

3.3 Beispiel für schwankende Massenströme

Nachdem die zwei Grenzfälle des Massenstroms "konstant" bzw. "absätzig" behandelt wurden, soll an einem Beispiel der Fall von schwankenden Massenströmen untersucht werden, **Bild 14**. Die beiden dargestellten schwankenden Massenströme (unten) werden von zwei Förderschnecken mit einem Durchmesser von 80 mm erzeugt. Im linken Teil des Bildes beträgt die Steigung der Schnecke 40 mm, im rechten 115 mm. Die Schnecke mit der größeren Steigung fördert bei der gleichen Drehzahl einen entsprechend größeren mittleren Massenstrom. Hierdurch ist der Mittelwert der dosierten Massen (Bildmitte) bei der großen Steigung größer als bei der kleinen Steigung. Dies entspricht den Verhältnissen bei verschiedenen großen konstanten Massenströmen. Bei beiden Förderschnecken treten Massenstromschwankungen in etwa gleicher absoluter Größe auf. Bei der größeren Steigung sind die relativen Massenstromschwankungen wegen des höheren mittleren Massenstroms jedoch nur etwa halb so groß wie bei der kleineren Steigung. Auch der Variationskoeffizient ist bei der größeren Steigung nur halb so groß wie bei der kleineren Steigung. Mit der kleineren relativen Massenstromschwankung wird daher eine höhere Dosiergenauigkeit bei der Massendosierung erreicht. Diese Tendenz entspricht den Verhältnissen bei einer absätzigen Materialzufuhr.

4. Zusammenfassung

Bei der Massendosierung von Futtermitteln übt der zeitliche Verlauf des der Dosierwaage zugeführten Massenstroms einen entscheidenden Einfluß auf den Mittelwert und die Streuung der dosierten Massen aus.

Setzt man eine konstante Einstellung der Dosierwaage voraus, wobei die Vergleichskraft an der Waage der Gewichtskraft der ge-

wünschten dosierten Masse (Soll-Masse) im statischen Fall entspricht, dann ist bei einem zeitlich konstanten Massenstrom zur Dosierwaage der Mittelwert der dosierten Masse stets größer als die Soll-Masse, während bei absätziger Zufuhr einzelner Massenelemente infolge von Impulskräften die dosierte Masse stets kleiner als die Soll-Masse ist. Die Fallhöhe zwischen Zufuhrorgan und Wiegebehälter der Dosierwaage ist nur bei der absätzigen Zufuhr einzelner Massenelemente von Einfluß.

Bei schwankenden Massenströmen ist der Mittelwert der dosierten Masse vom zeitlichen Mittelwert des zugeführten Massenstroms abhängig. Die Genauigkeit der Dosierung wird umso besser, je größer die dosierte Masse und je kleiner die Massenstromschwankungen bezogen auf den Mittelwert sind. Bei der Massendosierung ist deshalb ein möglichst gleichmäßiger Massenstrom in der Zufuhr anzustreben. Deshalb ist bei Dosierwaagen für Futtermittel die Auswahl geeigneter Zufuhrorgane von besonderer Bedeutung. Größere Probleme sind dabei bei Grundfutter wegen der ungünstigen Materialstruktur zu erwarten.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● *Pirkelmann, H.*: Mechanisierung der Kraftfuttermittelherstellung an Milchvieh. Arbeiten der DLG, Band 164, Frankfurt/Main: DLG-Verlag 1980.
- [2] *Schlünsen, D. u. K. Walter*: Futterdosierung in einem teilautomatisierten Milchviehhaltungssystem. Landtechnik Bd. 33 (1978) Nr. 5, S. 224/27.
- [3] *Mannebeck, H.*: Eine automatische Anlage zur biologischen Fütterung von Milchkühen. Landtechnik Bd. 27 (1972) Nr. 14, S. 317/20.

Mechanische Frostschäden an Rebstöcken

Von A.G. Meiering, J.H. Paroschy, R.L. Peterson, G. Hostetter und A. Neff, Guelph, Kanada*)

DK 634.8:632.111.5

Zur Erforschung mechanischer Frostschäden in den Rebanlagen der Niagara-Halbinsel in der Provinz Ontario, Kanada, wurden während der Winterhalbjahre 1974 bis 1977 Daten über den Temperaturverlauf, das tangentielle Dehnungsverhalten und den Wassergehalt von Rebstöcken gesammelt. Diese Daten bildeten die Grundlage für Gefrierversuche mit frisch geschnittenen Stammproben von 3 bis 4 Jahre alten *Vinifera*-Rebstöcken in einer temperaturprogrammierten Kammer. Wärmeverhalten und Eisbildung im Rebstockgewebe wurden ferner mit Hilfe eines theoretischen Simulationsmodells analysiert.

Die Forschungsmittel für die Arbeiten über Winterschäden in Rebstöcken wurden vom Ontario Wine Council, vom Canada Department of Agriculture, von der Bright's Wines Company sowie vom Ontario Ministry of Agriculture and Food zur Verfügung gestellt.

*) *Dr. A.G. Meiering ist Professor an der School of Engineering der University of Guelph. Dr. J.H. Paroschy war Forschungsingenieur im gleichen Institut und ist jetzt verantwortlich für Verfahrenstechnik und Verfahrensentwicklung bei der Bright's Wines Co. Ltd, Niagara Falls, Ontario. Dr. R.L. Peterson ist Professor im Department für Botanik und Genetik der University of Guelph. G. Hostetter ist Direktor für Weinbauforschung der Bright's Wines Co. Ltd und A. Neff ist Leiter des Pflanzenbaus bei demselben Unternehmen.*

Simulationsdaten und Meßergebnisse zeigten sehr gute Übereinstimmung und wiesen auf die enorme Bedeutung des Wasserhaushaltes für den Umfang der Eisbildung und die damit in direktem Zusammenhang stehenden mechanischen Schäden hin. Sie unterstrichen die starke Rolle von abgeschlossener Holzreife und Auswahl trockener Standorte ohne frostbedingte Staunässe für den erfolgreichen Anbau von *Vinifera*-Sorten im Kontinentalklima.

1. Einführung

Ein wichtiges Ziel der Rebenzüchtung ist die Selektion klimaresistenter Sorten, um Ertragsausfälle in frostgefährdeten Lagen oder in außergewöhnlich kalten Wintern so niedrig wie möglich zu halten. Züchter und Anbauer können sich dabei auf Forschungsergebnisse aus dem Gebiet der Pflanzenphysiologie stützen, während über die Mechanik von Frostschäden kaum Informationsmaterial existiert.

Ein Forschungsprogramm, das die Untersuchung frostbedingter, mechanischer Gewebeschäden bei *Vinifera*-Rebsorten zum Ziel hatte, wurde im Jahre 1974 in der School of Engineering der University of Guelph in Angriff genommen. Dabei standen zunächst das Wärmeverhalten der Rebstöcke und die daran gekoppelte Eisbildung im Rebstockgewebe im Vordergrund des Interesses. Beide

Vorgänge verursachen wegen der negativen Wärmedehnung beim Abkühlen des wasserfreien Gewebegerüsts und der gleichzeitigen positiven Ausdehnung beim Phasenwechsel des unterkühlten Wassers zu Eis erhebliche Spannungen in den verschiedenen Gewebeteilen und -zellen, die zu unterschiedlichen mechanischen Beschädigungen führen können.

Das Versuchsprogramm begann mit Feldversuchen im Rebanaugebiet der Niagara-Halbinsel Süd-Ontarios. Die daraus gewonnenen Daten dienten als Grundlage für die Wahl der Versuchsbedingungen und -parameter der anschließenden Laborversuche.

2. Messungen zur Frosteinwirkung in der Rebanlage

In den Wintern der Jahre 1974 bis 1977 wurden Temperaturverlauf und tangentielle Oberflächendehnung drei bis vier Jahre alter Rebstöcke der Sorten Marechal Foch und Gewürztraminer im Weinbaugebiet Süd-Ontarios kontinuierlich aufgezeichnet. Thermoelemente mit 0,13 mm Durchmesser wurden zu diesem Zweck in einer Höhe von 0,2 und 0,65 m über der Bodenoberfläche unmittelbar unter dem Phloem (dem Siebteil der Rinde) an der Nord-, Ost-, Süd- und Westseite und in der Rebstockmitte installiert, **Bild 1**. Die tangentielle Verformung der Oberfläche in der Nähe der Temperaturmeßstellen wurde mit Dehnungsmeßstreifen registriert, **Bild 2**.

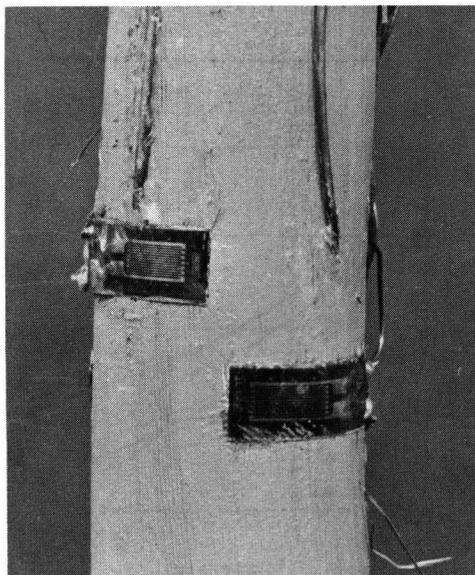


Bild 1 und 2. Temperatur- und Dehnungsmessung an Rebstöcken im Feldversuch [2, 3].

Bild 1. Lage der Meßstellen

Bild 2. Anbringung der Thermoelemente und Dehnungsmeßstreifen am Rebstock

Die in den Rebanlagen unter natürlichen Witterungsbedingungen vorgenommenen Messungen zeigten, daß die Stammtemperaturen grundsätzlich von Intensität und Richtung der Sonneneinstrahlung abhängig sind und generell mit der Lufttemperatur der Umgebung korrelieren. Aufzeichnungen der kältesten Tage im Mittwinter und Frühjahr 1977 sind in **Bild 3** dargestellt. Beide Beispiele zeigen einen typischen Temperaturverlauf für Frosttage mit Sonneneinstrahlung. Die Amplitude der Temperaturschwankungen betrug etwa 18 °C und war an Tagen mit starker Bewölkung und bei Schneebedeckung der unteren Meßstelle deutlich geringer. Das tägliche Temperaturminimum wurde generell kurz vor Sonnenaufgang erreicht. Die Aufzeichnungen ergaben insgesamt, daß die Rebstocktemperaturen an wenigen Tagen auf Werte unter -20 °C, jedoch regelmäßig auf -15 bis -20 °C während des Zeitraumes von Ende Dezember bis Ende März absinken [2].

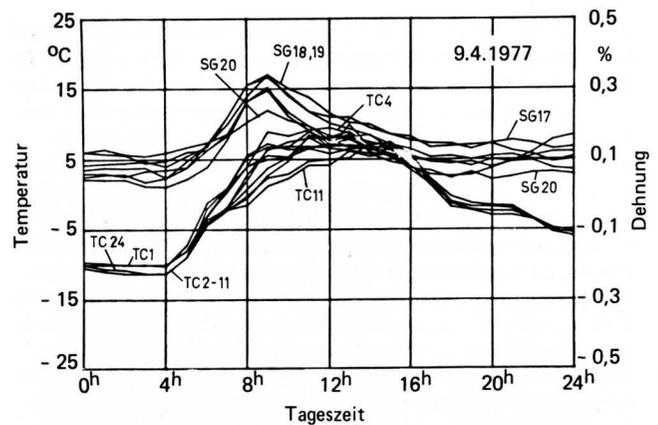
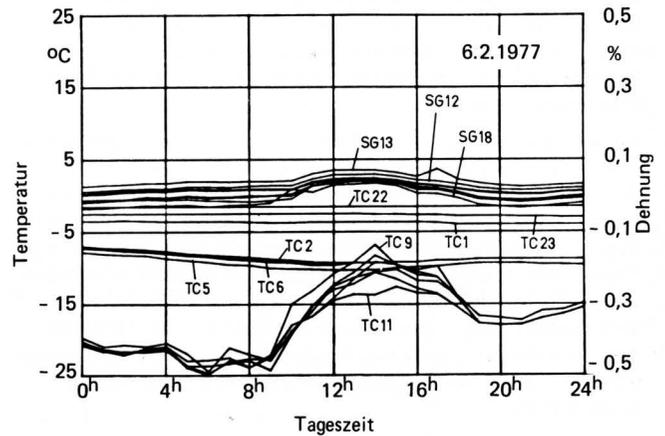


Bild 3. Rechner-Ausdruck der Meßwerte für Temperaturen (TC) und Oberflächendehnungen (SG); Feldversuche an 4jährigen Rebstöcken der Sorte Marechal Foch.

TC 1	Rebstockmitte in Bodenhöhe
TC 2	Rebstockmitte in 0,2 m Höhe
TC 3–TC 6	Temperatur an der Ost-, Süd-, West- und Nordseite in 0,2 m Höhe
TC 7	Rebstockmitte in 0,65 m Höhe
TC 8–TC 11	Temperatur an der Ost-, Süd-, West- und Nordseite in 0,65 m Höhe
TC 22	Schneetemperatur in 0,2 m Höhe
TC 23	Schneetemperatur in Bodenhöhe
TC 24	Lufttemperatur
SG 12–SG 15	Dehnung an der Ost-, Süd-, West- und Nordseite in 0,2 m Höhe
SG 17–SG 20	Dehnung an der Ost-, Süd-, West- und Nordseite in 0,65 m Höhe

Während des täglichen Strahlungsminimums zwischen etwa 18.00 Uhr und 8.00 Uhr sowie an bewölkten Tagen und bei Schneebedeckung der unteren Meßstelle treten wegen der geringen einfallenden Sonnenenergie keine nennenswerten Temperaturunterschiede zwischen Nord-, Ost- und Westseite sowie der Mitte des Rebstockes auf. Die durch Nachtfroste bewirkte Abkühlung verlief also bei gleichmäßiger Temperaturverteilung über dem gesamten Rebstockquerschnitt. An Tagen mit Sonneneinstrahlung entstanden für einige Stunden um die Mittagszeit, wenn sich die Rebstocktemperaturen dem Gefrierpunkt näherten, maximale Temperaturunterschiede zwischen Nord- und Südseite von etwa 8 °C [2]. Auf der Basis eines linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten trockener Laubhölzer von $\beta = (\partial l / \partial T)_p / l_0 = (23,0 \text{ bis } 31,0) \times 10^{-6}$ in radialer Richtung und von $(30,0 \text{ bis } 38,0) \times 10^{-6}$ in tangentialer Richtung würde diese Temperaturdifferenz Dehnungsunterschiede von annähernd 0,018–0,034 % im organischen Strukturmaterial der Rebstöcke verursachen [4]. Diese rein thermisch bedingten Unterschiede reichen in der Nähe des Gefrierpunktes bei kaum beeinträchtigter Gewebeflexibilität sicherlich nicht aus, um mechanische Schäden herbeizuführen. Windeinwirkung und Rebschnitt im Winter verursachen bei vergleichbaren Temperaturen weit größere Deformationen, ohne entsprechende Schäden zu hinterlassen.

Die Messung der tangentialen Verformung der Rebstockoberfläche ergab maximale Dehnungsunterschiede von 0,1 % zwischen Nord-, Ost-, Süd- und Westseite sowie maximale tägliche Dehnungsänderungen von etwa 0,3 %. Mechanische Schäden im Rebstockgewebe wurden während der winterlichen Untersuchungsperiode weder gemessen noch in der Umgebung der untersuchten Rebstöcke beobachtet. Die Unterschiede zwischen den berechneten und den gemessenen Dehnungswerten deuteten auf den Einfluß der Eisbildung im Rebstockgewebe und die daraus resultierenden Dehnungsvorgänge hin, die nur im Labor einer näheren Untersuchung zugänglich waren.

3. Laborversuche zum Erkennen von Frosteinwirkungen

Während der Monate Januar bis Mai 1978 wurden in regelmäßigen Zeitabständen etwa 0,9 m lange Stammproben von 3 bis 4 Jahre alten Rebstöcken der Sorte Gewürztraminer in der Versuchsanlage der Bright's Wines Co. Ltd geschnitten und unmittelbar nach dem Schnitt in ein speziell eingerichtetes Labor der School of Engineering in Guelph gebracht. Für die Versuche wurden die Proben auf 0,5 bis 0,7 m zurückgeschnitten, die äußere abgestorbene Rindenschicht entfernt sowie in der Probenmitte jeweils ein Thermoelement in das Phloem (Siebteil der Rinde) und ein Dehnungsmeßstreifen auf das Phellem (Korkgewebe der Rinde) aufgesetzt (s.a. Bild 15). Die so präparierten Proben wurden dann zu Gefrierversuchen in eine Kammer eingesetzt, die mit Kaltluft beschickt wurde, deren Temperatur zur Nachahmung der natürlichen Nachtfrosteffekte nach Amplitude und Zeit regelbar war, Bild 4. Zur Veränderung des Wassergehaltes im Phloem wurden einige Proben vor dem Gefrierversuch mit ihrer unteren Schnittfläche für ca. 24 Stunden in Wasser getaucht. Bei allen Proben wurde der Wassergehalt von Phloem und Xylem nach der Trockenschrankmethode bestimmt. In einigen Versuchen wurde eine größere Gefrierkammer benutzt, in der bei Frosttemperatur Schnitte hergestellt und unter dem Stereomikroskop auf Eiskristalle untersucht werden konnten. Weitere mikroskopische Untersuchungen über den Einfluß der Eisbildung auf Art und Ausmaß mechanischer Gewebeschäden wurden im Department für Botanik und Genetik vorgenommen. Schließlich wurden die makroskopisch an der Oberfläche sichtbaren Beschädigungen des Phellem registriert.

3.1 Analyse der Eisbildung im Rebstockgewebe

Winterhartes Pflanzengewebe besitzt die Fähigkeit, Wasser im unterkühlten Zustand aus seinen Zellen in die Interzellularen zu transportieren, wo es dann in die kristalline Phase des Eises ein-

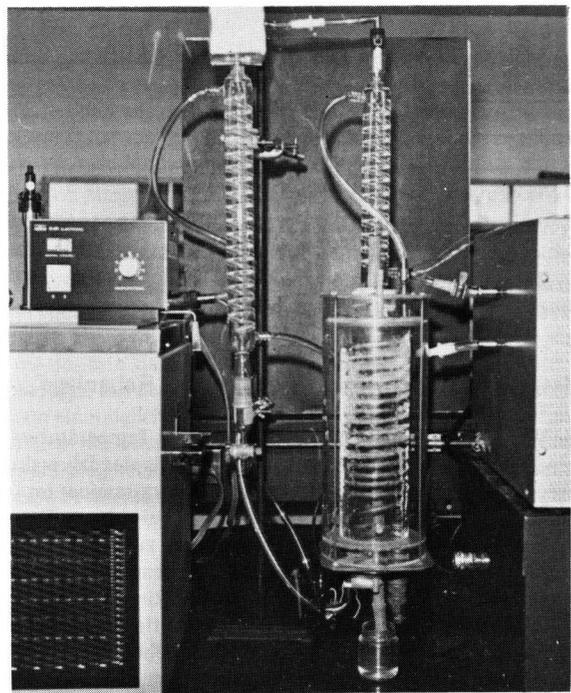


Bild 4. Temperaturregelte Kammer mit eingesetzter Rebstockprobe.

tritt [5, 6]. Die Mobilität der Wassermoleküle bei diesem Transport nimmt mit Absinken der Temperatur und des Feuchtegrads des Gewebes ab [7, 8]. Durch diese Wasserauslagerung erhöht die Pflanze die Konzentration ihrer natürlichen Frostschutzmittel im Zellsaft und kann damit durch Erniedrigung des Gefrierpunktes die Eisbildung innerhalb der Zellen mit abnehmender Temperatur weitgehend verhindern. Bild 5 zeigt, daß ein Teil des Gewebewassers in Obst- und Beerengehölzen auch bei Temperaturen unter -40 °C noch daran gehindert wird, aus der Zellsaftlösung in den Verband von Eiskristallen einzutreten. Der Wassertransport ist ein thermodynamisch reversibler Prozeß, da sich bei der Auslagerung das Potential der verschiedenen molekularen Bindungskräfte in der organischen Strukturmatrix und der Zellsaftlösung vergrößert, daß sich die Zellen nach dem Auftauen mit dem ausgelagerten Wasser völlig rekonstituieren können.

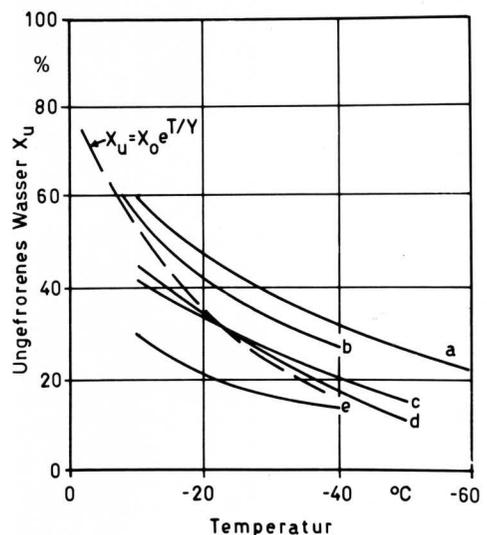


Bild 5. Konzentration des ungefrorenen Wassers (Feuchtegrad) in Zweigen verschiedener Obstgehölze in Abhängigkeit von der Temperatur [7, 9].

a, b Apfel im Februar d Schwarze Johannisbeere im Januar
c Kirsche im Februar e Apfel im Juli

Die Kinetik der Eisbildung ist gekoppelt an den Wärme- und Stoffaustausch des Rebstockes und weiterhin abhängig vom Gefrierpunkt und der Mobilität des Zellwassers. Für die theoretische Analyse des Abkühlvorganges wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Der Gesamtwasserhaushalt des Rebstockes ist stationär, so daß während einer einzelnen täglichen Temperaturschwankung der Austausch mit der Umgebung und die Diffusion von Gewebewasser in radialer Richtung keine signifikanten Werte erreichen. Der Wassertransport des Abkühlungsprozesses beschränkt sich auf den reversiblen Transport zwischen Zelle und ihrer unmittelbaren Umgebung.
2. Die Abkühlung des Rebstockes läßt sich mit guter Näherung mit den Gleichungen für einen homogenen, unendlich langen Zylinder beschreiben.
3. Die Wärmeleitfähigkeit ändert sich mit fortschreitender Eisbildung. Alle anderen Stoffeigenschaften bleiben während der Abkühlung konstant.
4. Das Wachstum der Eiskristalle ist proportional der Konzentration des unterkühlten, freien Zellwassers.
5. Die Konzentration des von den Zellen in nicht gefrorenem Zustand zurückgehaltenen Wassers läßt sich durch eine Exponentialfunktion in Anlehnung an die in Bild 5 dargestellten Funktionen beschreiben.
6. Die Reaktionskonstante der Eisbildung ist in erster Linie eine Funktion des Feuchtegrades und nimmt mit zunehmender Eisbildung linear ab.

Die zeitlichen Änderungen der Temperatur und der Eiskonzentration über dem Rebstockradius lassen sich unter diesen Bedingungen mit Gleichungssystem (1) beschreiben:

$$r = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad T > T_G \quad (1a),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\Delta h_E}{\rho c} \frac{\partial X_E}{\partial t} \quad T < T_G \quad (1b),$$

$$0 < r < r_0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{a}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad T > T_G \quad (1c),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{a}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\Delta h_E}{\rho c} \frac{\partial X_E}{\partial t} \quad T < T_G \quad (1d),$$

$$r = r_0$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{a}{\lambda} (T_L - T) \quad T > T_G \quad (1e),$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{a}{\lambda} (T_L - T) + \frac{\Delta h_E}{\rho c} \frac{\partial X_E}{\partial t} \quad T < T_G \quad (1f),$$

$$T_L = T_L(t) \quad (1g);$$

$$0 < r < r_0$$

$$\frac{\partial X_E}{\partial t} = k_E [X_0 - (X_u + X_E)] \quad (1h),$$

$$k_E = k_0 - (k_0 - k_G) \frac{X_E}{X_0} \quad (1i),$$

$$X_u = X_0 e^{T/Y} \quad (1j),$$

$$\lambda = \frac{X_E}{1 + X_E} \lambda_E + \left(1 - \frac{X_E}{1 + X_E}\right) \lambda_R \quad (1k),$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (1l).$$

Das Gleichungssystem (1) wurde numerisch (ADEP) gelöst, um Gewebetemperatur und Eisbildung als Zeit- und Ortsfunktionen über dem Rebstockquerschnitt zu bestimmen. Die simulierten Temperaturwerte wurden dann mit Meßwerten verglichen, die während der Gefrierversuche registriert wurden. Bild 6 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und durch Simulation errechneten Temperaturwerten eines typischen Versuches, dessen Anfangswerte und Versuchsparameter in Tafel 1 angegeben sind. In der Simulation ergaben sich maximale Temperaturunterschiede von 1,2 °C zwischen der Rebstockmitte und -oberfläche.

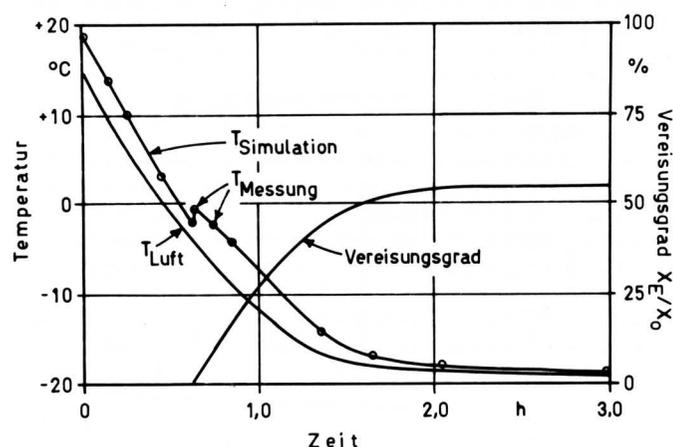


Bild 6. Rebstocktemperaturen und Vereisungsgrad als Funktion der Zeit für $r = 2,6$ mm im Gefrierversuch; Gewürztraminer, $r_0 = 9,3$ mm.

Symbol des Anfangswertes oder Parameters	Zahlenwert	Einheit	Quelle
c	0,78	kJ/kg K	[4, 10]
Δh_E	252,0	kJ/kg	[11]
k_0	50,0	h^{-1}	empirisch
k_G	30,0	h^{-1}	empirisch
T_G	-2,0	°C	[5, 6]
X_0	0,45	kg/kg	gemessen
a	40,0	kJ/h m^2 K	[12]
λ_E	2,0	kJ/m h K	[4, 10]
λ_R	0,45	kJ/m h K	[4, 10]
ρ	850,0	kg/ m^3	[4, 10]
Y	23,5	°C	empirisch

Tafel 1. Anfangswerte und Versuchsparameter eines typischen Gefrierversuches.

Ähnlich geringe Unterschiede wurden auch im Feldversuch gemessen [2]. Der Beginn der Eisbildung ist im Kurvenverlauf mit dem Temperaturanstieg bei $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ deutlich markiert. Die gute Übereinstimmung der gemessenen Temperaturwerte mit den Simulationswerten berechtigt zur Annahme, daß das Simulationsmodell auch den nur schwer meßbaren Vereisungsgrad X_E/X_0 , der nach 3 Stunden auf ca. 55 % angestiegen ist, mit ähnlichem Zuverlässigkeitsgrad voraussagen kann.

3.2 Analyse und Beobachtung von Gewebeschäden durch Eisbildung

Der Einfluß der Temperatur auf die Dichte von Wasser und Eis ist in Bild 7 dargestellt. Die Volumenänderung beim Phasenwechsel läßt sich aus dem Verhältnis $V_{\text{Eis}}/V_{\text{Wasser}} = \rho_{\text{Wasser}}/\rho_{\text{Eis}}$ berechnen. Danach ergibt sich für den Temperaturbereich von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine volumetrische Expansion von 8 % bis 9 % [3, 13]. Diese Ausdehnung kann mechanische Gewebeschäden verursachen, deren Größe vom Ausmaß der Eisbildung und von den strukturellen Eigenschaften des Entstehungsortes abhängen.

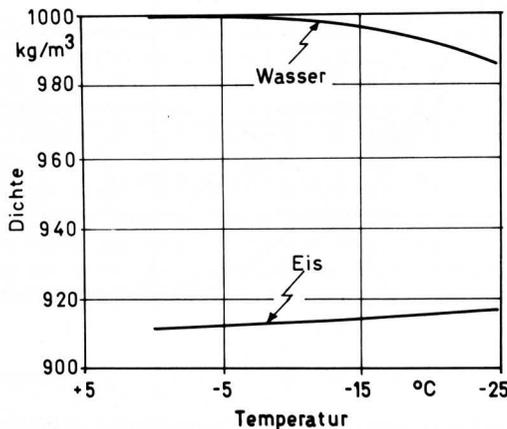


Bild 7. Dichte von Eis und unterkühltem Wasser als Funktion der Temperatur [13].

Das Ausmaß der Eisbildung wird bestimmt von der Konzentration der im Zellsaft enthaltenen Elektrolyte (natürlichen Frostschutzmittel) und von der Fähigkeit der Rebe, ihren Wassergehalt im Winter auf minimalem Niveau zu halten. Winterharte Rebsorten speichern während ihrer im Herbst rechtzeitig abgeschlossenen Holzreifung entsprechend große Mengen von Kohlehydraten und Eiweißstoffen, die im Winter zum Frostschutz zur Verfügung stehen [14 bis 18]. Mikroskopische Untersuchungen ergaben, daß frostharte Sorten der Gattung *Vitis Labrusca* im Winter deutlich größere Mengen Callose zum Verschließen der Poren des Siebteils und größere Mengen Suberin zur Versiegelung der Oberflächen eingelagert haben als die empfindlicheren Sorten der Gattung *Vitis Vinifera* [3]. Sie sind damit nachhaltiger sowohl gegen konvektive Wasseraufnahme von außen als auch gegen interne Diffusion von Wasser im Phloem geschützt. Die Ergebnisse der Feldversuche bestätigten, daß *Labrusca*-Sorten ihren Wassergehalt mit größerer Stabilität auf niedrigerem Niveau halten als *Vinifera*-Sorten, Bild 8. Die stärkere Wasseraufnahme der *Vitis Vinifera* in Tauwetterperioden — begünstigt durch die starke Wirksamkeit ihrer Kapillaren [19] — trägt mit hoher Wahrscheinlichkeit wesentlich dazu bei, daß sie während der darauf folgenden harten Frostperioden des Kontinentalklimas starke Schäden erleidet. Diese Vermutung wurde durch die Beobachtung gestützt, daß *Vinifera*-Sorten selbst auf wasserdurchlässigen Böden in leichten Mulden mit vorübergehender Ansammlung von Tauwasser nicht überleben können, während *Labrusca*-Sorten auch bei geringer Staunässe noch keinen Schaden nehmen. Dieselben Tendenzen wurden auch durch die Untersuchungen von *Parsons*, der bei *Cornus Stolonifera Michx.*

mit abnehmendem Wassergehalt eine höhere Winterfestigkeit feststellte, eindeutig bestätigt [20]. Er konnte in seinen Versuchen ferner nachweisen, daß bei einer Verlängerung der Photoperiode (Tageslänge) während der Holzreifung die vorwinterliche Absenkung des Wassergehaltes für die Gefrierpunktniedrigung und die Versiegelung der Wurzeloberfläche für die Verhinderung unzeitgemäßer Wasseraufnahme erheblich vermindert wurden. Solche Effekte sind in bestimmtem Umfang auch zu erwarten, wenn nordeuropäische, an eine kürzere Photoperiode angepaßte Rebsorten in Gegenden mit längerer herbsterlicher Photoperiode angebaut werden. Untersuchungen des Einflusses von Photoperiode, Temperaturgang und anderer Klimafaktoren auf sortenspezifische Schutzmaßnahmen zur Regulierung des Wasserhaushaltes während der Winterruhe scheinen weitere Antworten zur Frage der Frostresistenz geben zu können.

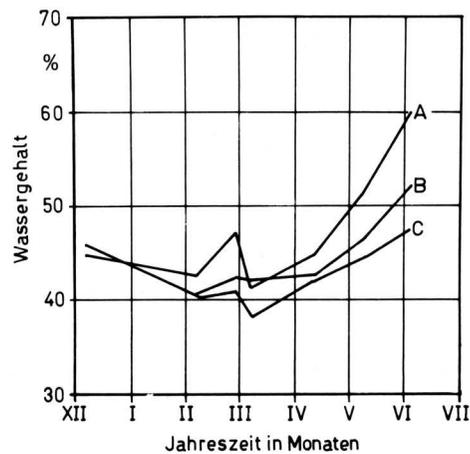
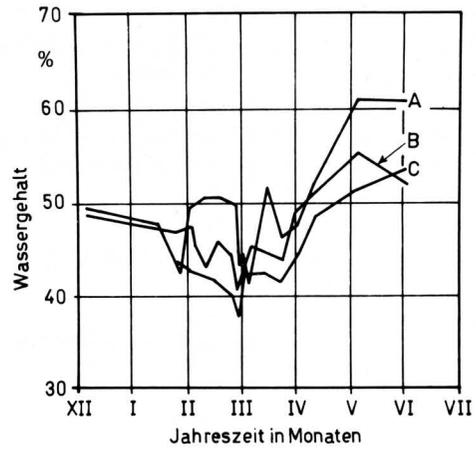


Bild 8. Wassergehalt des Rebstockgewebes im Winter bei der *Vinifera*-Sorte Gewürztraminer (oben) und der *Labrusca*-Sorte Concord (unten) [2, 3].

- A Phloem
- B Xylem
- C Mark (inneres Xylem)

Die Einwirkungen der Eiskristalle auf die Gewebestruktur wurden mikroskopisch untersucht. Dabei zeigte sich, daß die Eisbildung im Xylem hauptsächlich in den Poren und an der Wandung der größeren Gefäße stattfindet [3]. Die Eiskristalle können sich, selbst bei Temperaturen unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, größtenteils in den freien Raum hinein ausdehnen und übertragen daher nur in geringem Maße Dehnungskräfte auf die mit abnehmender Temperatur schrumpfenden Xylemstrukturen, Bild 9.

Eisbildung im Phloem, **Bild 10**, das im Vergleich zum Xylem einen wesentlich geringeren Anteil von Hohlräumen besitzt, scheint sowohl innerhalb der Zellen als auch in den Siebgefäßen zu erfolgen. Die Ausdehnung der Eiskristalle überträgt sich daher in stärkerem Maße auf das Gewebe und überlagert die frostbedingte Schrumpfung der Strukturelemente des Phloems. Mit diesen Auswirkungen der Eisbildung läßt sich nicht nur die im Vergleich zum Phloem stärkere Schrumpfung des Xylems erklären, die in früheren Untersuchungen gemessen wurde [21, 22], sondern auch das Auftreten erheblicher Spannungen, die entsprechende mechanische Beschädigungen vor allem im Phloem verursachen können.

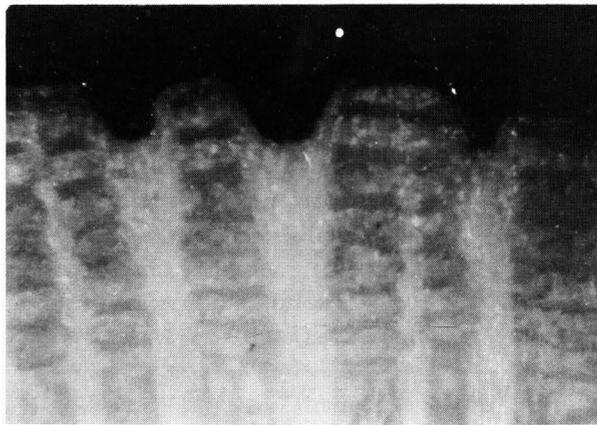
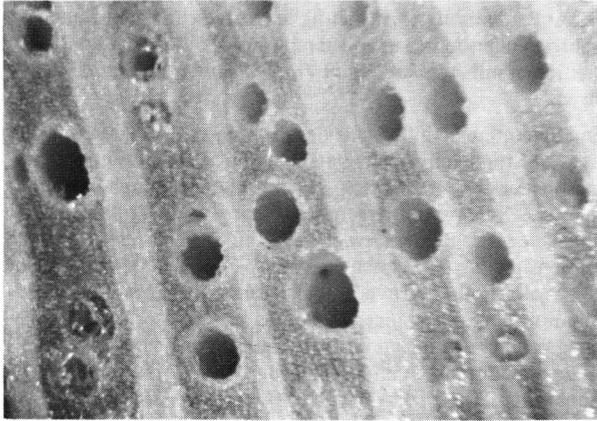


Bild 9 und 10. Eisbildung im Rebstockgewebe bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; Gewürztraminer, Schnitt und Photographie bei Frosttemperatur in der Gefrierkammer [3], Vergrößerung etwa 150fach.
Bild 9. Xylem
Bild 10. Phloem

Die unterschiedliche Schrumpfung von Phloem und Xylem führt bei abnehmenden Temperaturen unter dem Gefrierpunkt prinzipiell zu den in **Bild 11** schematisch dargestellten radialen Zugspannungen in der Nähe des Kambiums, wo die beiden Geweberegionen aufeinanderstoßen. Zug- und Scherspannungen lassen sich in Polarkoordinaten durch folgende Gleichungen beschreiben:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2a),$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} = 0 \quad (2b).$$

Unter der Annahme rotationssymmetrischer Spannungsverteilung, $\partial \sigma_r / \partial \theta = 0$ und $\partial \tau_{r\theta} / \partial \theta = 0$, sowie mit den Randbedingungen $\sigma_r = \sigma_{rc}$ und $\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta c}$, wenn $r = r_c$, ergibt Gleichungssystem (2) folgende Lösungen:

$$\sigma_r = \sigma_\theta + (\sigma_{rc} - \sigma_\theta) \frac{r_c}{r} \quad (3a),$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta c} \left(\frac{r_c}{r}\right)^2 \quad (3b).$$

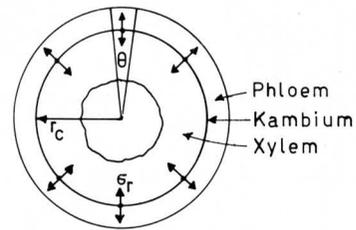


Bild 11. Spannungsverteilung im Rebholzquerschnitt (schematisch).

Die Gl. (3a) besagt, daß die radiale Zugspannung in der Kambiumzone ihr Maximum erreicht und mit zunehmendem Radius zur Oberfläche hin abnimmt. Da das Kambium wegen geringer Einlagerung von Fasern und Bindematerial die schwächste Gewebeschicht des Rebstockes darstellt, dürften mechanische Beschädigungen besonders in seinem Bereich zu erwarten sein. Typische tangential verlaufende Risse wurden in Gefrierversuchen mit sehr niedrigen Temperaturen sichtbar, wenn auch das Phloem eine größere Steifheit erlangt und die auftretenden Zugspannungen nicht im gleichen Maße wie bei normalen Frosttemperaturen durch elastische Verformung ausgleichen kann, **Bild 12**. Die Scherspannungen erreichen ebenfalls ihr Maximum in der Kambiumzone. Sie nehmen zur Oberfläche hin allerdings schneller ab als die radialen Zugspannungen.

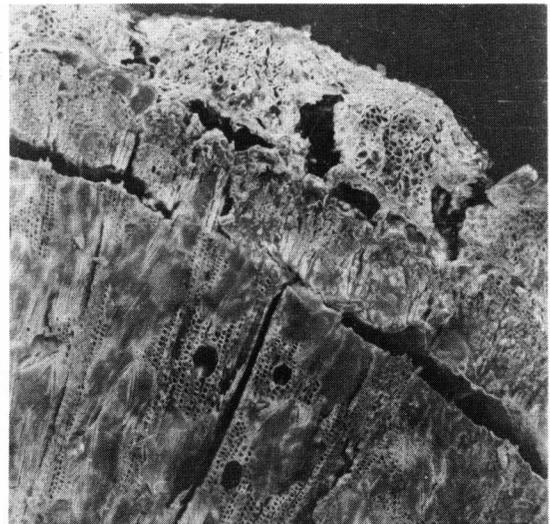


Bild 12. Frostschäden im Kambium bei Gefrierversuch mit flüssigem Stickstoff, Vergrößerung etwa 50fach (SEM).

Eine quantitative Analyse des Dehnungsverhaltens individueller Zell- und Gefäßwände war wegen mangelnder Informationen über die Wasserbewegung und Stoffwerte des Wandmaterials nicht möglich. Die Auswirkungen der Frosteinwirkung im Versuch wurden daher durch mikroskopische Untersuchungen von Gewebeschnitten erfaßt. Versuchstemperaturen von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ließen bei einem Vergleich mit gesundem Gewebe, **Bild 13**, keine Frostschäden erkennen, während bei $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine weitgehende Zerstörung des Phloems einschließlich des Phellems zu verzeichnen war, **Bild 14**.

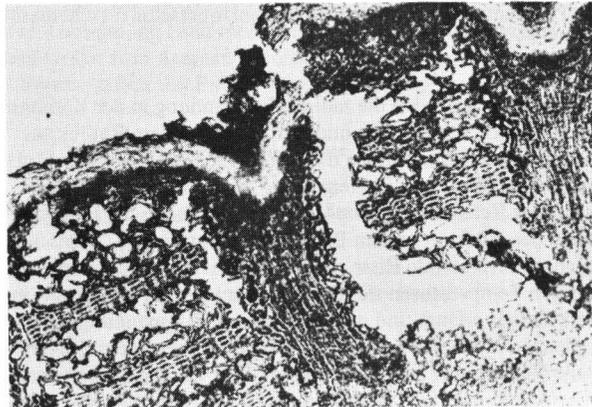
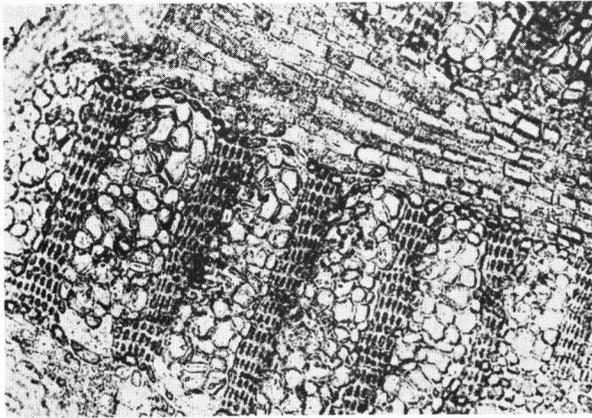


Bild 13 und 14. Vergleich von ungeschädigtem und durch Eisbildung geschädigtem Phloem der Sorte Gewürztraminer [3], Mikrotomschnitt, Vergrößerung etwa 120fach.

Bild 13. Ungeschädigtes Phloem

Bild 14. Nach Gefrierversuch mit - 25 °C geschädigtes Phloem

Das Ausmaß der Gewebeschäden wurde nach dem Auftauen an der Oberfläche des Phelms durch das Erscheinen von Zell- und Gewebeflüssigkeit angezeigt, **Bild 15**, deren Menge generell mit dem Wassergehalt des Phloems und dem Absinken der Temperaturen korrelierte [3]. Proben, die im Januar für die Gefrierversuche geschnitten wurden, zeigten dieses Symptom bei etwa - 21 °C.

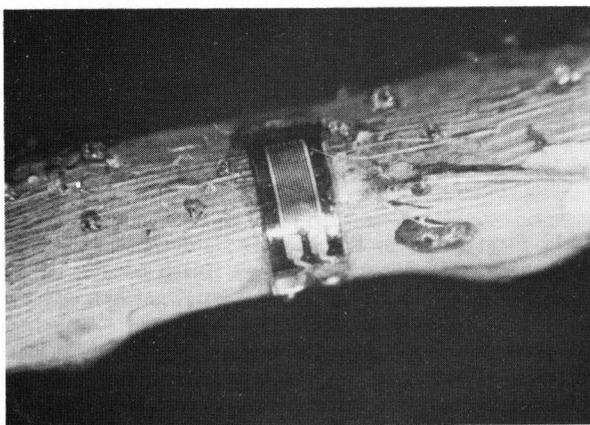


Bild 15. Austritt von Gewebeflüssigkeit als Folge von Frostschäden; Gewürztraminer, am 2.2.1978 geschnitten, Wassergehalt durch 24 stündiges Eintauchen von 50 % auf 52 % angehoben [2, 3].

Bis zum Monat Mai stieg die oberste Temperatur, bei der Schäden beobachtet werden, etwa linear auf einen Wert von - 10 °C an, **Bild 16**. Dieser Anstieg entspricht etwa der Zunahme des Wassergehaltes der Reben in Bild 8. Die in den Laborversuchen beobachteten Symptome des Saftaustrittes wurden im Frühjahr 1978 auch in den Rebanlagen der Niagara-Halbinsel festgestellt [2, 3]. Solche Reben entwickelten später im Frühjahr und Sommer, wenn das frostgeschädigte Phloem in der intensiven Sonnenbestrahlung eine übermäßige Wasserverdunstung und Austrocknung des darunter liegenden Gewebes mit entsprechender Schrumpfung nicht verhindern konnte, in Richtung der Stammachse etwa 0,1 bis 0,6 m lange und mehrere Millimeter weite, bis ins Mark reichende Risse [23]. Außerdem zeigten sie häufig in frostgeschädigten Zonen des vorausgehenden Jahres unvollständig ausgeheilte Risse und von Infektionen mit *Agrobacterium Tumefaciens* verursachte Wucherungen.

Wenn die untere Schnittfläche der Proben vor dem Gefrierversuch für ca. 24 Stunden in Wasser getaucht wurde, konnte sich wegen der schnellen Wasseraufnahme durch das sehr wirksame Kapillarsystem des Xylems und wegen des offenbar geringen Diffusionswiderstandes das Phloem soweit sättigen, daß dann dieselbe Schadenintensität zu verzeichnen war wie später bei vollem Saftanstieg im Frühjahr, Bild 16. Diese Tatsache unterstreicht nochmals die Bedeutung der vollständigen Holzreife mit entsprechender Einlagerung von Schutzstoffen für Gefrierpunktniedrigung und Gefäß- und Membranverschluß sowie eines Standortes ohne jegliche Staunisse.

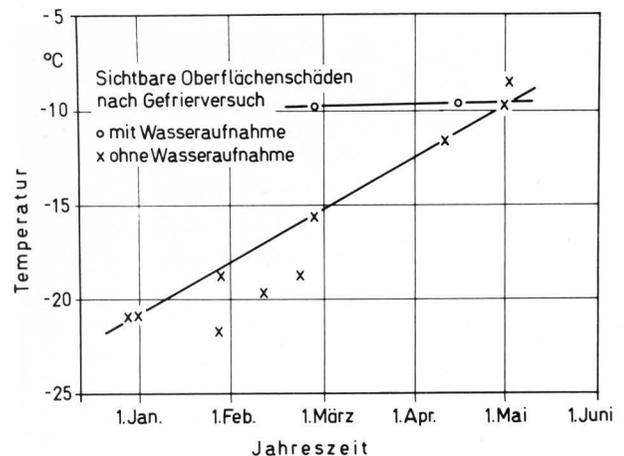


Bild 16. Kritische Temperaturen für den Austritt von Gewebeflüssigkeit als Folge von Frostschäden in Abhängigkeit von der Jahreszeit [2, 3].

4. Schlußfolgerungen

Die durch Sonneneinstrahlung bedingten sektoriellen Temperaturunterschiede in Rebstöcken verursachen im Winter nur unbedeutende Unterschiede im Wärmedehnungsverhalten, die mechanische Beschädigungen des Gewebes praktisch ausschließen. Das Dehnungsverhalten des im Gewebe eingeschlossenen Wassers kann dagegen beim Phasenwechsel zu Eis genügend große Spannungen entstehen lassen, um schwere Gewebeschäden herbeizuführen.

Das freie Poren- und Gefäßvolumen des Xylems (Holzgewebe) reicht aus, um den Kontakt der Eiskristalle mit dem Gewebe und folglich auch die Übertragung von Dehnungskräften klein zu halten. Weiterhin besitzt das Xylem kaum Zellen, in denen Wasser zu Eis gefrieren kann.

Das Phloem (Rindengewebe) hat ein wesentlich geringeres Poren- und Gefäßvolumen, das Eiskristalle aufnehmen kann. Die Dehnungskräfte des Eises werden daher in starkem Maße auf das Gewebe übertragen und verursachen mechanische Beschädigungen in den Zell- und Gefäßwänden sowie in der Gewebestruktur.

Das unterschiedliche Dehnungsverhalten von Phloem und Xylem verursacht radiale Zugspannungen, die ihr Maximum im Kambium erreichen, aber nur bei extrem niedrigen Temperaturen zu mechanischen Schäden führen.

Das Ausmaß der Eisbildung und der dadurch verursachten Gewebeschäden steht in direktem Zusammenhang zur Fähigkeit der Rebsorte, ihre Wasserkonzentration nach vollständiger Holzreife mit entsprechender Einlagerung von natürlichen Frostschutzmitteln im Winter genügend niedrig zu halten. Kulturmaßnahmen, die dieses Ziel unterstützen, sind vor allem Auswahl frühreifer Sorten, Vermeiden übermäßiger Nutzung und Anbau auf trockenen Standorten ohne Staunässe im Winter.

Verwendete Formelzeichen

a	Temperaturleitfähigkeit des Rebstockgewebes
c	Spez. Wärme des Rebstockgewebes
Δh_E	Schmelzwärme des Eises
k_E	Durchschnittliche Reaktionskonstante der Eisbildung
k_0	Reaktionskonstante der Eisbildung bei $X_E = 0$
k_G	Reaktionskonstante der Eisbildung bei $X_E = X_0$
r	Radius auf dem Rebstockquerschnitt
r_c	Radius des Kambiums
r_0	Radius der Rebstockoberfläche
T	Temperatur des Rebstockgewebes
T_G	Gefriertemperatur der Gewebeflüssigkeit
T_L	Lufttemperatur
t	Zeit
X_E	Eiskonzentration, angegeben als Feuchtegrad
X_0	Feuchtegrad des Rebstockgewebes zur Zeit $t = 0$
X_u	Feuchtegrad des nicht gefrorenen, unterkühlten Wassers
Y	empirische Konstante
α	Wärmeübergangskoeffizient
θ	Winkel auf dem Rebstockquerschnitt
λ	Wärmeleitfähigkeit des Rebstockgewebes
λ_R	Wärmeleitfähigkeit des Rebstockgewebes bei $T = T_G$
λ_E	Wärmeleitfähigkeit des Eises
ρ	Dichte des Rebstockgewebes
σ_r	Radiale Zugspannung im Querschnitt des Rebstockes
σ_{rc}	Radiale Zugspannung an der Innenseite des Kambiums
σ_θ	Tangentiale Zugspannung im Querschnitt des Rebstockes
$\tau_{r\theta}$	Scherspannung im Querschnitt des Rebstockes
τ_{rc}	Scherspannung an der Innenseite des Kambiums

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● *Crandall, S.H. u. P.M. Nagli*: An introduction to the mechanics of solids. New York: McGraw-Hill 1959.
- [2] *Paroschy, J.H. u. A.G. Meiering*: Winterhardiness of Vinifera and Vinifera hybrid grape varieties. Research report, School of Engineering, Univ. of Guelph, 1978, 204 S.
- [3] *Paroschy, J.H.*: Mechanical Winterinjury in grapevine trunks. Ph.D.-Thesis, School of Engineering, Univ. of Guelph, 1978, 147 S.
- [4] ● *Hütte*: Taschenbuch der Werkstoffkunde. Berlin: Wilh. Ernst & Sohn 1967.
- [5] *Pogosyan, K.S.*: The effect of freezing rate on survival of grapevine tissue. Soviet Plant Physiology, Translation from Fiziologiya Rastenii Bd. 18 (1971) Nr. 1, S. 145/50.
- [6] *Pogosyan, K.S.*: Caracteres physiologiques de la resistance au froid des differentes varietes et formes de vigne. Vitis Bd. 13 (1975) S. 287/91.
- [7] *Krasavtsev, O.A.*: Amount of unfrozen water in woody plants at different temperatures. Soviet Plant Physiology, Translation from Fiziologiya Rastenii Bd. 15 (1968) Nr. 2, S. 191/97.
- [8] *Krasavtsev, O.A.*: Rate of water outflow from cells of frost resistant plants at negative temperatures. Soviet Plant Physiology, Translation from Fiziologiya Rastenii Bd. 17 (1970) Nr. 3, S. 417/22.
- [9] *Krasavtsev, O.A.*: Heat exchange in wood plants with gradual freezing and thawing. Soviet Plant Physiology, Translation from Fiziologiya Rastenii Bd. 16 (1969) Nr. 6, S. 846/51.
- [10] ● *Handbook of Applied Engineering Science*. Chemical Rubber Co. Inc. Cleveland, Ohio, 1970.
- [11] *Milon, G. u. M.J. Brike*: Supercooling in overwintering azalea flower buds. Plant Physiol. Bd. 59 (1977) Nr. 2, S. 326/28.
- [12] ● *Dubbel*: Taschenbuch für den Maschinenbau. Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1970.
- [13] *Rasmussen, D.H. u. A.P. Mackenzie*: Clustering in supercooled water. The Journal of Chem. Physics Bd. 59 (1973) Nr. 9, S. 5003/13.
- [14] *Heber, U. u. M. Kempfle*: Protein als Schutzstoffe gegenüber dem Gefriertod der Zelle. Zeitschr. f. Naturforschung, Bd. 25b (1970) H. 80, S. 834/42.
- [15] *Levitt, J.*: Effects of artificial increases in sugar content on frost hardiness. Plant Physiol. Bd. 34 (1959) Nr. 4, S. 401/22.
- [16] *Reuther, G.*: Die Dynamik des Kohlehydratmetabolismus von Obstgehölzen in Abhängigkeit von der Winterruhe. Ber. Dtschn. Bot. Ges. Bd. 84 (1971) H. 10, S. 571/83.
- [17] *Reuther, G.*: Physiologische Kriterien der Klimaresistenz als Sortenspezifische Merkmale. Angew. Botanik Bd. 49 (1975) S. 75/91.
- [18] *Sakai, A. u. S. Yoshida*: The role of sugar and related compounds in variations of freezing resistance. Cryobiology Bd. 5 (1968) Nr. 3, S. 160/74.
- [19] ● *Price, C.A.*: Molecular approaches to plant physiology. New York: McGraw-Hill 1970.
- [20] *Parsons, L.R.*: Water relations, stomatal behavior and root conductivity of red osier dogwood during acclimation to freezing temperatures. Plant. Physiol. Bd. 62 (1978) Nr. 1, S. 64/70.
- [21] *Newton, A.*: Engineering aspects of winter injury in grapevines. M.Sc.-Thesis, School of Engineering, Univ. of Guelph, 1977.
- [22] *Paroschy, J.H.*: Mechanics of winterkill in grapevines. M.Sc.-Thesis, School of Engineering, Univ. of Guelph, 1974.
- [23] *Paroschy, J.H., A.G. Meiering, R.L. Peterson, G. Hostetter u. A. Neff*: Winter injury of grapevine trunks in the north eastern grape growing regions. ASE-Paper No. 7, Las Vegas, 1979.