflächen am Sperrgraben berechnet (HÄNTZSCHEL, pers. Mitteilung; BERNHOFER ET AL. (2003), Abschlussbericht an die DFG). Aufgrund fehlerhafter Landnutzungsklassifizierung (Datengrundlage digitale Höhen- und Landnutzungsdaten mit einer Auflösung von 30 m, Teile der bewaldeten Untersuchungsflächen sind dort als Wiesen klassifiziert) konnten nicht die angegebenen Landnutzungsdaten verwendet werden, sondern es musste jede Landnutzungsart separat als Reinbestand berechnet werden. Die Aufteilung der Evapotranspirationswerte der Buchen-Fichten-Mischfläche erfolgte, da keine Bestandesparameter (für PSN 6) für den Mischbestand vorlagen, allein anhand der Ergebnisse aus den Xylemflussmessungen (HÄNTZSCHEL, pers. Mitteilung; BERNHOFER ET AL. (2003), Abschlussbericht an die DFG). Dazu wurde das Transpirationsverhältnis der Buchen bzw. Fichten im Mischbestand relativ zum Fichten-Reinbestand ermittelt. Dieses Verhältnis war generell größer als eins, was zu einer erhöhten modellierten Verdunstung führte. Trotzdem waren die Unterschiede zwischen den modellierten Evapotranspirationswerten für den Buchen- bzw. Fichtenreinbestand gering und stimmten gut mit den Xylemmessungen überein (Abb. 3-50 A, C).

Der Fichten-Reinbestand wies im Mittel modellierte Evapotranspirationswerte von  $1,3 \text{ mm d}^{-1}$  auf (Abb. 3-50 A, C). Die gemessenen mittleren Transpirationswerte lagen

bei  $1,4 \text{ mm d}^{-1}$ . Das Verdunstungsverhalten des Mischbestandes war gegenüber dem Reinbestand um ca.  $0,4 \text{ mm d}^{-1}$  erhöht und wies im Mittel modellierte Evapotranspirationswerte von  $1,80 \text{ mm d}^{-1}$  und gemessene von  $1,76 \text{ mm d}^{-1}$  auf. Die mittleren Einzelanteile von Buche und Fichte an der Gesamttranspiration des Mischbestandes (gemessen und modelliert) lagen in Größenordnungen zwischen  $0,86 \text{ mm d}^{-1}$  und  $0,90 \text{ mm d}^{-1}$  (Abb. 3-51 A, C).

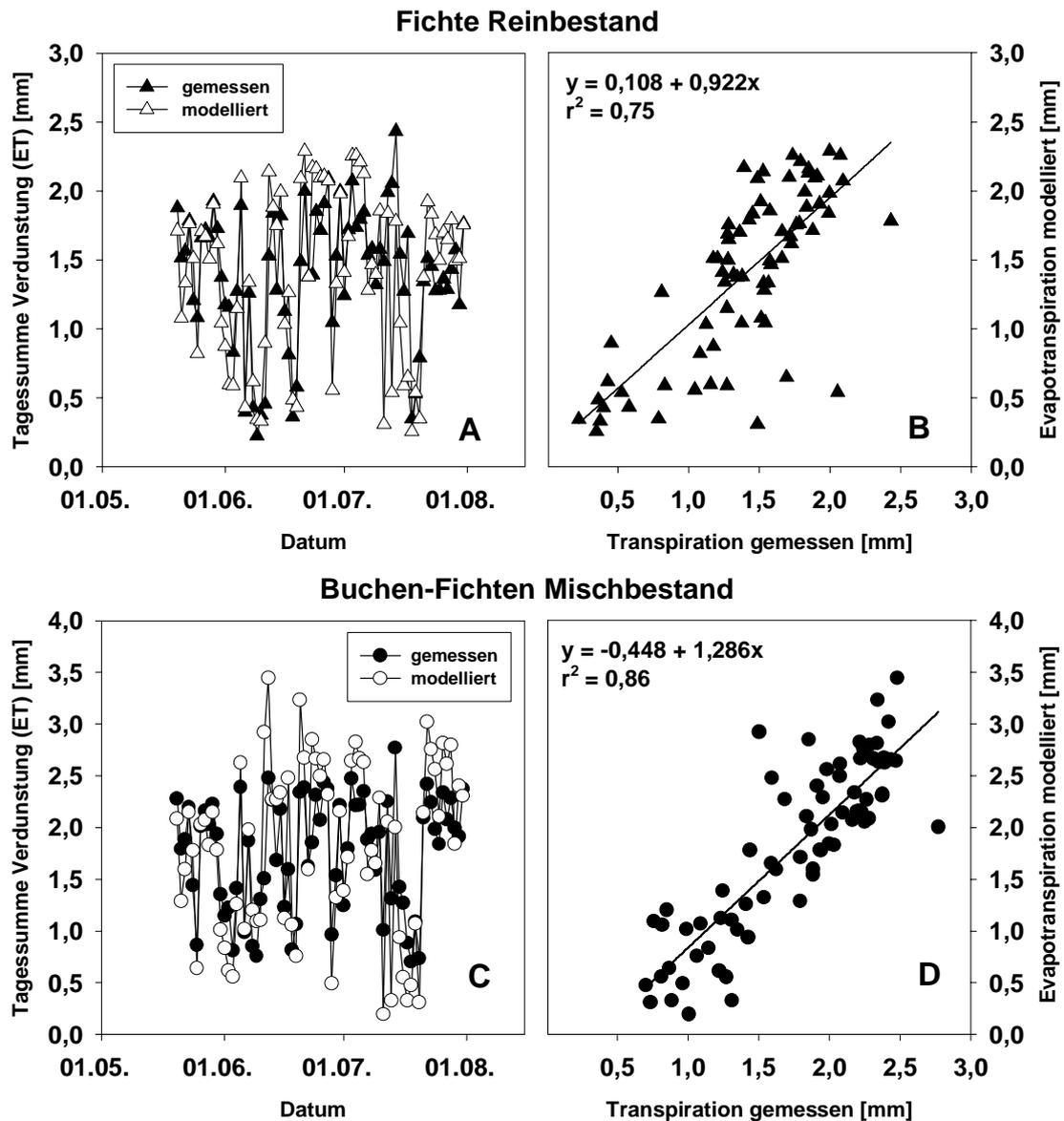


Abb. 3-50 Modellierte und gemessene Tagessummen der Verdunstung (ET) für den Fichten-Rein- (A) und Buchen/Fichten-Mischbestand (C) bzgl. der Untersuchungsflächen am **Sperrgraben** während des Zeitraums vom 20.05. - 31.07.2001. B, D Beziehung der gemessenen und modellierten Tagessummen der Verdunstung im gleichen Zeitraum für die beiden Bestände (Daten der modellierten ET: J. HÄNTZSCHEL).

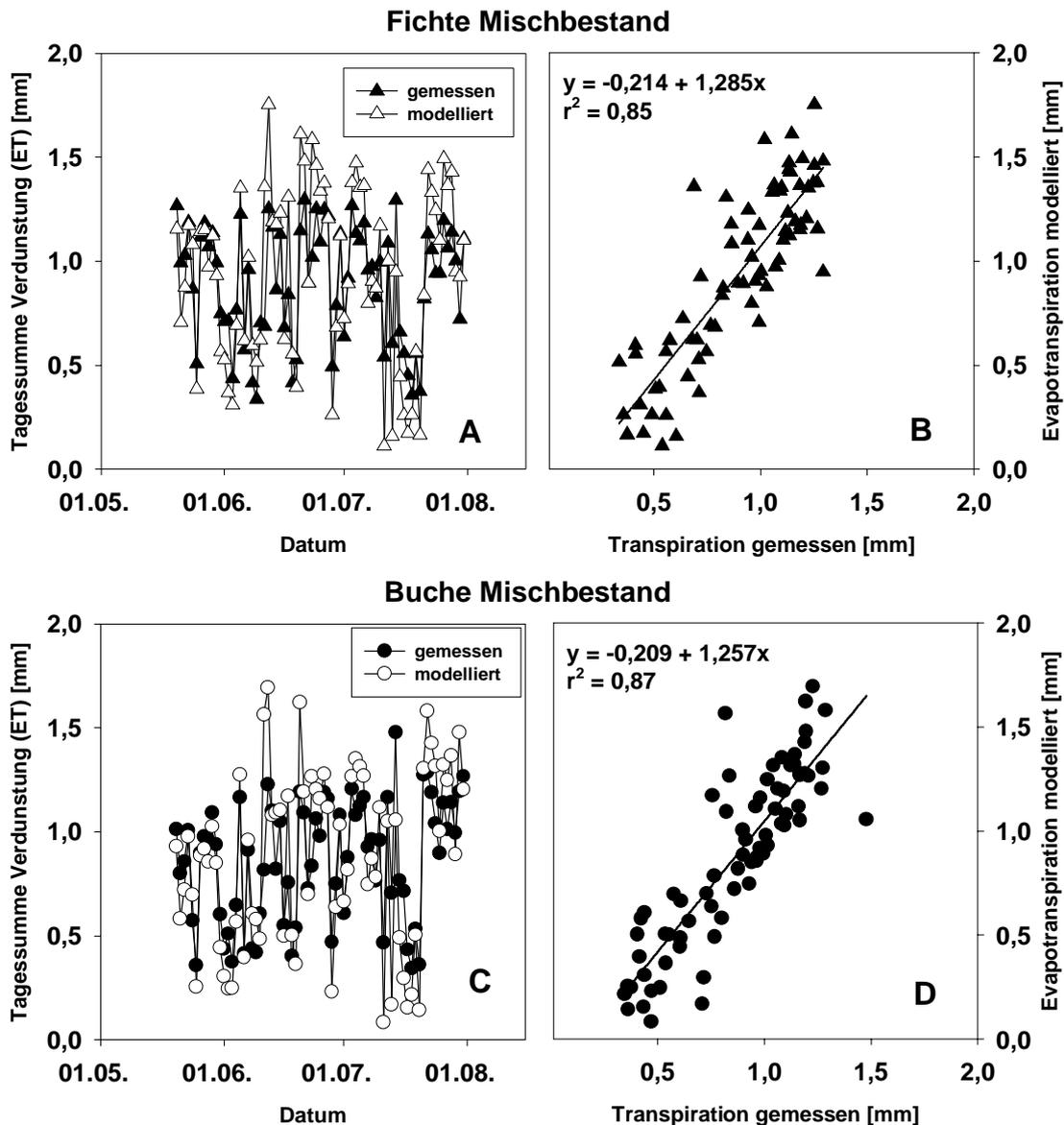


Abb. 3-51: Modellierte und gemessene Tagessummen der Verdunstung (ET) anteilig für Fichte (A) und Buche (C) im Mischbestand bzgl. der Untersuchungsflächen am **Sperrgraben** während des Zeitraums vom 20.05. - 31.07.2001. B, D Beziehung der gemessenen und modellierten Tagessummen der Verdunstung im gleichen Zeitraum für die beiden Baumarten (Daten der modellierten ET: J. HÄNTZSCHEL).

In der Gesamtsumme (Tab. 3-52) zeigte sich für den Vergleichszeitraum 2001 eine sehr gute Übereinstimmung von maximalen Unterschieden von 3 % zwischen Modell- und Messergebnissen des Misch- und weniger als 0,1 % für den Reinbestand am Sperrgraben.

Tabelle 3-52: Evapo- und Transpirationswerte [ET und T in mm] für den Zeitraum 20.05. – 31.07.2001. Ergebnisse aus Xylemflussmessungen (PATZNER) und Modellierungen in HIRGIS (HÄNTZSCHEL).

Vergleichs-Zeitraum:	Mischbestand			Reinbestand
	Gesamt	Buche	Fichte	Fichte
20.05. - 31.07.2001				
T gemessen [mm]	128,6	62,9	65,6	102,3
ET modelliert mit HIRGIS [mm]	132,6	63,8	68,7	102,2

Die funktionalen Beziehungen zwischen gemessenen und modellierten Tagessummen der Verdunstung für Buche und Fichte als Rein- bzw. Mischbestand zeigen leichte Überschätzungen der modellierten Evapotranspirationswerte gegenüber den gemessenen Transpirationswerten (Abb. 3-50 B, D und 3-51 B, D). Die Bestimmtheitsmaße sind in allen Beispielen sehr hoch und liegen zwischen 0,8 und 0,9, wodurch die sehr gute Qualität des angewendeten Modells unterstrichen wird.

### 3.2.7 Sommerwasserbilanz am Sperrgraben und im Kranzberger Forst

Die Abbildungen 3-53 und 3-54 zeigen jeweils die Sommer-Wasserbilanz für den Bergwald am Sperrgraben und den Tieflagenwald im Kranzberger Forst. Alle Größen der Wasserbilanz wurden auf die projizierte Grundflächeneinheit bezogen und als Niederschlagsäquivalente in mm H<sub>2</sub>O angegeben. In beiden Bilanzen wird die Interzeption (bei jeweils ähnlichem LAI von 6 bis 7 für projizierte Blatt- und Nadelflächen) aus der Differenz zwischen Freiland- und Bestandesniederschlag berechnet. Im Gegensatz zu dem Reinbestand wird bei den Mischbeständen am Sperrgraben und im Kranzberger Forst der Bestandesniederschlag unter Berücksichtigung des Stammablaufs angegeben. Gerade bei glattrindigen Baumarten mit aufrecht stehenden Ästen (wie z. B. Buche), fließt ein beachtlicher Anteil des Niederschlags am Stamm ab. Je rauer die Borke und je größer der Astwinkel, um so eher kann der Stammabfluss als Teil des Bestandesniederschlags vernachlässigt werden.

Während der Vegetationsperioden 1999 - 2001 (jeweils 15.05. bis 15.09.) wurden im Mischbestand am Sperrgraben 11 bis 32 % des Freilandniederschlags (876 bis 1251 mm = 100 %) *via* Interzeption durch das Bestandeskronendach an die Atmosphäre zurückgeführt (Abb. 3-53). Weitere 16 bis 23 % wurden durch die Transpiration des Bestandeskronendaches abgeführt. Somit verblieben als Niederschlag-Restmenge 52 bis 66 %, welche vor allem dem Hangabfluss bei der steilen Flächenneigung und der Evaporation zugerechnet wurde. Der Stammablauf über Buche in den Mischbestand betrug etwa 5 % des Freilandniederschlags. Im Fichten-Reinbestand (Abb. 3-53) verteilte sich die Niederschlagsmenge bei tendenziell jeweils geringerer Spannweite der Daten auf ähnliche Weise über Interzeption (22 bis 34 %), Transpiration (13 bis 19 %) und die berechnete Niederschlag-Restmenge (53 bis 59 %).

## Sperrgraben:

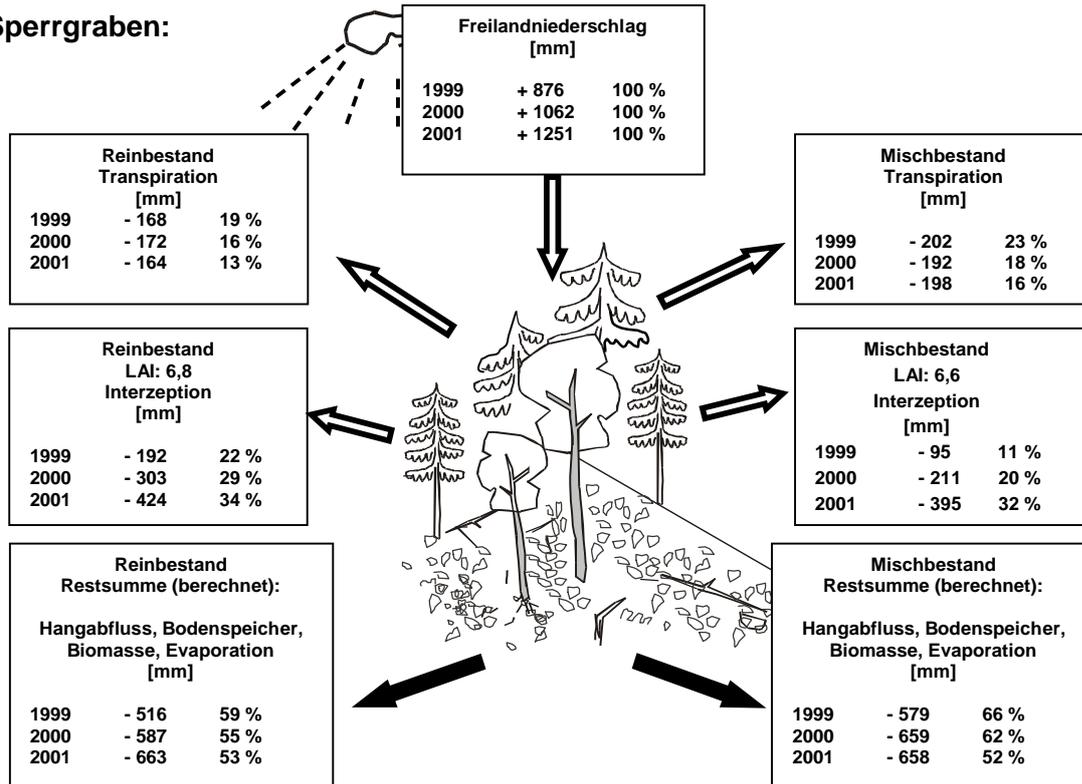


Abb. 3-53: Sommer-Wasserbilanz des Bergwaldes am **Sperrgraben** während der Vegetationsperioden vom 15. Mai – 15. September der Jahre 1999 - 2001. (Offene Pfeile = Messungen, geschlossene Pfeile = Berechnungen).

## Kranzberger Forst:

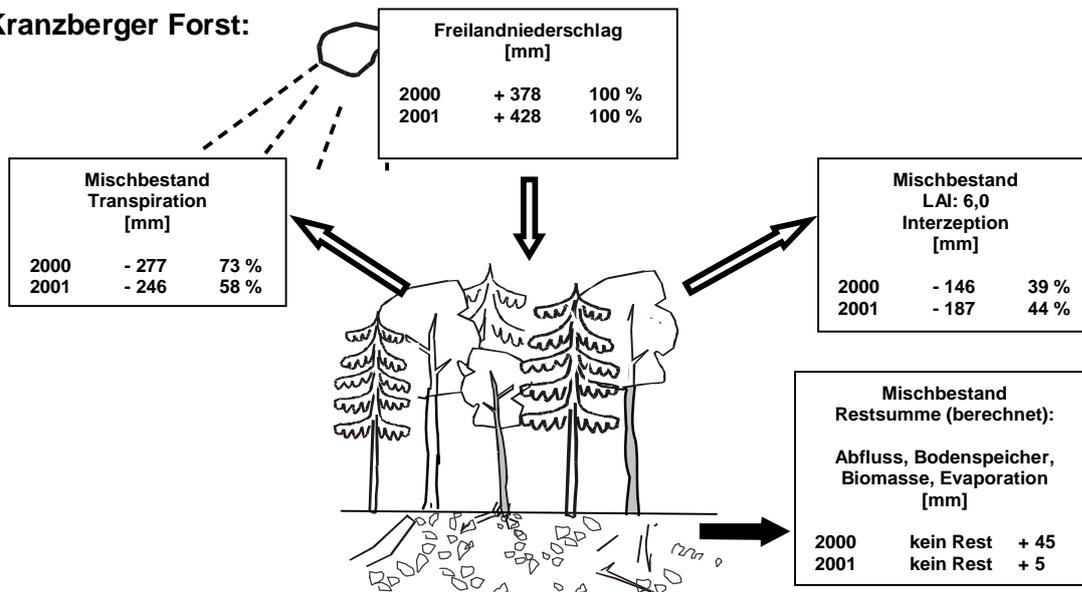


Abb. 3-54: Sommer-Wasserbilanz des Mischbestandes am Tieflagenstandort **Kranzberger Forst** während der Vegetationsperioden vom 15. Mai – 15. September der Jahre 2000 - 2001. (Pfeile wie Abb. 3-53).

Am Tieflagenstandort des Mischbestandes Kranzberger Forst (Abb. 3-54) waren bei niedrigerem Freilandniederschlag (378 bis 428 mm, jeweils 15.05. bis 15.09.2000 und 2001, mit ca. 5 % Abweichung ähnlich zu 5 km entfernt gelegener Messstelle „Landtechnik“/Campus Weihenstephan) die Anteile für Interzeption (39 bis 44 %) und Transpiration (58 bis 73 %) höher als am Sperrgraben. Als Stammablauf der Buche ergab sich etwa 13 % des Freilandniederschlags. Rechnerisch ließ sich keine Restmenge ermitteln, jedoch ist eine solche von über 10 % im Rahmen der Erfassungsgenauigkeit (z. B. der Bestandestranspiration: KÖSTNER 1999) nicht auszuschließen. Neben geringer Evaporation ist der Hangabfluss für die ebene Bestandesfläche in Kranzberg zu vernachlässigen (Hangneigung 1°). Somit erscheint im Sommer der Kreislauf zwischen Wassereintrag in den Bestand und Bestandestranspiration weitgehend geschlossen.

### 3.3 Gaswechselfmessungen im Kranzberger Forst

Die Kopplung der Transpiration an die CO<sub>2</sub>-Aufnahme (*via* g<sub>fac</sub>) sowie die Klärung des Ausmaßes der Schattkronentranspiration und der Bedeutung des bauminternen Wasserspeichers wurden exemplarisch im Kranzberger Forst bearbeitet (edaphisch und strukturell ähnlicher Buchen-Fichten-Mischbestand wie am Sperrgraben), dessen intensive Instrumentierung und Gerüst-Installationen (Messfläche im SFB 607) den Kronenraum für direkte Porometriemessungen auf Blatt-/Astebene zugänglich machten. Die Befunde aus dem Kranzberger Forst gingen in die Modellierungen (der Partnergruppen) des Wasserhaushaltes des Hochlagenstandortes Sperrgraben ein (Kap. 3.2.6).

#### 3.3.1 Witterungsbedingungen an den Messtagen

Tagesgänge der Blatt-/Nadeltranspiration im Zusammenhang mit den zugehörigen Photosyntheseraten wurden exemplarisch während der Sommermonate mittels Gaswechselfmessungen (LICOR 6400, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Diffusions-Porometer) an typischem Sonnen- und Schattenlaub (entsprechend SLA) unter herrschenden, Witterungsbedingungen aufgezeichnet. Abbildung 3-55 bietet eine Übersicht über die zu den Messtagen (Anzahl der Messtage siehe Kap. 2.8.5, Tab. 2.8.5.-1) gehörigen Verläufe von Lufttemperatur und photosynthetisch aktiver Strahlung.

Die dargestellten Tagesverläufe zeigen meist intensive Strahlungstage (z. B. 27. Juni 1999 oder 19. Juni 2000), die teilweise aufgrund vorübergehender Bewölkung kurzfristige Änderungen der einfallenden Strahlung (z. B. in den Mittagsstunden des 25. Juni 2000 und 02. Juli 2001) aufwiesen. Die Temperaturverläufe der Messtage zeigen vor Sonnenaufgang ein Temperaturminimum (gegen 4:00 bis 5:00 Uhr morgens), das zwischen 10 und 15 °C schwankte und ein Tagesmaximum, das gegen 15:00 - 16:00 Uhr erreicht wurde und zwischen 17 und 31 °C lag (Tab. 3-56). Die niedrigste mittlere Tagestemperatur von 13,6 °C zeigte trotz relativ hoher Strahlungssumme (43,8 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) der 16.06.2000, die höchste wurde am 02.08.2001 mit 24 °C gemessen. Die Strahlungssumme dieses Tages betrug 49,7 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Die niedrigste Strahlungssumme der Gesamt-Messtage wies der 27.08.2001 mit 36,2 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (T<sub>mittel</sub> 20,3 °C) auf, die höchste lag mit 64,7 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> am 19.06.2001 (T<sub>mittel</sub> 21,8 °C) vor. Die Standardtage (= synthetischer Tag für die Modellierer, s. Kap. 2.7.5) wurden separat für Buche und Fichte (Buche: Juni/Juli 1999 und 2000; Fichte: Juli/August 2001) über sämtliche in Tabelle 2.8.5-1 aufgelistete Messtage aus Mittelwerten je 10 min Intervall gebildet. Für den Buche-Standardtag betrug die mittlere Lufttemperatur 18,1 °C (T<sub>max</sub> 22,8 °C) und die Strahlung 52,1 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Beim Fichte-Standardtag lag die mittlere Lufttemperatur um 1,5 °C höher als bei der Buche (T<sub>max</sub> 25,9 °C), die Strahlung war um ca. 10 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> niedriger (42,9 mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

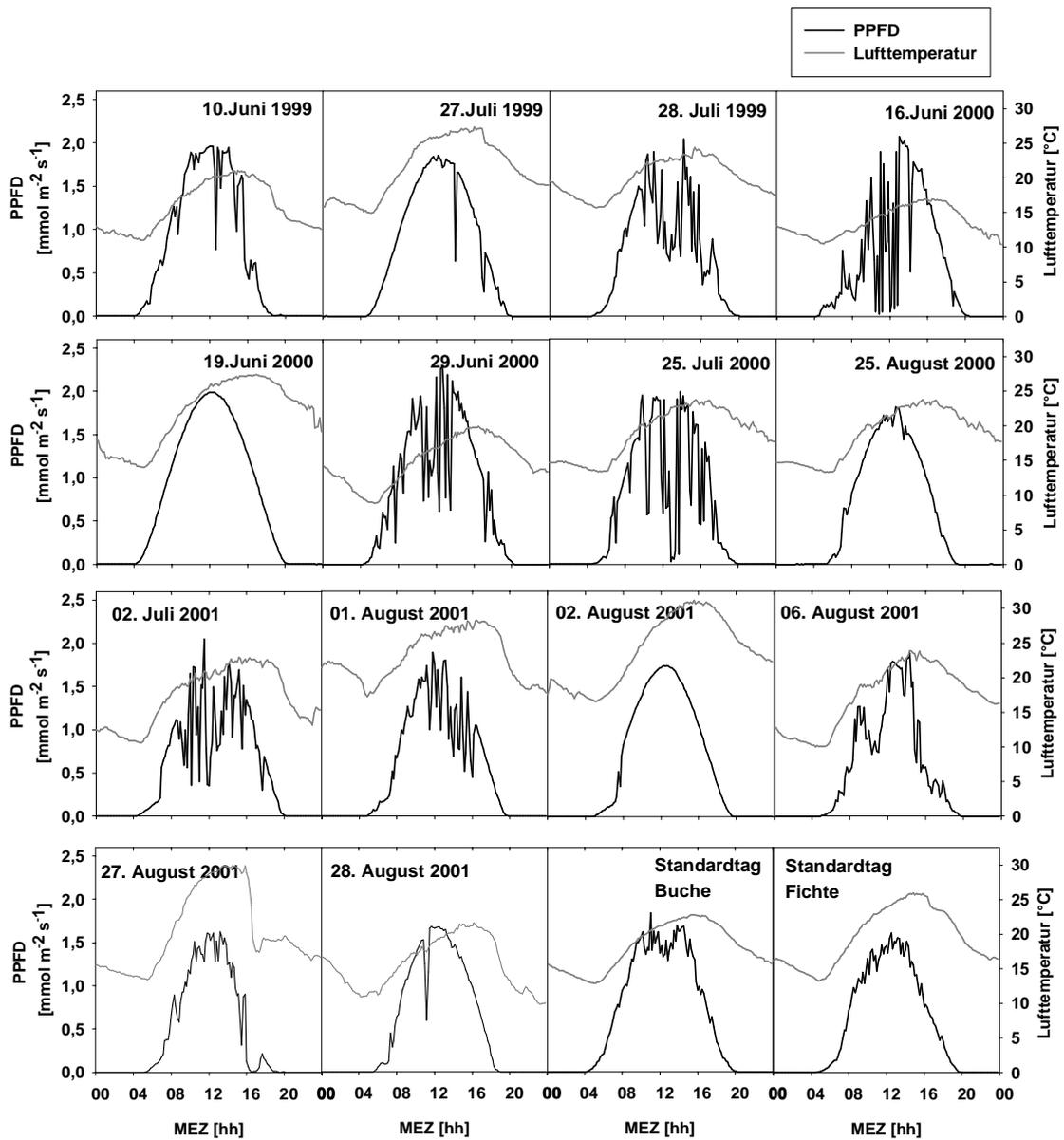


Abb. 3-55: Tagesverläufe der über dem Bestand ermittelten Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD) und Lufttemperatur während der Porometrietage an Buche und Fichte im **Kranzberger Forst**. Standardtage wurden separat für Buche und Fichte über sämtliche in Tab. 2.8.5-1 aufgelisteten Messtage aus Mittelwerten je 10-min-Intervall gebildet.

## Ergebnisse

Tab. 3-56: Mittlere, maximale Lufttemperatur ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ) und Tagessumme der Photonenflussdichte der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD) für alle Porometriemesstage im **Kranzberger Forst**. Berechnung der Standardtage wie bei Abb. 3-55.

Datum	$T_{\text{mittel}}$ [°C]	$T_{\text{max}}$ [°C]	PPFD [mol m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]
10.06.1999	15,8	21,0	54,9
27.07.1999	21,3	27,3	55,8
28.07.1999	16,4	24,3	43,7
16.06.2000	13,6	17,0	43,8
19.06.2000	21,8	27,4	64,7
29.06.2000	14,9	20,0	57,4
25.07.2000	18,8	23,8	47,9
25.08.2000	18,3	23,0	48,5
02.07.2001	17,2	23,0	44,9
01.08.2001	23,0	28,3	44,6
02.08.2001	24,0	31,3	49,7
06.08.2001	17,2	23,9	39,4
27.08.2001	20,3	29,9	36,2
28.08.2001	15,6	21,6	44,5
Standardtag Buche	18,1	22,8	52,1
Standardtag Fichte	19,6	25,9	42,9

### 3.3.2 Anteil der Transpiration der Schattenkrone am Wasserverbrauch der Gesamtkrone

Am Beispiel einiger Sommertage der Jahre 2000 bzw. 2001 wird der wechselnde Anteil der Transpiration der Schattenkrone an der Gesamtkrone einer Buche und Fichte an einem strahlungsreichen Tag und unter wechselnder Bewölkung dargestellt (zugehörige Klimaangaben s. Abb. 3-55 bzw. Tab. 3-56). Die Tagesgangmessungen erfolgten zeitgleich an typischem entsprechend der SLA eingeteilten Sonnen- und Schattenlaub (Abb. 3-57). Die jeweiligen blatt-/nadelflächenbezogenen Transpirationsraten (Sonnenblätter/-nadeln stets unbeschattet) wurden entsprechend der Flächenanteile des Sonnen- und Schattenlaubes auf die Kronenebene hochgerechnet – als Orientierungsbasis für Modellierungen (durch Partnergruppe Bernhofer) des Anteils der Schattenkronentranspiration an der gesamten Bestandeskronentranspiration.

In Buche (Kraft-Klasse 3) belief sich der Anteil des Schattenkrone an der Gesamtkronentranspiration auf 29 % (Strahlungstag) bzw. 43 % (wechselnde Bewölkung; Abb. 3-57); im gezeigten Beispiel betrug die Gesamtkronentranspiration unter beiden Witterungsbedingungen ca. 240 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (= 100 %).

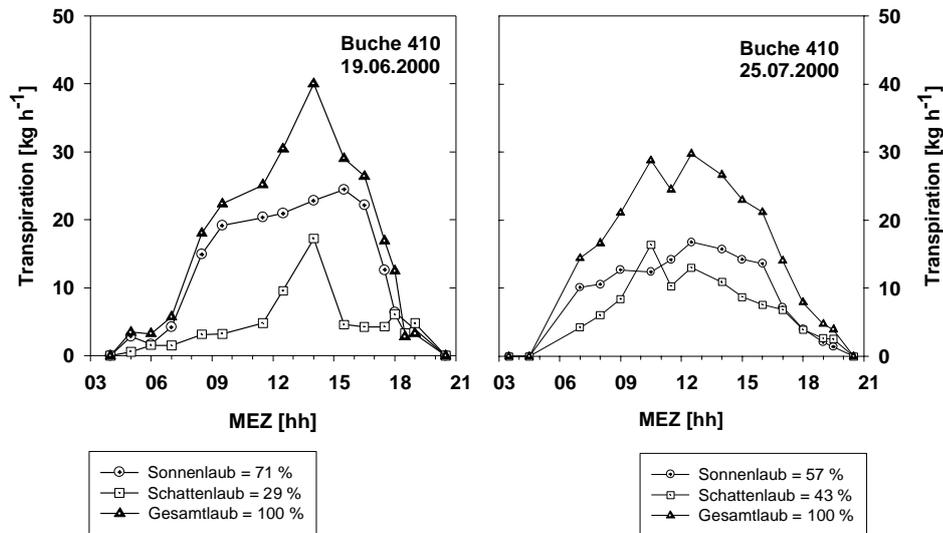


Abb. 3-57: Anteile der Transpiration von Sonnen- und Schattenlaub im Tagesgang an der Gesamtkronentranspiration am Beispiel einer **Buche im Kranzberger Forst** (Skalierung von Blatt-/Nadelebene auf Kronenebene s. Text): Strahlungstag links, wechselnde Bewölkung rechts (s. Abb. 3-55).

Bei Fichte (Kraft-Klasse 2) war der Anteil der Schattenkronentranspiration an der Gesamtkronentranspiration ähnlich wie bei Buche (Abb. 3-58): 25 % (Strahlungstag) bis 37 % (wechselnde Bewölkung). Die Gesamtkronentranspiration belief sich im gezeigten Beispiel unter wechselnder Bewölkung, jedoch nur auf etwa 50 % des Wasserverbrauchs während des Strahlungstages ( $129 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ).

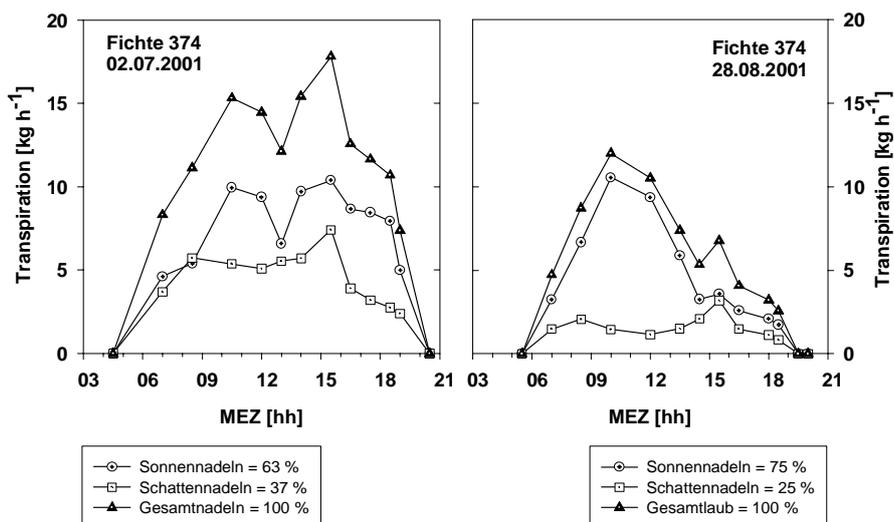


Abb. 3-58: Anteil der Transpiration von Sonnen- und Schattenlaub im Tagesgang an der Kronentranspiration (= 100 %) am Beispiel einer dominanten **Fichte im Kranzberger Forst** (Skalierung von Blatt-/Nadelebene auf Kronenebene s. Text): Strahlungstag links, wechselnde Bewölkung rechts (s. Abb. 3-55).

## Ergebnisse

Tabelle 3-59: Kronendachtranspiration ( $E_c$ ) von Sonnen- und Schattenlaub im Buchen-Fichten-Mischbestand (getrennt nach Baumart) und Fichten-Reinbestand am **Sperrgraben** sowie im Buchen-Fichten-Mischbestand des **Kranzberger Forsts** (alle Berechnungen auf Basis der Porometrie-Daten aus dem Kranzberger Forst, s. Abb. 3-57 und 3-58).

Buche			Fichte		
Datum	$E_c$ -Anteil Sonnenlaub	$E_c$ -Anteil Schattenlaub	Datum	$E_c$ -Anteil Sonnennadeln	$E_c$ -Anteil Schattennadeln
<b>Buchen-Fichten Mischbestand Kranzberger Forst</b>					
19.06.2000	6921 kg 75 %	2300 kg 25 %	02.07.2001	4151 kg 46 %	4880 kg 54 %
27.07.2000	3851 kg 62 %	2379 kg 38 %	28.08.2001	3459 kg 60 %	2272 kg 40 %
<b>Buchen-Fichten Mischbestand: Sperrgraben</b>					
19.06.2000	3456 kg 74 %	1167 kg 26 %	02.07.2001	1857 kg 52 %	1723 kg 48 %
27.07.2000	2631 kg 61 %	1652 kg 39 %	28.08.2001	624 kg 66 %	324 kg 34 %
<b>Fichten Reinbestand: Sperrgraben</b>					
			02.07.2001	2759 kg 52 %	2508 kg 48 %
			28.08.2001	2019 kg 66 %	1025 kg 34 %

Berechnet auf der Basis der Ergebnisse aus dem Kranzberger Forst betrug der Anteil der Schattenlaubtranspiration an der Gesamt-Kronendachtranspiration ( $E_c$ ) sämtlicher Buchen des Mischbestandes am Sperrgraben am 19.06.2000 (sonnige Witterung) 26 % und am 27.07.2000 (zeitweise bedeckt) 39 % (Tabelle 3-59). Die Schattenlaubtranspiration von  $E_c$  für Buche im Kranzberger Forst lag für diesen Strahlungstag bei 25 % und für den wechselnd bewölkten Tag bei 38 %. Bei Fichte liegen die Anteile der Schattenkronentranspiration an  $E_c$  sämtlicher Fichten des Misch- und Reinbestandes am Sperrgraben bei jeweils 48 % am 02.07.2001 (Strahlungstag) und bei ca. 34 % am 28.08.2001 (wechselnd bewölkt; Tab. 3-59 und Abb. 3-55). Hingegen ist im Kranzberger Forst die Schattenlaubtranspiration von  $E_c$  bei Fichte sowohl am strahlungsreichen (02.07.2001), als auch am bedeckten Tag (28.08.2001) um 6 % höher. Ursache, für den unterschiedlichen Beitrag der Schattenlaubtranspiration an der Gesamt-Kronendachtranspiration der Untersuchungsflächen, ist der aus den Biomassenerhebungen ermittelte, verschieden große Anteil an Schattenlaub.

### 3.3.3 Ermittlung des bauminternen Wasserspeichers

Zur Bestimmung des bauminternen Wasserspeichers wurde auf Stundenbasis während der in Abbildung 3-55 aufgelisteten Messtage mit sonnig-warmer Witterung, der im Tagesgang in Brusthöhe gemessene Xylemfluss mit der durch Gaswechselfmessungen ermittelten Transpirationsrate der Sonnen- und Schattenbelaubung verglichen. Als Eingangsgröße für die Modellierung (durch Partnergruppe Bernhofer) wurde der Vergleich auf prozentualer Basis vorgenommen, d. h. die Maxima von Xylemfluss und Blatt-/Nadeltranspiration wurden jeweils gleich 100 % gesetzt (SCHULZE ET AL. 1985; KÖSTNER ET AL. 1992). Über sämtliche Messtage je Baumart hinweg wurden pro Stundenintervall die Mittelwerte von Xylemfluss und Transpirationsrate gebildet, und auf dieser Basis die in den Abbildungen 3-60 bis 3-64 gezeigten „Standard-Tage“ als Grundlage für die Modellierung des zeitlichen Versatzes zwischen Wasserfluss in Brusthöhe und Belaubung abgeleitet.

Die Abbildungen 3-60 und 3-61 zeigen mehrere Tagesverläufe der anhand beider Methoden ermittelten Transpirationsraten für die Sonnen- und Schattenkrone der Buche. Beim Vergleich der durch Xylemfluss und Gaswechselfmessung ermittelten Transpirationsraten mit den zugehörigen Kurven (Abb. 3-55) der photosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD) war deutlich eine Ähnlichkeit zwischen den tageszeitlichen Schwankungen zu erkennen. Diese verliefen, jedoch nur mit der porometrisch ermittelten Kronentranspiration synchron. So begann die Kronentranspiration mit Sonnenaufgang (ca. 4:00 Uhr morgens) bzw. und endete mit Sonnenuntergang (ca. 20.30 Uhr). Die Kronentranspiration erreichte ihr Maximum noch am Vormittag und war bereits ab dem frühen Nachmittag eingeschränkt. Die durch den Xylemfluss ermittelte Transpirationsrate setzte erst mit einem zeitlichen Versatz von ca. 2 bis 3 Stunden nach Sonnenaufgang ein und hielt dafür noch mehrere Stunden nach Sonnenuntergang und Ende der Kronentranspiration an. Diese morgendliche und abendliche zeitliche Phasenverschiebung zwischen Xylemfluss und Porometrie trat in der Schattenkrone weniger deutlich zutage als in der Sonnenkrone (Abb. 3-61). Die Größe des Wasserspeichers, bestimmt aus der morgendlichen Differenzfläche zwischen Xylemfluss und Transpiration des Sonnenlaubes, schwankte an den dargestellten Messtagen zwischen 4 bis 39 % (Tab. 3-62) und belief sich für den aus diesen Tagen ermittelten Standardtag auf ca. 18 % des Tageswasserverbrauchs von 32 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (berechnet aus über den Tag integrierten Xylemflussmessungen in Brusthöhe). Bei dem Standardtag der Schattenkrone halbierte sich dieser Wert, bei einem berechneten Tageswasserverbrauch von ca. 25 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (s. Tab. 3-62).

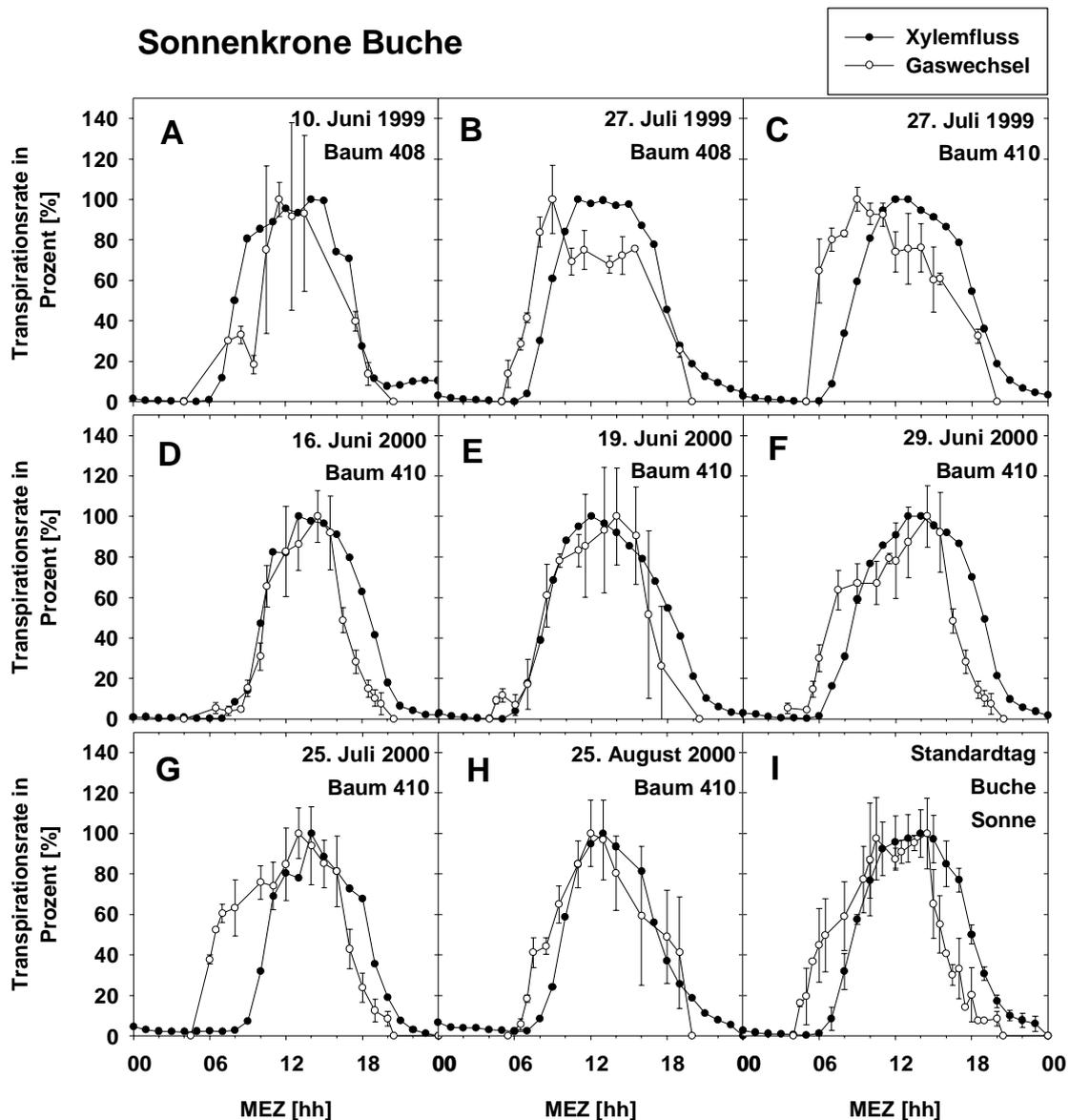


Abb. 3-60: Prozentualer Vergleich der Tagesgänge des Xylemflusses (Granier-Methode) und der Transpiration ( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Diffusions-Porometer) in **Buchen Sonnenkronen (Kranzberger Forst)**. Darstellung von Messmittelwerten aus 4 bis 5 Blättern und ihrer Standardabweichungen bei der Transpiration. Pro Tag erfolgte die Normierung des Xylemflusses und der Blatttranspiration auf den mittleren Maximalwert (= 100 %). Der „Standard-Tag“ wurde aus Mittelwerten je Stundenintervall der Messtage A - H gebildet. Zugehörige, entsprechend gemittelte Klimadaten s. Abb. 3-57.

Der nachmittägliche Zeitversatz zwischen Xylemfluss und Transpiration, der in dem Wiederauffüllen des Stammspeichers begründet ist (s. Tab. 3-62, Bestimmung erfolgte wie beim Wasserspeicher), lag am Standardtag bei der Sonnenkrone in einer Größenordnung von 25 % (Tageswasserverbrauch:  $32 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ) und bei der Schattenkrone bei 19 % (Tageswasserverbrauch: ca.  $25 \text{ kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ).

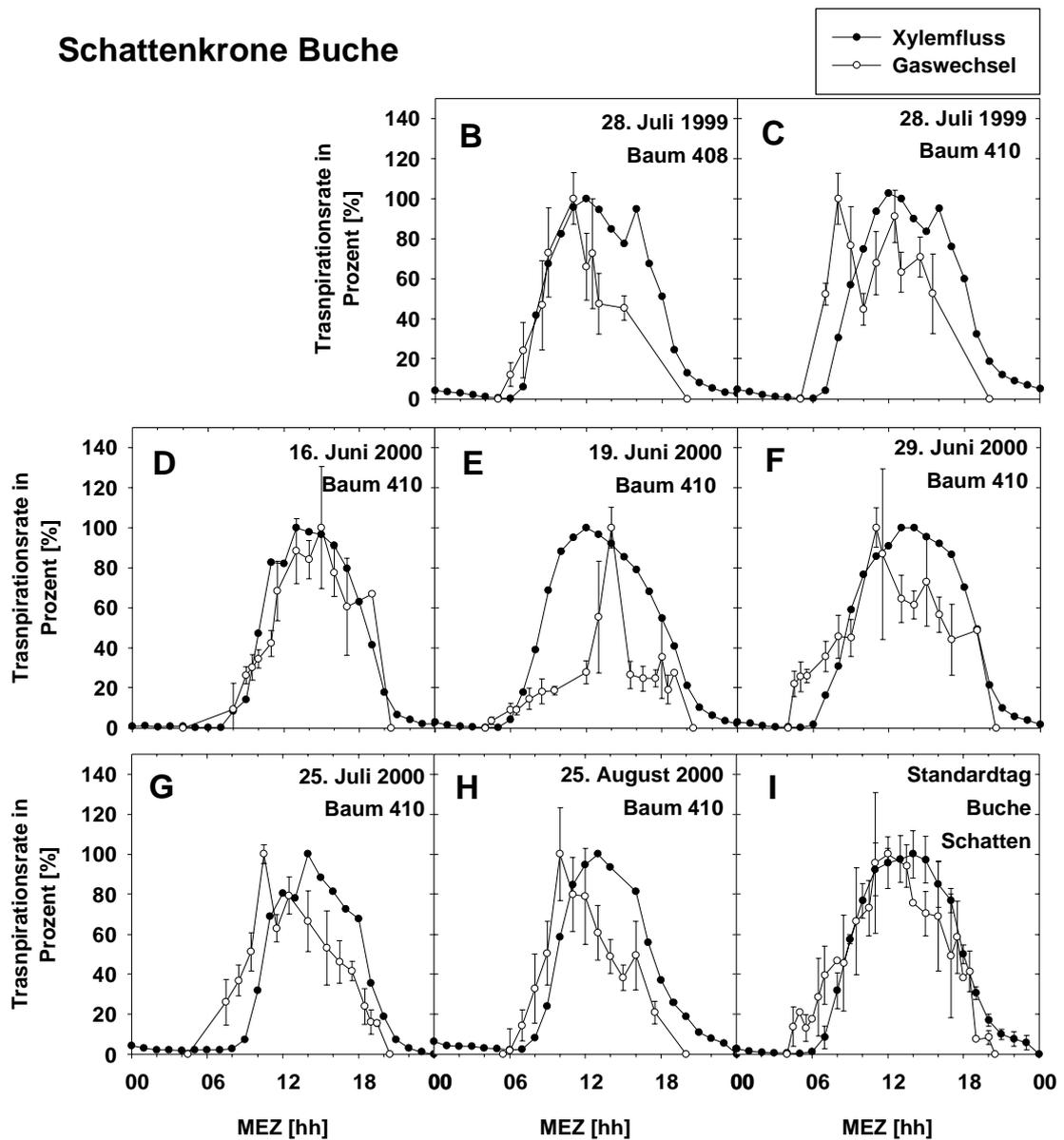


Abb. 3-61: Prozentualer Vergleich der Tagesgänge des Xylemflusses (Granier-Methode) und der Transpiration ( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Diffusions-Porometer) in **Buchen Schattenkronen (Kranzberger Forst)**. Darstellung von Messmittelwerten und Standardabweichungen (Datengrundlage: 4 bis 5 Einzelblätter) bei der Transpiration; Normierung der Messwerte erfolgte wie bei Abb. 3-60. Der „Standard-Tag“ wurde aus Mittelwerten je Stundenintervall der Messtage B - H gebildet. Zugehörige, entsprechend gemittelte Klimadaten s. Abb. 3-55.

## Ergebnisse

Tab. 3-62: Prozentualer Vergleich des Tageswasserverbrauchs des Xylemflusses (Granier-Methode = normiert auf 100 %) und der Transpiration ( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Diffusions-Porometer) in **Buchen Sonnen- und Schattenkrone (Kranzberger Forst)**. Berechnung des vormittäglichen Wasserspeichers und des nachmittäglichen Zeitversatzes aus Differenzflächen zwischen Xylemfluss und Transpiration. Angabe des Gesamttageswasserverbrauchs, ermittelt aus dem über den Tag integrierten Xylemfluss in Brusthöhe. Der „Standard-Tag“ wurde aus Mittelwerten je Stundenintervall der Messtage 10.06.1999 - 25.08.2000 bzw. 28.07.1999 - 25.08.2000 gebildet. Zugehörige, entsprechend gemittelte Klimadaten s. Abb. 3-55.

<b>Buche</b>	Datum	Wasser- verbrauch Xylemfluss ganzer Tag	Wasser- verbrauch Gaswechsel ganzer Tag	Wasserspeicher Zeitversatz vormittags	Zeitversatz nachmittags	Gesamttages- wasserverbrauch bestimmt durch Xylemfluss [kg $\text{H}_2\text{O}$ $\text{d}^{-1}$ ]
Baumnummer		[%]	[%]	[%]	[%]	
<b>Sonne</b>						
408	10.06.99	100	79	4	11	57,6
408	27.07.99	100	91	15	22	69,1
410	27.07.99	100	102	24	22	21,4
410	16.06.00	100	78	1	18	19,4
410	19.06.00	100	85	2	16	26,8
410	29.06.00	100	89	11	21	18,9
410	25.07.00	100	122	39	15	19,9
410	25.08.00	100	103	12	12	23,1
Standardtag		100	94	18	25	32
<b>Schatten</b>						
408	28.07.99	100	70	4	32	63,6
410	28.07.99	100	82	15	37	22,7
410	16.06.00	100	92	2	5	19,4
410	19.06.00	100	44	1	19	26,8
410	29.06.00	100	84	10	22	18,9
410	25.07.00	100	94	20	25	19,9
410	25.08.00	100	74	12	34	23,1
Standardtag		100	90,6	9	19	24,6

Ähnliche Trends wie bei Buche ergaben sich bei Fichte, allerdings war bei letzterer Art in der Sonnenkrone der vormittägliche und besonders der nachmittägliche zeitliche Versatz deutlich ausgeprägter (Abb. 3-63 und Tab. 3-65; Klimadaten s. Abb. 3-55). In der Schattenkrone verlief die Phasenverschiebung der beiden durch Xylemfluss und Porometrie bestimmten Transpirationsraten deutlich gedämpfter und war den Buchen ähnlicher (Abb. 3-64). Auch bei Fichte setzte synchron zum Sonnenaufgang die Transpiration in Sonnen- und Schattenlaub ein. Der Anteil des genutzten Wasserspeichers am Tageswasserverbrauch lag, bei Bestimmung am Vormittag und bezogen auf das Sonnenlaub, zwischen 10 bis 32 % (Tab. 3-65). Für die aus 5 bis 6 Tagen ermittelten Standardtage belief sich die Größenordnung des Wasserspeichers im Sonnenlaub auf ca. 13 % und im Schattenlaub auf ca. 11 % des Tageswasserverbrauchs von ca. 16 kg  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{d}^{-1}$  (Datengrundlage: Über den Tag integrierte Xylemflussmessungen in Brusthöhe). Der nachmittägliche Zeitversatz lag

am Standardtag der Fichten-Sonnenkrone in einer Größenordnung von 58 % und an dem der Schattenkrone bei 33 % und war damit fast doppelt so hoch wie bei Buche (vgl. Tab 3-62 und Tab. 3-65).

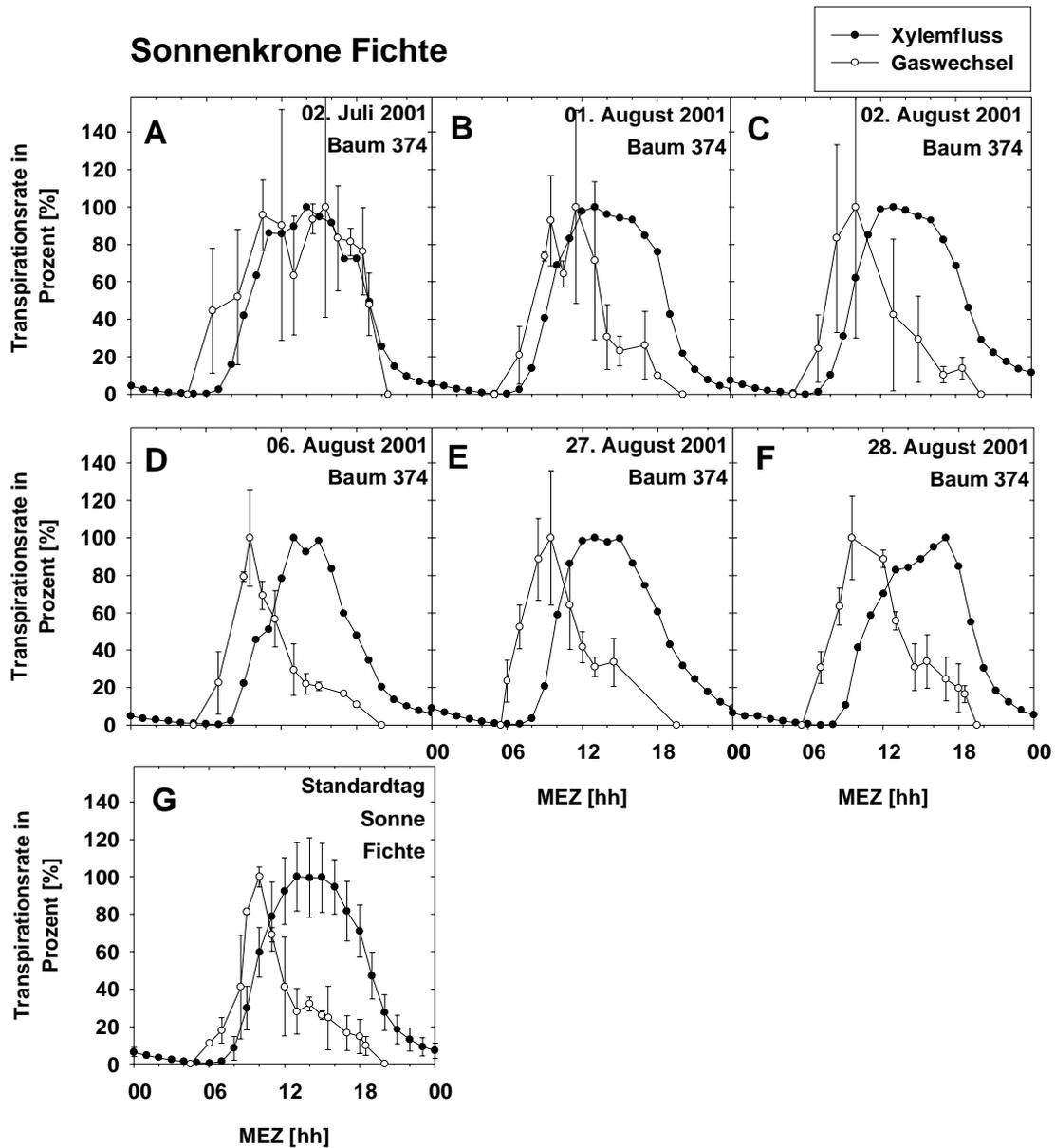


Abb. 3-63: Prozentualer Vergleich der Tagesgänge des Xylemflusses (Granier-Methode) und der Transpiration ( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Diffusions-Porometer) in **Fichten Sonnenkronen (Kranzberger Forst)**. Darstellung von Messmittelwerten und Standardabweichungen (Datengrundlage: 4 bis 5 1-jährige Triebe) bei der Transpiration. Pro Tag erfolgte die Normierung des Xylemflusses und der Blatttranspiration auf den mittleren Maximalwert (= 100 %). Der „Standard-Tag“ wurde aus Mittelwerten je Stundenintervall der Messtage A - F gebildet. Zugehörige, entsprechend gemittelte Klimadaten s. Abb. 3-55.

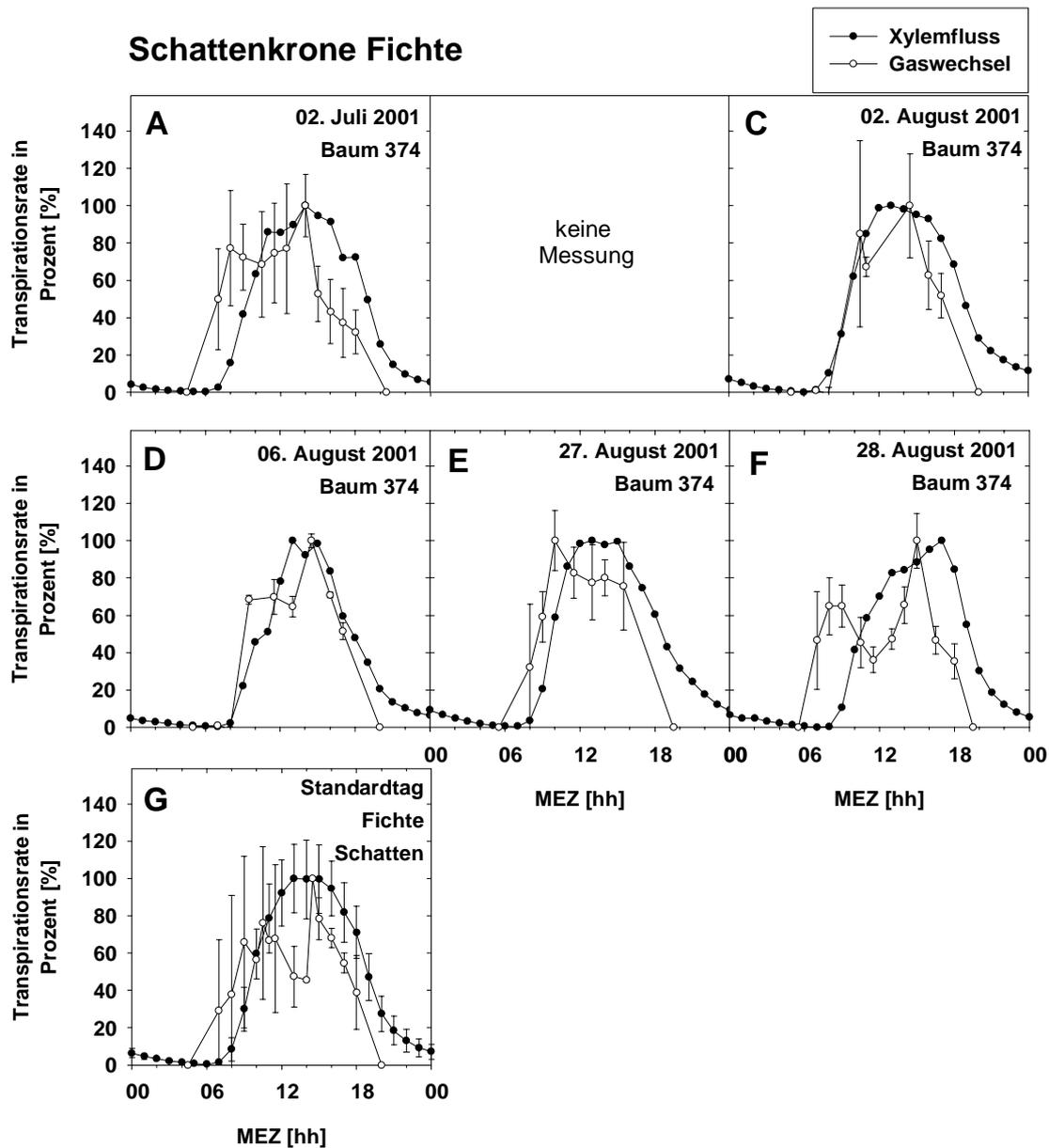


Abb. 3-64: Prozentualer Vergleich der Tagesgänge des Xylemflusses (Granier-Methode) und der Transpiration ( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Diffusions-Porometer) in **Fichten Schattenkronen (Kranzberger Forst)**. Darstellung von Messmittelwerten und Standardabweichungen (Datengrundlage: 4 bis 5 1-jährige Triebe) bei der Transpiration; Normierung der Messwerte erfolgte wie bei Abb. 3-63. Der „Standard-Tag“ wurde aus Mittelwerten je Stundenintervall der Messtage A - F gebildet. Zugehörige, entsprechend gemittelte Klimadaten s. Abb. 3-55.

Tab. 3-65: Prozentualer Vergleich des Tageswasserverbrauchs des Xylemflusses (Granier-Methode = normiert auf 100 %) und der Transpiration (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Diffusions-Porometer) in **Fichten Sonnen- und Schattenkrone (Kranzberger Forst)**. Berechnung des vormittäglichen Wasserspeichers und des nachmittäglichen Zeitversatzes aus Differenzflächen zwischen Xylemfluss und Transpiration. Angabe des Gesamttageswasserverbrauchs, ermittelt aus den über den Tag integrierten Xylemfluss in Brusthöhe. Der „Standard-Tag“ wurde aus Mittelwerten je Stundenintervall der Messtage 02.07.2001 - 28.08.2001 gebildet. Zugehörige, entsprechend gemittelte Klimadaten s. Abb. 3-55.

<b>Fichte</b> Baumnummer	Datum	Wasser- verbrauch Xylemfluss ganzer Tag [%]	Wasser- verbrauch Gaswechsel ganzer Tag [%]	Wasserspeicher Zeitversatz vormittags [%]	Zeitversatz nachmittags [%]	Gesamttages- wasserverbrauch bestimmt durch Xylemfluss [kg H <sub>2</sub> O d <sup>-1</sup> ]
<b>Sonne</b>						
374	02.07.01	100	114	19	8	20,5
374	01.08.01	100	62	10	46	16,8
374	02.08.01	100	62	18	56	15
374	06.08.01	100	61	23	60	16
374	27.08.01	100	63	26	47	14,4
374	28.08.01	100	30	32	53	15,5
Standardtag		100	50	13	58	16,4
<b>Schatten</b>						
374	02.07.01	100	90	20	20	20,5
374	02.08.01	100	76	1	23	15
374	06.08.01	100	89	9	18	16
374	27.08.01	100	82	13	27	14,4
374	28.08.01	100	82	22	40	15,5
Standardtag		100	75	11	33	16,3

### 3.3.4 Faktor für stomatäre Leitfähigkeit (g<sub>fac</sub>)

Der Parameter g<sub>fac</sub> wurde getrennt für Sonnen- und Schattenlaub als Steigung aus Gleichung 1 bestimmt (s. Kap. 2.8.6.1). Hierfür wurde für Buche und Fichte die stomatäre Leitfähigkeit mit der Netto-CO<sub>2</sub>-Aufnahmerate (korrigiert auf Luftfeuchte und CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft) bei sättigender PPF<sub>D</sub> korreliert (> 400 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> jeweils für Sonnenblätter im Kranzberger Forst, Schattenblätter > 200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, s. Abb. 3-66). Für Sonnenblätter der Buche betrug das frei variierte g<sub>min</sub> = 88,13 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> bei einem g<sub>fac</sub> = 10,6 und für Schattenblätter g<sub>min</sub> = 26,83 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> bei einem g<sub>fac</sub> von 9,6 (Abb. 3-67). In beiden Fällen waren die Bestimmtheitsmaße sehr hoch - zwischen 0,8 und 0,9. Bei Zwang von g<sub>min</sub> durch einen Minimalwert (hier = 1 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) wie er von einigen Autoren empfohlen wird (FALGE 1997), da größere Werte unter Umständen scheinbare Wasserverluste durch die Cuticula oder systematische Fehler des Meßsystems anzeigen können, steigt g<sub>fac</sub> bei Sonnenblättern der Buche auf 17,8 bzw. auf 16,7 bei Schattenblättern an (r<sup>2</sup> = 0,3 bzw. 0,2). Sonnennadeln der Fichte ergaben bei einem variablen g<sub>min</sub> von 11,7 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

## Ergebnisse

einen  $g_{fac}$  von 14,0 und Schattenblätter bei einem  $g_{min}$  von 13,8  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  einen  $g_{fac}$  von 20. Auch hier waren die Bestimmtheitsmaße mit 0,9 und 0,8 hoch. Bei einem  $g_{min}$  von 1 wiesen die Sonnennadeln ein  $g_{fac}$  von 18 auf mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,7. Da die Schattennadeln keine positive Nettophotosynthese erreichten und meistens atmeten, war die Bestimmung vom  $g_{min} = 1$  nicht sinnvoll. Aufgrund der unterschiedlichen Morphologie der Blattorgane wurden die Gaswechselfparameter bei Buche auf die projizierte Blattfläche und bei Fichte auf die allseitige Blattoberfläche bezogen.

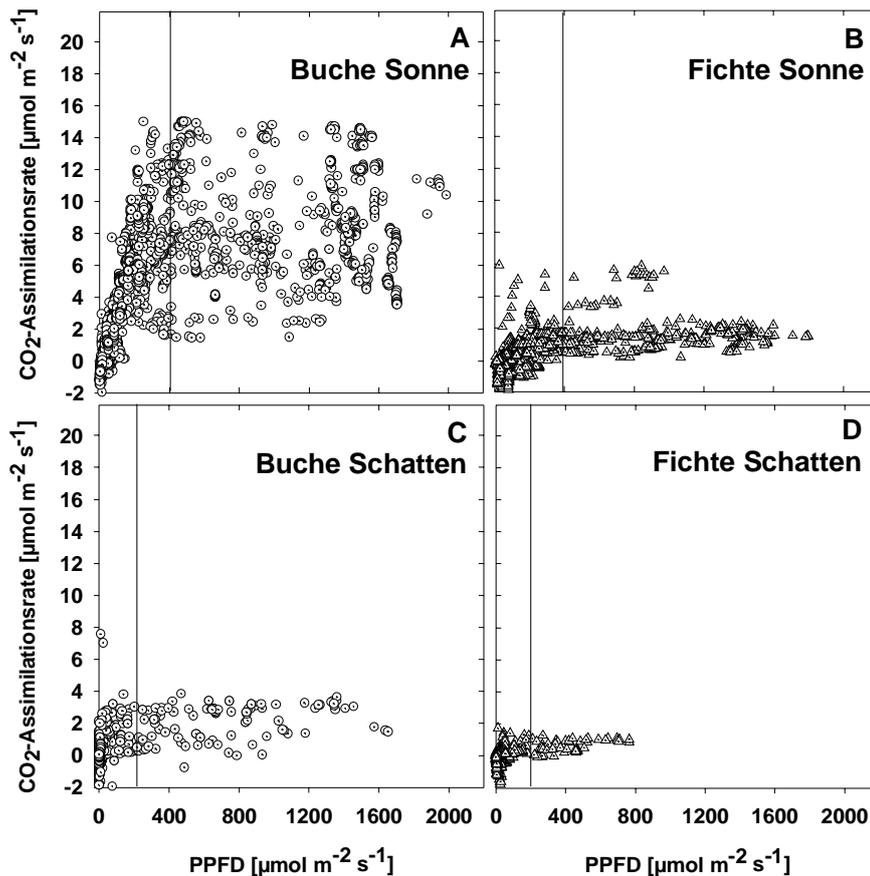


Abb. 3-66: Lichtabhängigkeitskurven der Nettophotosynthese ( $\text{CO}_2$ -Assimilationsrate) abgeleitet aus im Nachlauf betriebenen Tagesgangmessungen bei Sonnen- und Schattenlaub von Buche und Fichte. Die gezeigten Kurven beziehen sich auf die in Kap. 3.3.3 vorgestellt Messtage und Klimabedingungen (s. auch Tab. 3-56). Die eingezeichneten Senkrechten kennzeichnen die Lichtstärke, bei der die Nettophotosynthese lichtgesättigt ist und die Steigung Null wird.

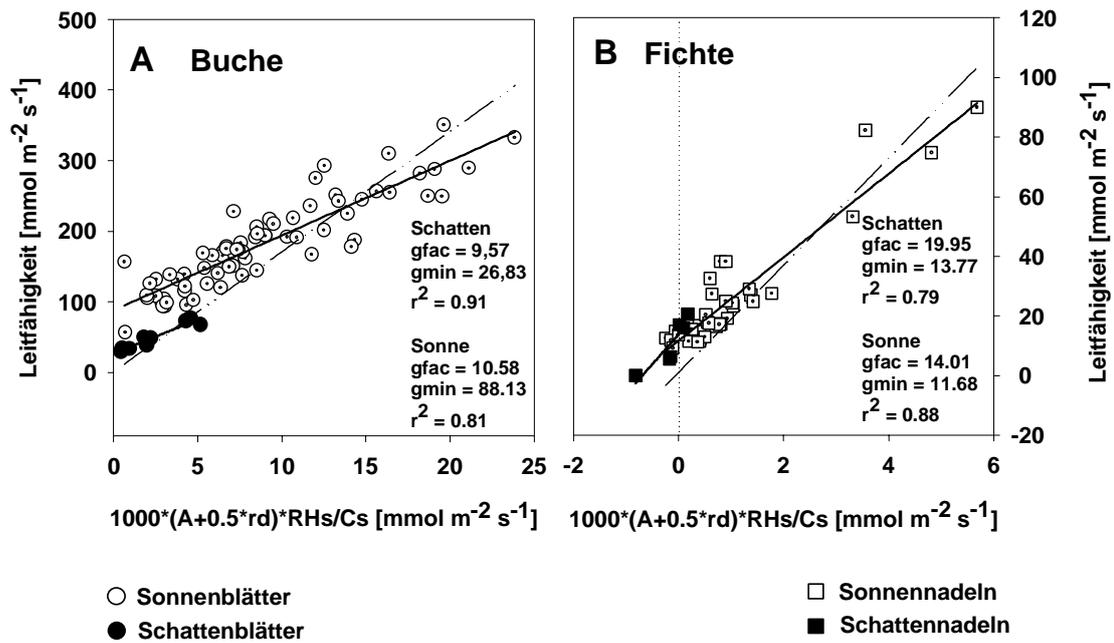


Abb. 3-67: Beziehungen zwischen stomatärer Leitfähigkeit für Wasserdampf und der nach Gleichung (1, Kap. 2.8.6.1) korrigierten Netto- $\text{CO}_2$ -Aufnahmerate (bei sättigender PPFD) aus Tagesgängen von Buche und Fichte im **Kranzberger Forst**.  $g_{\text{fac}}$  ergibt sich nach Gleichung (1) als Steigung der Beziehung. Bei Buche sind die Gaswechselfparameter auf die projizierte Blattoberfläche, bei Fichte auf die allseitige Blattoberfläche bezogen. Die gestrichelte Gerade zeigt die Steigung bei  $g_{\text{min}} = 1$  an.

### 4 Diskussion

#### 4.1 Specific leaf area am Sperrgraben und im Kranzberger Forst

Auf beiden Standorten finden sich enge Beziehungen zwischen der Schaftholzdimension (Brusthöhendurchmesser) der geernteten Bäume und deren oberirdischer Biomasse wie Gesamt-Laub-Trockengewicht und -oberfläche. In allen Fällen steigt die oberirdische Biomasse mit zunehmendem Durchmesser an (Abb. 3-6 und Abb. 3-7). „Erntebäume“ der Kraft-Klasse 1 und 2 von *Picea abies* am Sperrgraben zeigen auf der **Einzelblattebene** bei kleinern projizierten Nadeloberflächen höhere Gesamt-Nadel Trockengewichte (SLA) als vergleichbare „Erntebäume“ im Kranzberger Forst oder Befunde von BURGER (1941 und 1953), ALSHEIMER (1997) und FISCHER (1993). Während 1 kg trockene Fichtennadeln am Sperrgraben nur einer mittleren Oberfläche von 1,6 m<sup>2</sup> entsprechen, weist die gleiche Menge Fichtennadeln im Kranzberger Forst im Mittel 4,4 m<sup>2</sup> auf (Tab. 3-12 und 3-13). Ein Vergleich mit den Literaturdaten zeigt, dass bei BURGER 1 kg Nadeln eine Oberfläche von 5,5 m<sup>2</sup> und bei ALSHEIMER (1997) und FISCHER (1993) von ca. 5 m<sup>2</sup> aufweisen. Etwas geringere SLA-Werte für *Picea abies* geben ECKMÜLLER ET AL. (2000) mit 3,9 m<sup>2</sup> an. Die Gründe für die vergleichsweise geringen SLA-Werte bei *Picea abies* am Sperrgraben können nicht abschließend geklärt werden, allerdings sind Bäume dazu in der Lage ihr Wachstum und ihre Morphologie an unterschiedliche Lichtbedingungen anzupassen (CAO 2001, POORTER & WERGER 1999, THIÉBAUT 1988). Modellstudien mit dem 3-D-Modell STANDFLUX (Lichtinterzeptions- und Gaswechselmodell für monotypische Bestände, pers. Mitteilung FALTIN) zeigen eine verbesserte Lichtausnutzungseffizienz für Bestände in der Hanglage. Bei gegebenem Kohlenstoffgewinn benötigen geneigte Bestände hierzu deutlich geringere Blattoberflächen wodurch Atmungsverluste und erhöhte Transpiration minimiert werden können. Weiterhin könnten die geringeren SLA-Werte bei Fichten in Gebirgslage eine Anpassung an harsche Witterungsbedingungen in Form von höherem Eis- und Schnee-Druck sein, um die mechanische Widerstandsfähigkeit der Nadeln zu erhöhen. Die projizierte spezifische Blattfläche (SLA) bei Baumernten von *Fagus sylvatica* beider untersuchten Standorte ist hingegen sehr ähnlich (Tab. 3-12 und 3-13). So entspricht am Sperrgraben 1 kg trockener Buchenblätter einer mittleren projizierten Blattoberfläche von 21 m<sup>2</sup>, während im Kranzberger Forst ca. 23 m<sup>2</sup> dem gleichen Blattgewicht entsprechen. Damit liegen die gefundenen Ergebnisse im Trend von Baumernten von BURGER (1950). Bei ihm entsprach das Trockengewicht von 1 kg Buchenblättern im Mittel 24 m<sup>2</sup>. BARTELINK (1997) fand hingegen bei Buchen in den Niederlanden geringere SLA-Werte, die im Mittel bei 17 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> lagen.

Innerhalb eines Baumes verändert sich SLA in horizontaler (Ergebnisse werden nicht gezeigt) und vertikaler Richtung (Abb. 3-14 und 3-15). Generell steigt der SLA-Wert innerhalb der Baumkrone mit zunehmender Entfernung von der Baumspitze zur Kronenbasis an (MONSERUD ET AL. 1999). Die Variation von SLA innerhalb der Baumkrone beruht auf der veränderten Morphologie zwischen Sonnen- und Schattenblättern, bedingt durch die unterschiedlichen Lichtbedingungen innerhalb der Baumkrone (KELLOMÄKI ET AL. 1980, 1981). BARTELINK (1997) gibt bei *Fagus sylvatica*

eine Spannweite der SLA-Werte im Höhenprofil von 8 bis 34 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> an. Vergleichbare Ergebnisse werden bei PELLINEN (1986) und GRATANI ET AL. (1987) dargestellt. Dies stimmt mit eigenen Beobachtungen am Sperrgraben überein (Abb. 3-15 B). In dem gezeigten Beispiel variiert SLA bei *Fagus sylvatica* (Kraft-Klasse 2) zwischen 13 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> in der obersten Kronenregion bei ca. 21 m und steigt zur Kronenbasis bei ca. 10 m auf 28 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> an. Bei unterständigen Buchen (Kraft-Klasse 3) liegen die Werte höher und variieren zwischen 20 und 50 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, hingegen zeigt die geerntete Buche der Kraft-Klasse 1 niedrigere Werte zwischen 4 und 26 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> an (Ergebnisse nicht gezeigt). GROTE (2002) zeigt eine ähnlich große Spannweite bei *Fagus sylvatica* im Kranzberger Forst. Hier liegen die gefundenen SLA-Werte zwischen 9 und 44 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, gemittelt über alle Kraft-Klassen und alle Höhenprofile. Die Variabilität der SLA-Werte innerhalb der Kraft-Klassen am Sperrgraben wird durch die unterschiedliche Strahlungsaufnahme innerhalb der Baumkronen gesteuert. Jüngere, unterdrückte Bäume werden durch Nachbarn bedrängt und beschattet, ältere Bäume besitzen hingegen meist freier stehende Kronen, in die die Strahlung tief eindringen kann. In Abhängigkeit vom Bestandesalter und der waldbaulich angestrebten Bestandesdichte variiert SLA gleichermaßen (BARTELINK 1997).

*Picea abies* am Sperrgraben weist im Vertikalprofil (Mittel über alle Kraft-Klassen, Höhen liegen zwischen 29 und 14 m) SLA-Werte auf, die meist zwischen 2 und 5 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> liegen und nur in Ausnahmefällen bis zu 6 und 7 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> ansteigen (pers. Mitteilung FALTIN). Eigene Untersuchungen im Kranzberger Forst zeigten für die etwas freier stehende Fichte 374 (Kraft-Klasse 2) vergleichbare SLA-Werte von 3 bis 6 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, die sich auf eine Baumhöhe zwischen 12 bis 26 m verteilten (Abb. 3-14 B). GROTE (2002) bestätigte diese Ergebnisse für den Kranzberger Forst. Das Mittel aus seinen Erntebäumen wies eine Spanne der SLA-Werte von 3 bis 8 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> auf, verteilt über ein Höhenprofil zwischen 12 bis 30 m.

Bei der Hochrechnung der SLA-Werte von der Astbasis auf den **Gesamt-Baum** weist *Picea abies* am Sperrgraben im Gegensatz zum Kranzberger Forst pro Fläche ein höheres Nadel Trockengewicht auf (bei geringer Stichprobenzahl). Hingegen unterscheiden sich die SLA-Werte auf Baumebene bei *Fagus sylvatica* im Kranzberger Forst und am Sperrgraben kaum.

## 4.2 Blattflächen-Splintflächen-Beziehung

Ähnlich wie bei BALDWIN (1989) wurde der straffe statistische Zusammenhang zwischen BHD und Laub-Trockengewicht bzw. -Oberfläche der geernteten Bäume genutzt, um Schätzungen der Laub-Masse und -Oberfläche des jeweiligen Bestandes über eine mathematisch formulierte Regressionsbeziehung und den zuvor auf den Messflächen ermittelten Einzelbaumdurchmessern durchzuführen. Das Bestimmtheitsmaß [ $r^2$ ] war in der Regel sowohl am Sperrgraben als auch im Kranzberger Forst größer als 0,8 (Abb. 3-6 und 3-7). Exaktere Hochrechnungen ermöglicht die Beziehung zwischen Splintflächenanteil und Laubmasse (MÄKELÄ ET AL. 2001) bzw. -oberfläche (JARVIS & LEVERENZ 1983, ROBICHAUD ET AL. 1992, GILMORE ET

AL. 1996). Diese Form der Hochrechnung hat seinen Ursprung in der „Pipe-Model-Theory“ von SHINOZAKI ET AL. (1964). Demnach werden der Stamm und die Äste eines Baumes als Ansammlung von „Röhren“ angesehen, die jeweils eine „Blattmassen-Einheit“ versorgen und deren Gesamtheit die für die Wasserversorgung des Baumes entscheidende Leitfläche darstellt. Folglich stehen die transpirierenden Laubflächen im Gleichgewicht mit den sie versorgenden Querschnittsflächen des Xylems und bilden eine lineare Beziehung (Abb. 3-19). Ein Vergleich der untersuchten Messflächen zeigte, dass die geernteten Buchen aus dem 80-jährigen Bestand am Sperrgraben bei gleicher Splintquerschnittsfläche eine größere Blattoberfläche versorgten als vergleichbare Buchen im ca. 20 Jahre jüngeren Bestand im Kranzberger Forst (Abb. 3-19 A). Hingegen waren bei den Fichten am Sperrgraben und im Kranzberger Forst keine Unterschiede zu erkennen (Abb. 3-19 B).

LOHMANN (1992) zeigte, dass die kumulative Splintquerschnittsfläche wie auch der relative Splintanteil bei Einzelbäumen von *Picea abies* mit zunehmenden Bestandesalter abnimmt. Ähnliches beschrieben auch KÖSTNER ET AL. (1996) für Fichten aus dem Lehstenbach-Gebiet. Neben der Tendenz, dass ältere Bäume im Vergleich zu jüngeren eine geringere Splintfläche bei gleichem BHU aufweisen, stellte sie eine systematische Erhöhung des  $A_L/A_S$ -Verhältnisses mit zunehmenden Bestandesalter fest. Dies kommt daher, dass in älteren Beständen zwar die kumulative Splintquerschnittsfläche abnimmt, aber der Blattflächenindex im Vergleich zu jüngeren, dichteren Beständen fast gleich bleibt, was zu einem Anstieg des  $A_L/A_S$ -Verhältnisses mit abnehmender Bestandesdichte und zunehmenden Bestandesalter führt (ALSHEIMER 1997, AUSSENAC ET AL. 1988). HUNGERFORD (1987, zit. nach ALSHEIMER 1997) leitete daraus ab, dass bei ähnlichen Xylemflussdichten in verschiedenen alten Beständen die Transpirationsleistung pro Nadel/Blatt in älteren und lichtereren Beständen abnehmen muss und diese Abnahme durch eine größere Laubmasse kompensiert wird. Zwar konnte durch Bohrkernanalysen an *Fagus sylvatica* und *Picea abies* im 60-jährigen Bestand im Kranzberger Forst und in den 80-jährigen Beständen am Sperrgraben bestätigt werden, dass ältere Bestände geringere Splintflächen bei gleichen BHU aufweisen (Abb. 3-18), jedoch war nur bei *Fagus sylvatica* ein höheres  $A_L/A_S$ -Verhältnis mit zunehmenden Bestandesalter zu finden. Das  $A_L/A_S$ -Verhältnis bei *Picea abies* lag hingegen bei beiden Untersuchungsstandorten eng beieinander, wobei teilweise der jüngere Bestand des Kranzberger Forsts ein größeres  $A_L/A_S$ -Verhältnis aufwies als die 20 Jahre älteren Bestände am Sperrgraben.

Seit die „pipe-model-theory“ die Lauboberfläche ( $A_L$ ) und Splintfläche ( $A_S$ ) funktional verknüpfte, ist das Lauboberflächen-Splintflächen-Verhältnis ( $A_L/A_S$ -Verhältnis) eine wichtige strukturelle Kenngröße und dient als Skalierungsfaktor für die Baumtranspiration bzw. Wasserleitung im Stamm. WHITEHEAD ET AL. (1984) stellte fest, dass sowohl die Wachstumsrate als auch die hydraulische Leitfähigkeit der Bäume und die Bestandestranspiration von dem  $A_L/A_S$ -Verhältnis abhängig ist. Durch forstlich-biometrische Einflüsse wie z. B. Baumdichte (ALSHEIMER 1997), Lichtverhältnisse, soziale Stellung (DEAN & LONG 1986, SELLIN 1993), Wasserdampfdruckdefizit und maximale Sommertemperaturen (MENCUCCINI ET AL. 2001) kann das  $A_L/A_S$ -Verhältnis beeinflusst werden. Die Messungen am Sperrgraben und im Kranzberger Forst zeigten, dass das mittlere  $A_L/A_S$ -Verhältnis keine Höhenabhängigkeit aufweist und unabhängig vom Bestandesalter sowie von der Bestandesdichte ist (Abb. 3-20). Zwar

gibt es bei den Buchen-Fichten-Mischbeständen Tendenzen, dass mit zunehmender Bestandesdichte das mittlere  $A_L/A_S$ -Verhältnis (=„Huber-Value“, TYREE & ZIMMERMANN 2002) sinkt, jedoch waren die Streuungen sehr groß und dadurch die Quotienten sehr ähnlich. Noch geringer waren die Unterschiede zwischen dem Buchen-Fichten-Mischbestand und Fichten-Reinbestand am Sperrgraben. Da sich die untersuchten Bestände nicht wesentlich in der Xylemflussdichte unterscheiden, wirkt sich die kumulative Splintquerschnittsfläche der Bestände auf die Kronendachtranspiration insofern aus, dass der jüngste untersuchte Bestand im Kranzberger Forst die höchste kumulative Splintfläche und damit die größte Bestandestranspiration aufweist, gefolgt vom Fichten-Reinbestand und dem Buchen-Fichten-Mischbestand am Sperrgraben (Tab. 3-48).

#### 4.3 Variabilität der Xylemflussdichte in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung

Aus technischen Gründen berücksichtigt die Messmethode nach GRANIER (1985) Saftflüsse nur in einem kleinen Abschnitt des Stammquerschnitts. Leistungsunterschiede im Transport des Saftflusses auf den verschiedenen Stammseiten einzelner Bäume können nur durch eine höhere Anzahl an Messfühlern pro Baum berücksichtigt werden. Das Problem der Flussdichtenvariabilität sowohl im Stamm von Einzelbäumen als auch zwischen den Messbäumen wurde schon von zahlreichen Autoren erkannt und beschrieben (DAUM 1967, CERMÁK ET AL. 1984, LOUSTAU ET AL. 1998, OREN ET AL. 1998, FICHTNER & SCHULZE 1990, EWERS & OREN 2000). Eigene Untersuchungen an je 10 Buchen und Fichten im Kranzberger Forst haben diesen Sachverhalt bestätigt (Abb. 3-30). Bei gleichbleibender Witterung konnte zwischen Fühlern die zwar auf gleicher Stammhöhe, jedoch in Nord- und Süd-Exposition installiert wurden, eine Differenz der Xylemflussdichte von 7 bis 15 % bei Buche und von 3 bis 29 % bei Fichte festgestellt werden (Abb. 3-29). Diese Unterschiede steigen bei wechselnden Witterungen und reichen bei verschiedenen Individuen einer Baumart von minimal 6 bis 7 % bis maximal 120 bis 150 % (bezogen auf den Nordfühler). Die über alle Bäume einer Art gemittelten Unterschiede der Xylemflussdichte zwischen den Messungen der Nord- und Südseite betragen für Fichte 29 % und bei Buche 36 %. ALSHEIMER (1997) beschrieb für *Picea abies* ähnlich hohe Messstellenunterschiede, im Mittel bis zu 40 % in der Xylemflussdichte. LU ET AL. (2000) fanden bei Mango Bäumen unabhängig von der Exposition Messstellendifferenzen zwischen 21 und 27 % und empfahlen mindestens zwei Fühlerpaare pro Stamm, um diese Variabilität zu berücksichtigen und den Skalierungsfehler auf Baumebene zu minimieren. HEIMANN (1995) und KRAMER & KOZLOWSKI (1979) führten diese Variabilität der Xylemflussdichte an unterschiedlichen Messstellen eines Baumes auf eine heterogene Wassernachleitung innerhalb des Stammes zurück, die durch die spiralgige Anordnung der Xylemelemente entlang des Stammes hervorgerufen wird und bei Bäumen innerhalb einer Art individuell verschieden ist. Wie SHEKHOLESLAMI bei Fichten (zit. nach HEIMANN 1995) mit in radialer Richtung in den Splint injizierten Farblösungen nachwies, ist der Drehwinkel in den äußeren, jüngeren Jahrringen der spiralgig angeordneten Leitungsbahnen geringer als weiter innen. Der Fluss in Bahnen bedeutet, dass direkt ein Kronenbereich einem

speziellen Splintbereich im Stamm und einzelnen Wurzelbereichen zugeordnet werden kann. Partielle Besonnung der Baumkrone, als Folge einer asymmetrischen Wuchsform, könnte eine unterschiedliche Transpirationsleistung verschiedener Kronenbereiche zur Folge haben und sich auf Leistungsunterschiede im Wassertransport auf verschiedenen Baumseiten auswirken. HEIMANN (1989) beschrieb dies für eine Buche im Solling und ähnliche Unterschiede wurden bei den Untersuchungen im Kranzberger Forst ermittelt (Abb. 3-30). Die installierten Xylemflussfühler der Messbäume im Kranzberger Forst wiesen parallel zur Himmelrichtung mit der größeren Kronenausdehnung (meist in Richtung Süden) eine höhere Xylemflussdichte innerhalb des Stammes auf. Diese Ergebnisse waren unabhängig von der Baumart. LOUSTAU ET AL. (1996) führten die Variabilität der Xylemflussdichte innerhalb eines Stammes auf die unterschiedliche Verteilung und Beschaffenheit des Xylems zurück und die damit an dem Splint beteiligte Anzahl der Jahrringe. GRANIER (1987) fand hingegen bei Untersuchungen an Douglasien keine Unterschiede der Xylemflussdichte in Abhängigkeit von der Exposition der Installationsstelle im basalen Stammabschnitt. Er führte die Variabilität der Flussdichte innerhalb eines Baumstammes auf mangelnde Isolierung der Messfühler zurück, was jedoch aufgrund der hohen Anzahl an Beobachtungen bei anderen Autoren und der eigenen sorgfältigen Isolierung der Fühler im schwach geneigten Kranzberger Forst für unwahrscheinlich zu halten ist. Dagegen schließt GRANIER (1987) in Hanglagen und bei windexponierten Beständen ein inhomogenes Zuwachsverhalten der Baustämme nicht aus, was sich in variablen Flussdichten an der Stammbasis durch die Ausbildung von Reaktionsholz äußern kann. Untersuchungen am Sperrgraben, die diese Vermutung stützen könnten fanden im Rahmen dieser Arbeit nicht statt, da im Gebirge die Stromversorgung für eine größere Anzahl an Fühlern nicht ausreichend war. Allerdings fand HEIMANN (1995) in ihren Untersuchungen im Harz keinen Zusammenhang mit der Hangexposition bei *Picea abies*. Sie schließt die Bildung von Reaktionsholz durch eine höhere Einstrahlung auf der Südseite des Stammes jedoch nicht aus, da diese Stammseite durch Auftauprozesse im Frühjahr stärkeren Belastungen ausgesetzt ist. So fand z. B. SCHMIDT-VOGT (1986) bei Fichten auf der Südseite kürzere Tracheiden als auf der Nordseite.

#### 4.4 Radiale Variation des Saftflusses im Stamm

Für eine Skalierung des Wasserverbrauchs auf die Bestandesebene, basierend auf Xylemflussmessungen an einzelnen Bäumen, ist neben der Bestimmung der Splintholzfläche auch die Untersuchung der radialen Variation der Saftflussdichte notwendig. Häufig finden die Saftflussmessungen nur punktuell in der näheren Umgebung des Kambiums statt, wo die Saftflussdichte am höchsten ist, und werden von dort auf den gesamten Splintquerschnitt eines Baumes übertragen (JAMES ET AL. 2002). Mögliche Schwankungen oder Abnahmen des Saftflusses mit zunehmender Splintholztiefe werden nicht berücksichtigt. Als direkte Folge kann der Fehler, der bei der Hochrechnung der Saftflussdichte vom Messabschnitt auf den Gesamt-Baum und weitergehend über die Bestandes-Splintquerschnittsfläche auf den Gesamt-Bestand entsteht, fortgepflanzt werden (OREN ET AL. 1998, NADEZHINA ET AL. 2002) und wird

besonders groß bei Bäumen mit breitem Splint (HATTON ET AL. 1995, JAMES ET AL. 2002). NADEZHINA ET AL. (2002) fanden für *Prunus serotina* und *Populus canescens* unter der Annahme, dass der Safffluss in allen Splinttiefen gleich ist, einen systematischen Fehler zwischen  $-90$  und  $+300$  %. Die Größe des Fehlers war dabei abhängig von der Position des Messfühlers im inneren oder äußeren Splint. JAMES ET AL. (2002) geben für tropische Bäume (*Anacardium excelsum* [Bertero & Balb. ex Kunth]; Panama) einen Fehler von bis zu 100 % an. Die Fehlergröße wird verständlich, wenn man berücksichtigt, dass nicht die gesamte Splintfläche wasserleitend ist, sondern bis zu 1/3 aus nichtleitendem Speicherparenchym bestehen kann und es in älteren Splintholzbereichen vermehrt zu Embolien kommt (COCHARD & TYREE 1990, GLAVAC 1990). Untersuchungen von ZANG ET AL. (1996) an zwei 3-jährigen *Eucalyptus globulus* Bäumen bestätigten dies und zeigten, dass nur 78 % des Splintholzes am Wassertransport beteiligt sind.

Frühere Studien bewiesen, dass ein radialer Trend des Saffflusses in zahlreichen Baumarten besteht, sich die Variation der radialen Flussdichte allerdings nicht nur zwischen verschiedenen Baumarten, sondern auch innerhalb verschiedener Individuen einer Art sehr stark unterscheiden können (DYE ET AL. 1991, CERMÁK ET AL. 1992, OREN ET AL. 1999, JIMÉNEZ ET AL. 2000, LU ET AL. 2000, PAUSCH ET AL. 2000, WULLSCHLEGER ET AL. 2000, JAMES ET AL. 2003). Trotzdem ist häufig ein Muster erkennbar, indem die Saffflussdichte mit zunehmender radialer Entfernung vom Kambium in Richtung Reifholz abnimmt (KÖSTNER ET AL. 1998b, LANG 1999). PHILLIPS ET AL. (1996) bieten eine gute Übersicht für radiale Saffflusstrends bis 40 mm Splinttiefe bei den drei Hauptholzklassen: Koniferenholz, cycloporigen (ringporigen) und mikroporen (zerstreutporigen) Hölzern. Ringporige Arten wie z. B. *Quercus robur* L. besitzen einen eng umgrenzten hydroaktiven Splintholzbereich, innerhalb dessen eine starke Abnahme der Saffflussdichte zu finden ist. Bei *Quercus* führen die vorjährigen Jahrringe nur noch in ihren englumigen Spätholzbereichen Wasser, während die weitlumigen Frühholzgefäße meistens durch Cavitation funktionsuntauglich geworden sind. Bereits im dritten Jahr fällt auch der Spätholzanteil für die Wasserleitung aus (MILLER ET AL. 1980). Das Phänomen des Radialmusters wird bei *Quercus* gar nicht erfasst, da die Messsensoren über eine Splintfläche integrieren, die größer ist als die Fläche die noch tatsächlich Wasser leitet (PHILLIPS ET AL. 1996). GRANIER ET AL. (1996) bestätigen dies und stellten bei *Quercus petraea* fest, dass 80 % des Saffflusses im äußeren Zentimeter der Splintquerschnittsfläche stattfindet.

Für Koniferenholz fanden PHILLIPS ET AL. (1996) in *Pinus taeda* eine um 59 % reduzierte Xylemflussdichte im inneren Splintholzbereich und führten dies auf die unterschiedliche hydraulische Leitfähigkeit von Jugendholz und Holz der Altbäume zurück. So wird das innere Xylem (innersten 7 bis 10 Jahresringe) hauptsächlich von Jugendholz beherrscht, das weitringiger, spätholzärmer und leichter als das Holz der Altbäume ist. Das Jugendholz ist zusätzlich durch kürzere, weitlumige Tracheiden charakterisiert, welche die geringere hydraulische Leitfähigkeit verursachen. Die äußeren Jahresringe aus reifen Holz der Altbäume besitzen längere Tracheiden und damit verbunden eine höhere hydraulische Leitfähigkeit (SETH 1981, MEGRAW 1985 zit. nach PHILLIPS ET AL. 1996). Ähnlich sieht es auch GARTNER (1995), der dem äußeren Splint nahe dem Kambium eine höhere hydraulische Leitfähigkeit zuschreibt als dem inneren. Hingegen fanden GRANIER ET AL. (1996) bei *Pinus sylvestris* im

Splintholzbereich kaum Unterschiede in der Saffflussdichte, jedoch eine scharfe Abnahme des Flusses im Übergangsbereich vom Splint- zu Kernholz. Eigene Radialprofilmessungen bis zu einer Splinttiefe von 60 mm zeigten für *Picea abies* im 60-jährigen Bestand des Kranzberger Forsts eine Abnahme der Xylemflussdichte bis zu 70 % (Tab. 3-33). Eine Fichte des 80-jährigen Misch- und Reinbestandes am Sperrgraben wies nur noch 15 % (Messtiefe 60 mm) der Flussdichte der äußeren 20 mm Splintfläche auf (Tab. 3-33).

Allerdings ließ sich am Sperrgraben im Gegensatz zum Kranzberger Forst nicht durchgängig ein einheitlicher radialer Trend der Xylemflussdichte erkennen (Kap. 3.2.2). Vielmehr gestaltete sich die Bewertung der Xylemflussdichte in den verschiedenen Splinttiefen am Sperrgraben als sehr schwierig, da die Flussdichte bei einigen Bäumen mit zunehmender Splinttiefe erst anstieg und dann abnahm oder ansteigend blieb (Tab. 3-35). Diese Effekte zeigten nicht nur *Picea abies*, sondern auch *Fagus sylvatica* (Tab. 3-35) und werden besonderen standortstypischen Stressbedingungen zugeschrieben (CERMAK & NADEZHDINA 1998; JIMENEZ ET AL. 2000). Zwar beschreiben auch GRANIER ET AL. (2000), dass bei Buchen einige Individuen nicht direkt nach dem Kambium, sondern in tieferen Splintbereichen höhere Flussdichten aufweisen, in den noch tiefer liegenden Splintbereichen zeigten jedoch alle untersuchten Bäume eine deutliche Abnahme des Xylemflusses. ALSHEIMER (1997) beschreibt bei *Picea abies* eine radiale Änderung der Xylemflussdichte während der Vegetationsperiode, was mit der jahreszeitlichen Schwankung der Darrbezugsfeuchte (Wassergehalt bezogen auf das Holztrockengewicht in %) im Splintholz von Fichten zusammenhängen könnte (BURMESTER 1980 zit. nach Alsheimer 1997). PHILLIPS & OREN (1997) beschrieben ebenfalls bei Nadelholz eine zeitliche Dynamik der Variabilität der Flussdichte im inneren Splint während Austrocknungsphasen. Nach GLAVAC ET AL. (1990) kann es durch Wassermangelsituationen in Verbindung mit extremen atmosphärischen Transpirationsanforderungen zu Gefäßausfällen, vor allem im älteren, inneren Splintholz kommen, wodurch die hydraulische Leitfähigkeit gesenkt wird und die Saffflussdichte in den entsprechenden Splintholzregionen abnimmt (TOGNETTI ET AL. 1996). Aufgrund der beschränkten Stichprobenzahl konnte diese Spezialfrage weder am Sperrgraben noch im Kranzberger Forst abschließend geklärt werden. Ebenso wenig ließ sich im Gegensatz zu JIMÉNEZ ET AL. (2000) ein radiales Flussdichtenmuster in Abhängigkeit von der Baumdurchmesserklasse erkennen. Bei JIMENEZ ET AL. (2000) zeigten unterdrückte Bäume geringe, über das Radialprofil gleichbleibende Saffflussraten, während vorherrschende Bäume ein ausgeprägtes Radialprofil aufwiesen. Die soziale Position der Bäume in geschlossenen Beständen wird durch die Verfügbarkeit der Ressource Licht in den einzelnen Kronenebenen und die Wasserversorgung geprägt (BALDOCCHI ET AL. 1986). Während bei dominanten Bäumen die Strahlungsdichte innerhalb der Krone stark abnimmt, ändert sie sich in den Kronen unterdrückter Bäume kaum (CERMÁK 1998). CERMÁK (1998) vermutet, dass die Saffflussdichte des äußeren Splintbereichs die hohe Transpirationsrate der gut durchstrahlten Kronenbereiche widerspiegelt, während die Saffflussdichte des inneren Splintbereichs die geringe Transpirationsrate der Schattenkrone anzeigt. Bei unterdrückten Bäumen weist die unbedeutende Differenzierung der Saffflussdichte im Radialprofil auf die fast uniforme Transpiration der Blätter innerhalb der Krone hin. Da

am Sperrgraben keine allgemeingültige Aussage getroffen werden konnte, inwiefern sich die Xylemflussdichte im äußeren Splintbereich (0 bis 2 cm Splinttiefe) von der Flussdichte im inneren Splintbereich (2 bis 4 cm Splinttiefe) unterscheidet, wurde der 2 cm-Fühler als repräsentativ für den gesamten Splint betrachtet und bei der Berechnung des Saffflusses über die Gesamt-Splintquerschnittsfläche bei Fichte und Buche berücksichtigt. Im Kranzberger Forst schwankte zwar die radiale Xylemflussdichte einer Art von Baum zu Baum, jedoch nahm sie bei den gezeigten Beispielen sowohl bei *Fagus sylvatica* als auch bei *Picea abies* mit zunehmender Splinttiefe ab und entsprach damit einem Großteil der Literaturberichte (CERMÁK ET AL. 1992, KÖSTNER ET AL. 1998b, LANG 1999, LU ET AL. 2000, WULLSCHLEGER ET AL. 2000, JAMES ET AL. 2003). Die radiale Flussdichtenabnahme blieb an allen Beobachtungstagen (Anzahl 93) der Jahre 1999 und 2001 im Kranzberger Forst tendenziell erhalten (Abb. 3-31) und floss daher bei der Berechnung des Gesamtflusses ein (Kap. 2.6.7). Wie andere zerstreutporige Arten (*Citrus sinensis* (L.): COHEN ET AL. 1981, *Mangifera indica* (L.): LU ET AL. 2000) zeigte *Fagus sylvatica* eine weniger starke Abnahme der Saffflussdichte im Stammquerschnitt als *Picea abies* und war denen von LANG (1999) beobachteten ähnlich (Tab. 3-33). Auf die Bestimmung des Gesamt-Wasserverbrauches eines Baumes wirkt sich die Variation der Saffflussdichte im äußeren Splintbereich stärker aus als die des inneren Bereichs, da der Anteil der äußeren Splintquerschnittsfläche an der Gesamtsplintfläche im Vergleich zur inneren Splintquerschnittsfläche bedeutend größer ist (JIMENEZ ET AL. 2000).

### 4.5 Kronentranspiration pro Baumklasse und Bestandestranspiration

Die während der Vegetationsperiode durchgeführten Saffflussmessungen der Untersuchungsjahre 1999 bis 2001 zeigen für den Bestand im Kranzberger Forst einen typischen jahreszeitlichen Verlauf der Kronendachtranspiration, mit einem Anstieg der Transpirationsrate im Frühjahr, Transpirationsmaxima im Sommer und einen Abfall der Transpirationsrate im Herbst (vgl. Kapitel 3.2.4). Am Sperrgraben ist dieser Jahresverlauf weniger ausgeprägt, da der Untersuchungszeitraum (Mitte Mai bis Mitte September, vgl. Kapitel 3.2.4) im Gegensatz zum Kranzberger Forst (Anfang April bis Ende Oktober) kürzer war. Besonders bei Buche lässt sich der Anstieg der Transpirationsrate im Frühjahr mit Einsetzen der Knospenentwicklung und des Blattaustriebs verfolgen. Im Juni bis Juli erreicht die Transpirationsrate ihr Maximum (die Blätter sind voll entwickelt) und sinkt im Spätsommer, mit beginnender Seneszenz der Blätter, langsam ab (z. B. Abb. 3-47 C bis E). Der entsprechende saisonale Verlauf bei Fichte erscheint durch die längere Vegetationsperiode des immergrünen Laubes gedämpfter (z. B. Abb. 3-47 A bis B), entspricht aber Beobachtungen anderer Autoren (LADEFOGED 1963, GRANIER 1987, ALSHEIMER 1997).

Die Abhängigkeit des Saffflusses von der Strahlung, der damit verbundenen Blatttemperatur und dem Wasserdampfsättigungsdefizit wurde vielfach bestätigt (LOUSTAU ET AL. 1993, CIENCIALA ET AL. 1992, GRANIER & BRÉDA 1996, LANG 1999). Bei den eigenen Untersuchungen war der Zusammenhang zwischen Strahlung und Safffluss am stärksten (Abb. 3-37 und 3-38) und eine durch lineare Regression gewonnene Funktion diente dazu, fehlende Saffflussmesstage zu berechnen

(Kap. 2.6.8). Im Gegensatz zu ALSHEIMER (1997) und KÖSTNER (1999) wurde eine schwächere Abhängigkeit zum Wasserdampfsättigungsdefizit festgestellt (Daten nicht gezeigt), was Befunden von STÖHR & LÖSCH (2004) entsprach. Tage mit Niederschlägen schränkten die Transpirationsrate sowohl bei Buche als auch bei Fichte ein (Kapitel 3.1.2 und 3.2.4). Da Nebel gerade im Gebirge häufig die Transpiration erschwert, ist der von LADEFOGED (1963) beschriebene Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit, Lichtintensität und maximaler Transpiration besonders interessant: Je niedriger die relative Luftfeuchtigkeit ist, desto weniger Lichtintensität wird für das Erreichen der maximalen Transpirationsleistung benötigt. Trotz der Transpirationseinschränkung durch Nebel und geringeren monatlichen Strahlungsmengen in der Hochlage (vgl. Tab. 3-21 und 3-24) war bei gleichem jährlichen Beobachtungszeitraum der splintflächenbezogene Wasserverbrauch von Buche und Fichte am Sperrgraben ähnlich hoch wie in der Tieflage (Kranzberger Forst; s. Tab. 3-48).

Die für *Fagus sylvatica* in den Untersuchungsgebieten am Sperrgraben und im Kranzberger Forst gefundenen über die Vegetationsperiode gemittelten täglichen Werte der **Kronentranspiration pro Baumklasse** [ $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ] ähnelten sich während der drei Messjahre (Kap. 3.2.4) und lagen am Sperrgraben für Buchen der Kraft-Klasse 1 bei 96 bis 102  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ , für die Kraft-Klasse 2 bei 36 bis 40  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$  und für die Kraft-Klasse 3 zwischen 5 bis 14  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ . Im Kranzberger Forst wiesen die Buchen der Kraft-Klasse 1 einen etwas geringeren mittleren Wasserverbrauch pro Tag auf (zwischen 83 bis 93  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ), während die kleineren Kraft-Klassen eine höhere mittlere Kronentranspiration als am Sperrgraben zeigten (Kraft-Klasse 2 ca. 51  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$  und Kraft-Klasse 3 zwischen 22 bis 29  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ). Insgesamt war der Unterschied zwischen den beiden Messflächen trotz der unterschiedlichen Höhenlage gering. Die gefundene Kronentranspiration entsprach in etwa Angaben von CERMÁRK ET AL. (1993, zit. nach WULLSCHLEGER ET AL. 1998), der bei Buchen der Kraft-Klassen 1 eine etwas höhere Kronentranspiration von 137  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$  beschrieb. Im Rahmen des EUROFLUX Projektes wurden für einen 140-jährigen Buchen-Bestand im Steigerwald maximale Transpirationsraten von 10 bis 400  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$  gemessen, wobei die Brusthöhendurchmesser der untersuchten Buchen sich in Größenordnungen zwischen 12 bis 60 cm bewegten (GRANIER ET AL. 2003). Diese Transpirationsraten lagen für Buchen der Kraft-Klasse 1 weit über denen, die am Sperrgraben und im Kranzberger Forst gefunden wurden. So hohe Transpirationsraten fand LANG (1999) nur für eine freistehende Buche (311  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$ ) bei Karlsruhe. Er führte dies auf ihr deutlich größeres Kronenvolumen und die damit verbundene größere transpirierende Blattoberfläche zurück, als bei vergleichbar starken Buchen im Bestand. Bestandesbuchen (Bestandesalter ca. 74 Jahre), am gleichen Standort, wiesen eine mittlere tägliche Saftflussrate zwischen 104 bis 182  $\text{kg H}_2\text{O d}^{-1}$  auf und ähnelten stärker den eigenen Befunden (LANG 1999, GRANIER ET AL. 2003).

Hingegen unterschied sich die gefundene mittlere Kronentranspiration bei *Picea abies* sowohl am Sperrgraben als auch im Kranzberger Forst von Angaben für die entsprechenden Kraft-Klassen in der Literatur. Die Fichten der Kraft-Klasse 1 im Mischbestand am Sperrgraben wiesen eine mittlere tägliche Kronentranspiration von

50 bis 62 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> auf. Individuen der Kraft-Klasse 2 zeigten einen mittleren Wasserverbrauch von 11 bis 14 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (Kap. 3.2.4). Noch geringer war die mittlere Kronentranspiration in dem Fichten-Reinbestand am Sperrgraben und bei Fichten im Mischbestand im Kranzberger Forst (Kraft-Klasse 1: 39 bis 40 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> Reinbestand Sperrgraben, 28 bis 38 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> Kranzberger Forst, Kraft-Klasse 2: 19 bis 20 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> Reinbestand Sperrgraben, 14 bis 17 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> Kranzberger Forst). HERZOG ET AL. (1995) gibt für eine 220 jährige Fichte der Kraft-Klasse 1 einen täglichen Wasserverbrauch von 175 kg an, was fast dem Dreifachen der in dieser Arbeit gefundenen Kronentranspirationen entspricht. Allerdings wies sein Untersuchungsbaum eine Kronenlänge von 3,5 bis 25 m auf, was auf einen durchgehend guten Lichtgenuss der Krone hindeutet, während die eigenen untersuchten Fichten sowohl am Sperrgraben als auch im Kranzberger Forst kleinere Kronenlängen von ca. 12 bis 25 m aufwiesen. Für die kleineren Kraft-Klassen schwanken die Literaturangaben zwischen 10 bis 66 kg H<sub>2</sub>O d<sup>-1</sup> (SCHULZE ET AL. 1985, GRANIER & CLAUSTRÉS 1989, CIENCIALA ET AL 1992, CERMÁK ET AL. 1995, KÖSTNER ET AL. 1998c), was den unteren Bereich der eigenen Angaben abdeckt.

Die saisonale, d. h. die jeweils über die Vegetationsperioden 1999 bis 2001 integrierten Summen der **Bestandestranspiration** (15. Mai bis 15. September) betragen für den **Fichten-Reinbestand** am Sperrgraben 164 bis 172 mm und hochgerechnet auf ein Jahr ca. 220 mm (errechnet aus den mittleren Tageswerten der Vegetationsperioden über die schneefreie Zeit des Jahres: Mitte Mai bis November = 169 Tage, Tab. 4-1). Sie liegen damit oberhalb der mit Hilfe von Xylemflussmessungen ermittelten Transpirationsraten, wie sie GÜLPEN (1996) für einen 35- bis 55-jährigen bzw. 100-jährigen Fichtenbestand des Schwarzwaldes (137 mm bzw. 145 mm) beschrieben hat. In ähnlichen Bereichen (110 mm bis 217 mm) bewegen sich die Transpirationsraten die ALSHEIMER (1997) und KÖSTNER (1999) für Fichtenbestände im Fichtelgebirge für die Vegetationsperiode und ein Jahr ermittelt haben. Abschätzungen von CERMÁK & KUTSCHERA (1987) für einen mit Hilfe von Saftflussmessungen aus 14 Fichten hochgerechneten Bestand in Tschechien (180 bis 280 mm) liegen ähnlich hoch wie auch Angaben von HEIMANN (1995) mit 292 mm für den Harz und von LAUTERBACH (2000) mit 207 bzw. 249 mm fürs Osterzgebirge. Auffällig höher sind Jahressummen der Bestandestranspiration in Fichtenbeständen die mit Hilfe von Modellen (z. B. nach Penman-Monteith) berechnet wurden (Tab. 4-2). So weisen die durch HAMMEL & KENNEL (1999) ermittelten Summen häufig mehr als das Doppelte der mit Xylemflussmessungen bestimmten Bestandestranspirationen auf. Die Spanne reicht von 321 mm in Flössenburg bis 555 mm in Altötting. Ähnlich verhält es sich auch mit der VON WILPERT (1990) für den Heiligkreuztaler Wald im Donautal bestimmte potentielle Evaporation, die in der Größenordnung von 377 mm und 389 mm liegt. Die von CIENCIALA ET AL. (1992) mit Hilfe von Xylemflussmessungen berechneten 392 mm Bestandestranspiration für einen 24-jährigen Fichtenbestand in Südschweden sind vermutlich deshalb so hoch, da der Forst während Trockenphasen bewässert wurde.

## Diskussion

Tabelle 4-1: Zusammenstellung von Angaben zur Transpiration (T) und potentiellen Evapotranspiration (PET) von europäischen **Fichtenbestände** (geordnet nach Breitengrad und Höhenlage) nach verschiedenen Autoren. Die Differenz zwischen T und PET ist durch die Evaporation des Bodens und die Transpiration der Kraut- und Strauchschicht bedingt. Bei Saftflussmessungen werden diese Komponenten nicht berücksichtigt.

<b>Fichtenbestände</b>					
Ort	ü. NN [m]	T [mm]	PET [mm]	T bzw. PET [mm d <sup>-1</sup> ]	Ermittlungsmethode Quelle
SÜDWESTSCHWEDEN	100	392 (mit Bewässerung)		1,8	<sup>c</sup> CIENCIALA (1992)
TSCHECHIEN	k.a.	180 bis 280			<sup>c</sup> CERMAK & KUTSCHERA (1987)
ALTÖTTING	410	<sup>b</sup> 555			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
ZURSMARSHAUSEN	518	<sup>b</sup> 533			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
EBERSBERG	538	<sup>b</sup> 417			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
HEILIGKREUZTALER WALD (DONAUTAL)	600		<sup>b</sup> 377 <sup>b</sup> 389		<sup>d</sup> VON WILPERT (1990)
HARZ	ca. 640	<sup>b</sup> 292			<sup>c</sup> HEIMANN (1995)
ROTHENKIRCHEN	670	<sup>b</sup> 364			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
FICHELGEBIRGE	ca. 760 ca. 800	<sup>a, b</sup> 110 <sup>b</sup> 210 bis <sup>a</sup> 217		1,2 bis 2,1	<sup>c</sup> ALSHEIMER (1997) <sup>c</sup> KÖSTNER (1999)
OSTERZGEBIRGE	785	<sup>a</sup> 207 <sup>b</sup> 249			<sup>d</sup> LAUTERBACH (2000)
FLÖSSENBÜRG	833	<sup>b</sup> 321			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
GOLDKRONACH	835	<sup>b</sup> 343			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
SCHWARZWALD	800 1000	<sup>b</sup> 137 <sup>b</sup> 145			<sup>c</sup> GÜLPEN (1996)
SONTHOFEN	1240	<sup>b</sup> 431			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
OBERRAMMERSBERG	1260	<sup>a</sup> 164 bis 172 <sup>b</sup> ca. 220		1,3	<sup>c</sup> diese Arbeit

a = Hochrechnungszeitraum Vegetationsperiode (ALSHEIMER = Mitte April bis Oktober, LAUTERBACH = April bis September, diese Arbeit = Mitte Mai bis Mitte September)

b = Hochrechnungszeitraum ein Jahr

c = Xylemflussmessungen

d = Modellberechnungen z. B. nach Penman-Monteith

k.a. = keine Angaben

WKS = Waldklimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Bei **Buchen-Reinbeständen** liegen die mit Modellberechnungen und Xylemflussmessungen ermittelten Jahressummen von Bestandestranspirationen in ähnlichen Größenordnungen (Tab. 4-2). Frühe Untersuchungen wie die von SCHNOCK (1971, zit. nach LANG 1999) nennen einen Betrag von 344 mm im Jahr. Für britische Buchenwälder geben ROBERTS & ROSIER (1994) ein dreijähriges Mittel der potentiellen Evaporation von 393 mm an. Direkt vergleichbar sind Angaben der potentiellen Evaporation von LANG (1999) mit 289 mm für einen Bestand in Karlsruhe und von BENECKE & VAN DER PLOEG (1976) für einen Buchenbestand im Solling (281 mm). In einer späteren Untersuchung gibt CONERS (2001) die reine Kronentranspiration im Solling mit 229 mm an. Zwei weitere von CONERS (2001) untersuchte Buchenaltbestände, unterscheiden sich deutlich sowohl in ihrem Niederschlagsregime als auch bezüglich der bodenhydrologischen Eigenschaften. Während im Solling (1031 mm) und in der Lüneburger Heide (801 mm) verhältnismäßig viel Niederschlag fällt, ist die Wasserversorgung im Ziegelrodaer Forst mit 462 mm angespannt und mit der des Kranzberger Forsts vergleichbar (Kap. 3.2.7). Trotz dieser Unterschiede sind die Kronentranspirationen in den drei Buchenbeständen sehr ähnlich (Spanne von 224 mm bis 274 mm) und liegen im gleichen Rahmen wie Berechnungen von KÖSTNER (1999) für den Steigerwald mit 253 mm, von GRANIER ET AL. (1999) in Frankreich (zwischen 253 mm und 256 mm) und eigenen Untersuchungen während der Vegetationsperiode im Mischbestand im Kranzberger Forst (246 mm bis 277 mm, vgl. Tab. 4-3). Selbst die mit Modellrechnungen ermittelte Kronentranspiration für Buchenbestände (HAMMEL & KENNEL 1999) bewegt sich teilweise in dieser Größenordnung (Bad Brückenau: 188 mm, Mitterfels 282 mm), erreicht aber mit 333 mm in Schongau und 329 mm in Ebrach auch höhere Werte.

In keinem Fall liegt jedoch eine Verdreifachung der Kronentranspiration vor, wie sie in Fichten-Reinbeständen zwischen Xylemflussmessungen und empirischen Verdunstungsmodellen festgestellt wurden. Ähnliche Beobachtungen machte auch KÖSTNER (1999, 2001) bei Fichten- und Buchenbeständen. Laut der Autorin können die Unterschiede zwischen älteren Bestandestranspirationsangaben in der Literatur (z. B. PECK UND MAYER 1996), die indirekt durch Wasserbilanzgleichungen bestimmt wurden, und überarbeiteten Angaben, die durch Saftflussmessungen auf den Bestand skaliert wurden, bei fast 200 % liegen. KÖSTNER (1999, 2001) führte diese Diskrepanzen unter anderem darauf zurück, dass frühere Angaben teils die Evaporation von feuchten Oberflächen einschlossen. Außerdem erfolgte bei den älteren Beschreibungen der Bestandestranspirationen keine klare Trennung zwischen der Transpiration des Unterwuchses und des Baumbestandes (ALSHEIMER 1997, KÖSTNER 2001), obwohl erstere an heißen Sommertagen in Fichtenbeständen bis zu 45 % der Bestandestranspiration erreichen kann (KÖSTNER 1999).

## Diskussion

Tabelle 4-2: Zusammenstellung von Angaben zur Transpiration (T) und potentiellen Evapotranspiration (PET) von europäischen **Buchenbeständen** (geordnet nach Breitengrad und Höhenlage) nach verschiedenen Autoren. Die Differenz zwischen T und PET ist durch die Evaporation des Bodens und die Transpiration der Kraut- und Strauchschicht bedingt. Bei Saftflussmessungen werden diese Komponenten nicht berücksichtigt

<b>Buchenbestände</b>					
Ort	ü. NN [m]	T [mm]	PET [mm]	T bzw. PET [mm d <sup>-1</sup> ]	Ermittlungsmethode Quelle
DÄNEMARK	k.a.	<sup>a</sup> 493		4	<sup>k.a.</sup> LADEFOGED (1963)
ENGLAND	k.a.		<sup>a</sup> 393	3,22	<sup>k.a.</sup> ROBERTS & ROSIER (1994)
BELGIEN	k.a.	<sup>b</sup> 344			<sup>k.a.</sup> SCHNOCK (1971) zit. nach LANG (1999)
FRANKREICH	300 1000	<sup>b</sup> 256 <sup>b</sup> 253			<sup>c</sup> GRANIER ET AL. (1999)
NÖRDLICHES APENNIN / ITALIEN	1230		<sup>a</sup> 301	1,97	<sup>c</sup> MAGNANI ET AL. (1998)
k.a.	k.a.	<sup>b</sup> 268-601			<sup>d</sup> PECK & MAYER (1996)
LÜNEBURGER HEIDE	115	<sup>b</sup> 274			<sup>c</sup> CONERS (2001)
KARLSRUHE	220	<sup>b</sup> 206	<sup>b</sup> 289	3,33	<sup>c, d</sup> LANG (1999)
ALLSTEDT (ZIEGELRODAER FORST)	280	<sup>b</sup> 224			<sup>c</sup> STROBEL (1997) zit. nach CONERS (2001)
EBRACH	410	<sup>b</sup> 329			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
STEIGERWALD	440	<sup>b</sup> 253			<sup>c</sup> KÖSTNER (1999)
SOLLING	k.a.		<sup>b</sup> 281		<sup>k.a.</sup> BENECKE & VAN DER PLOEG (1976)
SOLLING	510	<sup>b</sup> 229			<sup>c</sup> CONERS (2001)
BAD BRÜCKENAU	780	<sup>b</sup> 188			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
SCHONGAU	785	<sup>b</sup> 333			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
MITTERFELS	1025	<sup>b</sup> 282			<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)
BERCHTESGADEN	k.a.	<sup>b</sup> 240 bis 370			<sup>k.a.</sup> KÖPPEL (1995)

a = Hochrechnungszeitraum Vegetationsperiode

(ROBERTS & ROSIER = Juni bis September, LADEFOGED = Mai bis August, MAGNANI ET AL. = Mai bis September)

b = Hochrechnungszeitraum ein Jahr

c = Xylemflussmessungen

d = Modellberechnungen z. B. nach Penman-Monteith

k.a. = keine Angaben

WKS = Waldklimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Abgesehen von Angaben zur Kronentranspiration von HAMMEL & KENNEL (1999) für einen **Buchen-Fichten-Mischbestand** bei Kreuth, konnten keine weiteren Literaturangaben für diesen Bestandestyp gefunden werden. Die am Sperrgraben (Hochlage) für den Buchen-Fichten-Mischbestand ermittelte Kronentranspiration lag bei ca. 50 % der Angaben von HAMMEL & KENNEL (1999) und betrug hochgerechnet auf ein Jahr ca. 270 mm. Die Hochrechnung erfolgte aus den mittleren Tageswerten der Vegetationsperioden über die schneefreie Zeit des Jahres (Mitte Mai bis November = 169 Tage, Tab. 4-3). Der Unterschied von Kreuth zum Tieflagenbestand im Kranzberger Forst lag bei ca. 20 %, wobei für Kranzberg eine jährliche Kronentranspiration von ca. 389 mm veranschlagt wurde (durch Messungen bestätigte Tage ohne Winterruhe 229, Hochrechnung der mittleren Tageswerte über diesen Zeitraum, Tab. 4-3). Da sich die mittleren Tageswerte der Bestandestranspiration für Kranzberg und Sperrgraben kaum unterscheiden (Tab. 4-3), ist der jährliche Wasserverbrauch in den verschiedenen Höhenlagen nur durch die Länge der frost- bzw. schneefreien Tage bestimmt, die für Fichten ausschlaggebend sind.

Tabelle 4-3: Zusammenstellung aus der Literatur bekannter Angaben zur Transpiration (T) von europäischen **Buchen-Fichtenmischbeständen** (geordnet nach Höhenlage).

<b>Buchen-Fichten-Mischbestände</b>				
Ort	ü. NN [m]	T [mm]	T [mm d <sup>-1</sup> ]	Ermittlungsmethode Quelle
FREISING	490	<sup>a</sup> 246 bis 277 <sup>b</sup> ca. 389	1,7	<sup>c</sup> diese Arbeit
OBERAMMERGAU	1220	<sup>a</sup> 192 bis 202 <sup>b</sup> ca. 242	1,6	<sup>c</sup> diese Arbeit
KREUTH	1832	<sup>b</sup> 460		<sup>d</sup> WKS (1999) aus HAMMEL & KENNEL (2001)

a = Hochrechnungszeitraum Vegetationsperiode (diese Arbeit = Mitte Mai bis Mitte September)

b = Hochrechnungszeitraum ein Jahr

c = Xylemflussmessungen

d = Modellberechnungen z. B. nach Penman-Monteith)

WKS = Waldklimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Wie oben gezeigt, lagen besonders die Modellberechnungen der Bestandestranspirationen für Fichten bei HAMMEL & KENNEL (1999) über denen anderer Autoren, so dass die in Kreuth gefundene höhere Mischbestandestranspiration vermutlich durch den Einzelbeitrag der Fichte verursacht ist. Ein vollständiger Stoffwechselstillstand findet bei Koniferen im Winter nicht immer statt (SCHMIDT-VOGT 1977, MATYSSEK 1985, KÖRNER ET AL. 1994). In Gebieten mit günstigen Standortverhältnissen bleibt der Stoffwechselapparat latent aktiv und reagiert auf Temperaturerhöhungen (sog. Verwöhnungsphasen) mit einem raschen Anstieg der Transpiration und Assimilation. In solchen Fällen ist ein Kälterückfall besonders gefährlich, da er zu Austrocknungsschäden des Plasmas führt (SCHMIDT-VOGT 1977).

Im Vergleich zu den laubabwerfenden Buchen haben Fichten damit die Möglichkeit, auch in der kalten Jahreszeit günstige Witterungsbedingungen für die Stoffproduktion bzw. Kompensation der Atmungsverluste zu nutzen (MATYSSEK 1985, KÖSTNER 2002). Die quantitative Bedeutung der winterlichen Photosynthese für den Stoffhaushalt lässt sich nicht einfach beurteilen, da kaum kontinuierliche Messungen durchgeführt wurden bzw. diese nur an einzelnen Zweigen (Gaswechsellmessungen) stattfanden (KÖSTNER 2002). Die thermoelektrischen Xylemsaftflussmethoden können bei wechselnden Temperaturverhältnissen mit Frostereignissen nur unter großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten eingesetzt werden (SAUGIER ET AL. 1997). Aus diesem Grund beschränken sich Saftflussmessungen in den gemäßigten Breiten meist auf die frostfreie Periode (KÖSTNER 1999). Im Rahmen des EUROFLUX-Projektes erfasste KÖSTNER (2002) während der Wintermonate kontinuierliche CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Flüsse (Eddy-Kovarianz-Methode) und konnte geringe Saftflüsse im Xylem eines Fichtenaltbestandes im Tharandter Wald (450 m NN) dokumentieren. Hierbei erreichten die CO<sub>2</sub>-Flussraten (pro Bodenfläche) tagsüber im Januar ca. 8 % ( $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) der mittleren Flussraten im Juli ( $12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Während eigener Messungen im Winter am Sperrgraben und im Kranzberger Forst ließen sich keine eindeutigen Xylemtransporte in den Stämmen nachweisen, was diese jedoch nicht ausschließt. HAMMEL & KENNEL (1999) haben bei Fichte eine ganzjährige Transpiration angenommen, ohne genauere Angaben zum Temperaturwert, bei dem in ihrem Modell die Transpiration einsetzt, zu geben. PISEK ET AL. (1967, zit. nach SCHMIDT-VOGT 1977) nennen ein Temperaturminimum der Nettoassimilation im Winter von  $-6^\circ$  bis  $-7^\circ \text{C}$ . KÖSTNER (2002) zeigte, dass selbst in den kältesten Monaten (Dezember/Januar mittlere Tagestemperatur ca.  $-2$  bis  $0^\circ \text{C}$ ) Gaswechsel und Transpiration bei Fichten stattfinden. Allerdings ergaben Modellierungen des Gasaustausches anhand meteorologischer Daten für das Lehstenbachgebiet einen Anteil von 4 % (8 mm) der Wintertranspiration an der Jahrestranspiration (FALGE & TENHUNEN 1998, zit. nach KÖSTNER 1999). Die Wasserverluste außerhalb der Vegetationsperiode sind damit sehr gering und können bei Bodenfrost durch die frequente Nassdeposition oberirdisch ausgeglichen oder dem Baumspeicher entnommen werden. KÖSTNER (1999) nimmt für den Winter Maximalwerte von unter 10 % der Jahreswerte an, was keine Erklärung für die hohen Modellberechnungen der Bestandestranspirationen für Fichten bei HAMMEL & KENNEL sind. Der Transpirationszeitraum bei Buche ist hingegen durch den Knospenaustrieb im Frühjahr und den Laubabwurf im Herbst eindeutig festgelegt – was die ähnlich hohen Bestandestranspirationen für Buche von HAMMEL & KENNEL (1999) im Vergleich zu anderen Autoren belegen. Rinden-Transpiration im Winter wird weder bei Buche noch Fichte berücksichtigt und dürfte vernachlässigbar gering sein.

#### 4.6 Sommerwasserbilanzen der Wassereinzugsgebiete

Die Summen der Bestandestranspirationen während der Vegetationsperioden 1999 - 2001 (jeweils 15. Mai bis 15. September, vgl. Kap. 3.2.8) am Sperrgraben und im Kranzberger Forst wurden mit den sommerlichen Wasserbilanzen der jeweiligen Wassereinzugsgebiete verglichen. Als Wasserbilanz eines Einzugsgebietes bezeichnet man die im Jahresverlauf auftretende Differenz zwischen Input und Output des Systems. Inputgröße ist der Freilandniederschlag. Ein Teil des Wassers wird direkt von den Lauboberflächen verdunstet, die Interzeptionsverdunstung. Der Teil des Niederschlags, der auf den Boden gelangt, wird als Bestandesniederschlag bezeichnet. Er setzt sich aus Kronentraufe und Stammablauf zusammen. Während bei Fichte der Stammablauf weniger als 1 % beträgt (BENECKE 1976) und deshalb in den Untersuchungen vernachlässigt wurde, kann er bei sommergrünen Bäumen wie der Buche zwischen 5 und 10 % des Freilandniederschlags betragen (LARCHER 2001).

Im Bergwald am Sperrgraben betrug die Bestandestranspiration im Fichten-Reinbestand in den Jahren 1999 bis 2001: 168 mm, 172 mm und 164 mm (Abb. 3-53) und damit zwischen 13 und 19 % des Freilandniederschlags. Im Buchen-Fichten-Mischbestand lag die Bestandestranspiration mit 16 bis 23 % des Freilandniederschlags etwas höher (202 mm, 192 mm und 198 mm). Der Bestandesniederschlag betrug von Mitte Mai bis Mitte September für den Fichten-Reinbestand im Jahr 1999: 683 mm, im Jahr 2000: 754 mm und im Jahr 2001: 825 mm. Das entspricht einer Interzeptionsverdunstung von 22, 29 und 34 % respektive.

Im benachbarten Buchen-Fichten-Mischbestand betrug bei vergleichbaren Blattflächenindex (Reinbestand: 6,8 und Mischbestand: 6,6) für die Jahre 1999 bis 2001 die Bestandesniederschläge 781 mm, 851 mm und 856 mm, wobei 5 % des Freilandniederschlags über den Stammablauf der Buchen eingetragen wurden. Im Mischbestand lagen damit für die Vegetationsperioden 1999 bis 2001 die Interzeptionsverluste zwischen 11 und 32 %. Die Differenz aus Bestandesniederschlag und Bestandestranspiration ergibt eine Abschätzung der Wassermenge (Niederschlags-Restmenge), die u. a. für die Transpiration, Bodenevaporation, Bodenspeicher und Hangabfluss zur Verfügung stehen. Die Bodenevaporation kann in den Beständen am Sperrgraben aufgrund des geschlossenen Kronendachs vernachlässigt werden (Deckungsgrad der Bodenvegetation < 5 %). Somit verblieben als Niederschlags-Restmenge in den beiden Beständen ca. 52 bis 66 %, welche vor allem dem Hangabfluss bei der steilen Flächenneigung (Fichten-Reinbestand 25° und Buchen-Fichten-Mischbestand 55°) und der Evaporation (ca. 10 % bei gegebenen Kronenschluss: BAUMGARTEN & LIEBSCHER 1996) zugerechnet wird. Zur experimentellen Überprüfung der hydrologischen Abflussmodellierung durch die Arbeitsgruppe Becker wurden zwei Abflussmessstellen im Sperrgrabengebiet eingerichtet, wobei eine direkt den Hangabfluss des 1,1 km<sup>2</sup> großen Sperrgrabengebietes in die Halbammer misst (pers. Mitteilung, SCHÄFERMEYER). Die Übereinstimmung der Pegelstandsmessungen der Jahre 1999 bis 2001 mit den in Abb. 3-53 aufgezeigten Niederschlags-Restsummen ist hoch. Insgesamt weisen die

Pegelstandsmessungen (1999: 517 mm, 2000: 451 mm und 2001: 442 mm) etwas niedrigere Hangabflüsse als die um die Evaporation (10 %) bereinigten Niederschlags-Restsummen auf. Die Differenzen sind dadurch erklärbar, dass sich im Gegensatz zu den Pegelstandsmessungen die Niederschlags-Restsummen auf kleinräumigere Flächen beziehen (vgl. Tabelle 2-3), die auch noch die höchsten Geländeneigungen im Sperrgrabengebiet aufweisen.

Der Tieflagenstandort des Mischbestandes im Kranzberger Forst (Abb. 3-54) wies bei niedrigerem Freilandniederschlag (378 bis 428 mm, jeweils 15.05. – 15.09.2000 und 2001, mit ca. 5 % Abweichung ähnlich zur 5 km entfernt gelegener Messstelle „Landtechnik“/Campus Weihenstephan) 2 bis 3fach höhere Anteile für Interzeption (39 bis 44 %) und Transpiration (58 bis 73 %) auf als am Sperrgraben. Der Stammablauf der Buche war mit etwa 13 % des Freiland-Niederschlags doppelt so hoch wie am Sperrgraben. Rechnerisch ließ sich keine Restmenge ermitteln, jedoch ist eine solche von ca. 10 % im Rahmen der Erfassungsgenauigkeit (z. B. der Bestandestranspiration: KÖSTNER 1999) nicht auszuschließen. Neben der Bodenevaporation (Deckungsgrad der Bodenvegetation < 5 % bei hohem Kronenschluss, s. o.) ist auch der Hangabfluss für die ebene Bestandesfläche in Kranzberg zu vernachlässigen (vgl. BAUMGARTEN & LIEBSCHER 1996). Somit erscheint im Sommer der Kreislauf zwischen Wassereintrag in den Bestand und Bestandestranspiration weitgehend geschlossen. Das Niederschlagswasser im Bestand wird direkt durch die Bäume aufgenommen oder von ihrer Lauboberfläche verdunstet. Ähnliches wiesen auch HENNING & LIEBSCHER (1979) für den benachbarten Standort Weihenstephan nach. Im Jahresgang der Station Weihenstephan bestehen im Winter Wasserüberschüsse, weil außerhalb der Hauptvegetationsperiode die Energie zur vollen Verdunstung nicht ausreicht. In der warmen Jahreszeit wird die potentielle Verdunstung durch die sommerliche Niederschlagshöhe gedeckt und diese nahezu aufgebraucht.

In Kranzberg und am Sperrgraben entspricht bei jeweils ähnlichem LAI von 6 bis 7 (für projizierte Blatt- und Nadelflächen) die ermittelte Interzeption Literaturangaben für Nadel- und Laubwälder der gemäßigten Zone (BAUMGARTEN & LIEBSCHER 1996, LARCHER 2001). Ganz klar können folgende Aussagen getroffen werden: Die Hangneigung (55°) am Sperrgraben ist Ursache für einen hohen Wasserabfluss im Gelände, der in dieser Form in der Ebene nicht stattfindet (Kranzberger Forst: Neigung 1°). Die hohen Niederschläge in den nördlichen Randalpen liefern während der Sommermonate einen Wasserüberschuss für das Teileinzugsgebiet des Sperrgrabens und bewirken somit einen Abfluss von Wasser aus dem Gebiet und sind eine Versorgungsgrundlage für anschließende Ökosysteme („Source“-Funktion). Im Kranzberger Forst wird während der Sommermonate das Wasser, das als Niederschlag fällt von der vorhandenen Vegetation aufgenommen und „verarbeitet“. Es findet somit keine Weiterleitung an umgebende Systeme, wie z. B. den Bodenwasserspeicher statt („Sink“-Funktion). Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der Kranzberger Forst während der Sommermonate ein „kurzgeschlossenes System“ ist und den außerhalb der Vegetationsperiode angelegten Wasserspeicher im Boden aufzehrt. Kurzzeitig kann die Vegetation unter Wasserstress leiden. Die während der Vegetationsperiode fehlenden Wassermengen sind sehr gering und

betragen etwa 2 bis 12 % des Freilandniederschlags. Außerhalb der Hauptvegetationsperiode, wenn die Transpiration und Interzeption sinkt, kann der Bodenwasserspeicher gefüllt werden und die Gesamtjahresbilanz Wasserüberschüsse aufweisen.

Die Eingangs dargestellten und aus der zentralen Hypothese abgeleiteten Fragestellungen werden in den folgenden Kapiteln diskutiert. Sie besitzen angesichts der ökophysiologischen Kenntnislücken über Bergwälder (KRÄUCHI ET AL. 2000) und zur prozessorientierten Modellierung der Bestandeskronentranspiration eine große Relevanz.

### **4.7 Fragestellung 1:**

**Ist unter den gegebenen Standortverhältnissen des Bergwaldes die für wechselgrüne Bäume gegenüber immergrünen Koniferen auf Einzelblattebene zu erwartende erhöhte Transpirationsrate auch auf Kronenebene feststellbar und für den Wasserverbrauch des Mischbestandes bestimmend - oder führen standörtliche Einflüsse zu ähnlichem Wasserverbrauch des Kronendaches im Fichtenreinbestand und Buchen-Fichten-Mischbestand?**

**Weitergehend wird folgende Hypothese beantwortet: Weist in der montanen Höhenstufe der nördlichen Randalpen ein adulter Fichten-Reinbestand einen ähnlichen Wasserverbrauch auf wie ein Buchen-Fichten-Mischbestand?**

Am begrenzten Kenntnisstand über quantitative Ursache-Wirkungsbeziehungen der Stoffflüsse (Produktion, Wasserverbrauch) in Bergwäldern hat sich trotz der regional hohen Bedeutung für Stammholzproduktion oder Schutzwaldfunktion auch in den letzten Jahren wenig geändert (KRÄUCHI ET AL. 2000). Die Klärung ökophysiologischer „Schlüsselprozesse“ wird als Grundlage für forstliches Management auf montaner Ökosystemebene gefordert, zumal auch in der Hochlage Buche als natürliches Mischwaldelement in Ergänzung zu Fichte zunehmend gefördert werden soll (DERTZ 1996). Der Wasserhaushalt ist ein solcher Schlüsselfaktor im montanen Mischwald, da die Bestandeskronendach-Transpiration ( $E_c$ ) in starkem Maße von interspezifischen Unterschieden in der Blattphysiologie und Kronenarchitektur geprägt ist (MACKEY ET AL. 2003, SCHUME ET AL. 2003). In beiderlei Hinsicht stellen Buche und Fichte gegensätzliche Extrema für mitteleuropäische Verhältnisse dar (MATYSSEK 1986; STITT & SCHULZE 1994). So kann  $E_c$  kleinräumig in Buchen-Fichten-Mischbeständen – bedingt durch strukturelle Kronendach-Heterogenitäten – beträchtlich variieren (KÖSTNER 2001, ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2001), was lokal zur eingeschränkten Boden-Wasserverfügbarkeit im Bestand führen kann (ZIERL 2001, SCHUME ET AL. 2003). In der Tat konnte am Sperrgraben die Kronentranspiration der Bäume an einem Tag selbst innerhalb der Kraft-Klassen erheblich variieren, was sich in Überlappungen der Datensätze zwischen den Kraft-Klassen, Baumarten und Bestandestypen sowie

den entsprechenden PPF-Abhängigkeiten manifestierte (Abb. 3-37). Dennoch waren lokale Einflüsse auf den Boden-Wasserhaushalt (in Form von Austrocknung) bei den gegebenen hohen, sommerlichen Niederschlagsmengen in der montanen Höhenstufe (Tab. 3-21; AG BERNHOFER, pers. Mitteil.) kaum nachweisbar (AG HUWE, pers. Mitteil.). Fehlende Feuchtelimitierung mag sich auch in der guten Wüchsigkeit der 80-jährigen Sperrgraben-Bestände widerspiegeln (BHD 50-60 cm in Buche und Fichte der Kraft-Klasse 1, Abb. 3-7; PRETZSCH, pers. Mitteil.), insbesondere in Buche gefördert durch gute Wasserzügigkeit in den stark geneigten Hangflächen und die Flysch-Sedimente als Ausgangssubstrat des tiefgründigen Bodens mit hoher Wasserspeicherkapazität (LANGSHAUSEN ET AL. 2001).

Dennoch sind montane Standorte geprägt von harschen Umweltbedingungen (GRILL ET AL. 1999), limitiert vor allem durch verkürzte Vegetationsperioden und niedrige Temperaturregime (KÖRNER 1998). Zwar findet bei Fichten im Winter nicht immer ein vollständiger Aktivitätsstillstand statt, in Gebieten mit winterlichen Witterungsanomalien (z. B. Föhn) bleibt der transpiratorische und assimilatorische Apparat in einem Zustand latenter Aktivität und reagiert auf Temperaturerhöhung mit einem raschen Anstieg der gesamten Stoffwechselaktivität (SCHMIDT-VOGT 1977). Allerdings birgt der Winterstoffwechsel trotz ausgebildeter Kälteresistenz der Fichte immer die Gefahr von Frostschäden (SCHMIDT-VOGT 1977) und bildet besonders in den nördlichen Randalpen eher eine Ausnahme. Versuchsmessungen sowohl am Sperrgraben als auch im gemäßigeren Klima des Kranzberger Forsts zeigten im Winter keine eindeutigen Xylemtransporte in den Stämmen (vgl. Kap 4.6). Bei Buche ist im Winter neben der Photosynthese, aufgrund des Laubverlustes, die Transpiration des Holzkörpers durch temporäre Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit infolge Cavitation in Stamm und Ästen eingeschränkt (COCHARD ET AL. 2001). Da solche Effekte bis in die Zeit der Schneeschmelze anhalten (STYLES ET AL. 2002), wurde die hydrologische und ökophysiologische Charakterisierung der Sperrgraben-Bestände (abgesehen von logistischen Gründen) auf die Vegetationsperioden begrenzt. Generell scheint in Buche die Bestandeskronenleitfähigkeit für Wasserdampf bei Temperaturen unter 17°C eingeschränkt zu werden (GRANIER ET AL. 2000). Trotz des unterschiedlichen Standortklimas, war jedoch die splintflächenbezogene Kronentranspiration von hinsichtlich Alter und Größe vergleichbaren Buchen- und Fichten-Bäume im Tieflagen-Bestand Kranzberger Forst (PRETZSCH ET AL. 1998) mit 106 bis 126 bzw. 61 bis 69 t m<sup>-2</sup> ähnlich zu jener am Sperrgraben mit 102 bis 103 t m<sup>-2</sup> bzw. 58 bis 63 t m<sup>-2</sup> (jeweils für die Jahre 2000 und 2001; Tab. 3-48). Selbst kurzfristige Reaktionen im Xylemfluss auf eine markante Sonnenlichtschwankung, die während der totalen Sonnenfinsternis am 11.08.1999 auftraten (FABIAN ET AL. 2001), zeigten in Buche und Fichte eine ähnlich gedämpfte Dynamik in der Hoch- und Tieflage (HÄBERLE ET AL. 2001) und entsprachen Beobachtungen an einem Buchenstandort in Belgien (STEPPE ET AL. 2002). Diese Ähnlichkeiten sind insofern bemerkenswert, als der typischerweise (in der Tieflage) zentripetal im Stammquerschnitt von Buche und Fichte abnehmende Xylemfluss (GRANIER ET AL. 2000, KÖSTNER ET AL. 1998) in der Hochlage jeweils ein inkonsistentes Muster aufwies (Abb. 3-32 und 3-34). Solche Effekte werden besonderen, standortstypischen Stressbedingungen zugeschrieben (CERMAK & NADEZHINA 1998, JIMENEZ ET AL. 2000). Auch die auf der Tieflagenfläche des Kranzberger Forsts nur geringfügige, jedoch am Sperrgraben deutlich ausgeprägte

Hangneigung hatte keinen wesentlichen Einfluß auf die Kronentranspiration einzelner Buchen und Fichten der Kraft-Klasse 1, obwohl aufsteigend von montanen zu subalpinen Lagen Unterschiede in Inklination und Exponierung die Ökophysiologie von Bäumen zunehmend beeinflussen können (TRANQUILLINI 1979, HÄSLER 1982, HERZOG ET AL. 1998). Entsprechend den Beobachtungen zum Kohlenstoffgewinn entlang von Höhengradienten (BENECKE ET AL. 1981) erscheint auch der Wasserverbrauch in verschiedenen Höhenlagen im wesentlichen durch die Länge der jeweiligen Vegetationsperiode bestimmt.

Am Sperrgraben war der Wasserverbrauch dominierender Fichten im Mischbestand nur wenig niedriger als von entsprechenden Buchen und leicht erhöht (jeweils nicht signifikant) gegenüber gleich großen Fichten im Reinbestand (Abb. 3-44). Auf Baumebene verwischten sich also die markanten blattphysiologischen Unterschiede zwischen immer- und wechselgrüner Belaubung (MATYSSEK 1986, STITT & SCHULZE 1994). Der tendenzielle Mehrverbrauch von Wasser durch die Fichte im Mischbestand mag einhergehen mit der oft beobachteten Steigerung der Produktivität dieser Baumart in Mischung (PRETZSCH 2003), welche typischerweise durch erhöhte Lichtpenetration in heterogen strukturierten Bestandeskronenräumen vermittelt wird (STYLES ET AL. 2002, BEYSCHLAG 2001). Diese Tendenz verlor sich im Vergleich von Fichten der Klasse 2 zwischen den Bestandestypen infolge der unter zunehmender Beschattung insgesamt reduzierten Kronentranspiration (OSTENDORF & MANDERSCHIED 1997, WEDLER ET AL. 1996); der angedeutete Unterschied zu Klasse-2-Buchen im Mischbestand blieb jedoch erhalten. Diese Befunde waren über die drei Messjahre hinweg konsistent.

Bei der gegebenen Ähnlichkeit der mittleren Kronentranspiration in der Hoch- und Tieflage wurde am Sperrgraben eine auf Gesetzmäßigkeiten der hydraulischen Architektur basierte (TYREE & ZIMMERMANN 2002) und in der Tieflage erprobte Skalierung von der Baum- zur Bestandesebene angewandt; beruhend auf der auch in Mischbeständen bereits genutzten, hohen Korrelation zwischen Splintfläche und Kronentranspiration (GRANIER ET AL. 1996a, WULLSCHLEGER ET AL. 2002, EWERS ET AL. 2001) und der Integration des Wasserverbrauchs unterschiedlicher, separat berücksichtigter „Struktur-Untereinheiten“ (hier Kraft-Klassen: ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2001).  $E_c$  wurde auf die projizierte und hangparallele Bestandesgrundfläche bezogen. Der erste Bezug dient der standardisierten Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Standorten und Studien, topographiebedingte Effekte auf  $E_c$  erfahren hierbei eine flächenbezogene Verdichtung; der zweite Bezug betont die neigungsabhängige Beeinflussung klimatisch-edaphischer und ökophysiologischer Parameter, so auch von  $E_c$ , entlang der Hangfläche (TRANQUILLINI 1979, KÖRNER 1998).  $E_c$  bei hangparallelem Grundflächenbezug war im Buchen-Fichten-Mischbestand niedriger als im Fichten-Reinbestand, diese Relation kehrte sich jedoch bei  $E_c$ -Bezug auf die projizierte Grundfläche um (vgl. Tab. 3-49). Die Wahl der Bezugsfläche hängt vom „Rationale“ des Modellierungskonzeptes ab, je nach Betonung der feldökologischen Relevanz topographieabhängiger Prozessinteraktionen (s. AGs HUWE und BERNHOFER). Bei standardisiert projiziertem Flächenbezug lag die Abweichung von  $E_c$  im Misch- relativ zum Reinbestand im Bereich des Gesamtfehlers bei Hochrechnungen der Bestandestranspiration aus Einzelbaum bezogenen Xylemflussmessungen (KÖSTNER 1999, KÖSTNER ET AL. 1998, KELLIHER ET AL. 1992).

Die zentrale Hypothese dieser Studie zur Ähnlichkeit des Wasserverbrauchs im Misch- und Reinbestand am Sperrgraben kann daher bestätigt werden (vgl. Fragestellung 1).

### **4.8 Fragestellung 2:**

#### **Wie groß ist der Anteil der Transpiration der Schattenkrone am Wasserverbrauch der gesamten Krone?**

Die Transpiration ist ein energiegetriebener Prozess, ursächlich bestimmt durch die Sonneneinstrahlung, und infolge von Temperaturänderungen modifiziert durch das Ausmaß von Feuchtegradienten und Turbulenzen im Energie-/Massenaustausch zwischen Pflanze/Bestand und Umgebungsluft (FINNIGAN & RAUPACH 1987, HOLLINGER ET AL. 1994, SCHULZE 1994). Folglich sollten sonnenexponierte Kronenteile pro Blattflächeneinheit stärker transpirieren als beschattete, je nach Ausmaß der mikroklimatischen Kopplung zwischen Bestandeskronendach und Atmosphäre (GRANIER ET AL. 2000, MAGNANI ET AL. 1998). Schattenkronen in spät-sukzessionalen Baumarten wie Buche und Fichte können jedoch beträchtliche Ausmaße im Bestandeskronendach einnehmen und könnten somit einen erheblichen Anteil zu  $E_c$  beitragen, was von Relevanz für Bestimmungsverfahren von  $E_c$  auf Basis der Temperatur sonnenexponierter Bestandesoberflächen ist. Tatsächlich steuerte in einer aus Messungen im Kranzberger Forst für den Sperrgraben nach Baumarten getrennt abgeleiteten Schätzung die Schattenkrone der Buche im Mischbestand zwischen 26 und 39 % und die der Fichte im Misch- und Reinbestand zwischen 34 und 49 % zu  $E_c$  bei (s. Tab. 3-59). Diese Schätzung ist von Belang für die Parametrisierung von auf „Remote-Sensing“ gestützten Modellierungen (AGs Huwe und Bernhofer).

### **4.9 Fragestellung 3:**

#### **Welche Bedeutung hat die - meist auf den Vormittag beschränkte - Nutzung des bauminternen Wasserspeichers für die Bestimmung der Kronentranspiration aus Xylemflussmessungen?**

Die Kapazität der Wasserspeicherung im Stammbereich und in den Ästen der belaubten Krone von Bäumen variiert im tages- und jahreszeitlichen Verlauf (TYREE & ZIMMERMANN 2002) und kann bei Lärchen und Fichten bis zu 25 % der sommerlichen Tagestranspiration decken (SCHULZE ET AL. 1985). Der bauminterne Wasserspeicher wird meist vormittags durch die Kronentranspiration genutzt und füllt sich nachts wieder auf. Die Nutzung des Wasserspeichers „entkoppelt“ den Gasaustausch der Krone für einige Stunden von der Bodenwasserversorgung. Somit kann die Transpiration vormittags bei ähnlichen Witterungsverhältnissen deutlich höher sein als am Nachmittag. Die Größe des bauminternen Wasserspeichers beeinflusst die stomatäre Leitfähigkeit und damit die Kronentranspiration (MEINZER & GRANTZ 1991, WHITEHEAD 1998) und ist bei Modellierungen der Bestandestranspiration und des Bodenwasserhaushalts zu berücksichtigen (s. Partnergruppe BERNHOFER). Auch ist zu beachten, dass die Validierung der modellierten Kronentranspiration auf den in

Brusthöhe gemessenen, zeitlich verzögerten Xylemfluss gestützt ist (WEDLER AL. 1996, LOUSTEAU ET AL. 1998, MATYSSEK ET AL. 2003, WIESER ET AL. 2003).

Gaswechselformen spiegeln unmittelbar die Wasserdampfabgabe über die Stomata in Nadeln und Blättern wider, als Reaktion auf den Anstieg der Strahlungsintensität nach Sonnenaufgang. Xylemflussmessungen an der Stammbasis zeigen hingegen einen zeitverzögerten Anstieg des Xylemflusses (Abb. 3-60 bis 3-64). Die Validierung hydrologischer Modellierungen auf Bestandesebene auf der Basis von Xylemflussdaten birgt ein Problem, da der an der Stammbasis gemessene Xylemfluss relativ zur Kronentranspiration besonders an sonnigen Tagen mit mehrstündiger Verzögerung versetzt auftreten kann (SCHULZE ET AL. 1985, KÖSTNER ET AL. 1992, LOUSTEAU ET AL. 1998). Die zeitliche Verzögerung steigt in Abhängigkeit von der zunehmenden Dimension der Bäume, weil große Bäume eine größere, interne Wasserspeicherkapazität aufweisen als kleine. Ein Anhaltspunkt für entsprechende Validierungskorrekturen von Modellierungen am Sperrgraben wurde wiederum für dominierende Bäume aus Messungen im Kranzberger Forst abgeleitet (Abb. 3-60 bis 3-64, Fragestellung 3): 2 bis 3 Stunden Zeitverzögerung des Xylemflusses durch die Stammbasis für ähnlich große Buchen und Fichten wie in Kranzberg.

#### 4.10 Fragestellung 4:

**Lassen sich Transpiration und CO<sub>2</sub>-Aufnahme in Sonnen- und Schattenästen auf eine Weise korrelieren, welche auf der Basis der Kronentranspiration die Modellierung von Kohlenstoffgewinnen auf Bestandesebene eröffnet?**

Die enge Kopplung zwischen photosynthetischer Netto-CO<sub>2</sub>-Aufnahme und Transpiration auf Blattebene (SCHULZE & HALL 1982) bietet die Perspektive, auch auf Bauebene per Modellierung aus der Kronentranspiration den Kohlenstoffgewinn abzuleiten. HARLEY & TENHUNEN (1991) und FALGE ET AL. (1996) haben für ihr Modellierungskonzept den Kopplungsfaktor  $g_{fac}$  definiert, der auf der Basis von „steady-state“ Gaswechselformen die benötigte Korrelation vermittelt.  $g_{fac}$  wurde im Kranzberger Forst für Sonnen- und Schattenlaub in guter Korrelation zwischen Netto-CO<sub>2</sub>-Aufnahmerate und Transpirationsrate für Buche und Fichte ermittelt (Abb. 3-67) und kann nun (in erster Näherung) in das Modellierungskonzept der AG BERNHOFER für die Sperrgraben-Bestände übernommen werden (vgl. Fragestellung 4). In den letzten Jahren ist allerdings auch für Buche gezeigt worden, dass Lichtflecken innerhalb der Baumkronen dynamische Induktionseffekte der Photosynthese nach sich ziehen, die das Photosynthesevermögen im Vergleich zu Modellierungen auf „steady-state“ Basis limitieren sowie zu nicht-uniformen Stomata-Reaktionen führen können (TIMM ET AL. 2002, STEGEMANN ET AL. 1999, KÜPPERS ET AL. 1999); Überschätzungen der Photosynthese durch „steady-state“ Modelle können daher die Folge sein. Die Statistik der Verteilung und Andauer von Lichtflecken sowie die unterschiedliche Blatorientierung bestimmen das Ausmaß der Überschätzung, die unter den Bedingungen mitteleuropäischer Buchenbestände nach SCHULTE ET AL. (2003) auf Blattebene und bei kurzzeitiger Betrachtung (< 30 min) typischerweise bei ca. 25 %

liegen. Anhaltende Induktion vermindert die Überschätzung durch „steady-state“ Modelle, was insbesondere bei großen Zeitschritten der Modellierung (z. B. 30 oder 60 min) auf der Basis gemittelter PPF<sub>D</sub> je Zeitintervall von Relevanz sein dürfte. Entsprechend wird berichtet, dass mittels  $V_c$ -max Bestimmungen (aus „steady-state“ Funktionen) sich der langfristige CO<sub>2</sub>-Gaswechsel verlässlich schätzen lässt (KOSUGI ET AL. 2003). Quantitative Skalierungskonzepte für Lichtfleckenphänomene und deren Auswirkungen von der Blatt- in Richtung Kronenphotosynthese existieren derzeit noch nicht. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass auf  $g_{fac}$  gestützte Modellierungen des C-Gewinns tendenziell ein potentiell Maximum angeben, und dass weiterzuführende Verbesserungen im Skalieren der Lichtfleckeneffekte erst die Schätzung der Photosyntheseleistung auf Baumebene dem realen Niveau weiter annähern werden.

### 4.11 Folgerung und Ausblick

Auf der Einzelbaumebene bieten Saftflussmessungen die Möglichkeit, physiologische Zusammenhänge wie den Einfluss der Witterung auf die Transpiration zu untersuchen. Hierbei zeigen die Einzelbäume sehr individuelle Reaktionsmuster, die abhängig von ihrer sozialen Stellung im Bestand sind. Saftflussmessungen geben Auskunft über den Wasserverbrauch von einzelnen Baumkronen und quantifizieren diesen besser als stichprobenartige Gaswechsellmessungen an einzelnen Blättern und Zweigen. Gaswechsellmessungen stoßen bei der Hochrechnung des quantitativen Wasserverbrauchs vom Einzelblatt auf die Gesamtkrone besonders bei Schattbaumarten wie Buche, aufgrund der hohen Variabilität der Einzelblätter, dem Einfluss von Lichtflecken und der stomatären Patchiness, auf ihre Grenzen. Sie dienen jedoch in dieser Arbeit der prozentualen Abschätzung des Anteils der Sonnen- und Schattenkrone an der Gesamttranspirationsleistung von Buche und Fichte sowie des Zeitverzugs zwischen Stammwasserfluss und Blatttranspiration. Gleichzeitig konnte durch Gaswechsellmessungen der Kopplungsfaktor  $g_{fac}$ , berechnet werden, der zwischen photosynthetischer Netto- $CO_2$ -Aufnahme und Transpiration auf Blattebene vermittelt. Der Informationsgewinn aus diesen Messungen war für die Parametrisierung und Validierung des Vegetations- und Atmosphärenmodells, das von der Arbeitsgruppe BERNHOFER verwendet wurde notwendig (HIRGIS gekoppelt mit PSN 6, Modellbeschreibungen GOLDBERG ET AL. 2002 und FALGE 1997).

„FARQUHAR-basierte“ Blattgaswechsel-Modelle (CAEMMERER & FARQUHAR 1981, HARLEY & TENHUNEN 1991) können mit Hilfe der Ergebnisse aus Saftflussmessungen den Wasser- und Kohlenstoffhaushalt von Bäumen oder Wäldern quantifizieren. Dies ist aufgrund der engen Kopplung zwischen photosynthetischer Netto- $CO_2$ -Aufnahme und Transpiration auf Blattebene möglich. Anhand von Xylemflussmessungen validierte physiologische Modelle eröffnen, im Gegensatz zu der Anwendung empirischer Verdunstungsmodelle wie PENMAN-MONTEITH, neue Perspektiven in der Modellierung von Wasserbilanzen bewaldeter Gebiete unterschiedlicher Flächenausdehnung. Einer ihrer wichtigsten Vorteile ist die konkrete Beschreibung der für den  $CO_2$ -Gewinn und den Wasserverbrauch verantwortlichen Prozesse (BALL ET AL. 1987, TENHUNEN ET AL. 1997). So kann das Verhalten eines Bestandes durch gekoppelte Modelle für den H-, C- und N-Haushalt nicht nur bei gegebenen Umweltbedingungen korrekt wiedergeben, sondern auch die Reaktion auf Klimaänderungen oder ein verändertes Nährstoffangebot untersucht werden. Dies ist für die Abschätzung der Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die untersuchten Bestände wichtig („Global Change-Szenarien“).

Für die heimische Forstwirtschaft ergibt sich die Möglichkeit, mit Hilfe von Modellen die Auswirkungen der Nutzungsänderungen auf die Netto- $CO_2$ -Fixierung als wichtigsten Beitrag zur Produktivität von Waldbeständen zu untersuchen. Gerade in den stärker strukturierten Bergwäldern ist durch die hohe Erosionsgefahr eine nachhaltige Bewirtschaftung und die Abschätzung des Wasserverbrauchs verschiedener Baumarten und Mischungen von größter Bedeutung. Saftflussmessungen können

gerade in den weniger untersuchten Gebirgsregionen die Validierung der hierfür notwendigen Transpirationsmodelle unterstützen.

Aufgrund der hinreichenden Stichprobenzahl und Berücksichtigung der Größenklassen der Bäume konnten in dieser Arbeit die Ergebnisse der Saftflussmessungen von der Einzelbaumebene auf den Bestand skaliert werden. Als Skalierungsfaktoren konnten die Splintquerschnittsflächen und Brusthöhendurchmesser im Bestand, wie sie in anderen Untersuchungen verwendet wurden, bestätigt werden. Weitere Strukturdaten, wie sie mit Hilfe von geernteten Baumdurchmesserklassen erfasst wurden (z. B. Laubmassen und Lauboberflächen pro Baum, prozentuale Anteile von Sonn- und Schattenlaub an der Gesamtblaubung), unterstützten die Charakterisierung der untersuchten Bestände. Bei Wasserhaushaltsanalysen von Waldbeständen bieten Saftflussmessungen den Vorteil der Trennung der Transpiration der Baumschicht von der Evaporation des Bodens und der Transpiration der Kraut- und Strauchschicht. Zur Bilanzierung des Wasserhaushalts wurden in dieser Arbeit neben der Bestandestranspiration, die Interzeption sowie der Bestandes- und Freilandniederschlag der Untersuchungsgebiete bestimmt. Dabei unterschieden sich die gefundenen Sommer-Wasserbilanzen der drei Bestände in Abhängigkeit von der Länge der Vegetationsperiode, ihrer Artenzusammensetzung (Rein- bzw. Mischbestand) und Höhenlage. Die verschiedenen Neigungen der Untersuchungsflächen wirkten sich stark auf die Höhe des Hangwasserabflusses aus und die parallele Darstellung dieser Ergebnisse ist für Modellierer interessant. Die außerdem gewonnenen Erkenntnisse, dass sich Buchen-Fichten-Mischbestände der Hoch- und Tieflage sowie ähnlich alte Fichten-Rein- und Buchen-Fichten-Mischbestände der Hochlage bei ähnlichen Witterungsbedingungen in ihren Wasserverbrauch und in ihren physiologischen Eigenschaften (z. B. Huber-Value) kaum unterscheiden, können bei der großräumigen Regionalisierung von Bestandesflüssen durch Fernerkundung (durch Modelle) nützlich sein. Basisdaten benachbarter Bestände, wie sie Forstbüchern in Form von Alter, Zusammensetzung und Bestandesdichte entnommen werden können, ermöglichen in Modellen eine Regionalisierung der Bestandestranspiration ( $E_c$ ) auf ein Einzugsgebiet. Optische- oder Radar-Signale aus der Fernerkundung müssen jedoch für eine flächenhafte Struktur-Interpretation durch bodengestützte forstliche Strukturaufnahmen (z. B. LAI, Baumhöhe,  $g_{fac}$  usw.) „kalibriert“ werden (KÖSTNER 1999). Besonders im Gebirge, ist die Regionalisierung durch Fernerkundungsdaten aufgrund der Geländetopographie sehr schwierig und eine gute Kalibrierung durch „bodengestützte Daten“, wie sie diese Arbeit bietet, umso wichtiger.

Xylemflussuntersuchungen, besonders an großen Bäumen, nehmen derzeit international in der Waldökosystemforschung zu, wobei meist Reinbestände und nur selten Mischbestände untersucht wurden. Noch seltener wurde bisher in Bergwäldern geforscht, für die es noch zahlreiche ökophysiologische Kenntnislücken gibt (KRÄUCHI ET AL. 2000). Die zu den vier Fragestellungen erarbeiteten Befunde schließen einen Teil dieser Kenntnislücken und leisten ihren Beitrag zu Abklärungen der in Deutschland durchgeführten Forschungsprogramme „International Geosphere-Biosphere Programme“ (IGBP) und „Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle“

**(BAHC).** Ziel dieser Programme und des „Ammerprojektes“ ist es vertikale Austauschprozesse (Wasser, Energie, Gas) zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre sowie die Wasser- und Stoffflüsse in den Untergrund hinein (Versickerung, Grundwasserbildung) zu beschreiben und auf spezifische Standorte und Bestandestypen zu beziehen. Besonders in hochwasser- und erosionsgefährdeten Gebieten wie an der Halbammer, mit ihrem Teileinzugsgebiet Sperrgraben, bieten diese Forschungsprogramme die Möglichkeit Hochwasserschutzmassnahmen zu entwickeln. Die Notwendigkeit von interdisziplinären Forschungsarbeiten wie sie im Ammerprojekt realisiert wurden, wird durch jüngste Ereignisse wie das Pfingsthochwasser 1999, das weite Landstriche im Bereich um Garmisch-Partenkirchen überflutete, unterstrichen.

### 5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Daten zur Validierung und Modellierung der Bestandstranspiration im Wassereinzugsgebiet des Flusses „Ammer“ gewonnen, die verbunden mit den anderen beteiligten Lehrstühlen (hauptsächlich AG Bernhofer, AG Huwe und AG Becker) des interdisziplinär zusammenarbeitenden Projektes eine Datengrundlage zur Erstellung einer Wasserbilanz für den Voralpenraum liefert. Aus logistischen Gründen wurden ein Teil der Messungen, die einen gut zugänglichen Kronenraum voraussetzten, auf der Zentralmessfläche des SFB 607 im Kranzberger Forst durchgeführt. Da Saftflussmessungen an untersuchten Bäumen der Tieflage keine ökophysiologischen Unterschiede zu denen der Hochlage aufwiesen, konnten im Kranzberger Forst gewonnene Grundsatzaspekte der Gaswechsellmessungen auf den Voralpenraum übertragen werden. Unterstützt wurde dieses Vorgehen durch die Erkenntnis, dass sowohl der Kohlenstoffgewinn als auch der Wasserverbrauch nicht von der Hochlage sondern durch die Länge der jeweiligen Vegetationsperiode bestimmt werden. Ein Vergleich des Wasserverbrauchs zwischen dem Hochlagenstandort am Sperrgraben und dem Tieflagen Standort im Kranzberger Forst unterstrichen dies. Trotz des unterschiedlichen Standortklimas war die splintflächenbezogene Kronentranspiration ähnlich alter und großer Buchen und Fichten im Tieflagen-Bestand Kranzberger Forst mit 106 bis 126 t m<sup>-2</sup> bzw. 61 bis 69 t m<sup>-2</sup> ähnlich zu jener am Sperrgraben mit 102 bis 103 t m<sup>-2</sup> bzw. 58 bis 63 t m<sup>-2</sup> (jeweils für die Vegetationsperioden vom 15. Mai bis 15. September der Jahre 2000 und 2001).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die zentrale Hypothese untersucht und bestätigt, dass in der montanen Höhenstufe der nördlichen Randalpen adulte Fichten-Reinbestände einen ähnlichen Wasserverbrauch wie Buchen/Fichten-Mischbestände aufweisen. Die während der drei Vegetationsperioden (in den Jahren 1999 bis 2001) gemessenen Transpirationsunterschiede zwischen den beiden Beständen liegen, bei Bezug auf den Fichten-Reinbestand und die projizierte Grundfläche, zwischen 12 und 21 %. Diese Unterschiede liegen im Bereich des Gesamtfehlers (15 bis 23 %), der sich bei Hochrechnungen der Kronendachtranspiration auf Basis einzelbaum-bezogener Xylemflussmessungen ergibt.

Der Wasserverbrauch dominierender Fichten am Sperrgraben war im Mischbestand nur geringfügig niedriger als von entsprechenden Buchen und leicht erhöht (jeweils nicht signifikant) gegenüber gleich großen Fichten im Reinbestand. Auf Baumebene verwischten sich die markanten blattphysiologischen Unterschiede zwischen immer- und wechselgrüner Belaubung. Der tendenzielle Mehrverbrauch der Fichte an Wasser im Mischbestand mag einhergehen mit der in diesen Beständen oft beobachteten räumlichen und zeitlichen Differenzierung in der Ressourcennutzung. Im Frühjahr, vor dem Laubaustrieb der Buche, kann die Strahlung tiefer und intensiver in den Buchen-Fichten-Mischbestand als in den Fichten-Reinbestand eindringen, die Winterruhe der Fichte verkürzen und zu einer Steigerung der Produktivität dieser Baumart in Mischung führen. Typischerweise erhöht sich in Mischbeständen durch die heterogen strukturierten Bestandeskronenräume die Lichtpenetration, was der Fichte in Mischung einen weiteren Vorteil einbringt. Die Kronentranspiration von Fichten der Klasse 2

nahm in beiden Bestandestypen infolge der nach unten zunehmenden Beschattung ab. Die bei den Fichten der größeren Baumklassen beobachteten Transpirationsunterschiede zwischen Misch- und Reinbestand verwischten sich innerhalb der Klasse 2, der angedeutete Unterschied zu Klasse-2-Buchen im Mischbestand blieb jedoch erhalten. Diese Befunde waren über die drei Messjahre hinweg konsistent.

Schattenkronen können in spät-sukzessionalen Baumarten wie Buche und Fichte einen beträchtlichen Anteil im Bestandeskronendach ausmachen und somit einen erheblichen Beitrag zur Kronentranspiration ( $E_c$ ) leisten, was von Relevanz für Bestimmungsverfahren von  $E_c$  auf Basis der Temperatur sonnenexponierter Bestandesoberflächen ist. Tatsächlich steuerte in einer aus Messungen im Kranzberger Forst für den Sperrgraben nach Baumarten getrennt abgeleiteten Schätzung die Bestandesschattenkrone bei Buche im Mischbestand zwischen 26 bis 39 % und bei Fichte im Misch- und Reinbestand zwischen 34 und 49 % von  $E_c$  bei. Diese Schätzung dient zur Orientierung für Validierungen von auf „Remote-Sensing“ gestützten Modellierungskonzepten (AGs Huwe und Bernhofer).

Xylemflussmessungen, die zur Modellierung der Kronentranspiration dienen, müssen den zeitlichen Versatz zwischen dem Wasserfluss in der Stammbasis relativ zur Kronentranspiration berücksichtigen, der in Abhängigkeit zur Dimension des betrachteten Baumes die interne Wasserspeicherkapazität bewirkt. Die im Kranzberger Forst untersuchten Buchen und eine repräsentative Fichte ließen sowohl in der Sonnen- als auch in der Schattenkrone (hier jedoch weniger deutlich) einen zeitlichen Versatz des Wasserflusses um ca. 2 - 3 Stunden (nach Beginn der Kronentranspiration bei Sonnenaufgang) erkennen. Der Wasserfluss im Stamm hielt auch noch mehrere Stunden nach Ende der Kronentranspiration an, welche bereits ab dem frühen Nachmittag eingeschränkt wurde. Bei Buche belief sich die Größe des Wasserspeichers, bestimmt aus der morgendlichen Differenzfläche zwischen Xylemfluss und Transpiration des Sonnenlaubes, auf ca. 18 % des Tageswasserverbrauchs. In der zweiten Tageshälfte wurden ca. 25 % ermittelt, so dass für die Modellierung ein Mittelwert von 21 % zugrunde gelegt wurde. In der Sonnenkrone der Fichte war der zeitliche Versatz deutlicher ausgeprägt als bei Buche. Der Anteil des genutzten Wasserspeichers am Tageswasserverbrauch betrug bei Bestimmung am Vormittag und bezogen auf das Sonnenlaub ca. 13 %, lag jedoch in der zweiten Tageshälfte bei ca. 58 % (gemittelt für Modellierung 35 %).

Die enge Kopplung zwischen photosynthetischer Netto- $\text{CO}_2$ -Aufnahme und Transpiration auf Blattebene bietet die Perspektive, auch auf Bauebene per Modellierung aus der Kronentranspiration den Kohlenstoffgewinn abzuleiten (Modell PSN 6). Die hierfür benötigte Korrelation wird durch den Kopplungsfaktor  $g_{\text{fac}}$ , der auf der Basis von „steady-state“ Gaswechsellmessungen beruht, vermittelt.  $g_{\text{fac}}$  wurde im Kranzberger Forst für Sonnen- und Schattenlaub in guter Korrelation zwischen Netto- $\text{CO}_2$ -Aufnahmerate und Transpirationsrate für Buche und Fichte ermittelt. Hierfür wird für Buche und Fichte die stomatäre Leitfähigkeit mit der Netto- $\text{CO}_2$ -Aufnahmerate (korrigiert auf Luftfeuchte und  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Außenluft) bei beginnender

## Zusammenfassung

---

PPFD-Sättigung korreliert (im Kranzberger Forst für Sonnenblätter  $> 400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , Schattenblätter  $> 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Für Sonnenblätter der Buche betrug  $g_{\text{fac}}$  (dimensionslos) 10,6, und für Schattenblätter 9,6. Sonnennadeln der Fichte ergaben ein  $g_{\text{fac}}$  von 14,0, die Schattennadeln wiesen ein  $g_{\text{fac}}$  von 19,9 auf. Aufgrund der unterschiedlichen Morphologie der Blattorgane wurden die Gaswechselfparameter bei Buche auf die projizierte Blattfläche und bei Fichte auf die allseitige Blattoberfläche bezogen. Der für Sonnen- und Schattenlaub gewonnene  $g_{\text{fac}}$  konnte nun (in erster Näherung) in das Modellierungskonzept der AG Bernhofer für die Sperrgraben-Bestände übernommen werden.

Die Sommer-Wasserbilanz für das Untersuchungsgebiet am Sperrgraben (Zeitraum 15. Mai bis 15. September) ergab im Reinbestand eine Interzeptionsverdunstung der Baumkronen von ca. 28 % des Freilandniederschlags. Für den Mischbestand bewegte sich die Interzeptionsverdunstung in der Größenordnung von ca. 21 %. Der Reinbestand gab ca. 16 % und der Mischbestand ca. 19 % des Freilandniederschlags durch Transpiration an die Atmosphäre zurück. Die verbleibende Restsumme (ca. 56 % im Rein- und 60 % im Mischbestand) wurde sowohl im Boden als auch in der Biomasse gespeichert oder ging dem Ökosystem am Sperrgraben durch Evaporation sowie Hangabflüssen verloren.

Die Interzeptionsverdunstung der Sommer-Wasserbilanz des Kranzberger Forsts betrug ca. 41 % und die Transpiration ca. 66 % des Freilandniederschlags. Nach dieser Rechnung war die Bilanz während der Sommermonate negativ (um ca. 7 %). Der Fehlbetrag wurde jedoch im Winter, wenn die Transpiration und Interzeption sanken, aufgefüllt und in der Gesamtjahresbilanz konnten Wasserüberschüsse erzielt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchung dienen neben der Bilanzierung der untersuchten Gebiete der Parametrisierung und Validierung des von der AG Bernhofer verwendeten Vegetations- und Atmosphärenmodells HIRGIS für das Wassereinzugsgebiet Sperrgraben. Bei einem exemplarischen Vergleich der modellierten und aus Saftflussmessungen abgeleiteten Verdunstung für einen Buchen-Fichten-Mischbestand und einen Fichten-Reinbestand am Sperrgraben, lieferte das validierte Modell von Bernhofer hohe Übereinstimmungen (Modellierungszeitraum 20.05. bis 31.07.2001). Die maximale Abweichung der Tagesraten der skalierten Xylemflüsse von Tagesraten der durch die AG Bernhofer modellierten Gesamtverdunstung betrug in der Gesamtsumme für den Mischbestand weniger als 3 % und für den Reinbestand nur 0,1 %. Diese Ergebnisse belegen, dass die Entwicklung des Modells HIRGIS für das Untersuchungsgebiet Sperrgraben ausgereift ist.

**Fazit:** Messungen des Xylemflusses in Bäumen sind für die hydrologische Charakterisierung eines Wassereinzuggebietes von zentraler Bedeutung. Sie ermöglichen, die aus anderen Verfahren abgeleitete Transpiration von Waldbeständen als wesentliche Komponente des regionalen Wasserumsatzes zu validieren und die Modellierung der Bestandestranspiration auf eine mechanistische Basis zu stellen. Bedarf besteht insbesondere für Extrema ökologischer Gradienten, wie z. B. die hydrologisch erst ansatzweise charakterisierten Wälder der montanen Stufe.

### 6 Summary

The study provided the database for validating and modelling the canopy transpiration of forest stands in a mountainous watershed within the river “Ammer” region. Investigations were conducted in cooperation with the partner groups of Prof. Bernhofer (University of Dresden), Prof. Huwe of Bayreuth and Dr. Becker (PIK, Institute for the Research of Climate Change, Potsdam) who were in charge of developing a hydrological water balance model of this part of the Bavarian Alps. Measurements of this study were performed in a spruce monoculture (*Picea abies* [L.] KARST) and in a mixed spruce/beechn stand (mixture with *Fagus sylvatica* L.) at “Sperrgraben” near Oberammergau (Bavaria/Germany, 1220 m a.s.l.). In parallel, a low-elevation spruce/beechn stand was investigated as a reference at “Kranzberger Forst” near Freising/Germany (experimental site of DFG-“Sonderforschungsbereich 607”, 490 m a.s.l.). Characteristics in gas exchange at low elevation were assigned – for modelling – to the trees of the mountainous sites, given the ecophysiological similarity of beech and spruce trees at high and low altitude: Carbon gain and crown transpiration were determined by the length of growing season rather than altitude-related changes in the ecophysiological performance. At both altitudes, crown transpiration as based on splint characteristics and scaled to stand level were similar each in beech and spruce trees. During the growing season between May 15 and Sept. 15, 2000 and 2001, the crown transpiration of beech and spruce trees was 106 - 126 t m<sup>-2</sup> and 61 - 69 t m<sup>-2</sup> respectively, at “Kranzberger Forst”, and 102 - 103 t m<sup>-2</sup> and 58 - 69 t m<sup>-2</sup>, respectively, at “Sperrgraben”.

The central hypothesis was tested and confirmed that at high altitude spruce monoculture did not differ (within determination accuracy) from spruce/beechn mixture in terms of water consumption during the growing seasons of 1999 through 2001.

At “Sperrgraben”, the water consumption of dominant spruce trees in mixture was insignificantly lower than of corresponding beech trees and slightly higher than of corresponding spruce trees in monoculture. Apparently, the distinct leaf-physiological differences known to exist between evergreen spruce and deciduous beech vanished when compared at the tree and stand level. The trend of a higher water consumption of spruce in mixture relates to high insolation in spring as long as neighboring beech is still bare of foliage and to the heterogeneous canopy structure that allows higher light use also during the remainder of the growing season relative to the growth conditions in monoculture. The coupling between crown transpiration and radiation declined in both species as tree individuals became gradually suppressed by neighbors in the stands. Trends of different water consumption in dominant spruce trees between monoculture and mixture vanished in both types of stands when comparing subdominant trees. However, differences were still evident between subdominant spruce and beech trees. Findings were consistent throughout the three years of observation.

The proportion of shade foliage in shade-tolerant tree species is larger than in light-demanding pioneers so that the shade-adapted foliage of beech and spruce must be accounted for in crown transpiration. This is important for remote-sensing methods that

assess canopy transpiration on the basis of the sun-foliage temperature. Based on measurements of shade-foliage transpiration in spruce and beech of “Kranzberger Forst”, the contribution of this foliage type to crown transpiration was estimated for the trees of both species at “Sperrgraben”. In beech, this contribution was 26 to 39 %, and in spruce 34 and 49 %, these data backing model validations by the partner groups from Bayreuth and Dresden.

The diurnal time shift between the onset of xylem sap flow (at sunrise) and that of crown transpiration is of relevance for validating modelled canopy transpiration through datasets on xylem sap flow, being aware this offset to be variable as depending on tree dimension and, hence, water storage capacity. In beech and spruce of “Kranzberger Forst”, this time shift ranged between 2 - 3 hours and was present both in the sun and shade crown. In the afternoon, crown transpiration would typically cease, although xylem sap flow continued at night. The water storage capacity was estimated as the differential area between the time courses of xylem sap flow and transpiration of the sun foliage. This capacity in beech amounted, on average, to 21 % of the daily water use, whereas this capacity was 35 %, on average, in spruce.

The close correlation between the rates of photosynthetic net CO<sub>2</sub> uptake and transpiration of leaves allowed to model the carbon gain of the foliage on the basis of measured canopy transpiration (through the model PSN6) and its coupling factor *gfac* which is derived from the steady-state gas exchange of leaves). In sun leaves of beech at “Kranzberger Forst”, *gfac* (being non-dimensional) was 10,6, and it was 9,6 in shade leaves. In spruce, *gfac* was 14,0 in sun, and 19,9 in shade leaves. As an approximation, *gfac* was employed through modelling by the partner group from Dresden to the trees at the mountainous site.

During the growing season, the water balance of spruce monoculture at “Sperrgraben” displayed an interception which was 28 % of the precipitation as assessed in the open field. In mixture with beech, interception was about 21 %. Transfer of water vapour through transpiration to the atmosphere was 16 %. Of the precipitation in spruce monoculture and about 19 % in mixture with beech. The remainder in the balance (about 56 % in spruce monoculture and about 60 % in mixture with beech) was ascribed to storage in soil and biomass as well as to evaporation and down-slope run-off.

At the low-elevation reference site of “Kranzberger Forst”, the interception during the growing season was 41 %, and transpiration about 66 % of the precipitation in the open field. Here, the water balance turned out to be negative during summer. The deficit of water vanished through precipitation in winter, when transpiration and interception were low.

The elaborated datasets were used for the parameterisation and validation of the model HIGRIS ( a coupled vegetation-atmosphere model) by the partner group from Dresden, being employed to the mountainous site. The comparison of modelled transpiration data by HIGRIS and assessments based on the sap flow measurements

## Summary

---

showed high correlation during the validation period of May 20 through July 31, 2001: Differences were less than 3 % in spruce/beech mixture and less than 0,1 % in spruce monoculture, proving HIGRIS suitable for modelling the “Sperrgraben” watershed.

**Conclusion:** Measurements of sap flow in trees provide a suitable basis for hydrological modelling of watersheds. Demand for this kind of modelling exists, in particular, in view of poorly understood extrema along ecological gradients, as represented, for example, by mountainous forests and their water regimes.

## 7 Literaturverzeichnis

- ALSHEIMER M (1997) Xylemflussmessungen zur Charakterisierung raum-zeitlicher Heterogenitäten in der Transpiration montaner Fichtenbestände (*Picea abies* (L.) Karst.) Dissertation, Universität Bayreuth
- ANSLEY RJ, DUGAS WA, HEURE ML & TREVINO BA (1994) Stem flow and porometer measurements of transpiration from honey mesquite (*Prosopis grandulosa*). J. Exp. Bot. 45: 847-856
- ARENTH A, KELLIHER FM, BAUER G, HOLLINGER DY, BEYERS JN, HUNT JE, McSEVENY TM, ZIEGLER W, VYGODSAYA NN, MILUKOVA I, SOGACHOV A, VARLAGIN A, SCHULZE E-D (1996) Environmental regulation of xylem sap flow and total conductance of *Larix gmelinii* trees in eastern Siberia. Tree Physiology 16: 247-255
- AUSSENAC G, GRANIER A (1988) Effect of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. Can. J. For. Res. 18: 100-105
- BALDOCCHI D, HUTCHINSON B, MATT D AND R MCMILLEN (1986) Seasonal variation in the statistics of photosynthetically active radiation penetration in an oak-hickory forest. Agric. For. Meteorol. 36: 343-361
- BALDWIN VC JR. (1989) Is sapwood basal area a better predictor of crown biomass than outside-bark bole diameter? Biomass 20: 177-185
- BALL JT, WOODROW IE, BERRY JA (1987) A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Beggins I (eds.) Process in photosynthesis research. Vol. IV.5, Proc of the vii International Photosynthesis congress, pp 221-224
- BARTELINK HH (1997) Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L). Ann. Sci. For. 54: 39-50
- BAUMGARTNER A, LIEBSCHER HJ (1996) Lehrbuch der Hydrologie BD.1, Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. 2. Aufl., Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1996) Bayerische Waldklimastationen. Jahrbuch 1996, Freising
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1997) Bayerische Waldklimastationen. Jahrbuch 1997, Freising
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.) (1978) Regionale, natürliche Waldzusammensetzung Bayerns nach Baumarten. München
- BENECKE U, SCHULZE E-D, MATYSSEK R, HAVRANEK WM (1981) Environmental control of CO<sub>2</sub> assimilation and leaf conductance in *Larix decidua* Mill. I. A comparison of contrasting natural environments; Oecologia, 50: 54-61

- BENECKE P, VAN DE PLOEG RR (1976) Quantifizierung des zeitlichen Verhaltens der Wasserhaushaltskomponenten eines Buchen- und FichtenaltholzBestandes im Solling mit Hilfe bodenhydrologischer Methoden. Verhandlg. Ges. Ökologie, 3-16
- BERNHOFER C, GOLDBERG V & HÄNTZSCHEL J (2003) Analyse und Simulation der Rolle der atmosphärischen Rückkopplung von Landoberflächen für den Wasserhaushalt der Landschaftsebene anhand des Ammergebietes. Abschlussbericht an die DFG. Geschäftszeichen BE 1721/2-1-4
- BERNHOFER C, GRAY LW (1990) Zur Abschätzung des Spaltöffnungswiderstandes über Bowenverhältnis-Energiebilanzmethode am Beispiel zweier unterschiedlicher Pflanzenbestände. Landwirtschaftl. Jahrbuch 67: 78-88
- BURGER H (1941) Holz, Blattmenge und Zuwachs. V. Mitteilung: Fichten und Föhren verschiedener Herkunft auf verschiedenen Kulturorten. In: Burger H (Hrsg.) Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Kommissionsverlag von Beer & CIE, Zürich, Band 22, 1. Heft, pp. 10-62
- BURGER H (1950) Holz, Blattmenge und Zuwachs- Die Buche. In: Burger H (Hrsg.) Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Kommissionsverlag von Beer & CIE, Zürich; Band 26, 2. Heft, pp. 419-468
- BURGER H (1953) Holz, Blattmenge und Zuwachs. XIII. Mitteilung: Fichten im gleichaltrigen Hochwald. In: Burger H (Hrsg.) Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Kommissionsverlag von Beer & CIE, Zürich, Band 29, 2. Heft, pp. 38-130
- BEYSCHLAG W (2001) Biotic interactions. In: Huttunen S, Heikkilä H, Bucher J-B, Sundberg B, Jarvis PG, Matyssek R, (eds.) Trends in European Forest Tree Physiological Research, Kluwer, The Netherlands, pp. 197-205
- BORRIS H, LIBBERT E (1985) Pflanzenphysiologie, Wörterbuch der Biologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 589 S.
- BRAUN-BLAQUET J (1928) Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. – In: Schoenichen, W. (Hrsg.): Biologische Studienbücher 7. Springer. Berlin. 330 S.
- BROSINGER F, ROTHE A (2003) Intakter Bergwald – unverzichtbar für den Hochwasserschutz in Bayern. In: Hochwasserschutz im Wald. Berichte aus der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Nummer 40: 34-38
- BURMESTER A (1980) Holzfeuchtigkeit in Nadelhölzern. Jahreszeitliche Einflüsse auf die Eigenschaften des Splint- und Kernholzes von Nadelbäumen. HZB, Jahrg. 106 Nr. 91: 1303-1304
- CAEMMERER VON S, FARQUHAR GD (1981) Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. Planta 153: 376-387
- CAO K-F (2001) Morphology and growth of deciduous and evergreen broad-leaved saplings under different light conditions in a Chinese beech forest with dense bamboo undergrowth. Ecological Research 16: 509-517

- CERMÁK J (1998) Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forests in southern Moravia. *Tree Physiology* 18: 727-737
- CERMÁK J, NADEZHIDINA N (1998) Sapwood as the scaling parameter – defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Ann. Sci. For.* 55: 509-521
- CERMÁK J, CIENCIALA E, KUCERA J, LINDROTH A, BEDNÁŔOVÁE (1995) Individual variation in sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. *J. Hydrol.* 168: 17-27
- CERMÁK J, KUCERA J (1993) Extremely fast changes of xylem water flow rate in tall trees caused by atmospheric, soil and mechanical factors. *In Water Transport in Plants Under Climatic Stress*. Eds. M. Borghetti, J. Grace and A. Raschi. Cambridge University Press, pp. 181-190
- CERMÁK J, CIENCIALA E, KUCERA J, HÄLLGREN J-E (1992) Radial velocity profiles of water flow in trunks of Norway spruce and oak and the response of spruce to severing. *Tree Physiology* 10: 367-380
- CERMÁK J, KUCERA J (1987) Transpiration of mature stands of spruce (*Picea abies* L. KARST.) as estimated by the tree-trunk heat balance method. *In: Forest and Watershed Management (Proceedings of the Vancouver Symposium, Aug. 1987): IAHS-AISH Publ. No. 167*
- CERMÁK J, JENIK J, KUCERA J AND ZIDEK V (1984) Xylem water flow in crack willow (*Salix fragilis* L.) in relation to diurnal changes of environment. *Oecologia* 64: 145-151
- CERMÁK J, KUCERA J (1981) The compensation of natural temperature gradient at the measuring point during the sap flow rate determination in trees. *Biol. Plat.* 23, 469-471
- CIENCIALA E, LINDROTH A, CERMAK J HÄLLGREN J-E, KUCERA J (1992) Assessment of transpiration estimates of *Picea abies* trees during a growing season. *Trees* 6: 121-127
- COCHARD H, LEMOINE D, AMEGLIO T, GRANIER A (2001) Mechanisms of xylem recovery from winter embolism in *Fagus sylvatica*. *Tree Physiology* 21: 27-33
- COCHARD H & TYREE MT (1990) Xylem dysfunction in *Quercus*: vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. *Tree Physiology* 6: 393-407
- COHEN Y, FUCHS M & GREEN GC (1981) Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell & Environment* 4: 391-397
- CONERS H (2001) Wasseraufnahme und artspezifische hydraulische Eigenschaften der Feinwurzeln von Buche, Eiche und Fichte: *In situ*-Messungen an Altbäumen. Dissertation, Universität Göttingen
- DAUM CR (1967) A method for determining water transport in trees. *Ecology* 48: 425-431

- DEAN TJ, LONG JN (1986): Variation in sapwood area-leaf area relations within two stands of lodgepole pine. *Forest Sci.* 32: 749-758
- DEURTZ W (1996) Buchenwälder im Zielkatalog der Forstwirtschaft. In: Buchenwälder – ihr Schutz und ihre Nutzung. Stiftung Wald in Not, Bonn, Germany, pp. 2-8
- DYE PJ, OLBRICH BW AND POULTER AG (1991) The influence of growth rings in *Pinus patula* on heat pulse velocity and sap flow measurement. *J. Exp. Bot.* 42: 867-870
- ECKMÜLLER O, STERBA H (2000) Crown condition, needle mass, and sapwood area relationships of Norway spruce (*Picea abies*). *Can. J. For. Res.* 30 (10): 1646-1654
- ELLENBERG H (1996) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht, 5. Auflage, Ulmer, Stuttgart, 1095 S.
- ELLENBERG H, MAYER R, SCHAUERMANN J (1986) Ökosystemforschung. Ergebnisse des Sollingprojekts 1966-1986. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 507 S.
- EWERS BE, MACKAY DS, GOWER ST, AHL DE, BURROWS SN, SAMANTA SS (2001) Tree species effects on stand transpiration in northern Wisconsin. *Water Resources Research* 38: art. no. 1103
- EWERS BE, OREN R (2000) Analyses of assumptions and errors in the calculation of stomatal conductance from sap flux measurements. *Tree Physiology* 20: 579-589
- FABIAN P, WINTERHALTER M, RAPPENGLÜCK B, REITMAYER H, STOHL A, KOEPKE P, SCHLAGER H, BERRESHEIM H, FOKEN T, WICHURA B, HÄBERLE K-H, MATYSSEK R, KARTSCHALL T (2001) The BAYSOFI campaign - Measurements carried out during the total solar eclipse of August 11, 1999. *Meteorologische Zeitschrift* 10: 165-170
- FALGE E, TENHUNEN J (1998) Klimaänderungseffekte auf Kronendachtranspiration, -leitfähigkeit und CO<sub>2</sub>-Gewinn von Ökosystemen in Bayern. Bayerisches Klimaforschungsprogramm (BayFORKLIM), Forschungsbericht
- FALGE EM (1997) Berechnung der Kronendachtranspiration von Fichtenbeständen (*Picea abies* (L.) Karst.) mit unterschiedlichen Modellierungsansätzen. Dissertation, Universität Bayreuth
- FALGE E, GRABER W, SIEGWOLF R, TENHUNEN JD (1996) A model of the gas exchange response of *Picea abies* to habitat conditions. *Trees* 10: 277-287
- FETZER KD ET AL. (1986) Erläuterungen zur Standortkundlichen Bodenkarte von Bayern, München-Augsburg und Umgebung. Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 396 S.
- FICHTNER K, SCHULZE E-D (1990) Xylem water flow in tropical vines as measured by steady state heating method. *Oecologia* 82: 355-361

- FINNIGAN JJ, RAUPACH MR (1987) Transfer processes in plant canopies in relation to stomatal characteristics. In: ZEIGER E, FARQUHAR GD, COWAN IR (eds.) Stomatal Function, Stanford Press, pp. 385-429
- FISCHER D (1993) Bestimmung der Bestandestranspiration und der Kronendachleitfähigkeit durch Xylemflussmessungen in einem Hochlagenwald (*Picea abies* (L.) KARST.) des Fichtelgebirges. Diplomarbeit, Universität Bayreuth. 99 S.
- FRITSCH J & MAYER H (1998) Verdunstung aus der Energiebilanz. In: Ökosystemforschung im Schwarzwald. Auswirkungen von atmosphärischen Einträgen und Restabilisierungsmaßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Fichtenwäldern. Verbundprojekt ARINUS. Raspe S, Feger KH & Zöttl HW (Hrsg.), ecomed, Landsberg, S. 90-103
- GARTNER BL (1995) Patterns of xylem variation within a tree and their hydraulic and mechanical consequences. In: Plant Stems: Physiology and Functional Morphology. B.L. Gartner (Hrsg.), Academic Press, San Diego, S. 125-149
- GILMORE DW, SEYMOUR RS, MAGUIRE DA (1996) Foliage-sapwood area relationships for *Abies balsams* in central Maine, USA. Can. J. For. Res. 26 (12): 2071-2079.
- GLAVAC V, KOENIES H, EBBEN U (1990) Auswirkungen sommerlicher Trockenheit auf die Splintholz-Wassergehalte im Stammkörper der Buche (*Fagus sylvatica* L.). Holz Roh Werk., 48: 437-441
- GOLDBERG V, HÄNTZSCHEL J (2002) Application of a radiation model for small-scale complex terrain in a GIS environment. In: Meteorol. Zeitschrift (N.F.) 11 (2002) 2, S. 119-128
- GOULDEN ML, FIELD CB (1994) Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies: ventilated-chamber, sap-flow and Penman-Monteith measurement on evergreen oaks. Functional Ecology 8: 125-135
- GRANIER A, AUBINET M, EPRON D, FALGE E, GUDMUNDSSON J, JENSEN NO, KÖSTNER B, MATTEUCCI G, PILEGAARD K, SCHMIDT M, TENHUNEN J (2003) Deciduous forests: Carbon and water fluxes, balances and ecophysiological determinants. In: Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests. R Valentini (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 53-70
- GRANIER A, BIRON P, LEMOINE D (2000) Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. Agricultural and Forest Meteorology 100: 291-308
- GRANIER A & BRÉDA N (1996) Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. Ann. Sci. For. 53:115-122
- GRANIER A, BIRON P, BRÉDA N, PONTAILLER JY (1996) Transpiration of trees and forest stands: Short and longterm monitoring using sapflow methods. Global Change Biology: 2 (3): 265-274

- GRANIER A, BIRON P, KÖSTNER B, GAY LW, NAJJAR G (1996b) Comparisons of xylem sap flow and water vapour flux at the stand level and derivation of canopy conductance for Scots pine. *Theoret. Appl. Climatol.* 53, 155-122
- GRANIER A, CLAUSTRES JP (1989) Relations hydriques dans un épicéa (*Picea abies* L.) en conditions naturelles: Variations spatiales. *Acta. Oecol.* 10: 295-310
- GRANIER A (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3, 309-320
- GRATANI L, FRIDA C, FIORENTINO E (1987) Ecophysiological features in leaves of a beech ecosystem during the growing period. *Bull Soc. R Bot. Belg.* 120: 81-88
- GRILL D, HAVRANEK WM, HUTTUNEN S, GUTTENBERG H (1999) Tree growth at high altitude and high latitude. *Phyton* 39 (special edition), pp. 285
- GROTE R (2002) Von der Baumdimension zur Biomasse und wieder zurück – Ein neuer Ansatz zur dynamischen Modellierung von Baum- und Bestandesbiomassen, In *Forstliche Forschungsberichte München: Inventur von Biomasse- und Nährstoffvorräten in Waldbeständen*, Nr. 186
- GÜLPEN M (1996) Xylemfluß, Elementtransport und Bindung von Calcium und Magnesium in Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) von ARINUS-Versuchsflächen im Schwarzwald. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*. Herausgegeben vom Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Heft 36
- HÄBERLE K-H, REITER I, PATZNER K, HEYNE C, MATYSSEK R (2001) Switching the light off: A break in photosynthesis and sap flow of forest trees under total solar eclipse. *Meteorologische Zeitschrift* 10: 201-206
- HAMMEL K, KENNEL M (2001) Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK). *Forstliche Forschungsberichte München*. Heft 185
- HARLEY PC, TENHUNEN JD (1991) Modelling the photosynthetic response of C3 leaves to environmental factors. In: BOOTE KJ, LOOMIS RS (eds.) *Modelling crop photosynthesis - from biochemistry to canopy*. ASA Madison WI, pp. 17-39
- HÄSLER R (1982) Net photosynthesis and transpiration of *Pinus montana* on east and north facing slopes at alpine timberline. *Oecologia* 54: 14-22
- HATTON TJ, MOORE SJ & REECE PH (1995) Estimating stand transpiration in an *Eucalyptus populnea* woodland with the heat pulse method: measurement errors and sampling strategies. *Tree Physiology* 15: 219-227
- HEIMANN J (1995) Xylemsaftfluss 40-jähriger Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) im Wassereinzugsgebiet der Langen Bramke, Harz. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 129*
- HEIMANN J (1989) Anwendung der thermoelektrischen Methode an Buchen (*Fagus sylvatica* L. ) zur Untersuchung der Abhängigkeit des Xylemflusses von klimatischen Bedingungen. *Diplomarbeit, Systematisch-Geobotanisches Institut der Universität Göttingen*.

- HENNING D & LIEBSCHER HJ (1979) Verdunstung. – In: Keller R (eds.): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland: 75-90; Boppard (Boldt.)
- HERZOG KM, THUM R, KRONFUSS G, HELDSTAB H-J, HÄSLER R (1998) Patterns and mechanisms of transpiration in a large subalpine spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) Ecological Research 13: 105-116
- HERZOG KM, HÄSLER R, THUM R (1995) Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. Trees 10: 94-101
- HOLLINGER DY, KELLIHER FM, SCHULZE E-D, KÖSTNER BMM (1994) Coupling tree transpiration to atmospheric turbulence. Nature 371: 60-62
- HUNGERFORD RD (1987) Estimation of foliage area in dense Montana lodgepole pine stands. Can. J. For. Res. 17: 320-324
- HUWE B, ENGELHARDT S (2003) Modellierung der Wasser-, Wärme- und Stickstoffdynamik von Böden in Landschaften: Analyse zu Komplexität, Dimensionalität und Parameterqualität. Abschlussbericht an die DFG. Geschäftszeichen HU 636/6-3
- JAMES SA, MEINZER FC, GOLDSTEIN G, WOODRUFF D, JONES T, RESTOM T, MEJIA M, CLEARWATER M, CAMPANELLO P (2003) Axial and radial water transport and internal water storage in tropical forest canopy trees. Oecologia 134: 37-45
- JAMES SA, CLEARWATER MJ, MEINZER FC & GOLDSTEIN G (2002) Heat dissipation sensors of variable length for measurement of sap flow in trees with deep sapwood. Tree Physiology 22: 277-283
- JARVIS PG, LEVERENZ JW (1983) Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In: Physiological Plant Ecology. IV. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series, Vol. 2D (OL Lange, PS Nobel, CB Osmond, H Ziegler, eds.) Springer-Verlag, New York, NY, USA. 233-280
- JARVIS PG, STEWART J (1979) Evaporation of water from plantation forest. In: Ford ED, Malcolm DC, Atterson J (eds.) The ecology of even-aged plantations. Proc. Int. Union For. Res. Org., Edinburgh, pp. 327-349
- JARVIS PG, JAMES GB, LANDSBERG JJ (1976) Coniferous Forest. In: MONTEITH JL (eds.) Vegetation and the atmosphere Vol. 2, Academic Press, New York, pp. 171-240
- JERZ H (1993b) Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000. Blatt Nr. 8132 Weilheim. Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 158 S.
- JERZ H (1993a) Geologie von Bayern Band II. Die Eiszeitalter in Bayern. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 243 S.
- JIMÉNEZ MS, NADEZHDINA N, CERMÁK J, MORALES D (2000) Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary Islands. Tree Physiology 20: 1149-1156

- KAUFMANN MR & KELLIHER FM (1991) Measuring transpiration rates. In: Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology. Lassoie JP & Hinckley TM (Hrsg.) CRC Press, Boca Raton, pp. 117-140
- KELLIHER FM, KÖSTNER BMM, HOLLINGER DY, BYERS JN, HUNT JE, McSEVENY TM, MESERT R, WEIR PL, SCHULZE E-D (1992) Evaporation, xylem sap flow, and tree transpiration in a New Zealand broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 62: 53-73
- KELLOMÄKI S, HARI P, KANNINEN M, ILONEN P (1980) Eco-physiological studies on young Scots pine stands. II Distribution of needle biomass and its application in approximating light conditions inside the canopy. *Silva Fenn.* 14: 243-257
- KELLOMÄKI S, OKER-BLOM P (1981) Specific needle area of Scots pine and its dependence on light conditions inside the canopy. *Silva Fenn.* 15: 190-198
- KLIMAATLAS VON BAYERN (1996) Herausgegeben von BayFORKLIM, München
- KOCH W, MAIER-MAERCKER U (1992) Die Bedeutung des Wasserhaushaltes für die Beurteilung von Waldschäden. *Allg. Forst.* 57: 394-400
- KÖPPEL J (1995) Der Beitrag der Vegetation zum Wasserhaushalt. Nationalpark Berchtesgaden, Forschungsbericht 29
- KÖRNER C (1998) A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115: 445-459
- KÖSTNER B (2001) Evaporation and transpiration from forests in Central Europe relevance of patch-level studies for spatial scaling. *Meteorology and Atmospheric Physics* 76: 69-82
- KÖSTNER B (1999) Die Transpiration von Wäldern - Quantifizierung als Xylemsaftfluss und Faktorenabhängigkeit von Teilflüssen. Habilitationsschrift, Universität Bayreuth
- KÖSTNER B, GRANIER A, CERMAK J (1998a) Sapflow measurements in forest stands - methods and uncertainties. *Ann. Sci. For.* 55: 13-27
- KÖSTNER B, FALGE EM, ALSHEIMER M, GEYER R, TENHUNEN JD (1998b) Estimating tree canopy water use via xylem sapflow in an old Norway spruce forest and a comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. *Ann. Sci. For.* 55: 125-139
- KÖSTNER B, SCHUPP R, SCHULZE E-D, RENNENBERG H (1998c) Organic and inorganic sulfur transport in the xylem sap and the sulfur budget of *Picea abies* trees. *Tree Physiology* 18: 1-9
- KÖSTNER B, ALSHEIMER M, TENHUNEN JD (1996) Tree canopy transpiration at different sites of spruce forest ecosystem. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie.* Band 26: 61-68

- KÖSTNER BMM, SCHULZE E-D, KELLIHER FM, HOLLINGER DY, BYERS JN, HUNT JE, McSEVENY TM, MESERTH R, WEIR PL (1992) Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: an analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements. *Oecologia* 91: 350-359
- KOSUGI Y, SHIBATA S, KOBASHI S (2003) Parameterisation of the CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O gas exchange of several temperate deciduous broad-leaved trees at the leaf scale considering seasonal changes. *Plant, Cell & Environment* 26: 285-301
- KRAMER P, KOZLOWSKI TT (1979) *Physiology of Woody Plants*. Academic Press, New York, San Francisco, London. 811 S.
- KRÄUCHI N, BRANG P, SCHÖNENBERGER W (2000) Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology & Management* 132: 73-82
- KÜPPERS M, HEILAND I, SCHNEIDER H, NEUGEBAUER PJ (1999) Lightflecks cause non-uniform stomatal opening – studies with special emphasis on *Fagus sylvatica* L. *Trees* 14: 130-144
- KURZ F (2003) Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten, Dissertation, Technische Universität München
- LADEFOGED K (1963) Transpiration of forest trees in closed stands. *Physiol. Plant.* 16:378-414
- LANG S (1999) Ökophysiologische und anatomische Untersuchungen zum Safffluss in verschiedenen Splintholzbereichen von *Fagus sylvatica* L. Dissertation, Universität Karlsruhe
- LANGSHAUSEN J, KOLB E, EWALD J, REHFUESS KE (2001) The suitability of soils derived from Flysch sediments of the Bavarian Pre-Alps for European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forstw. Cbl.* 120: 363-374
- LARCHER W (2001) *Ökophysiologie der Pflanzen*. Ulmer-Verlag Stuttgart, pp. 408
- LAUTERBACH G (2000) Wasser- und Stoffhaushalt dreier Waldökosysteme des Osterzgebirges. Dissertation, Universität Göttingen
- LEVERENZ J, DEANS JD, FORD ED, JARVIS PG, MILNE R, WHITEHEAD D (1982) Systematic spatial variation of stomatal conductance in a sitka plantation. *J. Appl. Ecol.* 19, 835-851
- LIETH H (1976) The use of correlation models to predict primary productivity from precipitation or evapotranspiration. In: Lange OL, Kappen L, Schulze E-D (eds.) *Water and Plant Life*. *Ecol. Stud.* 19, Springer, Berlin, 392-407
- LOHMANN J (1992) Die Xylemquerschnitte von Fichten (*Picea abies* [L.] KARST.) unterschiedlicher Vitalitätsgrade und Altersklassen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme*, Göttingen. Reihe A, Band 88 123 S.
- LOUSTAU D, DOMECH JC, BOSCH A (1998) An analysis of the spatial variability of sap flow density in maritime pine. *Ann. Sci. For.* 55: 29-46

- LOUSTAU D, BERBIGIER P, ROUMAGNAC P, ARRUDA-PACHECO C, DAVID JS, FERREIRA MI, PEREIRA JS, TAVARES R (1996) Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. 1. Seasonal courses of water flux through maritime pine. *Oecologia* 107: 33-42
- LOUSTAU D, GRANIER A (1993) Environmental control of water flux through Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). In Water transport in plants under climatic stress. Borghetti, M., J. Grace & A. Raschi (Hrsg.) Proc. Int. Workshop, Vallombrosa, Firenze, Italy, 29. - 31.05.1990, Cambridge University Press, pp. 205-218
- LU P, MÜLLER WJ AND CHACKO EK (2000) Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology* 20, 683-692
- LUDWIG R (2000) Die flächenverteilte Modellierung von Wasserhaushalt und Abflussbildung im Einzugsgebiet der Ammer. In: Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band 32, 173 S., München.
- MACKEY DS, AHL DE, EWERS BE, SAMANTA S, GOWER ST (2003) Physiological tradeoffs in the parameterization of a model of canopy transpiration. *Advances in Water Resources* 26: 179-194
- MAGNANI F, LEONARDI S, TOGNETTI R, GRACE J, BORGHETTI, M (1998) Modelling the surface conductance of a broad-leaf canopy: effects of partial decoupling from the atmosphere. *Plant, Cell & Environment* 21: 867-879
- MÄKELÄ A, VANNINEN P (2001) Vertical structure of Scots pine crowns in different age and size classes. *Trees* 15: 385-392
- MATYSSEK R, WIESER G, NUNN AJ, KOZOVITS AR, REITER IM, HEERDT C, WINKLER JB, BAUMGARTEN M, HÄBERLE K-H, GRAMS TEE, WERNER H, FABIAN P, HAVRANEK WM (2002) Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees of different species, age and site conditions. Background paper at UNECE Workshop "Establishing Ozone Critical Levels II", Proceedings University of Göteborg and IVL, Göteborg November 19-22, 2002, pp. 16
- MATYSSEK R, CERMAK J, KUCERA J (1991) Ursacheingrenzung eines lokalen Buchensterbens mit einer Meßmethode der Kronentranspiration. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 142: 809-828
- MATYSSEK R (1986) Carbon, water and nitrogen relations in evergreen and deciduous conifers. *Tree Physiology*, 2: 177-187
- MATYSSEK R (1985) Der Kohlenstoff-, Wasser- und Nährstoffhaushalt der wechselgrünen und immergrünen Koniferen Lärche, Fichte, Kiefer. Dissertation, Universität Bayreuth
- MAURER S & MATYSSEK R (1997) Nutrition and the ozone sensitivity of birch (*Betula pendula*), II. Carbon balance, water-use efficiency and nutritional status of the whole plant. *Trees* 12: 11-20
- MEGRAW RA (1985) Wood Quality Factors in Loblolly Pine. Tappi. Press, Atlanta, GA

- MEINZER FC, GRANTZ DA (1991) Coordination of stomatal, hydraulic, and canopy boundary layer properties: Do stomata balance conductance by measuring transpiration? *Physiol. Plant.* 83: 324-329
- MENCUCCINI M, LORENZO B (2001) Leaf/sapwood area ratios in Scots pine show acclimation across Europe. *Can. J. For. Res.* 31: 442-456
- MILLER DR, VAVRINA CA AND CHRISTENSEN TW (1980) Measurement of sap flow and transpiration in ring-porous oaks using a heat pulse velocity technique. *Forest Science* 26: 485-494
- MONSERUD RA, MARSHALL JD (1999): Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Can. J. For. Res.* 29 (5): 521-535
- NADEZHINA N, CERMÁK J AND CEULEMANS R (2002) Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree Physiology* 22: 907-918
- NIINEMETS Ü, KULL O (1995) Effects of light availability and tree size on the architecture of assimilative surface in the canopy of *Picea abies*: variation in shoot structure. *Tree Physiology* 15: 791-798
- OREN R, PHILLIPS N, EWERS BE, PATAKI DE AND MEGONIGAL JP (1999) Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in flooded *Taxodium distichum* forest. *Tree Physiology* 19: 337-347
- OREN R, PHILLIPS N, KATUL G, EWERS BE AND PATAKI DE (1998) Scaling xylem sap flux and soil water balance and calculating variance: a method for partitioning water flux in forests. *Ann. Sci. For.* 55: 191-216
- OREN R, SCHULZE E-D, MATYSSEK R, ZIMMERMANN R (1986) Estimating photosynthetic rate and annual carbon gain in conifers from specific leaf weight and leaf biomass. *Oecologia* (Berlin), 70: 187-193
- OSTENDORF B, MANDERSCHIED B (1997) Seasonal modelling of catchment water balance: a two-level cascading modification of TOPMODEL to increase the realism of spatio-temporal processes. *Hydrol. Proc.* 11: 1231-1242
- PAUSCH RC, GROTE EE, DAWSON TE (2000) Estimating water use by sugar maple trees: considerations when using heat-pulse methods in trees with deep functional sapwood. *Tree Physiology* 20: 217-227
- PECK A, MEYER H (1996) Einfluss von Bestandestranspiration auf die Verdunstung von Wäldern. *Forstw. Cbl.* 115: 1-9
- PELLINEN P (1986) Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Dissertation, Universität Göttingen, Germany 134 pp.
- PHILLIPS N, OREN R AND ZIMMERMANN R (1996) Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species. *Plant, Cell & Environment* 19: 983-990
- PINOL J, LLEDÓ MJ, ESCARRÉ A (1991) Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades, NE Spain). *Hydrol. Sci. J.* 36: 95-107

- POORTER L & WERGER MJA (1999) Light environment, sapling architecture and leaf display in six rain forest tree species. *American Journal of Botany* 86: 1464-1473
- PRETZSCH H, KAHN M, GROTE R (1998) Die Fichten-Buchen-Mischbestände des Sonderforschungsbereiches "Wachstum oder Parasitenabwehr?" im Kranzberger Forst. *Forstw. Cbl.* 117: 241-257
- PRETZSCH H (2003) Diversität und Produktivität von Wäldern. *Allg. Forst- und Jagdztg.* 174: 88-98
- REICHELT G & WILMANN S O (1973): *Vegetationsgeographie.* – Westermann. Braunschweig. 210 S.
- RIEKEL T (1983) Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Flussgebiet der Ammer. Dissertation, Lehrstuhl für Hydrogeologie und Hydrochemie der TU München, München.
- ROBERTS J, ROSIER PTW (1994) Comparative estimates of transpiration of ash and beech forest at a chalk site in Southern Britain. *J. Hydr.* 162: 229-245
- ROBICHAUD E, METHVEN IR (1992): The applicability of the pipe model-theory for the prediction of foliage biomass in trees from natural, untreated black spruce stands. *Can. J. For. Res.* 22 (8): 1118-1123
- RODENKIRCHEN H, GÖTTLEIN A (1998): Kurzstellungnahme zu den standörtlichen Verhältnissen der Versuchsfläche im Kranzberger Forst, 2 S., unveröffentlicht.
- SAUGIER B, GRANIER A, PONTAILLER JY, DUFÊNE E, BALDOCCHI DD (1997) Transpiration of boreal pine forest measured by branch bags, sapflow and micrometeorological methods. *Tree Physiology* 17: 511-519
- SCHAD P & HIRSCH C (1998) Wirkung von Ozon auf Wüchsigkeit und Schädlingsdisposition von Buche und Fichte in Mischbeständen. Interdisziplinäre Freilandstudie im Kranzberger Forst. Boden- und standortkundliche Voruntersuchungen von 1997, 10 S., unveröffentlicher Arbeitsbericht.
- SCHMIDT-VOGT H (1986) *Die Fichte*, Bd. II/1. Hamburg, Berlin: Parey
- SCHMIDT-VOGT H (1977) *Die Fichte*, Bd. I. Hamburg, Berlin: Parey
- SCHNOCK G (1971) Le bilan de l'eau dans l'écosystème d'une forêt – Application à une chênaie melangée de haute Belgique. Cof. UNESCO, Paris, 1969, Productivité des écosystèmes forestiers. Actes Colloq., Brüssel, S 41-47
- SCHUBERT H (1999) Qualitative und quantitative Untersuchung verschiedener Methoden der Xylemflussmessung an Bäumen, Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München
- SCHULTE M, OFFER C, HANSEN U (2003) Induction of CO<sub>2</sub> gas exchange and electron transport: comparison of dynamic and steady-state responses in *Fagus sylvatica* leaves. *Trees* 17: 153-163

- SCHULZE E-D (1994) The regulation of plant transpiration: interactions of feedforward, feedback, and futile cycles. In: SCHULZE E-D (ed.) Flux control in biological systems. Academic Press, New York, pp. 203-235
- SCHULZE E-D, CERMAK J, MATYSSEK R, PENKA M, ZIMMERMANN R, VASICEK F, GRIES W, KUCERA J (1985): 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: 475-483
- SCHULZE E-D, HALL AE (1982) Stomatal responses, water loss, and nutrient relations in contrasting environments. In Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H (eds.) *Encyclopedia of plant ecology 12B, Physiological plant ecology II*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 182-230
- SCHUME H, JOST G, KATZENSTEINER K (2003) Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) - European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand. *Geoderma* 112: BP 273-287
- SELLIN A (1993): Resistance to water flow in xylem of *Picea abies* (L.) Karst. trees grown under contrasting light conditions. *Trees* 7: 220-226
- SETH MK (1981) Variation in tracheid length in blue pine (*Pinus wallichiana* A. B. Jackson). *Wood Science & Technology* 15: 275-286
- SHINOZAKI K, YODA K, HOZUMI K, KIRA T (1964) A quantitative analysis of plant form. The pipe model theory II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Jpn. Ecol.* 14: 133-139
- STEGEMANN J, TIMM H-C, KÜPPERS M (1999) Simulation of photosynthetic plasticity in response to highly fluctuating light: an empirical model integrating dynamic photosynthetic induction capacity. *Trees* 14: 145-160
- STEINBACH'S NATURFÜHRER (1984) Die farbigen Naturführer, Alpenblumen. Mosaik Verlag, München, S. 287
- STEPPE K, LEMEUR R, SAMSON, R (2002) Sap flow dynamics of a beech tree during the solar eclipse of 11 August 1999. *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY* 112: 139-149
- STITT M, SCHULZE E-D (1994) Plant growth, storage and resource allocation: From flux control in metabolic chain to the whole-plant level. In: Schulze E-D (ed.) *Flux control in biological systems: from enzymes to populations and ecosystems*. Academic Press, San Diego, New York. pp.57-118
- STÖHR A, LÖSCH R (2004) Xylem sap flow and drought stress of *Fraxinus excelsior* saplings. *Tree Physiology* 24: 169-180
- STOLZ R (1998) Die Verwendung der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten. In: *Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band 26, 177 S., München*.
- STROBEL J (1997) Wasserhaushalt eines Buchenwaldes im mitteldeutschen Trockengebiet. Diplomarbeit, Universität Göttingen

- STYLES JM, RAUPACH MR, FARQUHAR GD, KOLLE O, LAWTON KA, BRAND WA, WERNER RA, JORDAN A, SCHULZE E-D, SHIBISTOVA O, LLOYD J (2002) Soil and canopy CO<sub>2</sub>, (CO<sub>2</sub>)-<sup>13</sup>C, H<sub>2</sub>O and sensible heat flux partitions in a forest canopy inferred from concentration measurements. *Tellus Series B – Chemical & Physical Meteorology* 54: 655-676
- SWANK WT, CROSSLEY DA (1988) (eds.) *Forest hydrology and ecology at Coweeta*. *Ecol Stud* 66, Springer Berlin, New York
- TENHUNEN JD, FALGE E, RYEL R, MANDERSCHIED B, PETERS K, OSTENDORF B, JOSS U AND LISCHIED G (2001a) A flux model hierarchy for spruce ecosystems. In *Ecosystem Approaches to Landscape Management in Central Europe*. Eds. J.D. Tenhunen, R. Lenz and R. Hantschel. *Ecol. Studies* 147, Springer-Verlag Berlin, pp 417-462
- TENHUNEN JD, VALENTINI R, KÖSTNER B, ZIMMERMANN R, GRANIER A (1998) Variation in forest gas exchange at landscape to continental scales. *Ann. Sci. For.* 55: 1-12
- TENHUNEN JD, ALSHEIMER M, FALGE E, GRABER W, HEINDL B, JOSS U, KÖSTNER B, LISCHIED G, MANDERSCHIED B, OSTENDORF B, PETERS K, REYEL R, SCHARFENBERG HJ, WEDLER M (1997) Water fluxes in a spruce forest ecosystem: A framework for process study integration. In: Hantschel RE, Beese F, Lenz R (eds.): *Processes in Managed Ecosystems: Spatial and Temporal Variability*, Springer Verlag, Ecological Studies Series, Heidelberg, in press
- THIÉBAUT B (1988) Tree growth, morphology and architecture, the case of beech: *Fagus sylvatica* L. In: *Scientific Basis of Forest Decline Symptomatology* (eds. JM Cape & P Mathy) pp.49-72. IUFRO symposium, Brüssel
- TIMM H-C, STEGEMANN J, KÜPPERS M (2002) Photosynthetic induction strongly affects the light compensation point of net photosynthesis and coincidentally the apparent quantum yield. *Trees* 16: 47-62
- TOGNETTI R, RASCHI A, BÉRES C, FENYVESI A & RIDDER H-W (1996) Comparison of sap flow, cavitation and water status of *Quercus petraea* and *Quercus cerris* trees with special reference to computer tomography. *Plant, Cell & Environment* 19: 928-938
- TRANQUILLINI W (1979) *Physiological ecology of the alpine timberline*. *Ecological Studies* 31, Springer Verlag, Berlin, pp. 137
- TYREE MT, ZIMMERMANN MH (2002) *Xylem structure and the ascent of sap*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Stuttgart, pp. 283
- VON WILLERT DJ, MATYSSEK R & HERPPICH W (1995) *Experimentelle Pflanzenökologie – Grundlagen und Anwendungen*. G. Thieme Verlag, 344 S.

- VON WILPERT K (1990) Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. Ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstressdisposition. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen. Herausgegeben vom Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Heft 24
- WALTER H & BRECKLE SW (1994) Ökologie der Erde, Band 3, Spezielle Ökologie der Gemäßigten und Arktischen Zonen Euro-Nordasiens, 2. Auflage, Gustav Fischer, 726 S.
- WEDLER M, HEINDL B, HAHN SC, KÖSTNER B, BERNHOFER C, TENHUNEN JD (1996) Model-based estimates of water loss from patches of the understory mosaic of the Hartheim Scots pine plantation. *Theoretical and Applied Climatology* 53: 135-144
- WHITEHEAD D (1998) Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies. *Tree Physiology* 18: 633-644
- WHITEHEAD D, EDWARDS WRN, JARVIS PG (1984) Conducting sapwood area and permeability in mature *Picea sitchensis* and *Pinus contorta* trees. *Can. J. For. Res.* 14: 990-947
- WIESER G, MATYSSEK R, KÖSTNER B, OBERHUBER W (2003) Quantifying ozone uptake at the canopy level of spruce, pine and larch trees at the alpine timberline: an approach based on sap flow measurement. *Environmental Pollution* (in press)
- WILMANN S O (1993) Ökologische Pflanzensoziologie, 5. Auflage, Quelle & Meyer, Heidelberg, Wiesbaden, 479 S.
- WULLSCHLEGER SD, HANSON PJ, TODD DE (2001) Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecology and Management* 143: 205-213
- WULLSCHLEGER SD, KING AW (2000) Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees. *Tree Physiology* 20, 511-518
- WULLSCHLEGER SD, MEINZER FC, VERTESSY RA (1998) A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology* 18: 499-512
- ZANG D, BEADLE CL AND WHITE DA (1996) Variation of sapflow velocity in *Eucalyptus globules* with position in sapwood and use of correction coefficient. *Tree Physiology* 16: 697-703
- ZIERL B (2001) A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. *Journal of Hydrology* 242: 115-136
- ZIMMERMANN MH (1983) Xylem Structure and the Ascent of Sap. Springer-Verlag, Berlin, 142 S.
- ZIRLEWAGEN D, von WILPERT K (2001) Modeling water and ion fluxes in a highly structured, mixed-species stand. *Forest Ecology & Management* 143: 27-37



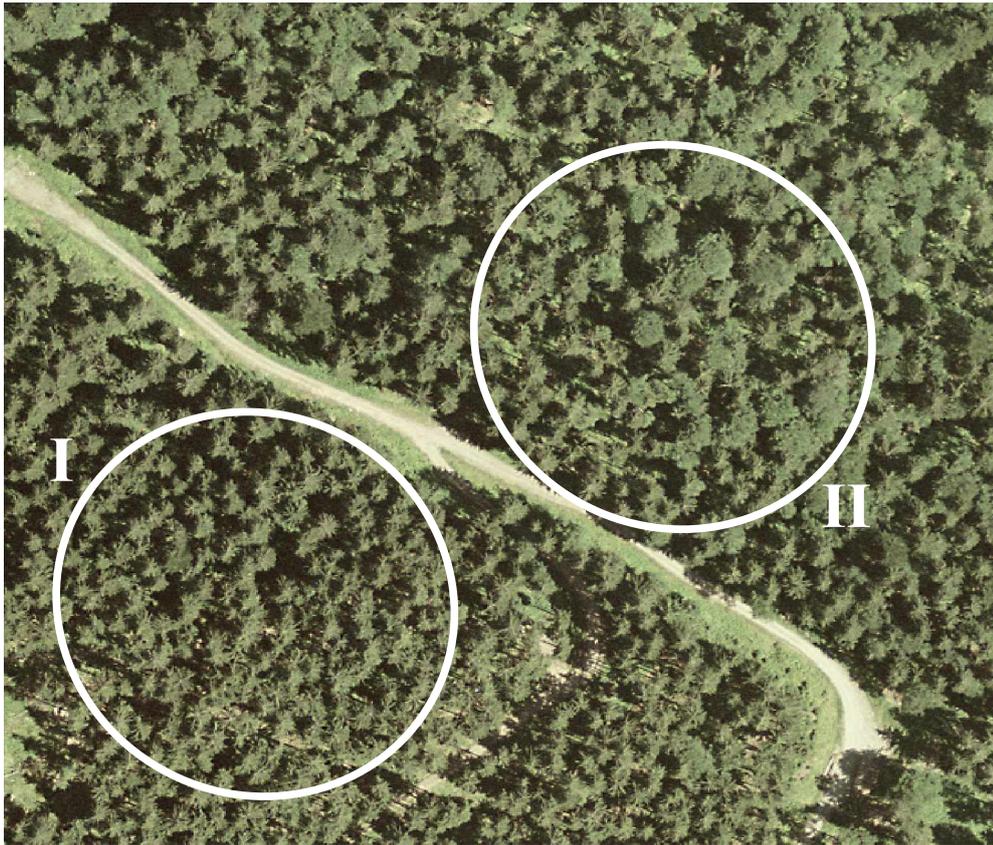


Abb. A2: Digitales Orthophoto der Versuchsfelder I (Fichten-Reinbestand) und II (Buchen-Fichten-Mischbestand) am Sperrgraben vom 09.07.2002 (Quelle: Bayerisches Landesvermessungsamt München, Kachelname: 4473695\_5363838, Bodenauflösung: 0,4 m).



Abb. A3: Blick in den Buchen-Fichten-Mischbestand am Sperrgraben.



Abb. A4: Stammablauf auf der Buchen-Fichten-Mischbestandesfläche am Sperrgraben.

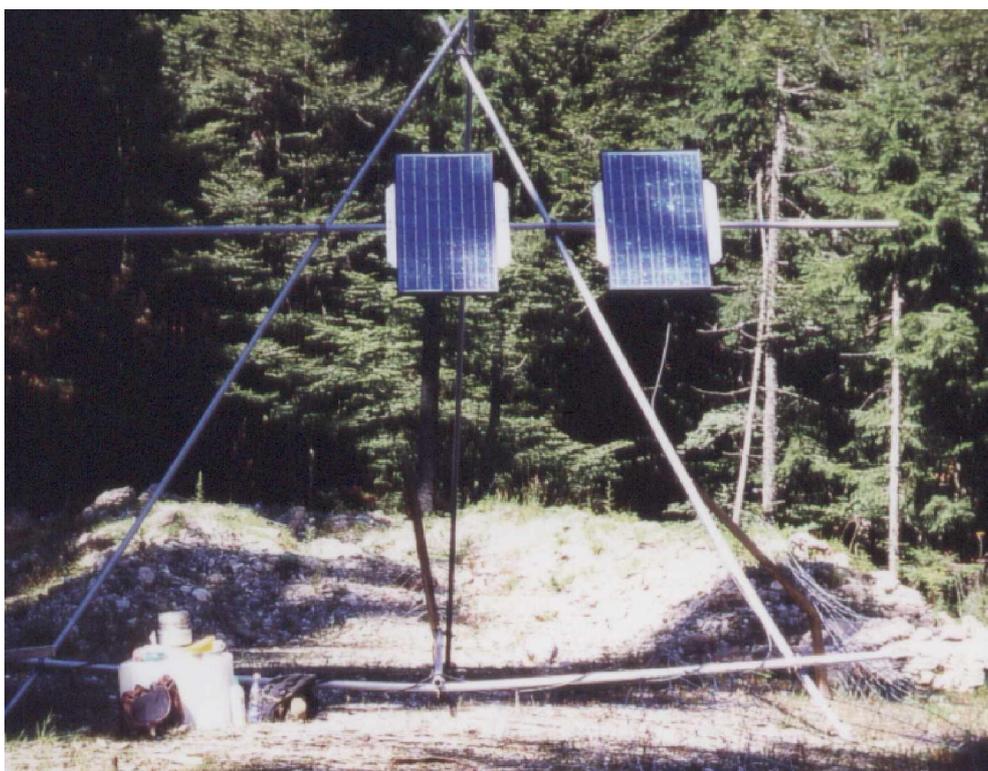


Abb. A5: Solarpanel zur Stromversorgung des Fichten-Reinbestandes am Sperrgraben.

Abb. A6: Blick in den Fichten-Reinbestand am Sperrgraben nach dem Schneebruch im Frühjahr 2000.



Abb. A7: Steuerelektronik des Buchen-Fichten-MischBestandes am Sperrgraben. Blick auf den Logger, die Konstantstromversorgungen und den Tiefentladungsschutz.





Abb. A8: Digitales Orthophoto vom 14.07.2003 der Versuchsfäche des SFB 607 im Kranzberger Forst. Sichtbar sind der Messkran und die Messtürme (Quelle: Bayerisches Landesvermessungsamt München, Kachelname: 4419853\_5276048, Bodenauflösung: 0,4 m).



Abb. A9: Blick vom Messkran auf die zentralen Messtürme der Versuchsfäche des SFB 607 im Kranzberger Forst (Foto: Markus Löw, Datum: 22.10.2003).

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Rainer Matyssek für die Überlassung des Themas, die stets großzügige Unterstützung, Diskussionsbereitschaft und wissenschaftliche Anleitung.

Meinem Betreuer Herrn Dr. Karl-Heinz Häberle sei gedankt für seine freundliche und fachliche Unterstützung sowie die Bereitschaft, mich gelegentlich bei meinen Geländetätigkeiten zu begleiten.

Prof. Dr. Bernd Huwe danke ich für das Gutachten für mein Stipendium.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Thomas Feuerbach und Peter Kuba bedanken. Sie waren oft gefragte, unermüdliche Helfer bei technischen und handwerklichen Problemen.

Ilse Süß schulde ich Dank für die vielen Stunden, die für die Herstellung der Granier-Fühler benötigt wurden.

Hendrik Schubert und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Pflanzenökologie der Universität Bayreuth danke ich für die ersten Installationen auf den Versuchsflächen, Dr. Thorsten Grams für die tatkräftige Hilfe bei den ersten Bohrkernentnahmen am Sperrgraben. Des weiteren möchte ich allen meinen Helfern danken, die mich bei den Messaktionen und der Baumernte unterstützten.

Den Mitstreitern des „Ammerprojektes“ danke ich für die angenehme Zusammenarbeit im Gelände, die netten gemeinsamen Abende in unserer Forsthütte und bei Projekttagungen. Vor allem Janet Häntzschel sei für die Bereitstellung der Klima- und Modellierungsdaten für den Sperrgraben gedankt. Dank auch an Petra Tres, Stefan Engelhardt, Jan Peter Schäfermeyer, Dr. Natascha Oppelt und Wolfgang Faltin für die zur Verfügung gestellten Daten und Informationen. Dr. Rüdiger Grote danke ich für die „Baumerntedaten“ im Kranzberger Forst. Ein Dankeschön auch dem Lehrstuhl für Ökoklimatologie für die Klimadaten und der LWF für die technische Anleitung beim Bau von Stammabläufen und Abflussrinnen sowie für die Erlaubnis, ihre Freilandfläche im Kranzberger Forst zum Aufbau einer Niederschlagsrinne nutzen zu dürfen. Den Mitarbeitern der Forstämter Oberammergau und Freising danke ich für die Fahrgenehmigungen und Hilfen.

Allen Mitarbeitern und Mitdoktoranden des Instituts danke ich für die Unterstützung, Hilfe bei Computerfragen, das nette Arbeitsklima und die angenehme Zusammenarbeit. Bei Freunden und Kollegen bedanke ich mich für die Geselligkeit nach der Arbeitszeit.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Barbro Winkler für die kurzfristige, konstruktive Korrektur der Doktorarbeit und die Hilfe bei der Berechnung des  $g_{fac}$ . Herzlich danken möchte ich auch Birgit Nibler für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

## **Danksagung**

---

In erster Linie möchte ich den Menschen herzlich danken, die mich in dieser Zeit unterstützt und motiviert haben. Besonders zu erwähnen sind hier Mattias Meißner, die „Münchner“ und meine Familie. Ohne ihre Hilfe wäre vieles schwerer gewesen.

Ich danke auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung des Projektes und der Technischen Universität München für die Gewährung eines Promotionstipendiums im Rahmen des HWP-Programms.

Dank auch meinen Forschungsobjekten, den Bäumen, die mich geduldig ertrugen.

## Lebenslauf



### Persönliche Daten:

---

Name:	Katja Maria Patzner
Geburtsdatum/ -ort:	30.06.1971 in Hamm
Staatsangehörigkeit:	deutsch
Familienstand:	ledig

### Schulbildung:

---

1977 – 1981	Selmiger-Heide Grundschule, Hamm
1981 – 1987	Realschule Pelkum, Hamm; Mittlere Reife
1987 – 1990	Märkisches Gymnasium Hamm; Abitur

### Hochschulausbildung:

---

Oktober 1990 – Dezember 1996	Studium der Biologie (Diplom) an der Universität und Gesamthochschule Kassel
März 1996 – Dezember 1996	Diplomarbeit im Fachbereich Ökologie/Botanik der Universität und Gesamthochschule Kassel
August 1997 – Juli 1998	wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU-München, Lehrstuhl für Physiologie, molekularbiologische Untersuchungen zum Thema: „Vergleichender Nachweis physiologisch aktiver Faktoren im Eileiter bei Rind und Marmoset-Affe und ihr Einfluss auf die Gameten“
August 1998 – November 2003	wissenschaftliche Mitarbeiterin und HWP-Promotionsstipendiatin an der TU-München, Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, Anfertigung der vorliegenden Dissertation unter Leitung von Prof. Dr. R. Matyssek

## **Veröffentlichungen:**

---

### **Diplomarbeit:**

---

PATZNER K (1996) Untersuchungen zu Vegetationsveränderungen in immissionsgeschädigten Buchenwäldern des Naturparks Habichtswald, Universität und Gesamthochschule Kassel, Deutschland.

### **Poster:**

---

PATZNER K M , HÄBERLE K-H, MATYSSEK R (2002) Assessing canopy transpiration and primary production of mountainous forests – a basis for validating watershed models. In: MATYSSEK R, OSSWALD W, FROMM J (eds) 7. Jahrestagung des Arbeitskreises "Experimentelle Ökologie" der Gesellschaft für Ökologie, Freising, Deutschland.

PATZNER K M , HÄBERLE K-H, MATYSSEK R (2001) Assessing canopy transpiration and primary production of mountainous forests – a basis for validating watershed models. In HABER W (ed) 44th Symposium : Vegetation and Ecosystem Function. Department of Ecology, Technische Universität München (TUM), International Association of Vegetation Science (IAVS), Freising, Deutschland.

PATZNER K, EINSPANIER R (1998): Erste Untersuchungen zu Immunzellen im bovinen Eileiter und Immunglobulin-Interaktionen mit Spermien. In: 10. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Andrologie gemeinsam mit der Sektion Reproduktionsbiologie und -Medizin der Deutschen Gesellschaft für Endokrinologie, Münster, Deutschland.

## **Veröffentlichungen:**

---

GROTE R , PATZNER K, SEIFERT T (2003) Modelling Water Availability in Individual Trees – a Contribution of Process-Based Simulation to the Prediction of Developments in Heterogeneous Stands. In: GNAUCK A, HEINRICH R (Eds.) Umwelt-Informatik aktuell, Metropolis Verlag Marburg, Volume 31: 804-812

HÄBERLE K-H, REITER I, PATZNER K, HEYNE C, MATYSSEK R (2001) Switching the light off: A break in photosynthesis and sap flow of forest trees under total solar eclipse. Meteorologische Zeitschrift 10: 201-206