

# Schallemissionsanalyse in der Pflanzenphysiologie: Ein Beispiel

Sabine ROSNER, Institut für Botanik, Department für Integrative Biologie und Biodiversitätsforschung, Universität für Bodenkultur, Wien (BOKU), Wien, Österreich,

**Kurzfassung.** Während der Austrocknung von Holz werden akustische Signale (AEs) in einem breiten Frequenzspektrum emittiert. Signale im Frequenzbereich zwischen 100 und 300 kHz ermöglichen die zeitliche Erfassung von Rissbildungen während der industriellen Holz Trocknung und von Kavitationen (Abreißen der Wassersäule) in trockengestressten Wasserleitungselementen von Bäumen, da Störsignale effizient ausgeschaltet werden. Die Mehrzahl der emittierten Signale stammt von Kavitationen, die zu Verlusten der hydraulischen Leitfähigkeit im Holz führen. Leitfähigkeitsverluste verschlechtern die Wasserversorgung der Krone und können bis zum Absterben der Pflanze führen. Ziel dieser Studie war es, mittels Schallemissionsanalyse jene Kavitationen herauszufiltern, welche die Wasserleitfähigkeit von Fichtenholz signifikant vermindern. Tests wurden mit resonanten 150 kHz Sensoren an austrocknenden Holzstäbchen verschiedenen Alters durchgeführt (Länge 10 cm, Querschnittsfläche 36 mm<sup>2</sup>). Als Referenzmethode zur Bestimmung der hydraulischen Verwundbarkeit dienten hydraulische Verwundbarkeitskurven, wo der Verlust der Leitfähigkeit in Abhängigkeit von positivem Pressluftdruck graphisch aufgetragen wird. Juveniles Fichtenholz vom Wipfel, das engere Wasserleitelemente aufweist, war weniger verwundbar als älteres (adultes) Holz. Dieses junge Holz emittierte in Abhängigkeit von der höheren Anzahl der Wasserleitelemente eine höhere Anzahl AEs, jedoch mit einer insgesamt geringeren relativen Energie (pVs). Die Gesamtanzahl der Signale war negativ mit der mittleren relativen Energie/10 min, der maximalen relativen Energie/10 min und dem Prozentanteil von Signalen über 60 dB korreliert. Die kleineren Wasserleitelemente des weniger verwundbaren juvenilen Holzes emittierten also schwächere Signale. Die kumulative relative Energie/10 min, aufgetragen gegen den relativen Wasserverlust, ermöglichte eine repräsentative Bestimmung der hydraulischen Verwundbarkeit. Bei gleichem relativem Wasserverlust emittierten weniger verwundbare Holzproben einen geringeren Prozentsatz der kumulativen relativen Energie/10 min. Der Vorteil der Schallemissionsanalyse gegenüber der hydraulischen Methode liegt in der geringen Arbeitsintensität und der Automatisierbarkeit.

## 1. Einleitung

Milburn & Johnson fanden 1966, dass Kavitationen (Abreißen der Wassersäule) im Holz von lebenden Pflanzen akustische Emissionen (AEs) im niederfrequenten Bereich (<15 kHz) induzieren [12]. Tyree & Dixon verwendeten 1983 akustische Sensoren für den Frequenzbereich zwischen 100 and 2000 kHz und konnten so umweltbedingte Störsignale effizient ausschalten [17]. Auf der Basis dieses Wissens wurde der Physical Acoustics Drought Stress Monitor (DMS) entwickelt, der bis heute Anwendung in der Pflanzenphysiologie findet [21]. Da Kavitationen Signale in einem breiten Frequenzspektrum erzeugen, wurde bereits in den 80er Jahren die Frage laut, ob die Wellenformen

der Signale Informationen über die hydraulische Verwundbarkeit von Holz geben können [13] [15].

AEs mit den höchsten Amplituden zwischen 100 und 300 kHz werden vermutlich durch eine Schockwelle hervorgerufen, die entsteht wenn das flüssige Wasser in den Wasserleitelementen des Holzes, das unter Zugspannung steht, plötzlich verdampft [20]. Kavitationen führen zu Verlusten in der hydraulischen Leitfähigkeit des Holzes. Die pflanzenphysiologische Anwendung der Schallemissionsanalyse beruht hauptsächlich auf der Zählung jener AEs, die eine bestimmte Intensitätsschwelle überschreiten, basierend auf der Annahme, dass die kumulativen AEs einem bestimmten Leitfähigkeitsverlust entsprechen [2] [10] [17]. Leitfähigkeitsverluste schränken die Wasserversorgung ein und können bis zum Absterben von Organen und ganzen Pflanzen führen. Das Zählen der kumulativen AEs ist eine repräsentative Methode um akute Trockenstressperioden zerstörungsfrei zu erfassen [6] [7]. Jedoch kann diese Methode nur unter bestimmten Voraussetzungen quantitative Aussagen über den tatsächlichen Leitfähigkeitsverlust geben, da prinzipiell jede wassergefüllte tote Zelle, die ausreichend starke Zellwände hat um ein Kollabieren zu vermeiden, AEs erzeugen kann [9] [20]. Die kumulativen AEs korrespondieren deshalb nicht unbedingt mit dem Leitfähigkeitsverlust, da das Holz nicht nur aus leitenden Zellelementen besteht. Aber selbst wenn jedes Signal genau einer Kavitation eines Leitelementes entspräche, so würde sich ein 1:1 Verhältnis zwischen kumulativen AEs und Leitfähigkeitsverlust nur dann ergeben, wenn alle Leitelemente exakt dieselben Dimensionen hätten. Die Lumendurchmesser der wasserleitenden Elemente des Holzes sind jedoch meist recht variabel und der Durchfluss steigt mit der vierten Potenz des Radius (Fichte: ca. 5-20  $\mu\text{m}$ ). Bereits sehr früh hat man vermutet, dass die Frequenzkomposition und die Energie der emittierten Signale Informationen über die Dimensionen der kavitierten Wasserleitelemente und somit über den Leitfähigkeitsverlust bergen [13] [15]. Die Schallemissionsanalyse ist eine etablierte Methode zur Optimierung industrieller Trocknungsmethoden, um Rissbildung im Holz zu vermeiden [1]. Dieser methodische Ansatz könnte auch in der Pflanzenphysiologie Anwendung finden, da man weiß, dass die meisten AEs von Kavitationen und nicht von Rissen stammen [8].

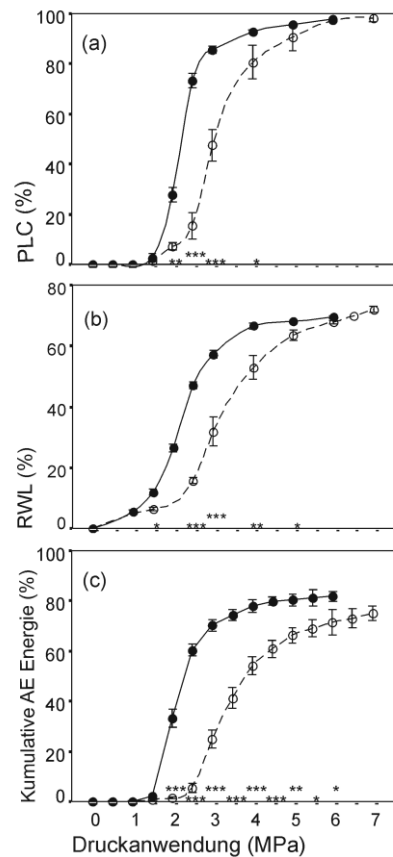
Ziel dieser Studie war es, Wellenformeingenschaften der AEs herauszufiltern, welche Auskunft über die hydraulische Verwundbarkeit von Fichtenholz geben. Es wurden Holzproben mit unterschiedlichen anatomischen und hydraulischen Eigenschaften untersucht. Junges Fichtenholz vom Wipfel mit engen Wasserleitelementen ist erwartungsgemäß weniger verwundbar als älteres leitendes Stammholz. Anatomische und klassische hydraulische Untersuchungen dienten als Referenzmethoden um jene AE Parameter zu ermitteln, die Aufschluss über den hydraulischen Leitfähigkeitsverlust geben.

## **2. Material und Methoden**

### *2.1 Präparation von Standardstäbchen für hydraulische und AE Tests*

Holzproben stammten von zwölf 25 jährigen Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.), die in Südschweden gefällt worden waren. Die mittlere Baumhöhe war  $11.1 \pm 0.4$  m und der mittlere Brusthöhendurchmesser  $13.3 \pm 0.6$  cm. Stäbchen mit einer Länge von 13 cm und einer Querschnittsfläche von  $1 \times 1$  cm<sup>2</sup> wurden mit einem Stemmeisen vom frischen Splitholz abgespaltet. Die tangentialen und radialen Schnittflächen wurden auf einem Schlittenmikrotom plan gehobelt ( $6 \times 6$  mm<sup>2</sup>) und die Enden mit Rasierklingen beschnitten, bis eine endgültige Länge von 11 cm erreicht war. Die Proben wurden anschließend in destilliertem Wasser unter Unterdruck aufgesättigt um möglicherweise eingedrungene Luft

aus den Wasserleitelementen zu entfernen. Standardstäbchen wurden von 17-19 jährigen Holzjahren (adultes Holz, entnommen in 1 m Stammhöhe) und 1-2 jährigen Holzjahren (juveniles Holz des Wipfels) hergestellt.



**Abb. 1a-c** Prozentueller Leitfähigkeitsverlust (PLC) (a), relativer Wasserverlust (RWL) (b) und die relative kumulierte AE-Energie (c) *versus* einer Überdruckanwendung mittels Druckkragen. X-Werte der Abb. (c) wurden mittels kubischer Ausgleichsfunktion aus RWL und Überdruck errechnet (b). Leere Symbole und durchbrochene Linien repräsentieren juvenile Stammholzproben ( $n = 6$  (a & b),  $n = 12$  (c)), gefüllte Symbole und durchgehende Linien adulte Stammholzproben ( $n = 12$ ). Unterschiede zwischen juvenilem und adultem Holz sind mit \* gekennzeichnet wenn  $P < 0.05$  war, mit \*\* wenn  $P < 0.01$ , and mit \*\*\* wenn  $P < 0.001$ .

## 2.2 Hydraulische Methode zur Bestimmung der hydraulischen Verwundbarkeit

Eine Verwundbarkeitskurve ist eine graphische Darstellung des prozentuellen Leitfähigkeitsverlustes (PLC, y-Achse) *versus* dem Stress (x-Achse) der diesen PLC ausgelöst hat. Die spezifische hydraulische Leitfähigkeit ( $k_s$ ) wird wie folgt berechnet:

$$k_s = Q \cdot l \cdot A_s^{-1} \cdot \Delta P^{-1} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}],$$
 wobei  $Q$  die Flussrate ist [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],  $l$  die Segmentlänge [m],  $A_s$  die Querschnittsfläche [ $\text{m}^2$ ], und  $\Delta P$  ist die Druckdifferenz zwischen beiden Enden der Holzprobe (0.0054 MPa).  $k_s$  wurde mit destilliertem, gefiltertem (22  $\mu\text{m}$ ), entgastem Wasser, das 0.005 vol. % Micropur enthielt, bestimmt. Nach Wägung und der Bestimmung der Leitfähigkeit bei voller Sättigung wurde mittels eines Druckkragens (PMS Instruments Co., Corvallis, Oregon) positiver Pressluftdruck auf die Holzproben ausgeübt. Die Proben wurden gewogen und nach einer Ausgleichszeit von ca. 30 Minuten wurde abermals der Durchfluss gemessen. Diese Prozedur wurde wiederholt, bis nur mehr 5 % der ursprünglichen Leitfähigkeit übrig waren. Hydraulische Verwundbarkeitskurven wurden mittels einer Sinus-Ausgleichsfunktion erstellt:

$PLC [\%] = 100 / (1 + \exp(a(P - b)))$ , dabei ist PLC der Leitfähigkeitsverlust,  $a$  die Steigung des linearen Teils der Kurve und  $b$  der Pressluftdruck, der zu 50 % Leitfähigkeitsverlust führt. Je größer der Parameter  $b$  ist, desto weniger verwundbar ist die Holzprobe. Der relative Wasserverlust (RWL), ausgelöst durch den jeweiligen Überdruck, wurde aus dem Sättigungsgewicht (SG), dem jeweiligen Frischgewicht (FG) und dem Trockengewicht (TG) mittels folgender Formel berechnet:

$$RWL [\%] = (1 - (FG - TG) / (SG - TG)) \cdot 100$$

Das Trockengewicht wurde durch Trocknen bei 103°C bis zur Gewichtskonstanz bestimmt. Der RWL in Abhängigkeit von der Druckerhöhung wurde mit einer kubischen Funktion ausgeglichen.

### 2.3 Akustische Methode zur Bestimmung der hydraulischen Verwundbarkeit

AEs wurden mittels des  $\mu$ DiSP™ Digital AE-Systems von Physical Acoustics Corporation (Princeton Jct, USA) [16], unter Verwendung von resonanten 150 kHz R15C Sensoren (Frequenzbereich 50 – 200 kHz) und einer Vorverstärkung (Filter 100 – 300 kHz) von 40 dB, gemessen. Als Messschwelle wurden 30 dB (0 dB = 1  $\mu$ V Input) festgelegt. Die Extraktion von Wellenformereigenschaften, wie der maximalen Amplitude (dB), der Signaldauer ( $\mu$ s) und der relativen Energie (pVs) erfolgte mit der AE Win® software (Physical Acoustics Corp.). Die relative Energie, auch „PAC Energie“ genannt, ist als die Fläche des Voltsignals über die Zeit definiert.

AE Sensoren wurden mittels einer Klemme aus Metall und Plexiglas an der tangentialen Schnittfläche der Holzproben angebracht [14]. Silikonpaste diente als Koppelungsmedium (Wacker, Burghausen, BRD). Eine Druckfeder, die unter dem Probenhalter angebracht war, garantierte einen konstanten Anpressdruck von  $30 \pm 2$  N. Der Anpressdruck wurde mittels DMS Kraftmesszellen (Typ 8416-5500, Verstärker Typ 9235; Burster, Gernsbach, BRD) während der gesamten Messung kontinuierlich registriert. Die Klemme wurde auf eine Waage (Auflösung:  $10^{-3}$  g, Sartorius, Göttingen, BRD) gestellt. Parallel zu den akustischen Signalen, die während der Austrocknung des Holzes bei Raumtemperatur (22 °C, 40 % r.h.) emittiert wurden, wurde der Wasserverlust in 10-Minuten-Schritten erhoben. Der Test war beendet, wenn keine AEs mehr gemessen wurden. Dies war bei den Standardstäbchen nach 10 – 12 Stunden erreicht.

Die AE Daten wurden mittels Vallen VisualAE™ Software (Vallen Systeme GmbH, München, BRD) gefiltert. Signale, die kleinere maximale Amplituden als 31 dB aufwiesen, wurden nicht in die Analyse mitaufgenommen, weil sie die festgelegte Schwelle nur einmal überschritten. Sie wurden als Störsignale interpretiert, die entweder vom System selber stammten oder Hintergrundgeräusche darstellten. AEs wurden in folgende Amplituden- und Signaldauerstufen (Cluster) eingeteilt:  $31 \text{ dB} \leq PA_{AE} < 40 \text{ dB}$ ,  $40 \text{ dB} \leq PA_{AE} < 50 \text{ dB}$ ,  $50 \text{ dB} \leq PA_{AE} < 60 \text{ dB}$  und  $PA_{AE} \geq 60 \text{ dB}$ , sowie  $D_{AE} < 100 \mu\text{s}$ ,  $100 \mu\text{s} \leq D_{AE} < 500 \mu\text{s}$ , and  $D_{AE} \geq 500 \mu\text{s}$ . Ein mittlerer relativer Energiewert wurde für 10 Minuten-Intervalle errechnet. Die einzelnen relativen kumulativen Energiewerte/10 Minuten wurden mit der gesamten mittleren relativen Energie/10 Minuten in Beziehung gesetzt. Diese Prozentwerte wurden gegen die relativen Wasserverlustdaten (RWL) in 10-Minuten-Stufen aufgetragen. Die statistische Analyse erfolgte in 5 % RWL-Schritten. „AE-Raten“ sind geclusterte AEs/10 Minuten bezogen auf den maximalen Wert der geclusterten AEs/10 Minuten (in %). Als „Relative AE-Raten“ werden geclusterte AEs/10 Minuten bezogen auf alle im selben Zeitraum gemessenen AEs bezeichnet (in %). Verwundbarkeitskurven, basierend auf kumulativen AEs oder relativen AE-Energie Werten und dem relativen Wasserverlust wurden mittels einer kubischen Funktion errechnet.

## 2.4 Statistik

Statistische Analysen wurden mit SPSS® 11.0 durchgeführt. Werte werden als Mittelwerte  $\pm$  Standardfehler (SE) angegeben. Mittelwertvergleiche wurden mit dem *t*-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt, nachdem eine Normalverteilung gesichert war. Zusammenhänge zwischen zwei Variablen wurden mit linearer oder nicht-linearer Regressionsanalyse getestet. Unterschiede in den Mittelwerten oder Zusammenhänge zwischen Variablen galten als signifikant, wenn  $P < 0.05$  war.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Durchflussexperimente

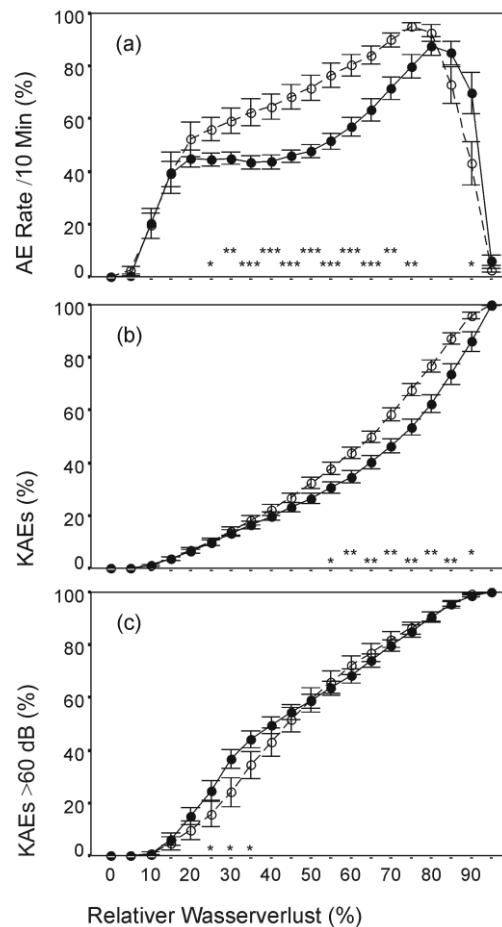
Juveniles Holz war weniger empfindlich für Kavitationen als adultes Holz (Abb. 1a): 50 % Leitfähigkeitsverlust (PLC) wurden durch  $3.20 \pm 0.16$  MPa Druck ausgelöst, während nur  $2.26 \pm 0.04$  MPa ausreichten um denselben Effekt im adulten Holz zu erzielen ( $P < 0.001$ ). Der Vergleich der Drücke, die nötig waren, um 50 % relativen Wasserverlust zu erreichen, erbrachte ähnliche Ergebnisse (juvenil:  $3.67 \pm 0.17$  MPa, adult:  $2.58 \pm 0.06$  MPa;  $P < 0.001$ , Abb. 1b). Juveniles Holz hatte signifikant geringere Durchflusswerte bei voller Sättigung als adultes Holz ( $4.99 \pm 0.90$  cm<sup>2</sup>/s/MPa,  $37.21 \pm 1.55$  cm<sup>2</sup>/s/MPa;  $P < 0.001$ ), bedingt durch geringere Durchmesser der Wasserleitelemente (Tracheiden). Während juveniles Holz im Mittel  $568.0 \pm 38.5$  Tracheiden/mm<sup>3</sup> aufwies, fanden sich im adulten Holz  $201.4 \pm 13.62$ /mm<sup>3</sup>. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde versucht, AEs mit jenen Wellenformeingenschaften zu filtern, die einen relevanten Einfluss auf den Leitfähigkeitsverlust haben.

### 3.2 Gesamtanzahl der AEs und AE-Rate

Juvenile Stammholzproben produzierten mehr AEs als adulte (Tabelle 1) und die gesamten AEs der Standardstäbchen waren eng mit der Anzahl der Wasserleitelemente/mm<sup>2</sup> Querschnittsfläche (Tracheiden/mm<sup>2</sup>) korreliert ( $r = 0.91$ ,  $P < 0.001$ ). Juvenile Holzproben hatten eine fast doppelt so hohe Anzahl an Tracheiden/mm<sup>2</sup> (Tabelle 1), was auf deutlich geringere Gefäßdurchmesser schließen lässt.

Die AE-Rate/10 Minuten zeigte im juvenilen Holz einen durchgehenden Anstieg, während im adulten Holz zwei Peaks feststellbar waren (Abb. 2a). Juveniles Holz hatte eine höhere kumulative AE-Rate bezogen auf den RWL als adultes Holz (Abb. 2b). Steilere Anstiege der kumulativen AE-Rate werden in der Literatur sowohl als Anzeichen für eine geringere [14] [18] [19] als auch für eine höhere hydraulische Verwundbarkeit interpretiert [2] [3] [4]. 50 % der gesamten AEs wurden in juvenilem Holz nach  $64.60 \pm 1.73$  % RWL, im adulten erst nach  $72.84 \pm 2.31$  % RWL gemessen ( $P < 0.01$ ). Die Unterschiede in der Steigung der Kurven waren jedoch erst nach 50 % RWL signifikant, was vom baumphysiologischen Standpunkt sehr spät ist, da ein RWL von 35 - 40 % bereits zu einem PLC von 50 % führt. Signale, die nach 70 % RWL emittiert werden, stammen wahrscheinlich von Tracheiden, deren Funktion weniger die axiale Wasserleitung, als vielmehr die Gewährleistung der mechanischen Stabilität, die Wasserleitung in radialer Richtung oder die Wasserspeicherung ist, oder aber auch von mechanischen Mikrorissen. Während der Zusammenhang zwischen Leitfähigkeitsverlust und kumulativen AEs bei Fichtenastholz recht eng ist [2], sind kumulierte AEs (sämtliche messbare), aufgetragen

gegen den relativen Wasserverlust oder den Pressluftdruck, kaum geeignet repräsentative Verwundbarkeitskurven für Fichtenstammholz zu erstellen.

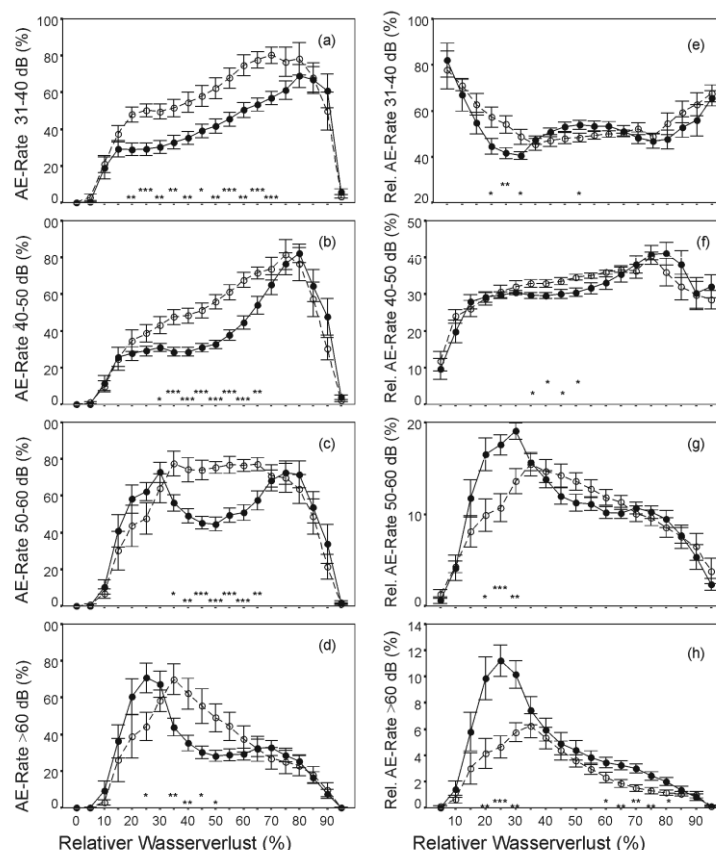


**Abb. 2a-c** Rate der akustischen Emissionen (AEs) /10 min in Beziehung zur maximalen AE-Rate/10 min (a), kumulierte AE-Rate in Relation zu den gesamten AEs (b), und kumulierte AEs > 60 dB in Relation zur Gesamtanzahl der AEs > 60 dB (c) in 5 % Stufen des relativen Wasserverlustes für juveniles Holz ( $n = 12$ , leere Symbole, durchbrochene Linien) und adulte Stammholzproben ( $n = 12$ , gefüllte Symbole, durchgezogene Linien). Unterschiede zwischen juvenilem und adultem Holz sind mit \* gekennzeichnet wenn  $P < 0.05$  war, mit \*\* wenn  $P < 0.01$ , and mit \*\*\* wenn  $P < 0.001$ .

### 3.3 AE Features: Maximale Amplitude und Signaldauer

AEs mit maximalen Amplituden zwischen 30 und 50 dB machten über 85 % der gesamten AEs aus (Tabelle 1). Ihre Verlaufsrate entsprach deshalb der Verlaufsrate der gesamten AEs (Abb. 2a & Abb. 3a-b). AEs zwischen 50 und 60 dB hatten im adulten Holz zu Beginn und gegen Ende der Austrocknungsperiode die höchsten Raten (Abb. 3c). Der prozentuelle Anteil an AEs > 60 dB war sehr gering, mit signifikant höheren Werten im adulten Holz (Tabelle 1). Maximale Raten der AEs > 60 dB wurden im juvenilen Holz später als im adulten erreicht ( $30.24 \pm 3.06\%$ ,  $22.75 \pm 1.96 \%$ ,  $P < 0.05$ , Abb. 3d). Ihr prozentueller Anteil an den gesamten AEs war im Bereich zwischen 20 und 30 % RWL im adulten Holz viel höher als im juvenilen (Abb. 3g-h). Auch die maximalen relativen AE-Raten > 60 dB waren im juvenilen Holz erst bei höheren RWLs zu verzeichnen ( $30.29 \pm 3.07 \%$ ,  $22.34 \pm 1.52 \%$ ;  $P < 0.05$ ). Die kumulierte AE-Rate für Signale >60 dB zeigte deshalb im physiologisch interessanten Bereich zwischen 25 and 35 % einen anderen Verlauf als die

gesamte kumulierte AE-Rate (Abb. 2b-c). Bei einer Erhöhung der Messschwelle auf 60 dB wäre die kumulierte AE-Rate von adultem Holz zwar steiler als die von juvenilem Holz (Abb. 2c), allerdings würde man so nur weniger als 4 % aller Signale erfassen (Tabelle 1).



**Abb. 3a-h** AE-Rate (AEs/10 min in Beziehung zu den maximalen AEs/10 min) (a-d, linke Seite) und die relative AE-Rate (AEs/10 min in Beziehung zu allen zur selben Zeit gemessenen AEs) (e-h, rechte Seite) geclustert nach den Peak Amplituden ( $PA_{AE}$ ) Bereichen:  $30.5 \text{ dB} \leq PA_{AE} < 40 \text{ dB}$ ,  $40 \text{ dB} \leq PA_{AE} < 50 \text{ dB}$ ,  $50 \text{ dB} \leq PA_{AE} < 60 \text{ dB}$ , and  $PA_{AE} \geq 60 \text{ dB}$  in 5 % RWL Schritten für juvenile und adulte Stammholzproben. Die Symbole sind in Abb. 2. erklärt.

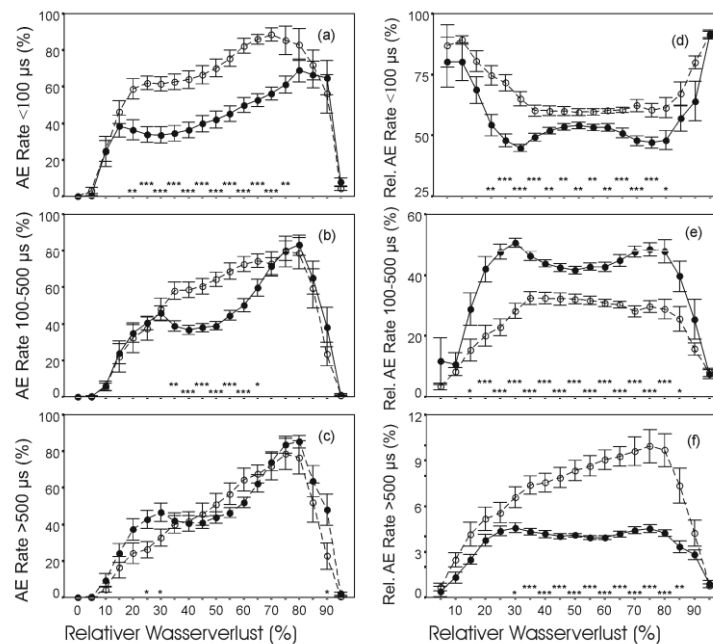
**Tabelle 1.** Kumulierte akustische Emissionen (KAE) geclustert nach Wellenformigenschaften, Gesamtanzahl der AEs und die Anzahl der Tracheiden/mm<sup>2</sup> Querschnittsfläche (Mittelwerte und Standardfehler). KAEs wurden in 4 Amplitudenstufen und 3 Signaldauerstufen eingeteilt. Signifikante Unterschiede ( $P < 0.01$ ) zwischen juvenilem (J,  $n = 12$ ) und adultem Holz (A,  $n = 12$ ) sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet.

	KAE 31-40 dB (%)	KAE 40-50 dB (%)	KAE 50-60 dB (%)	KAE >60 dB (%)	KAE <100 $\mu\text{s}$ (%)	KAE 100-500 $\mu\text{s}$ (%)	KAE > 500 $\mu\text{s}$ (%)	AEs total (n)	Tracheiden (n/mm <sup>2</sup> )
J	52.16 <sup>a</sup> (1.21)	34.73 <sup>a</sup> (0.62)	10.55 <sup>a</sup> (0.49)	2.55 <sup>a</sup> (0.22)	63.43 <sup>a</sup> (1.05)	28.29 <sup>a</sup> (1.05)	8.20 <sup>a</sup> (0.48)	1679512 <sup>a</sup> (77033)	1393 <sup>a</sup> (62)
A	51.70 <sup>a</sup> (1.41)	34.52 <sup>a</sup> (1.17)	10.22 <sup>a</sup> (0.36)	3.55 <sup>b</sup> (0.23)	54.84 <sup>b</sup> (1.25)	41.33 <sup>b</sup> (1.20)	3.83 <sup>b</sup> (0.10)	567051 <sup>b</sup> (18281)	796 <sup>b</sup> (46)

Während juveniles Holz mehr Signale im Bereich  $< 100 \mu\text{s}$  und  $> 500 \mu\text{s}$  emittierte, war der Anteil der AEs zwischen 100 und 500  $\mu\text{s}$  im adulten Holz über die gesamte

Austrocknungsperiode hinweg höher (Tabelle 1, Abb. 4d-f). Adultes Holz hatte signifikant geringere Raten  $< 500 \mu\text{s}$  zwischen 30 und 70 % RWL (Abb. 4a-b), aber höhere Raten der AEs  $> 500 \mu\text{s}$  zwischen 25 und 30 % RWL als juveniles Holz (Abb. 4c).

Die Suche nach jenen Wellenformeigenschaften, die eng in Zusammenhang mit dem Leitfähigkeitsverlust stehen, wurde auf den Bereich  $< 40$  % RWL beschränkt, da dieser Bereich physiologisch gesehen am interessantesten ist. Aber weder lieferten die geclusterten Signale  $> 500 \mu\text{s}$  noch die Signale  $> 60$  dB brauchbare Ergebnisse um den Unterschied in der Verwundbarkeit zwischen juvenilem und adultem Holz nachweisen zu können. Kubische Ausgleichsfunktionen zwischen RWL und kumulativen geclusterten AEs zeigten bei keinem kumulierten AE Wert signifikante RWL Unterschiede.



**Abb. 4a-f** AE-Rate (AEs/10 min in Beziehung zu den maximalen AEs/10 min) (a-c, linke Seite) und die relative AE-Rate (AEs/10 min in Beziehung zu allen, im betreffendem Zeitintervall gemessenen, AEs) (d-f, rechte Seite) geclustert in folgende Signaldauerintervalle ( $D_{AE}$ ):  $D_{AE} < 100\mu\text{s}$ ,  $100\mu\text{s} \leq D_{AE} < 500 \mu\text{s}$ , and  $D_{AE} \geq 500\mu\text{s}$  in 5 % relativen Wasserverlust-Stufen. Die Symbole sind in Abb. 2. erklärt.

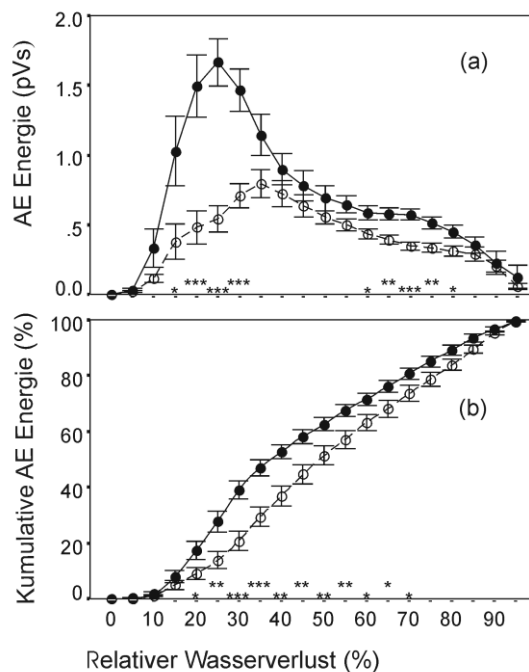
### 3.4 Verwundbarkeitskurven basierend auf der relativen AE-Energie

Die mittlere relative AE-Energie/10 min war bei adultem Holz signifikant höher als bei juvenilem ( $0.50 \pm 0.03$  pVs,  $0.29 \pm 0.03$  pVs,  $P < 0.001$ ). Die mittlere relative AE-Energie/10 min war negativ mit der Anzahl der Tracheiden/ $\text{mm}^2$  ( $r = -0.77$ ,  $P < 0.001$ ) und mit der AE Gesamtanzahl korreliert ( $r = -0.79$ ,  $P < 0.001$ ). Juvenile Holzproben wiesen auch geringere maximale AE-Energien/ 10 min als adulte Holzproben auf ( $P < 0.001$ , Abb. 5a). Deshalb war auch die maximale AE-Energie/ 10 min negativ mit der Tracheidenanzahl ( $r = -0.60$ ,  $P < 0.01$ ) und der Anzahl der gesamten AEs ( $r = -0.87$ ,  $P < 0.001$ ) korreliert.

Da die relative AE-Energie sowohl Informationen über die Amplitude als auch die Signaldauer enthält, führte die Verwendung dieses Parameters zu Kurven, die den hydraulischen Verwundbarkeitskurven am besten entsprechen. Signale mit maximalen Energiewerten wurden von juvenilem Holz bei signifikant höheren Wasserverlusten emittiert als von adultem ( $30.61 \pm 3.24$  %,  $22.86 \pm 1.59$  %;  $P < 0.05$ ). Die relativen Raten der kumulierten Energiewerte hatten in adultem Holz höhere Werte als im juvenilen (Abb.



5b), und 50 % der totalen emittierten Energie wurde bei signifikant geringerem RWL erreicht ( $39.37 \pm 2.15 \%$ ,  $50.99 \pm 2.53 \%$ ;  $P < 0.001$ ). Der Pressluftdruck, der nötig ist, um 50 % der kumulierten Energie zu erreichen, ist deshalb im adulten Holz weit geringer als im juvenilen ( $2.31 \pm 0.05$  MPa,  $3.73 \pm 0.11$  MPa;  $P < 0.001$ ). Die Modell-Verwundbarkeitskurven, bei denen die kumulierten Energien gegen den Pressluftdruck aufgetragen werden (Abb. 1c), entsprachen etwa jenen Verwundbarkeitskurven, bei denen die Leitfähigkeitsverluste gegen die Drücke aufgetragen wurden (Abb. 1a). Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass Kavitationen von stärker verwundbaren, größeren Wasserleitelementen stärkere AEs erzeugen. Es wird vermutet, dass Wasserleitelemente mit höherem Durchmesser mehr elastische Energie speichern, wenn sie unter Zugspannung stehen [13] [15]. Innerhalb einer Baumart steht die hydraulische Verwundbarkeit der Tracheiden in direkter Beziehung zu deren Durchmesser- und Tüpfel Eigenschaften [2] [5] [11] [22]. Die Kavitation von sehr großen und deshalb verwundbareren Leitelementen wirkt sich dramatisch auf den Leitfähigkeitsverlust aus, da die Durchflussrate proportional zur 4. Potenz des Radius des Leitelementes ist (Hagen-Poiseuille-Gleichung). Die Verteilung der maximalen AE-Energien über die Austrocknungsdauer lässt vermuten, dass die Kavitationen der stärker verwundbaren Tracheiden im adulten Holz bereits bei geringerem RWL stattfinden als im juvenilen Holz (Abb. 5a)



**Abb. 5a-b** Mittlere relative AE-Energie/10 min (pVs) (a) und relative kumulative AE-Energie (kumulative AE-Energie die bis zu einem bestimmten RWL Schritt emittiert wurde in Beziehung zur totalen emittierten AE-Energie) in 5 % relativen Wasserverlustschritten. Die Symbole sind in Abb. 2. erklärt.

#### 4. Schlussfolgerung

Die Analyse der Wellenformigenschaften akustischer Signale, die während der Austrocknung von Holzproben emittiert werden, ist eine interessante Alternative zur hydraulischen Methode, um die hydraulische Verwundbarkeit zu bestimmen. Die relativen AE-Energiewerte, aufgetragen gegen den RWL oder gegen die Pressluftdrücke, die dieselben RWLs auslösten, ergaben dabei die vielversprechendsten Ergebnisse. Der RWL

oder der Druck, der 50 % kumulativer relativer Energie entsprachen, korrespondierten ungefähr mit jenen Werten, die zu 50 % Leitfähigkeitsverlust führten. Die Vorteile der akustischen Methode gegenüber der hydraulischen liegen in der geringeren Arbeitsintensität und der Automatisierbarkeit.

## 5. Danksagung

Diese Studie wurde vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziert (FWF Project P16275-B06). Mein Dank ergeht an Andrea Klein, Bo Karlsson, Gudmund Ahlberg, Joachim Sell und Hanno Richter für technische Unterstützung, hilfreiche Diskussionen und linguistische Korrekturen.

## 6. Referenzen

- [1] Beall, FC, Breiner TA, Wang J. 2005. Closed-loop control of lumber drying based on acoustic emission peak amplitude. *Forest Products Journal* 55: 167-174.
- [2] Cochard H. 1992. Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiology* 11: 73- 83.
- [3] Hacke U, Sauter JJ. 1995. Vulnerability of xylem to embolism in relation to leaf water potential and stomatal conductance in *Fagus sylvatica* f. *purpurea* and *Populus balsamifera*. *Journal of Experimental Botany* 46: 1177-1183.
- [4] Hacke U, Sauter JJ. 1996. Drought-induced xylem dysfunction in petioles, branches, and roots of *Populus balsamifera* L. and *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Plant Physiology* 111:413-417.
- [5] Hacke UG, Sperry JS. 2001. Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 4: 97-115.
- [6] Hölttä T, Vesala T, Nikinmaa E, Perämäki M, Siivola E, Mencuccini M. 2005. Field measurements of ultrasonic acoustic emissions and stem diameter variations. New insight into the relationship between xylem tensions and embolism. *Tree Physiology* 25: 237-243.
- [7] Jackson GE, Grace J. 1996. Field measurements of xylem cavitation: are acoustic emissions useful?. *Journal of Experimental Botany* 47: 1643-1650.
- [8] Kawamoto S, Williams RS. 2002. Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites A Review. Madison, WI: Gen. Techn. Rep. FPL-GTR-134. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- [9] Kikuta S. 2003. Ultrasound acoustic emissions from bark samples differing in anatomical characteristics. *Phyton (Horn, Austria)* 43: 161-178.
- [10] Lo Gullo MA, Salleo S. 1991. Three different methods for measuring xylem cavitation and embolism: a comparison. *Annals of Botany* 67: 417-424.
- [11] Mayr S, Wolfschweiger M, Bauer H. 2002. Winter-drought induced embolism in Norway spruce (*Picea abies*) at the Alpine timberline. *Physiologia Plantarum* 115: 74-80.
- [12] Milburn JA, Johnson RPC. 1966. The conduction of sap. I Detection of vibrations produced by sap cavitation in *Ricinus* xylem. *Planta* 69: 43-52.
- [13] Ritman KT, Milburn JA. 1988. Acoustic emissions from plants: ultrasonic and audible compared. *Journal of Experimental Botany* 38: 1237-1248.
- [14] Rosner S, Wimmer R. 2005. Acoustic detection of cavitation events in Norway spruce sapwood. In: Bröker F-W ed. 14<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Aachen, Germany: Shaker Verlag, 123-134.
- [15] Sandford AP, Grace J. 1985. The measurement and interpretation of ultrasound from woody stems. *Journal of Experimental Botany* 36: 298-311.
- [16] Sell J. 2004. Overview of new Acoustic Emission (AT) Systems, PAC Developments. *Proceedings of the 26<sup>th</sup> European Conference on Acoustic Emission Testing*. Berlin, Germany: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. Berichtsband 90(2): 803-810.
- [17] Tyree MT, Dixon MA. 1983. Cavitation events in *Thuja occidentalis* L. ? Ultrasonic acoustic emissions from the sapwood can be measured. *Plant Physiology* 72: 1094-1099.
- [18] Tyree MT, Dixon MA. 1986. Water stress induced cavitation and embolism in some woody plants. *Physiologia Plantarum* 66: 397-405.
- [19] Tyree MT, Dixon AD, Tyree EL, Johnson R. 1984. Ultrasonic acoustic emissions from the sapwood of cedar and Hemlock. An examination of three hypothesis regarding cavitations. *Plant Physiology* 75: 988-992.

- [20] Tyree MT, Sperry JS. 1989a. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40: 19–38.
- [21] Tyree MT, Sperry JS. 1989b. Characterization and propagation of acoustic emission signals in woody plants: towards an improved acoustic emission counter. *Plant, Cell and Environment* 12: 371-382.
- [22] Tyree MT, Zimmermann MH. 2002. *Xylem structure and the ascent of sap*, 2<sup>nd</sup> edition., Berlin, Germany: Springer.