

**Einfluss der Düngung auf die Frosthärte  
stecklingsvermehrter *Rosa* 'Sommerabend' und  
*Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'**

---

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Gottfried Wilhelm Leibniz  
Universität Hannover zur Erlangung des Grades einer

Doktorin der Gartenbauwissenschaften

**- Dr. rer. hort. -**

genehmigte Dissertation  
von

Dipl.-Ing. agr. Petra Mensing  
geboren am 06.01.1974 in Hannover

2007

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Spethmann

Korreferent: Prof. Dr. rer. hort. Donnchadh Mac Cárthaigh

Tag der Promotion: 17. November 2006

## Kurzfassung

Der Einfluss der Düngung auf die Frosthärte kann in verschiedene Bereiche unterteilt werden: 1. Pflanzen im gewachsenen Boden, 2. Pflanzen im Container im Freiland oder unter kontrollierten Bedingungen und 3. bewurzelte Stecklinge. Eine genaue Temperaturangabe der Frosttoleranz ist in Freilandversuchen nur mit einem hohen Messaufwand (hoher Bedarf an Messstationen) möglich. Eine Differenzierung zwischen Früh-, Tief- oder Spätfrostschaden kann meist nicht getroffen werden. Die Frosttoleranz stecklingsvermehrter Gehölze im ersten Winter ist bisher wenig erforscht und daher Gegenstand dieser Dissertation.

Das Ziel dieser Arbeit war neben der Untersuchung des Düngereinflusses auf die Frosthärte speziell für bewurzelte Stecklinge (Bestimmung der Elektrischen Leitfähigkeit), die Überprüfung der Chlorophyllfluoreszenzmethode hinsichtlich ihrer Eignung zur Frosthärtebestimmung bei stecklingsvermehrten Gehölzen unterschiedlicher Düngevarianten. Dazu wurden in verschiedenen Versuchen (N, P, K) jeweils Früh-, Tief- und Spätfrosttoleranz von stecklingsvermehrten *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' unter kontrollierten Bedingungen in der Klimakammer getestet.

Eine erhöhte **Stickstoff**düngung hat sich dabei negativ auf Frühfrosthärte von *R.* 'Sommerabend' und *P. laurocerasus* 'Rotundifolia' ausgewirkt. Eine erhöhte **Kalium**-gabe führte im Frühfrost zu einem positiven, im Spätfrosttest jedoch zu einem negativen Effekt auf die Frosthärte der *R.* 'Sommerabend'-Stecklinge. Die *P. laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge zeigten dagegen keine Veränderung der Frosthärte bei gesteigerter Kaliumernährung. Eine erhöhte **Phosphor**düngung wirkte sich über eine vermehrte Stickstoffaufnahme negativ auf die Früh-, Tief- und Spätfrosthärte beider Arten aus. Die Chlorophyllfluoreszenzmessung zeigte sich auch bei unterschiedlichen Düngegraden als geeignete Methode zur Bestimmung der Frosthärte chlorophyllhaltigen Materials.

Schlagwörter: Frosthärte, stecklingsvermehrte Gehölze, Düngung

## Abstract

The frost hardiness as influenced by fertilisation is divided into three different categories: 1. Plants in natural soil, 2. Container plants grown in the open or under controlled conditions and 3. rooted cuttings. An exact temperature specification of frost tolerance in outdoor exposure tests is only possible with a high technical input. A differentiation between early-, deep- or late-frost damage cannot be done in most cases. Little research has been done on the frost hardiness of rooted cuttings. Therefore, this is the subject of this thesis.

The goal of this thesis was to investigate the influence of fertilisation on the frost hardiness of rooted cuttings by measuring electrical conductivity. Furthermore the chlorophyll fluorescence method in regard to its suitability for measuring frost hardiness of cuttings with different fertilization treatments was examined. Early-, deep- and late-frost damage of rooted cuttings of *Rosa* 'Sommerabend' and *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' were measured in different experiments (N, P, K) under controlled conditions (climate chamber).

An increased **nitrogen** fertilisation affected frost hardiness of *R.* 'Sommerabend' and *P. laurocerasus* 'Rotundifolia' negatively. In the **potassium** experiment early-frost hardiness of *R.* 'Sommerabend' rooted cuttings was affected positively by higher application of Potassium, whereas late-frost hardiness decreased. Frost hardiness of *P. laurocerasus* 'Rotundifolia' was not affected by potassium fertilisation. An increased **phosphorus** application during the phosphorus experiment affected early-, deep- and late-frost hardiness negatively in both species.

The chlorophyll fluorescence measurement seems to be a suitable method for the determination of frost hardiness of chlorophyllous material with different fertilization rates.

Key words: frost hardiness, rooted cuttings, fertilization

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Material und Methoden</b>	<b>20</b>
<b>3. Einfluss von Stickstoff auf die Frosthärte</b>	<b>32</b>
3.1 Einleitung	32
3.2 Ergebnisse	37
3.2.1 Einfluss von Stickstoff auf die Frosthärte von <i>Rosa</i> 'Sommerabend'	37
3.2.2 Einfluss von Stickstoff auf die Frosthärte von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'	41
3.3 Diskussion	48
<b>4. Einfluss von Kalium auf die Frosthärte</b>	<b>57</b>
4.1 Einleitung	57
4.2 Ergebnisse	58
4.2.1 Einfluss von Kalium auf die Frosthärte von <i>Rosa</i> 'Sommerabend'	58
4.2.2 Einfluss von Kalium auf die Frosthärte von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'	61
4.3 Diskussion	67
<b>5. Einfluss des Verhältnisses K/N auf die Frosthärte</b>	<b>72</b>
5.1 Einleitung	72
5.2 Ergebnisse	74
5.2.1 Einfluss des Verhältnisses K/N auf die Frosthärte von <i>Rosa</i> 'Sommerabend'	74
5.2.2 Einfluss des Verhältnisses K/N auf die Frosthärte von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'	87
5.3 Diskussion	96
<b>6. Einfluss von Phosphor auf die Frosthärte</b>	<b>99</b>
6.1 Einleitung	99
6.2 Ergebnisse	101
6.2.1 Einfluss von Phosphor auf die Frosthärte von <i>Rosa</i> 'Sommerabend'	101
6.2.2 Einfluss von Phosphor auf die Frosthärte von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'	113
6.3 Diskussion	127
<b>7. Zusammenfassende Diskussion</b>	<b>132</b>
<b>8. Zukunftsaussichten</b>	<b>139</b>
<b>9. Kritik der eigenen Arbeit und Verbesserungsvorschläge</b>	<b>141</b>
<b>10. Literaturverzeichnis</b>	<b>145</b>
<b>11. Anhang</b>	<b>167</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Intrazelluläres und extrazelluläres Gefrieren von Hefezellen.	3
Abbildung 1.2: Die Frosttoleranz verschiedener Organe, Gewebetypen und Lebensstadien von <i>Abies alba</i> und <i>Acer pseudoplatanus</i> im Winter und während des Frühlings bzw. Sommers.	5
Abbildung 1.3: Phänologische, cytologische, cytochemische und physiologische Prozesse in Bezug auf die Frosthärte am Bsp. <i>Robinia</i> .	6
Abbildung 1.4: Strukturformel Prolin	13
Abbildung 1.5: Ursachen und Ablauf der Schädigungen kälteempfindlicher Pflanzenzellen.	14
Abbildung 1.6: Auswirkungen von Froststress auf die Membranen am Bsp. Raps.	16
Abbildung 2.1: <i>Rosa</i> 'Sommerabend'	20
Abbildung 2.2: <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'	21
Abbildung 2.3: Steckling von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'	21
Abbildung 2.4: Foliengewächshaus mit Foganlage in Ruthe	21
Abbildung 2.5: Übersicht über die Verwendung der Stecklinge für Frosttests und Mineralstoffanalysen am Beispiel des Stickstoffversuches	25
Abbildung 2.6: Exemplarischer Temperaturverlauf einer Klimakammer im Tieffrosttest	28
Abbildung 3.1: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher N-Ernährung.	37
Abbildung 3.2: Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost.	38
Abbildung 3.3: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher N-Ernährung.	39
Abbildung 3.4: Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) im Frühfrost.	40
Abbildung 3.5: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher N-Ernährung.	42

- Abbildung 3.6: Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost. 43
- Abbildung 3.7: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher N-Ernährung. 44
- Abbildung 3.8: Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Frühfrost. 45
- Abbildung 3.9: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher N-Ernährung. 46
- Abbildung 3.10: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher N-Ernährung. 46
- Abbildung 3.11: Stickstoffüberschuss- bzw. Stickstoffmangelpflanze von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' am 05. Nov. 2002 53
- Abbildung 3.12: Stickstoffüberschuss- bzw. Stickstoffmangelpflanze von *Rosa* 'Sommerabend' am 05. Nov. 2002 53
- Abbildung 4.1: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher K-Ernährung. 59
- Abbildung 4.2: Einfluss der K-Ernährung auf den K-Gehalt sowie die REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost. 60
- Abbildung 4.3: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K-Ernährung. 62
- Abbildung 4.4: Einfluss der K-Ernährung auf den K-Gehalt sowie die REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost. 63
- Abbildung 4.5: Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung. 64
- Abbildung 4.6: Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung. 65
- Abbildung 4.7: Einfluss der Frostungstemperatur (Spätfrost, -10 °C) auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung. 66

Abbildung 5.1: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004.	75
Abbildung 5.2: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005.	76
Abbildung 5.3: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2003.	77
Abbildung 5.4: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2004.	78
Abbildung 5.5: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) im Tieffrost Januar 2004.	79
Abbildung 5.6: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) im Tieffrost Januar 2005.	80
Abbildung 5.7: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-8 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) im Spätfrost April 2004.	81
Abbildung 5.8: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004.	82
Abbildung 5.9: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005.	83
Abbildung 5.10: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-8 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) im Frühfrost November 2004.	85
Abbildung 5.11: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-8 °C) von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) im Tieffrost Januar 2005.	86
Abbildung 5.12: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung.	87

- Abbildung 5.13: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Parameter  $F_v/F_m$  von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung. 89
- Abbildung 5.14: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost. 91
- Abbildung 5.15: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung. 93
- Abbildung 5.16: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K/N-Ernährung. 95
- Abbildung 6.1: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004. 102
- Abbildung 6.2: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. 103
- Abbildung 6.3: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2003. 104
- Abbildung 6.4: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C und -10 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2004. 105
- Abbildung 6.5: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Tieffrost Januar 2004. 106
- Abbildung 6.6: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Tieffrost Januar 2005. 107
- Abbildung 6.7: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C und -8 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Spätfrost April 2004. 108
- Abbildung 6.8: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004. 110

- Abbildung 6.9: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. 110
- Abbildung 6.10: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004. 113
- Abbildung 6.11: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. 114
- Abbildung 6.12: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Parameter  $F_v/F_m$  von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchsjahr 2003/2004. 116
- Abbildung 6.13: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Parameter  $F_v/F_m$  von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchsjahr 2004/2005. 116
- Abbildung 6.14: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost November 2003. 119
- Abbildung 6.15: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-5 °C) und  $F_v/F_m$  Werte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost November 2004. 119
- Abbildung 6.16: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) und  $F_v/F_m$  Werte (-10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Tieffrost Januar 2004. 120
- Abbildung 6.17: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-10 °C) und  $F_v/F_m$  Werte (-10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Tieffrost Januar 2005. 121
- Abbildung 6.18: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C und -8 °C) und  $F_v/F_m$  Werte (-8 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Spätfrost April 2004. 122
- Abbildung 6.19: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004. 123
- Abbildung 6.20: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. 124

Abbildung 6.21: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Frühfrost November 2004. 126

Abbildung 6.22: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-8 °C und -10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Tieffrost Januar 2005. 126

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Düngevarianten des Stickstoffversuches.	23
Tabelle 2.2: Düngevarianten des Kaliumversuches.	23
Tabelle 2.3.: Düngevarianten des Phosphorversuches.	24
Tabelle 2.4: Düngevarianten des K/N-Versuches.	24
Tabelle 2.5: Zusammenstellung der Termine der einzelnen Frosttests der Jahre 2002 bis 2005.	27
Tabelle 2.6: Tiefsttemperaturen aller durchgeführten Frosttests der Jahre 2002 bis 2005.	27
Tabelle 2.7: Übersicht der durchgeführten Versuche und Analysen der Jahre 2002 bis 2004/2005.	30
Tabelle 3.1: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' und <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher N-Ernährung.	48
Tabelle 3.2: Einfluss der N-Versorgung auf verschiedene Inhaltsstoffe bei <i>Rosa</i> 'Sommerabend' und <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'.	49
Tabelle 3.3: Standardabweichungen (STABW) und Variationskoeffizienten (CV) der <i>Rosa</i> 'Sommerabend' Sprossproben (Frühfrost).	50
Tabelle 3.4: Beurteilung der Stickstoffgehalte verschiedener Gehölze.	52
Tabelle 3.5: Mineralstoffgehalte bei <i>Forsythia x intermedia</i> 'Lynwood'.	54
Tabelle 4.1: Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K-Ernährung.	60
Tabelle 4.2: Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher K-Ernährung.	63
Tabelle 4.3: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' und <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung.	67
Tabelle 4.4: Einfluss der K-Versorgung auf den K-Gehalt von Spross und Wurzel bei <i>Rosa</i> 'Sommerabend' und <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia'.	67
Tabelle 4.5: Beurteilung der Kaliumgehalte verschiedener Gehölze.	69

Tabelle 5.1: Einfluss der Frostungstemperatur (Spätfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung.	84
Tabelle 5.2: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' (Spross) im Tieffrost.	92
Tabelle 5.3: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' (Wurzel) im Frühfrost.	93
Tabelle 5.4: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' (Wurzel) im Tieffrost.	94
Tabelle 5.5: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' und <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K/N-Ernährung	96
Tabelle 6.1: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Spross) im Spätfrost April 2005.	109
Tabelle 6.2: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) im Frühfrost November 2004.	111
Tabelle 6.3: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) im Tieffrost Januar 2005.	111
Tabelle 6.4: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' (Wurzel) im Spätfrost April 2005.	112
Tabelle 6.5: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalte von <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' (Spross) im Spätfrost April 2005.	122
Tabelle 6.6: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von <i>Rosa</i> 'Sommerabend' und <i>Prunus laurocerasus</i> 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher P-Ernährung.	127
Tabelle 6.7: Beurteilung der Phosphorgehalte verschiedener Gehölze.	129
Tabelle 7.1: Einfluss von Stickstoff, Phosphor und Kalium auf die Frosttoleranz in Literaturberichten.	132
Tabelle 11.1: Zusammenstellung der in der Literatur verfügbaren Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der N-, P- bzw. K- Düngung auf die Frosthärte	167
Tabelle 11.2: Zusammenstellung der in der Literatur verfügbaren Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Ca-, Mg- bzw. B- Düngung auf die Frosthärte	170
Tabelle 11.3: Literaturschlüssel zu den Tabellen 11.1 und 11.2	171

## Abkürzungsverzeichnis

$\alpha$	alpha
%	Prozent
‰	Promille
°C	Grad Celcius
AAS	Atom-Absorptions-Spektrometer
Abb.	Abbildung
ADP	Adenosindiphosphat
ATP	Adenosintriphosphat
B	Bor
bi-dest.	entmineralisiert
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
CaCO <sub>3</sub>	Calciumcarbonat
ca.	cirka
CF	Chlorophyllfluoreszenz
cm	Zentimeter
COR	cold regulated
CsCl	Cäsiumchlorid
Cu	Kupfer
CV	Variationskoeffizient
DSC	differential scanning calorimetry
DTA	differential thermal analysis
EIS	Electrical Impedance Spectroscopy
EL	Elektrische Leitfähigkeit
et al.	und andere
evtl.	eventuell
Fe	Eisen
Fm	maximale Fluoreszenz
Fruc	Fructose
Fv	Variable Fluoreszenz
Gluc	Glucose
h	Stunde
H <sub>2</sub> O	Wasser
HCl	Wasserstoffchlorid, Salzsäure
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
IBS	Indolbuttersäure
K	Kalium
K0	Kaliummangel
KN	Kalium-Normal
KÜ	Kaliumüberschuss
K <sub>2</sub> O	Kaliumoxid
LEA	late embryogenesis abundant
µl	Mikroliter
µM	Mikromol
mg / L	Milligramm pro Liter
Mg	Magnesium

MgO	Magnesiumoxid
min	Minuten
ml	Milliliter
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
nm	Nanometer
N0	Stickstoffmangel
NÜ	Stickstoffüberschuss
o. a.	oben angeführt(e, en)
o. g.	oben genannt(e, en)
OS2	2 g Osmocote / L
P	Phosphor
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphoroxid
pH	potentia hydrogenii, negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration
P0	Phosphormangel
PN	Phosphor-Normal
ppm	parts per million
Pro	Prolin
PÜ	Phosphorüberschuss
REL	Relative Elektrische Leitfähigkeit
RF	Relative Feuchte
sig.	signifikant
sp.	Species
STA	simple thermal analysis
TS	Trockensubstanz
TTC	Triphenyl-Tetrazolium-Chlorid
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
z. B.	zum Beispiel
Zn	Zink

## 1. Einleitung

Pflanzen sind vielerlei abiotischen Stresssituationen ausgesetzt. Während die Verfügbarkeit von Wasser die Produktivität beeinflusst, sind Kälte und Frost die ausschlaggebenden Faktoren für die Verbreitung der Pflanzen (SALISBURY & ROSS, 1992). Viele Arten können sich an niedrige Temperaturen akklimatisieren. Die dabei ablaufenden Mechanismen und Veränderungen bei der Anpassung an niedrige Temperaturen sind aber trotz jahrzehntelanger Forschung nicht in allen Einzelheiten bekannt.

Nach heutigen Erkenntnissen setzt sich die Frosthärte aus der Fähigkeit der Vermeidung intrazellulären Gefrierens und der Toleranz interzellulären Gefrierens zusammen. Sie ist keine statische Eigenschaft, sondern variiert mit der Jahreszeit und dem physiologischen Zustand der Pflanze. Wegen dieser Dynamik kann man nicht von Frosttoleranz im Allgemeinen sprechen. Nach LARSEN (1976) ist eine Aufteilung des Begriffes in Früh-, Winter- und Spätfrosttoleranz nötig. Um ein Gesamtbild zu bekommen, müssen mindestens alle drei Teilkomponenten analysiert werden. Ein noch genaueres Bild ergibt sich durch die Ermittlung des Kurvenverlaufs der Frosthärte vom Beginn der Abhärtung bis zum Ende der Enthärtung (siehe auch Abb. 1.3).

In der Literatur werden häufig die Begriffe Frostresistenz und –toleranz gleichwertig verwendet. Eine Resistenz im absoluten Sinn kann allerdings von keiner Pflanze erreicht werden, eine zu 100 % frostharte Pflanze kann es nicht geben. Daher wird in dieser Arbeit der Begriff der Toleranz verwendet.

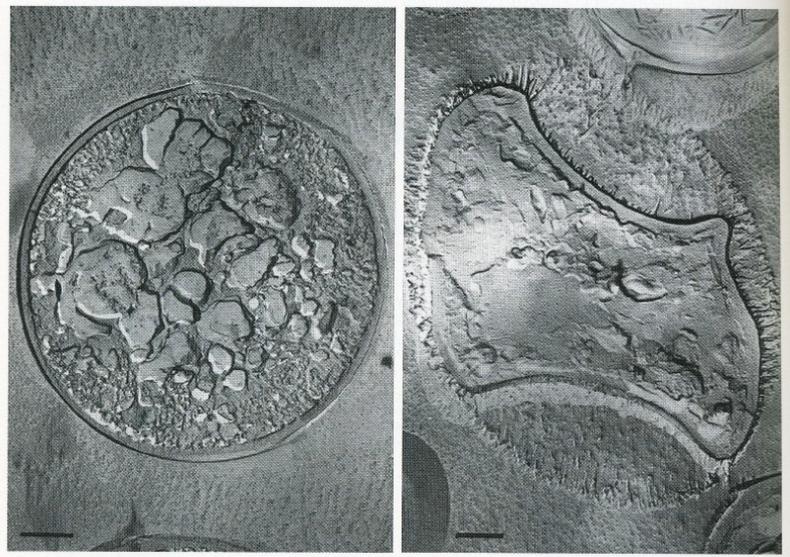
### Theorien zu Frostschäden

Die älteste Theorie zur Frosttoleranz ist die so genannte "**Wärmetheorie**" (HUNTER, 1775; SCHÖPF, 1788; beide zit. in LEVITT, 1956). In den Anfängen der Erforschung der Frosthärte ging diese Theorie davon aus, dass frosttolerante Pflanzen genug Wärme abgeben könnten, um die Eisbildung zu verhindern (LEVITT, 1966). Die "**Zerreitheorie**" (GOODALE, 1885; KERNER VON MARILAUN, 1894; beide zit. in LEVITT, 1956) unterstellte ein Zerreißen der Zellen durch die Ausdehnung des sich bildenden Eises. Da in vielen Versuchen gezeigt wurde, dass Zellen nicht beim Gefrieren zerreißen und dass Eis sich in den interzellulären Zellzwischenräumen

bildet, sind beide Theorien widerlegt worden (LEVITT, 1966, 1980). Beiden Theorien ist gemeinsam, dass sie ohne vorherige experimentelle Untersuchungen aufgestellt wurden. Die von GORKE (1906) aufgestellte "**Zuckertheorie**" beruhte dagegen auf Versuchsergebnissen: GORKE (1906) konnte einen protektiven Effekt von zusätzlichen Zuckergaben beim Frieren von Pflanzenextrakten nachweisen. Dieser Versuchsanstellung lag Getreide zugrunde, eine Übertragung bzw. Verallgemeinerung für alle Pflanzen konnte nicht erreicht werden (LEVITT, 1966a). ILJIN's "**Mechanische Stresstheorie**" (1933), die vermutete, dass Frostschäden durch Druck auf das Protoplasma zwischen Eis außerhalb der Zelle und gefrierendem Zellsaft entstünden, konnte ebenfalls keine umfassende Erklärung geben. LEVITT (1962) führte Frostschäden auf **Disulfidbrücken** zwischen den Proteinen zurück: Durch Dehydrierung während des Frierens schrumpfen die Zellen, reaktive Sulfhydrylgruppen verschiedener Proteine nähern sich dabei an und bilden stabile kovalente Brücken. Durch die Wasseraufnahme während des Auftauens werden die Proteine durch Zellexpansion wieder auseinander gerissen, dadurch bricht die sekundäre Struktur der Proteine zusammen. Die daraus resultierende Proteindenaturierung führt zum Zelltod. Diese Theorie wurde von LEVITT (1966a) später selbst in Frage gestellt und von HEBER & SANTARIUS (1964), SANTARIUS & HEBER (1967) und MAZUR (1969) verworfen. Zeitgleich entstand schließlich die noch heute gültige Theorie, dass Frostschäden durch **intrazelluläres Gefrieren** verursacht werden (ASASHINA, 1961): Der erste Schritt dieses Gefriervorganges besteht in der Bildung **extrazellulären Eises** in den Interzellularen und großen Xylemgefäßen (LEVITT, 1980). Der Dampfdruck über Eis ist niedriger als über einer unterkühlten Lösung, dadurch wird den Protoplasten Wasser entzogen und es kommt zu Schrumpfungen auf etwa 2/3 des normalen Volumens (LARCHER, 1994; Abb. 1:1). Dieser Vorgang führt zur Dehydrierung der Zellen (Frostplasmolyse), wodurch die intrazelluläre Konzentration der gelösten Stoffe bis auf einen toxischen Gehalt ansteigen kann (WISNIEWSKI et al., 2004). Semipolare Verbindungen wie bspw. Phenylalanin, Valin, Leucin u. a. zerstören die Lipid-Lipid Interaktionen und destabilisieren damit die Membranen. Beim Rehydrieren können außerdem Schäden durch an den Membranen anhaftende Teile des Protoplasmas entstehen (PALTA, 1990; LARCHER, 1994). Unter diesem Aspekt wirkt Froststress für die Pflanzen genauso wie Trockenstress (LEVITT, 1980; PALTA, 1990; BLÖDNER et al., 2005). Daher ist es nicht verwunderlich, dass frostharte Pflanzen auch Trockenheit tolerieren (SAKAI & LARCHER, 1987). Die Diffusion und das Frieren des

Wassers schreiten solange voran, bis ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Eis und Zellflüssigkeit herrscht (LARCHER, 1994).

**Abbildung 1.1: Intrazelluläres (links) und extrazelluläres (rechts) Gefrieren von Hefezellen.** Die intrazelluläre Eisbildung hat die protoplasmatischen Strukturen vollständig zerstört. Die extrazellulär gefrorene Hefezelle ist durch die Dehydrierung geschrumpft (aus LARCHER, 1994; nach MOOR, 1964).



Wie schnell die Eiskristalle wachsen und die Zellen dehydrieren hängt von der Geschwindigkeit des Abkühlens ab. Wenn dieser Vorgang genügend langsam vonstatten geht, diffundiert das zelluläre Wasser langsam zum extrazellulären Eis. Die Konzentration in der Zelle steigt schrittweise an, bis sich die chemischen Potentiale der intrazellulären Lösung und der extrazellulären Eiskristalle in einem Gleichgewicht befinden. Die intrazelluläre Lösung "unterkühlt" (supercooling) und ist dadurch prädestiniert für intrazelluläre Eiskristallbildung (STEPONKUS, 1984). Unter "supercooling" versteht man das Erreichen einer Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes. Dieser Zustand kann bei sehr langsamem Gefrieren erreicht werden. Nach LEVITT (1980) ist dies die niedrigst mögliche Temperatur des Zellsaftes, bevor die Eisbildung einsetzt. Im Allgemeinen ist das Ausmaß der Unterkühlung mit 1 °C bis 4 °C sehr gering (BURKE et al., 1976). Der Grund hierfür ist der instabile Zustand des unterkühlten Wassers und das Vorhandensein von Nukleatoren (z. B. Bakterien wie *Erwinia herbicola* oder *Pseudomonas syringae*) (LEVITT, 1980; SAKAI & LARCHER, 1987; LARCHER, 1994; TAIZ & ZEIGER, 2000). Je niedriger der erreichte "Unterkühlungspunkt", umso schneller schreitet die sich anschließende Eisbildung voran (DILLER, 1975). Die Temperaturuntergrenze der Unterkühlung liegt bei etwa - 40 °C: sehr kleine homogene Wassertropfen ( $\varnothing < 10\mu\text{m}$ ) unterkühlen bis - 38,1 °C (RASMUSSEN & MACKENZIE, 1972), die gelösten Stoffe in der Zelle senken diese Temperatur auf - 41 °C bis - 47 °C ab (SAKAI & LARCHER, 1987). Unter - 40 °C bilden

sich Eiskristalle auch ohne Kristallisationskerne (Nukleatoren), was zur intrazellulären Eisbildung und zum Zelltod führt (TAIZ & ZEIGER, 2000).

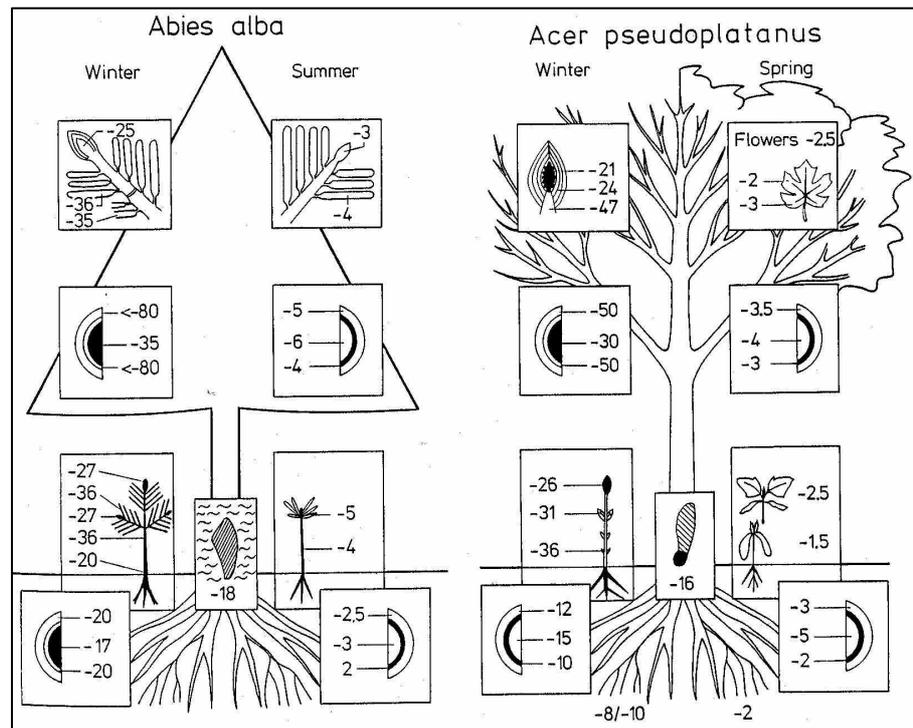
Werden Pflanzenzellen extrem schnell (10.000 K/min oder mehr) gefroren, entstehen sehr kleine intrazelluläre Eiskristalle. Kommt es zum Schmelzen bevor diese Kristalle eine kritische Größe für die Zelle erreichen, kann die Zelle dieses intrazelluläre Gefrieren überleben (SAKAI & YOSHIDA, 1968).

### **Akklimatisierung im Herbst (Abhärtung)**

Die Frosthärte von Gehölzen variiert im Laufe der Vegetationsperiode, wobei die maximale Frosthärte im Januar / Februar erreicht wird. Die Abhärtung des Sprosses im Herbst kann nach WEISER (1970) und LARCHER (1976) in zwei bzw. drei Stufen unterteilt werden: Die 1. Abhärtungsstufe erfolgt bei Kurztag und Temperaturen zwischen 0 °C und +5 °C. Das Längenwachstum endet und Endknospen werden gebildet. In dieser Stufe werden Zucker und andere lösliche Substanzen im Protoplasma angereichert. Der Wassergehalt der Zellen sinkt und die Zentralvakuole teilt sich in viele Kleinvakuolen auf (POMEROY & SIMINOVITCH, 1971; LARCHER, 1994). Die 2. Abhärtungsstufe wird durch Temperaturen kurz unter dem Gefrierpunkt induziert. Die Frosthärte steigt in dieser Phase schneller als in der ersten Phase (HUYSTEE et al., 1967). Es kommt zu Veränderungen in den Membranstrukturen, um die Toleranz gegenüber der Dehydrierung durch die Eisbildung zu erhöhen (LARCHER, 1994). Der Gehalt an Phospholipiden und Galactolipiden steigt an, wodurch das Lipid-/Proteinverhältnis steigt (HÄLLGREN & ÖQUIST, 1990). Außerdem steigt der Gehalt an ungesättigten Fettsäuren (siehe auch "Veränderungen der Membranen", S. 14). Die 3. Abhärtungsstufe ist nur für sehr frostharte Pflanzen beschrieben, da diese Phase erst nach Einwirkung einer Temperatur von - 30 °C bis - 50 °C eintritt. Die Existenz dieser drei Phasen wurde von TIMMIS & WORRALL (1975) an Sämlingen von *Pseudotsuga menziesii* nachgewiesen.

Oberirdische Pflanzenteile akklimatisieren früher und erreichen eine höhere Frosttoleranz als unterirdische Pflanzenteile (BIGRAS et al., 2001; PELLETT & WHITE, 1969; SMIT-SPINKS et al., 1985). Reproduktive Organe wie Blütenanlagen in den Winterknospen oder Fruchtknoten in den Blüten sind am frostempfindlichsten, das Kambium der Sprossachsen ist am frosthärtesten (LARCHER, 1994; Abb. 1.2).

**Abbildung 1.2: Die Frosttoleranz verschiedener Organe, Gewebetypen und Lebensstadien von *Abies alba* und *Acer pseudoplatanus* im Winter und während des Frühlings bzw. Sommers. Die Temperaturen sind in °C angegeben (SAKAI & LARCHER, 1987).**



Die Frosthärte des Wurzelsystems ist abhängig von der Entfernung zum Spross. Wurzelspitzen zeigen daher die geringste Frosthärte (MITYGA & LANPHEAR, 1971; STUDER et al., 1978; COLOMBO et al., 1995) und große verholzte Wurzelsysteme sind weniger frostempfindlich als feine Wurzeln (SMIT-SPINKS et al., 1985; COLOMBO, 1994; RYYPPÖ et al., 1998). Von besonderer Bedeutung für das Überleben der gesamten Pflanze ist die Frosttoleranz des Wurzelhalses. Stirbt dieser Teil ab, kann sich auch der Spross nicht mehr regenerieren (LARCHER, 1994).

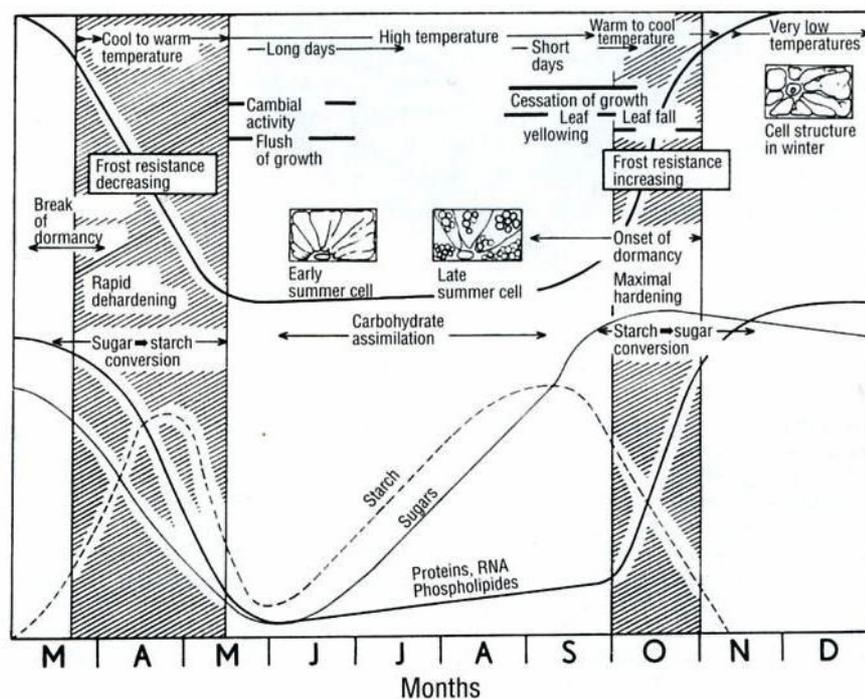
MITYGA & LANPHEAR (1971) und STEPONKUS et al. (1976) berichten, dass Feinwurzeln nicht akklimatisieren können, wogegen COLOMBO et al. (1995) von geringer Abhärtung sprechen. BIGRAS et al. (1989a) haben die Abhärtung junger Wurzeln von *Juniperus chinensis* 'Pfitzeriana' untersucht und zwei Phasen nachgewiesen: Beide Phasen wurden nur durch niedrige Temperaturen induziert. Das erste Stadium wurde bei +8 °C, das zweite bei +1 °C erreicht. Auch die Wurzeln von *Picea glauca*-Sämlingen wurden bei der Akklimatisierung nur von der Temperatur und nicht von der Photoperiode beeinflusst (BIGRAS & D'AOUST, 1993). Ob der Kurztag einen Einfluss auf die Akklimatisierung der Wurzeln hat, konnte dennoch nicht abschließend geklärt werden: Bei 16 verschiedenen Untersuchungen an Koniferenwurzeln wurde je 8 mal der Einfluss des Kurztages auf die Wurzelakklimatisierung nachgewiesen bzw. nicht nachgewiesen (BIGRAS et al., 2001). Alle Untersuchungen wiesen

aber den bereits erwähnten Einfluss niedriger Temperaturen auf die Wurzelakklimatisierung nach. Da es sich in BIGRAS et al. (2001) um Untersuchungen verschiedener Autoren handelt, variieren die Tiefsttemperaturen, die Dauer der Frosttests, Start- und Endtemperaturen, das Tempo des Gefrierens bzw. Auftauens, die verwendeten Wurzelteile (Feinwurzeln, ganze Wurzelsysteme, usw.) und die Testmethode (bspw. EL, Verbräunung, usw.), was evtl. die unterschiedlichen Ergebnisse erklären kann.

### Enthärtung im Frühjahr

Nach GLERUM (1985) vollzieht sich die Enthärtung des Sprosses in zwei Stufen. Sie verläuft schneller als die Abhärtung und wird von steigender Photoperiode und steigenden Temperaturen beeinflusst (Abb. 1.3). Die Enthärtung der Wurzeln beginnt früher und endet später als die des Sprosses (BIGRAS et al., 2001; BAUER et al., 1971; LARCHER et al., 1985; COLEMAN et al., 1992).

**Abbildung 1.3:** Phänologische, cytologische, cytochemische und physiologische Prozesse in Bezug auf die Frosthärte am Bsp. *Robinia*. Die schraffierten Streifen markieren die Zeiten der größten Veränderungen (SIMINOVITCH, 1981).



### Methoden zur Frosthärtebestimmung

Die Frosttoleranz kann auf zwei verschiedenen Wegen bestimmt werden. Die einfachste Methode ist die Sichtung nach einer Winterperiode im Freiland. Die Nachteile dieser Vorgehensweise liegen in der nicht genau bestimmbarer Frosthärte der Pflanzen und in der Abhängigkeit von den natürlichen Witterungsbedingungen. Temperaturverläufe auf Freilandflächen sind außerdem nach LARSEN et al. (1978) nicht

einheitlich. Durch eine entsprechend große Anzahl an Messstationen müssten solche Temperaturunterschiede erfasst werden. Zusätzlich lassen sich die Zeitpunkte, zu denen die Frostschäden auftraten, nicht genau bestimmen, d. h. eine Unterscheidung zwischen Früh-, Tief- und Spätfrostschäden wird erschwert. Im Verlauf des Winters kann es außerdem zu einer Summierung kleiner Frostereignisse kommen, die das Schadbild am Ende des Winters verzerren (LARSEN et al., 1978). Weitere Einflussgrößen sind außerdem die Länge der Frostphase, die Lage der Versuchsfläche, Luftbewegungen (exponierte Lage oder windgeschützt), starke Temperaturwechsel durch Sonnenstrahlung bzw. Nachtfroste und eine evtl. vorhandene Schneedecke.

Diese Nachteile werden im Klimakammerfrosttest ausgeschlossen. Die Testung unter Laborbedingungen erlaubt die genaue Bestimmung der zum Testzeitpunkt ausgeprägten Frosthärte durch einen vorher definierten Temperaturverlauf. Die einfachste Beurteilung kann durch die Verbräunung des Gewebes von Sprossstücken vorgenommen werden.

Erste Versuche unter kontrollierten Bedingungen zur Ermittlung der Frosthärte sind von HARVEY (1918) durchgeführt und von ÅKERMAN (1927) durch eine numerische Beurteilung von 1 bis 10 (1 = höchste Frosthärte) ergänzt worden. Der große Nachteil dieser ersten Frosthärteversuche lag in der subjektiven Beurteilung der Ergebnisse. Darüber hinaus sind noch eine ganze Reihe weiterer Methoden entwickelt worden. BURR et al. (2001) geben einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Untersuchungsmethoden, an dieser Stelle seien daher nur die gebräuchlichsten Methoden erwähnt:

DEXTER et al. (1930) und DEXTER (1932) entwickelten in den 1930er Jahren eine Methode zur Messung der **Elektrischen Leitfähigkeit (EL)**, die seitdem mit einigen Modifikationen weite Verbreitung gefunden hat. Diese Messung beruht auf der Erfassung von Elektrolyten, die aufgrund von Membranschäden aus den beschädigten Zellen austreten. Je stärker die Membranen geschädigt sind, umso höher ist die gemessene Elektrische Leitfähigkeit. Mit Hilfe der EL-Messung kann sowohl die Frosthärte von Blättern oder Sprossstücken als auch von Wurzeln ermittelt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Ermittlung objektiver, quantitativer Daten. Zur Absicherung

sollte aber trotzdem eine weitere Methode angewandt werden. Hier sei bspw. die Messung der **Chlorophyllfluoreszenz (CF)** genannt. Diese nicht destruktive Methode ermittelt Veränderungen in der Fähigkeit der Elektronen, durch die zwei primären Photosysteme in die Chloroplasten-Thylakoidmembran zu fließen. Dabei wird mit Hilfe eines Lichtblitzes (spezifische Wellenlänge) eine vorher definierte grüne Blattfläche beleuchtet, deren Emission an rotem Licht anschließend durch eine Elektrode gemessen wird. Eine Dunkeladaption ist dabei unabdingbar, damit der Lichtblitz die maximale Reaktion hervorrufen kann. Da die Chloroplasten bei niedrigen Temperaturen geschädigt werden, ist diese Methode sehr gut für Frosthärtemessungen geeignet. Außerdem ist die Korrelation zwischen der Elektrischen Leitfähigkeit und der CF-Messung nach BURR et al. (2001) sehr hoch, obwohl die Schäden an verschiedenen Membransystemen gemessen werden. Eine Messung der Wurzelfrosthärte scheidet aufgrund der Messung an den Chloroplastenmembranen hierbei aber zwangsläufig aus.

Die **Thermale Analyse** ermittelt den Anstieg der Gewebetemperatur, der durch wachsendes Eis im Gewebe verursacht wird. Hierbei sind derzeit drei verschiedene Ansätze möglich: STA (simple thermal analysis), DTA (differential thermal analysis) und DSC (differential scanning calorimetry). Die "**Electrical Impedance Spectroscopy**" (EIS) zeigt Veränderungen der Zellstrukturen durch Frostschäden auf. Sie eignet sich auch zur Beobachtung von Veränderungen in den Zellstrukturen während der Ab- bzw. Enthärtung (REPO et al., 2000).

Die **TTC-Methode** nutzt die Fähigkeit lebender Zellen, farbloses Triphenyl-Tetrazolium-Chlorid in rotes Formazan zu reduzieren (LARSEN 1976a; STEPONKUS & LANPHEAR, 1967). TAULAVUORI (1998) hat Veränderungen in der Frosthärte durch **pH-Wert** Messungen analysiert. Eine breite Anwendung hat diese Methode aber bisher nicht gefunden.

CALKINS & SWANSON (1990) kommen nach einem umfangreichen Methodenvergleich zwischen mikroskopischen Untersuchungen, Vitalfärbung, Chlorophyllfluoreszenz, Elektrischer Leitfähigkeit, Enzymaktivität u. a. zu der Auffassung, dass es keinen perfekten Vitalitätstest zur Ermittlung der Frosttoleranz für alle Pflanzenarten bzw. für jede Art von Material (Spross, Blatt, Wurzel, usw.) geben kann. Jede Metho-

de habe ihre Vor- und Nachteile und müsse für den jeweiligen Fall ausgesucht werden. PALTA et al. (1978) empfehlen grundsätzlich die parallele Anwendung mehrerer Tests.

Ein relativ neuer Ansatz ist die Untersuchung der Frosthärte mittels **Genexpression**. Die Veränderungen der Genexpression während der Akklimatisierung wurden 1985 von GUY et al. in Spinat entdeckt. Viele dieser durch Kälte induzierten Gene codieren Proteine, die an der Frosthärte beteiligt sind, bspw. codiert das *Arabidopsis* COR15a Gen ("**c**old **r**egulated") ein 15kDa Polypeptid, das die Chloroplasten vor Frostschäden schützen kann (ARTUS et al., 1996; THOMASHOW, 1998). Dehydrine (Synonyme: LEA D11 bzw. Gruppe 2 der LEA Proteine; **l**ate **e**mbr**y**ogenesis **a**bundant) sind die in diesem Zusammenhang am häufigsten untersuchten Proteine. Es handelt sich dabei um hydrophile, hitzestabile Proteine, die als Reaktion auf eine Stresssituation, die mit Dehydrierung verbunden ist (bspw. Salz-, Trocken- oder Froststress), induziert werden. Sie schützen bspw. Membranstrukturen (BOROVSKII et al., 2002) und verhindern die Denaturierung von Proteinen (WISNIEWSKI et al., 1999). Die An- bzw. Abwesenheit eines 25 kDa Dehydrins könnte nach LIM et al. (1999) und ARORA et al. (2002) als genetischer Marker zur Unterscheidung von frostharten und weniger frostharten *Rhododendron* Genotypen dienen. Die Gehalte des 25 kDa Dehydrins waren in kälteakklimatisierten Blättern von *Rhododendron catawbiense* 5 mal so hoch wie in nicht kälteakklimatisierten Blättern. Der erste Beweis einer Antifrostaktivität bei Gehölzen wurde durch WISNIEWSKI et al. (1999) an einem Dehydrin-Protein (PCA60) aus akklimatisiertem Rindengewebe an Pfirsich (*Prunus persica* (L.) Batsch) erbracht. Das dazugehörige Dehydrin-Gen (ppdhn1) wurde ebenfalls identifiziert (ARTLIP et al., 1997). Inzwischen sind 49 vollständige Sequenzen von Dehydrin-Genen der *Rosaceae* bekannt (NCBI Datenbank, Stand: 16.11.2005).

### **Einflüsse verschiedener Inhaltsstoffe**

Die Bedeutung einzelner Nährelemente ist für viele Pflanzen (hauptsächlich Koniferen und Getreide) häufig untersucht worden. **Stickstoff** ist ein wichtiger Strukturbaustein organischer Stickstoffverbindungen wie bspw. Proteinen, Amino- und Nukleinsäuren. Außerdem ist er Bestandteil des Chlorophylls und verschiedener Phytohormone wie Auxin, Cytokinin und Gibberellin. Somit ist er wesentlicher Bestandteil des

Protoplasmas und beeinflusst die Photosyntheseleistung und Steuerung der Wachstumsprozesse. Stickstoff ist daher für die Pflanze von herausragender Bedeutung und durch kein anderes Element zu ersetzen (DIEREND, 1995). Durch den Einfluss des Stickstoffes auf das Wachstum ist in verschiedenen Versuchen sowohl eine verbesserte (DEHAYES et al., 1989; TAULAVUORI et al., 1997, 2001) als auch eine verringerte Frühfrosthärte (LARSEN, 1976; KOSKELA, 1970) nach erhöhter Stickstoffgabe festgestellt worden. Verschiedene Autoren berichten außerdem von vermehrten Spätfrostschäden nach erhöhter Düngung im Vorjahr (bspw. LARCHER, 1976; ALDHOUS, 1972).

**Phosphor** ist als Bestandteil von Nukleinsäuren und Phospholipiden in den Membranen ein wichtiges Strukturelement der Pflanzen. Außerdem ist Phosphor an der Speicherung und Weiterleitung von Energie bspw. durch ATP oder ADP beteiligt (WIGNARAJAH, 1995; ŠEBÁNEK, 1992). Die Wirkung der Phosphorversorgung auf die Frosthärte ist wie bei Stickstoff nicht abschließend geklärt. Nach LARSEN (1976a) kann erhöhte Phosphorversorgung durch vermehrte Stickstoffaufnahme zu geringerer Frosthärte führen. MALCOLM & FREEZAILLAH (1975) vermuten eine Verzögerung des Wachstumsabschlusses durch erhöhte Stickstoffaufnahme in Folge einer hohen Phosphorversorgung. Eine zu geringe Phosphorversorgung kann die Synthese der Phospholipide als wichtige Bausteine der Membranen beeinträchtigen (LYR et al., 1992), bzw. zu einem frühen Wachstumsabschluss führen (JALKANEN et al., 1998).

**Kalium** trägt als Hauptkation wesentlich zum osmotischen Potential der Zelle bei (LÜTTGE & CLARKSON, 1989). Es ist u. a. an Proteinsynthese, Enzymaktivierung, Photosynthese, Osmoregulation, Zellstreckung, Bewegung der Spaltöffnungen, Phloemtransport und Kationen-Anionen Balance beteiligt (MARSCHNER, 1995). Kalium wird nicht metabolisiert und bildet nur schwache Komplexe, aus denen es leicht austauschbar ist (MARSCHNER, 1995). Kalium ist daher im Zellsaft frei beweglich und hat einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt der Pflanze. Bei einem hohen Kaliumgehalt in der Zelle entsteht ein niedriges osmotisches Potential, so dass Wassermoleküle verstärkt in die Zelle diffundieren (DIEREND, 1985).

**Calcium** ist wichtiger Strukturbestandteil der Mittellamelle der Zellwand und wird als "Second messenger" bei vielen Stadien der Pflanzenentwicklung (bspw. Embryogenese, Gravitropismus, Phototropismus, hypersensitive Reaktionen) benötigt (SMALLWOOD & BOWLES, 2002; MEDVEDEV, 2005).

**Magnesium** ist wichtiger Bestandteil des Chlorophyllmoleküls (Zentralatom) und Co-Faktor vieler Enzyme bspw. im Phosphorylierungsprozess. Bei Fehlen von Magnesium würden daher alle Prozesse der Energiegewinnung oder des Energietransportes zusammenbrechen. Bei geringer Kaliumgabe erhöht sich die Aufnahme an Magnesium und umgekehrt (WIGNARAJAH, 1995).

In der Literatur sind Angaben über das Kalium/Calcium-Verhältnis zu finden, das die Permeabilität der Zellmembranen für Wasser fördern soll und dadurch eine hohe Frosthärte bewirkt (LEVITT, 1956; MAZUR, 1969). In einem Versuch von CHRISTERSSON (1973) mit *Pinus sylvestris*-Sämlingen, schwankte das Kalium/Calcium-Verhältnis zwischen 12 und 2, so dass sich ein Effekt hätte zeigen müssen. Die Ergebnisse ließen aber keinen Einfluss des Kalium/Calcium-Verhältnisses erkennen.

Andere Arbeiten befassen sich mit der möglichen Beeinflussung der Frosthärte durch das Nährstoffverhältnis Kalium/Stickstoff. TIMMIS (1974) hat dies bspw. für Sämlinge von *Pseudotsuga menziesii* ermittelt. Das Niveau der Frosthärte hing dabei nicht vom Gehalt an Stickstoff, Phosphor oder Kalium alleine ab, sondern es ergab sich eine Korrelation zwischen dem Verhältnis K/N im Blatt und der Frosthärte. Ein Verhältnis von 0,6 wurde als ideal angesehen. Die Auswirkung des Verhältnisses K/N unterstreicht nach WEISER (1970) die Bedeutung dieser Elemente: Stickstoff ist wichtiger Bestandteil der Proteinsynthese, während Kalium in vielen enzymatischen Reaktionen unabdingbar ist (LEVITT, 1980).

Allgemein kann Düngung die Frosthärte auf zwei Wegen beeinflussen: 1. durch Veränderung der Länge der Wachstumsperiode oder 2. durch den Prozess der Zucker-, Protein- und Fettsäureproduktion (LEVITT, 1980).

Der Zusammenhang zwischen Akklimatisierung und **Zuckergehalten** ist eingehend untersucht worden (ARONSSON et al., 1976; ÖGREN, 1997, 1999b). Die Schutzfunktion von Zuckern beruht zum einen auf einem osmotischen Effekt: Ein erhöhter Zuckergehalt reduziert das Ausmaß der zellulären Dehydrierung beim Gefrieren. Zum zweiten gibt es einen metabolischen Effekt, da Zucker zur Bildung anderer schützender Substanzen oder als Energielieferant gebraucht werden. Schließlich gibt es auch einen direkten cryoprotektiven Effekt zum Schutz der zellulären Strukturen (SAKAI & LARCHER, 1987), so stabilisiert bspw. Saccharose die Plasmamembran und Proteine während des Frostes (PATTERSON & GRAHAM, 1987; CROWE et al., 1990). Wenn die Plasmamembran Wasser verliert, wird dies durch Saccharose ersetzt. Es kommt zu Interaktionen mit Membran-Phospholipiden, so dass die Membranstruktur erhalten bleibt (STRAUSS & HAUSER, 1986; CAFFREY et al., 1988). Ein weiterer Wasserverlust kann außerdem bei sehr niedrigen Temperaturen (< -30 °C) durch Vitrifikation ("Verglasung") verhindert werden (HIRSH et al., 1985; HIRSH, 1987).

Die verschiedenen Zuckerarten zeigen unterschiedliche Korrelationen mit der Frosthärte: Zu Beginn der Akklimatisierung und im Frühjahr ist das Niveau der Frosthärte am ehesten mit dem Saccharosegehalt korreliert (ÖGREN, 1999b; HINESLEY et al., 1992). Im Winter gewinnt Raffinose gemeinsam mit Saccharose an Bedeutung (HINESLEY et al., 1992; STUSHNOFF et al., 1998; ÖGREN, 1999b; COX & STUSHNOFF, 2001). Nach SAKAI (1962) und CHEN et al. (1995) akkumulieren je nach Pflanzenart einige Zucker stärker als andere, am häufigsten werden Glucose, Fructose oder Saccharose mit Frosthärte in Verbindung gebracht (HARBORNE, 1995). Eine generelle Korrelation zwischen dem Gehalt eines bestimmten Zuckers und der Frosthärte erscheint daher nicht möglich. Nach LARSEN et al. (1978) ist die Zuckerkonzentration in der Initialphase der Abhärtung und in der Endphase der Enthärtung von größerer Bedeutung als in der Tieffrostphase.

**Prolin** akkumuliert sowohl unter hohen als auch niedrigen Temperaturen und kann als Stressindikator angesehen werden (HEUER, 1999). Dabei deutet ein höherer Prolingehalt auf eine höhere Stresstoleranz hin. Bei einigen Koniferenarten geht ein steigender Prolingehalt mit steigender Frosttoleranz einher (KAROLEWSKI & PUKACKI, 1995; KIM & GLERUM, 1995). *Picea mariana* (ODLUM et al., 1993) und

*Picea glauca* (DURZAN, 1968) akkumulieren Prolin nach Einwirkung niedriger Temperaturen. Für *Pinus resinosa* (KIM & GLERUM, 1995), *Pinus sylvestris* (PIETILÄINEN & LÄHDESMÄKI, 1986), *Picea glauca* (DURZAN, 1968) und *Cryptomeria japonica* (MORI, 1974) konnten dagegen steigende Prolingehalte in den Sommermonaten nachgewiesen werden. Bei *Populus tremuloides* verändert sich durch Trockenstress zwar die Aminosäurekonzentration, Prolin ist aber nur gering betroffen. *Pinus sylvestris* und *Larix sibirica* zeigen dagegen unter Trockenstress einen geringeren Proteingehalt, aber einen höheren Prolingehalt (HEUER, 1999). Prolin kann daher nicht als Stressindikator für alle Pflanzenarten gelten.

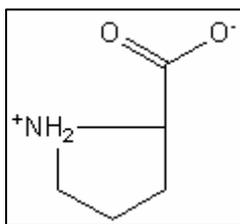


Abbildung 1.4: Strukturformel Prolin (ANONYM, 2006)

Das Prolingrundgerüst ist ein heterozyklisches Ringsystem mit einem Stickstoffatom im Ring (Abb. 1.4). Damit nimmt Prolin eine Ausnahmestellung unter den Aminosäuren ein (HEINKE, 1983). Nach BROWN & HELLEBUST (1978) ist Prolin die am besten lösliche aller Aminosäuren. Diese hohe Löslichkeit kommt nach SCHOBERT (1979, 1980) durch die Anordnung der Prolinmoleküle zustande: Durch die hydrophoben Wechselwirkungen der übereinander gestapelten Pyrrolidinringe entstehen supramolekulare Strukturen. Die hydrophilen Gruppen sind dabei alternierend nach außen gerichtet, dadurch entsteht ein Polyprolin mit hydrophobem Rückgrat und hydrophilen Seitengruppen (SCHOBERT, 1979, 1980; CROWE et al., 1990). Die Prolinsynthese wird unter anderem bei THOMPSON (1980) und DELAUNEY & VERMA (1993) genauer beschrieben.

Prolin erhöht die Löslichkeit verschiedener Proteine durch Interaktion mit hydrophoben Teilen der Proteinoberfläche, wodurch sowohl der hydrophile Anteil als auch die Stabilität des Moleküls erhöht wird (ASPINALL & PALEG, 1981). Außerdem ist Prolin während eines Wasserstressses frei beweglich in der Pflanze und akkumuliert am stärksten in jungen Blättern und Sprossen. Nach Beendigung des Stressses verringert sich die Prolinkonzentration sehr schnell (ASPINALL & PALEG, 1981). Der Abbau von Prolin führt zu Glutamat (MAZELIS, 1980), das eine Stickstoffquelle für die Synthese anderer Aminosäuren darstellt (VERMA & ZHANG, 1999).



Der Primäreffekt des Schadens ist der Übergang der Biomembranen in den gelartigen Zustand, sowie eine Desorientierung der Membranproteine. Dadurch erhöht sich die Permeabilität, und die Selektivität des Stofftransportes wird vermindert (LARCHER, 1994).

Durch die Arbeit mit krautigen Pflanzen konnte nachgewiesen werden, dass abhängig von Grad und Dauer des Froststresses eine reversible (sub-lethale) oder irreversible (lethale) Schädigung auftreten kann (PALTA et al., 1977a, 1977b; PALTA et al., 1982). Unter reversibler Schädigung versteht man dabei das Auftreten einer sichtbaren physiologischen Schädigung, die unter der Voraussetzung keiner erneuten Stresseinwirkung nach einer gewissen Zeit wieder repariert ist. Da man davon ausgeht, dass der hauptsächliche Frostschaden durch Dehydrierung verursacht wird, ist das Auftreten einer reversiblen Schädigung u. a. abhängig von der Geschwindigkeit des Gefrierens und der Dauer der Frosteinwirkung: Beim langsamen Gefrieren können so geringere Schäden auftreten als bei schnellem Gefrieren, ohne Unterschied in der Endtemperatur.

Untersuchungen an Zwiebelzellen (*Allium cepa*) lassen die Annahme zu, dass ein Austreten von Elektrolyten aus frostgeschädigten Zellen einen selektiven Schaden an den Membrantransportsystemen bspw. H<sup>+</sup>ATPase verursacht (PALTA & LI, 1980; ARORA & PALTA, 1991). Plasmamembran-ATPase scheint wichtig für die Reparatur reversibler Frostschäden zu sein. Bei geringem Verlust (etwa 30 %) der ATPase-Aktivität nach einer Frosteinwirkung kann es innerhalb von vier bis fünf Tagen zu einer vollständigen Regenerierung der Pflanze kommen. Eine Vorbehandlung mit Vanadat (spezifischer Inhibitor der ATPase) unterbindet dagegen die Regenerierung (ARORA & PALTA, 1991). Da diese Untersuchungen an Zwiebelzellen durchgeführt wurden, steht ein Nachweis für Gehölze noch aus.

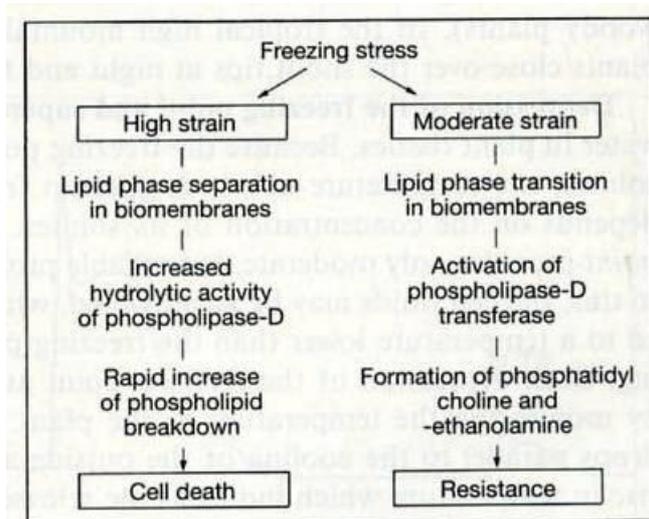
Weitere Studien an Zwiebeln zeigen neben einer Veränderung der Plasmamembran-ATPase-Funktion als primären Frost- bzw. Auftauschaden noch die Möglichkeit eines sekundären Schadens, wenn die Schädigung am aktiven Transportsystem eine Schwelle überschritten hat, also irreversibel ist (PALTA & LI, 1980; ARORA & PALTA, 1986a). Die sekundäre Schädigung beinhaltet einen Verlust an Membran-Calcium nach dem Auftauen. Bei Geweben, die nach einem Frosttest einen

reversiblen Schaden zeigten, ereignete sich ein Membran-Calcium-Verlust von ca. 35 %, wogegen Gewebe mit irreversiblen Schädigungen einen Calcium-Verlust von ca. 85 % erreichten. DEHAYES et al. (1997) konnten die Bedeutung des Membran-Calciums für die Frosttoleranz bei *Picea rubens* nachweisen.

Der Verlust an Membran-Calcium ist eine Folge der Ersetzbarkeit durch extrazelluläres Kalium, dem Hauptelektrolyt des primären Frostschadens, daher die Bezeichnung sekundärer Frostschaden. ARORA & PALTA (1986b) gelang der Nachweis des sekundären Frostschadens durch Entfernen des Kaliums nach dem Auftauen. Zwiebelzellen, die eigentlich irreversibel geschädigt waren, konnten sich vollständig regenerieren. Membran-Calcium spielt somit eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung der Membranstruktur (PALTA & WEISS, 1993), der Gehalt an Calcium könnte daher auch für die Frosthärte bei Gehölzen von Bedeutung sein.

Durch die Dehydrierung der Protoplasten werden die Biomembranen osmotisch und durch die Volumenkonzentration überbeansprucht. Es kommt zum Abbau von Membranlipiden, Membranproteine werden abdissoziiert und Membran-ATPasen werden in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt (Abb. 1.6). Beim Rehydrieren muss das abgelöste Membranmaterial wieder eingefügt werden. Gelingt dies nicht, kann die Zelle ihr ursprüngliches Volumen nicht mehr erreichen, und es kommt zur expansions-induzierten Lysis (SMALLWOOD & BOWLES, 2002). Der Austritt von Plastocyanin aus Thylakoidmembranen gilt als Indiz für die Membranzerstörung durch den Gefrier- oder Auftaustress (HINCHA et al., 1998; LARCHER, 1994).

**Abbildung 1.6: Auswirkungen von Froststress auf die Membranen am Bsp. Raps (LARCHER, 1994 , nach SIKORSKA & KACPERSKA, 1982).**



PALTA & LI (1978) und PALTA (1990) sehen einen Zusammenhang zwischen dem Zusammenbruch der Membranen und der Inaktivierung der Kalium- und Zuckerpumpen. Diese Inaktivierung führt zu einer Änderung im zellulären Metabolismus und zum Tod der Zelle.

Während der Abhärtung steigt der Gehalt an Membranproteinen und Phospholipiden merklich an (YOSHIDA & SAKAI, 1973; YOSHIDA, 1984). Der Stress der Plasmolyse und Deplasmolyse kann so möglicherweise leichter überstanden werden, weil bspw. durch dieses Reservoir eine Nachlieferung bei der Ausdehnung der Membran erfolgen kann. Außerdem können evtl. Schäden an der Vakuole wieder ausgeglichen werden, so dass Säuren oder Phenole die Zelle nicht schädigen können (PATTERSON & GRAHAM, 1987; PUKACKI & PUCKAKA, 1987).

### **Ziel dieser Arbeit**

Frosthärteuntersuchungen werden in drei verschiedenen Bereichen durchgeführt, deren Ergebnisse jeweils anders zu interpretieren sind: Zum einen gibt es Untersuchungen im gewachsenen Boden. Hier stehen häufig die Auswirkungen des sauren Regens auf *Picea rubens* im Mittelpunkt (CAPE et al., 1991; FOWLER et al., 1989). Ebenso werden viele Herkunftsversuche in Verbindung mit der Frosttoleranz im Freiland durchgeführt (bspw. BLÖDNER et al., 2005). Der Einfluss der Düngung auf die Frosthärte von Freilandpflanzen ist u. a. von JALKANEN et al. (1998) und CAPORN et al. (1994) untersucht worden. Eine genaue Temperaturangabe der Frosttoleranz ist in Freilandversuchen aufgrund der natürlichen Witterung allerdings kaum möglich. Zum anderen werden auch Frosthärteversuche mit Containerpflanzen durchgeführt (PELLETT & WHITE, 1969a; BIGRAS & D'AOUST, 1992). Bei Frosthärteversuchen mit Containerpflanzen ist aber zu bedenken, dass die Wurzeln hierbei tieferen Temperaturen ausgesetzt werden, als im natürlichen Boden (STEPONKUS et al., 1976). Die Ergebnisse sind daher, zumindest was die Wurzelfrosthärte angeht, nicht immer übertragbar. Schließlich gibt es noch den Bereich der stecklingsvermehrten Gehölze. Dieses Gebiet ist bisher wenig erforscht und daher Gegenstand dieser Dissertation.

Die wichtigsten Parameter einer erfolgreichen Stecklingsvermehrung sind u. a. das Alter der Mutterpflanze, der Steckzeitpunkt, die Feuchtigkeitsbedingungen während der Bewurzelung und die erste Überwinterung. Häufig bewurzeln bspw. *Fagus* oder *Hamamelis* erfolgreich, aber die bewurzelten Pflanzen können den ersten Winter nicht überleben. Wie erfolgreich die Vermehrung verlaufen ist, kann daher für viele Gehölzarten erst nach der ersten Winterperiode beurteilt werden (SPETHMANN, 1982, 1998).

Aufgrund der vielen verschiedenen Aussagen in der Literatur kann derzeit keine eindeutige Beurteilung der Wirkung einer Düngung auf die Frosthärte getroffen werden. Die Arbeiten unterscheiden sich in großen Teilen voneinander, so dass Vergleiche schwer, wenn nicht sogar unmöglich sind. So werden von jedem Versuchsansteller nicht nur andere Pflanzenarten, sondern auch andere Pflanzenteile untersucht (Spross, Wurzel, Nadel). Die Düngevarianten, die untersuchten Tiefsttemperaturen und die Ermittlung der Frosthärte decken ebenso die ganze Bandbreite möglicher Varianten ab. In den Tabellen 11.1 und 11.2 im Anhang dieser Dissertation sind alle der Autorin bis März 2006 bekannten Ergebnisse zum Thema Frosthärte und Düngung aufgelistet. Auffallend ist die häufige Verwendung von Koniferen, die oft als Sämlinge untersucht wurden. Der Autorin sind nur die Arbeiten von PELLETT & WHITE (1969, 1969a) und PELLETT (1973) bekannt, die sich mit dem Einfluss von Stickstoff auf die Frosthärte bei Stecklingen von *Juniperus chinensis* 'Hetzii', *Forsythia x intermedia* und *Cornus alba* befassen. Weitere Arbeiten, die stecklingsvermehrte Gehölze in diesem Zusammenhang untersucht haben, sind der Autorin nicht bekannt. SMALLEY & DIRR (1986) führen zwar eine ganze Reihe schwer zu überwinternder stecklingsvermehrter Gehölze auf, die Frage der Düngung wird aber nur am Rande erwähnt.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist daher die Untersuchung des Düngereinflusses auf die Frosthärte speziell für stecklingsvermehrte Gehölze. Der Effekt einer Grunddüngung auf die Stecklingsbewurzelung ist in der Abteilung Baumschule der Universität Hannover bereits eingehend untersucht worden. Eine Grunddüngung mit 2 g Osmocote (3 - 4M) / L wird seit Beginn der 1990er Jahre als Standardmethode verwandt. SPETHMANN & HARMS (1993) konnten dadurch bspw. ein gesteigertes

Sprosswachstum bei der Eichenstecklingsvermehrung erreichen. Ob und wie sich dabei die Düngung auf die Frosthärte auswirkt, konnte noch nicht geklärt werden. In der Literatur wird der Einfluss des Stickstoffs auf die Frosthärte uneinheitlich beschrieben (siehe auch Tab. 11.1 im Anhang). Es wird zum einen eine Verlängerung der Wachstumsperiode durch hohe Stickstoffdüngung vermutet, die zur Verminderung der Frühfrosthärte führen kann. Zum anderen werden gut mit Stickstoff versorgten Pflanzen bessere Bedingungen beim Austrieb im Frühjahr zugeschrieben. Eine hohe Kaliumdüngung wird landläufig als Frosthärte fördernd angesehen. Diese Einschätzung ist auch in der Literatur abzulesen (Vergleich Tab. 7.1). Für den Einfluss einer Phosphordüngung liegen im Vergleich mit Stickstoff und Kalium nur wenige Berichte vor. Der Effekt eines erhöhten Phosphorgehaltes wird dabei je nach Frostzeitpunkt mal positiv (Frühfrost) und mal negativ (Spätfrost) beurteilt. Wie bereits erwähnt, wurden die bisherigen Untersuchungen außer den o. a. Ausnahmen mit Freilandpflanzen durchgeführt. Welchen Einfluss die Düngung auf stecklingsvermehrte Gehölze im ersten Winter unter kontrollierten Bedingungen hat, soll in dieser Arbeit geklärt werden.

Ein weiteres Ziel ist die Überprüfung der Chlorophyllfluoreszenzmethode hinsichtlich ihrer Eignung zur Frosthärtebestimmung bei stecklingsvermehrten Gehölzen unterschiedlicher Düngevarianten. Die CF-Messung ist nach LINDGREN & HÄLLGREN (1993) gut zur Ermittlung von Frostschäden in homogenen Blattgeweben geeignet. Bisher fand diese Methode hauptsächlich in der Frosthärtebestimmung unterschiedlicher Herkunft Anwendung (z. B. ÖGREN, 1999a).

## 2. Material und Methoden

Der Einfluss der Düngung auf die Frosthärte stecklingsvermehrter Gehölze wurde exemplarisch an *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' untersucht. Die Auswahl dieser beiden Pflanzenarten beruhte dabei auf der bekannten Frosttoleranz von *Rosa* 'Sommerabend', sowie auf der Frostsensitivität von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'. Außerdem sollte durch die Auswahl einer sommer- und einer immergrünen Art ein möglichst breites Spektrum abgedeckt werden. Die Stecklinge wurden in jedem Versuchsjahr ab Juli bewurzelt. Nach erfolgreicher Bewurzelung wurden die unterschiedlichen Varianten für acht Wochen flüssig gedüngt. Um die kritische Phase des ersten Überwinterungsjahres zu untersuchen, wurden zu bestimmten Zeitpunkten (Früh-, Tief- und Spätfrost) Frosttests unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammern durchgeführt. Die Stärke der jeweiligen Frostschäden wurde anschließend mittels Elektrischer Leitfähigkeitsmessung, Chlorophyllfluoreszenzmessung und visueller Bonitur ermittelt. Außerdem erfolgte eine Bestimmung der wichtigsten Mineralstoffgehalte.

### Pflanzenmaterial

*Rosa* 'Sommerabend' ist eine zur Familie der *Rosaceae* gehörende Bodendeckerrose. Sie wurde 1995 von W. Kordes' Söhne gezüchtet. Die Pflanze erreicht eine Höhe von bis zu 30 cm und wird als breitwüchsig und sehr buschig beschrieben. Die Triebe werden oft über einen Meter lang. *Rosa* 'Sommerabend' blüht rot in dichten Büscheln (Abb. 2.1) mit einfachen schalenförmigen Blüten (KORDES, 2005).

Das Ausgangsmaterial für die Rosenstecklinge wurde bei W. Kordes' Söhne in Klein Offenseth-Sparrieshoop geerntet. Die Mutterpflanzen befanden sich in Grundbeeten im Gewächshaus. In jedem Versuchsjahr wurden Anfang Juli bis zu 1 m lange Triebe geschnitten, angefeuchtet und in Foliensäcken nach Ruthe (Versuchsgelände der Universität Hannover) transportiert. Aus den Trieben wurden Stecklinge geschnitten, die aus einem Auge mit jeweils einem Fiederblatt bestanden. Das Triebstück unterhalb des Auges war nur wenige Zentimeter lang. Das Stecken erfolgte einen Tag nach dem Schnitt der Reiser.



half des Auges war nur wenige Zentimeter lang. Das Stecken erfolgte einen Tag nach dem Schnitt der Reiser.

Abbildung 2.1: *Rosa* 'Sommerabend' (KORDES, 2005)

*Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Abb. 2.2) gehört mit der Gattung *Prunus* ebenfalls zur Familie *Rosaceae*. Die Sorte entstand 1865 bei L. C. B. Billard & Barre in Frankreich, wird zwei bis drei Meter hoch und ebenso breit. Die Blüten erscheinen in weißen aufrechten Trauben zwischen den immergrünen Blättern (BRUNS, 2003). Die Bundesgehölzsichtung (ANONYM, 2001) beurteilt *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' als gute bis sehr gute Sorte, die aber in der Sichtung (1997-2001) unter starken Winterschäden zu leiden hatte (ohne genauere Angabe).



**Abbildung 2.2: *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'**  
(ANONYM, 2001)

Das Material für die *Prunus*-Stecklinge stammte jeweils von einer Hecke in Gödringen (Region Hannover) und wurde ebenfalls in jedem Versuchsjahr Anfang Juli geschnitten. Im Versuch wurden nur Kopfstecklinge mit drei bis vier Blättern verwendet (Abb. 2.3). Das Stecken konnte aufgrund der kurzen Entfernungen am gleichen Tag erfolgen.



**Abbildung 2.3: Steckling von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'**

**Abbildung 2.4: Fo-  
liengewächshaus mit  
Foganlage in Ruthe**



Die Basis der *Rosa*- und *Prunus*-Stecklinge wurde vor dem Stecken in eine Mischung aus 0,5 % IBS und 10 % Euparen getaucht. Die Stecklinge wurden in einem unbeheizten Foliengewächshaus ohne Bodenheizung in 9er Töpfen kultiviert (Abb. 2.4). Der Versuchsaufbau erfolgte jeweils als vollständig randomisierte Blockanlage. Die Beete waren zu allen Seiten durch Plattenwege begrenzt. Das Folienhaus war mit einer Hochdrucknebelanlage (System Florafog<sup>®</sup>) ausgestattet. Die Luftfeuchtigkeit (95 – 100 % RF) wurde mittels einer Intervallsteuerung manuell geregelt. Während des Betriebes der Foganlage erfolgte weder Lüftung, noch eine Schattierung oder zusätzliche Beleuchtung.

### **Substrat**

Als Substrat kam in jedem Versuch ein Gemisch aus Torf : Sand (3 : 1) zum Einsatz, das nach Anfertigung einer Pufferkurve auf pH 5 mit CaCO<sub>3</sub> aufgekalkt wurde.

### **Düngung**

Sechs Wochen nach dem Stecktermin wurde jeweils mit der Flüssigdüngung begonnen, die bis Anfang Oktober einmal pro Woche durchgeführt wurde (acht aufeinander folgende Wochen). Jeder Topf wurde innerhalb dieses Zeitraumes einmal wöchentlich mit 50 ml Düngelösung versorgt. Nach abgeschlossener Düngung wurden die Töpfe in einem ungeheizten Gewächshaus zur frostfreien Überwinterung aufgestellt.

### **Stickstoffversuch**

Im Versuchsjahr 2002/2003 wurde ein **Stickstoffversuch** mit *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' durchgeführt. Zum Einsatz kamen die Varianten Stickstoffmangel (N<sub>0</sub>) und Stickstoffüberschuss (N<sub>Ü</sub>). Die Einwaagen für 50 ml Düngelösung pro Topf sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Außer den angegebenen Düngern wurde jeder Topf mit 1 ‰ Radigen versorgt. Jede Düngevariante umfasste 288 Töpfe (144 Töpfe *R.* 'Sommerabend' + 144 Töpfe *P. laurocerasus* 'Rotundifolia', s. Abb. 2.5), die auf drei Wiederholungen aufgeteilt wurden. Somit ergaben sich 48 Töpfe pro Art, Wiederholung und Düngevariante. Die Düngung erfolgte ab dem 14. August bis 2. Oktober 2002.

**Tabelle 2.1: Düngevarianten des Stickstoffversuches.** Die Einwaagen gelten pro Topf und Dünge-termin (N0: Stickstoffmangel; NÜ: Stickstoffüberschuss).

Variante	Einwaage / 50 ml H <sub>2</sub> O			
N0	0 mg Harnstoff	270 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	60 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50 mg MgSO <sub>4</sub>
NÜ	185 mg Harnstoff	270 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	60 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50 mg MgSO <sub>4</sub>

### Kaliumversuch

Parallel zum Stickstoffversuch wurde im Versuchsjahr 2002/2003 im gleichen Gewächshaus ein Kaliumversuch durchgeführt. Dabei wurden die Varianten Kaliummangel (K0), Kaliumüberschuss (KÜ) und Kalium-Normal (KN) verwendet. Tabelle 2.2 zeigt die Zusammensetzungen der Düngelösungen für die einzelnen Varianten. Außer den angegebenen Düngern wurde jeder Topf mit 1 ‰ Radigen versorgt. Jede Düngevariante umfasste 288 Töpfe (144 Töpfe *R.* 'Sommerabend' + 144 Töpfe *P. laurocerasus* 'Rotundifolia', s. Abb. 2.5), die auf vier Wiederholungen aufgeteilt wurden. Somit ergaben sich 36 Töpfe pro Art, Wiederholung und Düngevariante. Die Düngung erfolgte ab dem 14. August bis 2. Oktober 2002.

**Tabelle 2.2: Düngevarianten des Kaliumversuches.** Die Einwaagen gelten pro Topf und Dünge-termin (K0: Kaliummangel; KN: Kalium-Normal; KÜ: Kaliumüberschuss).

Variante	Einwaage / 50 ml H <sub>2</sub> O			
K0	85 mg Harnstoff	265 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50 mg MgSO <sub>4</sub>
KN	85 mg Harnstoff	265 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	60 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50 mg MgSO <sub>4</sub>
KÜ	85 mg Harnstoff	265 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	180 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50 mg MgSO <sub>4</sub>

### Phosphorversuch

Ein Phosphorversuch wurde 2003/2004 und 2004/2005 jeweils mit *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' durchgeführt. Die 2 g/L Osmocote Variante (OS2) des ersten Versuchsjahres wurde 2004/2005 durch Phosphor-Normal (PN) ersetzt. Da sich beide Varianten in ihrer Zusammensetzung entsprachen und jeweils eine mittlere Phosphorversorgung bewirken sollten, wurde die einheitliche Bezeichnung PN verwendet (Kapitel 6). In beiden Jahren wurden außerdem die Varianten Phosphorüberschuss (PÜ) und Phosphormangel (P0) verwendet. Die Düngemengen für beide Jahre sind in Tab. 2.3 nachzulesen. Außer den angegebenen Düngern wurde jeder Topf mit 1 ‰ Radigen versorgt.

**Tabelle 2.3.: Düngevarianten des Phosphorversuches.** Die Einwaagen gelten pro Topf und Dünge-termin (P0: Phosphormangel; PN: Phosphor-Normal; PÜ: Phosphorüberschuss).

Variante	Einwaage / 50 ml H <sub>2</sub> O			
<b>P0</b>	74 mg Harnstoff	0 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	78 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>
<b>PN (nur 2003/2004)</b>	Grunddüngung mit 2 g/L Osmocote® Plus 3-4M			
<b>PN (nur 2004/2005)</b>	74 mg Harnstoff	350 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	78 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>
<b>PÜ</b>	74 mg Harnstoff	1270 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	78 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>

Jede Variante umfasste 360 Töpfe, die auf drei Wiederholungen aufgeteilt wurden. Das entspricht 60 Töpfen pro Art, Wiederholung und Düngevariante. Gedüngt wurde vom 14. August bis 2. Oktober 2003 bzw. vom 25. August bis 13. Oktober 2004.

### Das Verhältnis von Kalium zu Stickstoff

Ein Versuch zur Untersuchung der Wirkung des Verhältnisses von Kalium zu Stickstoff (K/N) wurde 2003/2004 nur mit *Rosa* 'Sommerabend' durchgeführt. Im Versuchsjahr 2004/2005 wurden *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' verwendet. Wie im Phosphorversuch wurden wieder 60 Töpfe pro Art, Wiederholung und Düngevariante verwendet. Die Düngung erfolgte vom 14. August bis 2. Oktober 2003 bzw. vom 25. August bis 13. Oktober 2004. Die Düngezusammensetzung für beide Versuchsjahre befindet sich in Tabelle 2.4. Außer den angegebenen Düngern wurde jeder Topf mit 1 ‰ Radigen versorgt. Die Variante E (600 mg K / 800 mg N) wurde aufgrund hoher Ausfälle im zweiten Jahr nicht mehr untersucht.

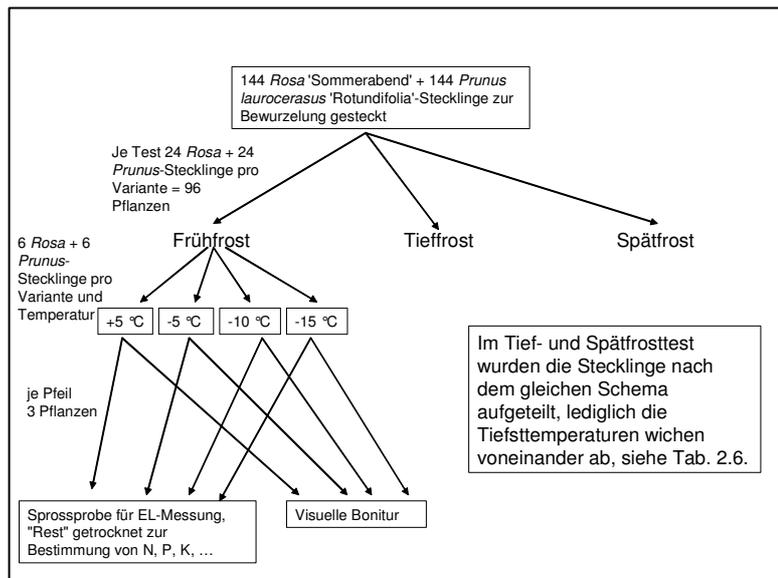
**Tabelle 2.4: Düngevarianten des K/N-Versuches.** Die Einwaagen gelten pro Topf und Düngetermin

Variante (K/N)	Einwaage / 50 ml H <sub>2</sub> O			
<b>A (200 mg K / 270 mg N)</b>	60 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100 mg Harnstoff	350 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>
<b>B (200 mg K / 500 mg N)</b>	60 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	185 mg Harnstoff	350 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>
<b>C (400 mg K / 200 mg N)</b>	120 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	74 mg Harnstoff	350 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>
<b>D (400 mg K / 530 mg N)</b>	120 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	196 mg Harnstoff	350 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>
<b>E (600mg K / 800 mg N)</b>	180 mg K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	296 mg Harnstoff	350 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	65 mg MgSO <sub>4</sub>

Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch für den Stickstoffversuch die Aufteilung der Pflanzen auf die drei Testtermine, die verschiedenen Temperaturen sowie die anschließende Weiterverwendung. Unabhängig von der Versuchsfrage wurden in jedem Frosttest jeweils sechs Pflanzen pro Variante drei verschiedenen Testtemperaturen

sowie einer Kontrollbehandlung (+5 °C) ausgesetzt, d. h. in jedem Test wurden 24 Pflanzen verwendet, die anschließend für die EL-Messung und für die Laboranalysen verwendet wurden. Zusätzlich wurden drei (1. Versuchsjahr) bzw. vier (2. und 3. Versuchsjahr) Pflanzen pro Variante den gleichen Testtemperaturen und der Kontrollbehandlung ausgesetzt und anschließend im Gewächshaus weiterkultiviert (s. u. Visuelle Bonitur). Insgesamt wurden damit 36 (1. Versuchsjahr) bzw. 40 (2. und 3. Versuchsjahr) Pflanzen pro Variante für jeden Frosttest verwendet.

**Abbildung 2.5: Übersicht über die Verwendung der Stecklinge für Frosttests und Mineralstoffanalysen am Beispiel des Stickstoffversuches.**



### Probennahme zur Mineralstoffbestimmung

Damit die EL-Messungen, die Stickstoff- und Kaliumanalysen an der gleichen Stichprobe erfolgen konnten wurden direkt nach jedem Frosttest die sechs Testpflanzen jeder Variante zur Analyse der Inhaltsstoffe als Mischprobe (unabhängig von der Testtemperatur jedoch nach Spross und Wurzel getrennt) getrocknet. Die Trocknung erfolgte aufgrund der geplanten Zucker- und Prolinbestimmungen bei 70 °C. Nach vollständiger Trocknung wurden die Pflanzenproben fein gemahlen, nachgetrocknet und bis zur Analyse im Exsikkator aufbewahrt. Eine evtl. durch die Waschung der Wurzeln erfolgte Auswaschung von Nährstoffen konnte nicht ausgeschlossen werden und wurde dementsprechend bei der Interpretation der Daten berücksichtigt.

### **Visuelle Bonitur**

Einige Pflanzen wurden zur weiteren Beobachtung nach erfolgtem Frosttest im Gewächshaus weiter kultiviert und ca. vier Wochen nach der Frostbehandlung bonitiert. Da es sich um eine sehr geringe Anzahl (drei bzw. vier Pflanzen) gehandelt hat, sind die Daten nicht generell in die Auswertung eingeflossen.

### **Ermittlung des Stickstoffgehaltes**

Der Gesamt-Stickstoffgehalt wurde in einer oxidativen Verbrennung mit Hilfe des Elementaranalysators VarioMax<sup>®</sup> bestimmt. Das Prinzip dieser Analyse beruht auf der Verbrennung organischer Substanz bei 900 °C mit dosierter Sauerstoffzufuhr, wobei Stickstoff gasförmig entweicht. Die entstehenden Gase werden mit einer Wärmeleitfähigkeits-Messzelle gemessen. Der VarioMax<sup>®</sup> des Labors der Abteilung Baumschule misst sowohl den Stickstoff-, als auch den Kohlenstoffgehalt. Für die Analyse wurden 300 mg jeder gemahlten Pflanzenprobe mit Wiederholung in Tiegel eingewogen, in den Elementaranalysator gestellt und automatisch gemessen. Die Ergebnisse wurden in % N bzw. % C in der Trockensubstanz (TS) angegeben.

### **Ermittlung des Kaliumgehaltes**

Zur Bestimmung des Kaliumgehaltes wurden von jeder Mischprobe (s. o.) 0,1 g TS doppelt eingewogen und bei 480 °C verascht. Die Asche wurde in 4 ml 0,5 n HCl gelöst, filtriert und in Reagenzgläser überführt. Für die Ermittlung des Kaliumgehaltes wurden anschließend 0,1 ml Probe mit 9,9 ml CsCl Puffer versetzt und die Konzentration im AAS gemessen.

### **Zuckerbestimmung**

Die Glucose- und Fructosegehalte wurden nach BOEHRINGER (1984) enzymatisch bestimmt. Abweichend von der Originalanleitung wurden 1/2 Micro-Küvetten verwendet (PLASTIBRAND<sup>®</sup> Einmal-Küvetten, 1,5 ml, halbmikro PS).

### **Prolinbestimmung**

Die Prolinbestimmung wurde in Anlehnung an STRANSKY (1999), STEINERT & BIELKA (1990), BATES et al. (1973) und KALDY & FREYMAN (1984) durchgeführt. Von jeder Probe wurden ca. 200 mg Trockensubstanz in 2 ml Eppendorf Safe Lock Tubes doppelt eingewogen und mit 1,8 ml 10 % Sulfosalicylsäure versetzt. Die Ansätze

wurden homogenisiert, 30 min auf Eis inkubiert und nochmals homogenisiert. Bei 10.000 Umdrehungen/min wurden die Eppendorfgefäße anschließend für 15 Minuten zentrifugiert. 500 µl des Überstandes wurden in neue Eppendorfgefäße vorgelegt. Nach Zugabe von 300 µl Eisessig und 300 µl Ninhydrinreagenz (Gemisch aus 60 %iger Essigsäure und 85 %iger Ortho-Phosphorsäure und 25 mg/ml Ninhydrin) wurden die Tubes 45 min bei 100 °C im Wasserbad inkubiert und anschließend in Eiswasser abgekühlt. Nach Überführung in kleine Reagenzgläser ergab sich durch Zugabe von 3 ml Toluol und anschließendem Homogenisieren ein Überstand von etwa 2,50 ml (Toluolphase), der bei 520 nm in Quarzküvetten (Photometer Cadas 30, Dr. Lange) vermessen wurde. Für die Eichgerade wurden Standards mit folgenden Gehalten angesetzt: 25 µM, 50 µM, 100 µM, 200 µM, 300 µM, 400 µM, 500 µM.

### Durchführung der Frosttests

In jedem Versuchsjahr sind Früh-, Tief- und Spätfrosttoleranz unter kontrollierten Bedingungen getestet worden (Tab. 2.5). Um die Wurzeln vor zu niedrigen Temperaturen zu schützen, wurden die Testpflanzen zu je zwölf in nach oben offene Styroporkisten gestellt. Die einzelnen Temperaturen sind Tabelle 2.6 zu entnehmen.

**Tabelle 2.5: Zusammenstellung der Termine der einzelnen Frosttests der Jahre 2002 bis 2005**  
(N = Stickstoffversuch, K = Kaliumversuch, K/N = K/N-Versuch, P = Phosphorversuch).

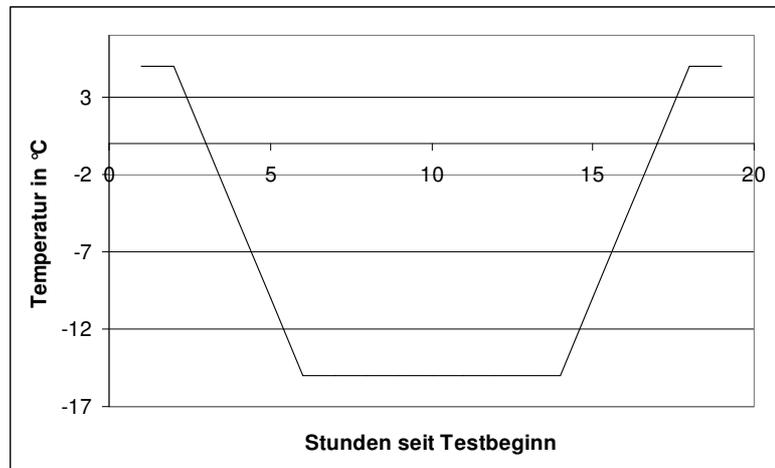
Termin	2002/2003	2003/2004	2004/2005
<b>Frühfrost</b>	5. Nov. 2002 (N) 21. Okt. 2002 (K)	3. Nov. 2003 (K/N + P)	8. Nov. 2004 (K/N + P)
<b>Tieffrost</b>	19. Dez. 2002 (N) 13. Jan. 2003 (K)	19. Jan. 2004 (K/N + P)	17. Jan. 2005 (K/N + P)
<b>Spätfrost</b>	7. April 2003 (N) 24. März 2003 (K)	5. April 2004 (K/N + P)	11. April 2005 (K/N + P)

**Tabelle 2.6: Tiefsttemperaturen aller durchgeführten Frosttests der Jahre 2002 bis 2005.**

Termin	2002/2003 und 2003/2004				2004/2005			
<b>Frühfrost</b>	+5 °C (Kontrolle)	-5 °C	-10 °C	-15 °C	+5 °C (Kontrolle)	-5 °C	-8 °C	-10 °C
<b>Tieffrost</b>	+5 °C (Kontrolle)	-10 °C	-15 °C	-20 °C	+5 °C (Kontrolle)	-5 °C	-8 °C	-10 °C
<b>Spätfrost</b>	+5 °C (Kontrolle)	-5 °C	-8 °C	-10 °C	+5 °C (Kontrolle)	-3 °C	-5 °C	-8 °C

Die Starttemperatur jedes Testes lag bei +5 °C. Die Abkühlung erfolgte mit 5 °C/h, die Tiefsttemperatur wurde jeweils für acht Stunden gehalten. Das anschließende Auftauen erfolgte wiederum unter kontrollierten Bedingungen mit 5 °C/h (Abb. 2.6).

**Abbildung 2.6: Exemplarischer Temperaturverlauf einer Klimakammer im Tieffrosttest.**



Die in den ersten beiden Versuchsjahren gewählten Tiefsttemperaturen stellten sich als zu niedrig heraus. Um genauere Aussagen zu ermöglichen, wurden daher die Testtemperaturen im dritten Jahr (2004/2005) höher gewählt (Tab. 2.6).

### **Bestimmung der Elektrischen Leitfähigkeit**

Die Messung der Elektrischen Leitfähigkeit (EL) als Maß für den Frostschaden wurde in Anlehnung an OTTEN (1992) durchgeführt. Nach dem Frosttest wurden von jeder Pflanze (Pflanzen aus den verschiedenen Testkammern und Kontrollpflanzen) definierte Spross- und Wurzelstücke in 30 ml bi-dest. Wasser gegeben (Rollrandgläser mit Deckel): Beim Spross handelte es sich dabei um 2 cm Material direkt oberhalb des Wurzelhalses, die mit bi-dest. Wasser abgespült wurden. Für die Wurzelproben wurde eine etwa 2 cm lange Stichprobe unterhalb des Wurzelhalses entnommen, die ausgewaschen und ebenfalls mit bi-dest. Wasser gespült wurde (Die nicht für die EL-Messung benötigten Pflanzenteile wurden bei 70 °C getrocknet, s. Probenahme zur Mineralstoffbestimmung, S. 25). Die Proben ruhten für 24 h bei Zimmertemperatur. Anschließend erfolgte die erste Messung der Elektrischen Leitfähigkeit (WTW Standard-Leitfähigkeitsmesszelle TetraCon<sup>®</sup> 325). Vor jeder Messung sind die Gläser sorgfältig geschüttelt worden. Alle Proben sind nach der ersten Messung bei ca. 80 °C über Nacht im Ofen abgetötet und nach weiteren 24 h erneut gemessen

worden (2. Messung). Die Berechnung der relativen Elektrischen Leitfähigkeit (REL) wurde nach Formel 1 durchgeführt:

**Formel 1: Die Berechnung der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit nach OTTEN (1992).**

$$\% \text{ REL} = (\text{Leitfähigkeit 1. Messung} * 100) / \text{Leitfähigkeit 2. Messung}$$

Durch diese Berechnung werden die Elektrolyte, die nach erfolgtem Frosttest aufgrund der Zellschädigung aus den Zellen ausgetreten sind, mit den Gesamtelektrolyten ins Verhältnis gebracht. Je höher dieser Wert ausfällt, umso stärker ist die Pflanze geschädigt. In den graphischen Auswertungen dieser Arbeit wird der relative Frostschaden jeweils in % REL angegeben.

Die REL-Werte sind bei den höher gedüngten Varianten in den Kontrollen häufig höher ausgefallen als bei den gering gedüngten Varianten. Dieses Phänomen beruht auf der erhöhten Nährstoff- bzw. Zuckerkonzentration in den vermehrt gedüngten Pflanzen. Die geschädigten Pflanzenzellen setzen zu großen Teilen Kaliumionen frei (PALTA et al., 1977b), wodurch die Messergebnisse sich bereits in den Kontrollen unterscheiden (nicht sig.). Besonders auffällig war dieses Phänomen daher im Kaliumversuch (Kapitel 4) zu beobachten. Um die reale Veränderung der REL-Werte der einzelnen Varianten besser vergleichen zu können, wurde daher die Steigerung der REL-Werte nach Formel 2 berechnet.

**Formel 2: Berechnung der Steigerung der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten.**

$$\text{Anstieg des REL-Wertes} = (\text{REL}_{\text{Frost}} - \text{REL}_{\text{Kontrolle}}) / \text{REL}_{\text{Kontrolle}}$$

### **Chlorophyllfluoreszenzmessung**

Die Chlorophyllfluoreszenz der *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge wurde mit Hilfe des Handy PEA der Firma Hansatech gemessen. Dazu wurde jeweils das zweitjüngste Blatt jeder Pflanze für 15 Minuten durch Anbringen eines "leaf clips" dunkeladaptiert. Die Messung erfolgte ohne Vorbeleuchtung mit einem Lichtblitz für 1 sec (Lichtstärke  $2500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Zur Auswertung wurde anschließend nur der Parameter  $F_v/F_m$  (Variable Fluoreszenz/Maximale Fluoreszenz) herangezogen. Dabei gilt, im Gegensatz zur EL-Messung, je niedriger der  $F_v/F_m$ -Wert, um so stärker ist

die Pflanze in ihrer Fähigkeit Photosynthese zu betreiben beeinträchtigt. Für gesunde Pflanzen können  $F_v/F_m$ -Werte zwischen 0,75 und 0,85 angenommen werden. Liegen die Werte unterhalb dieser Schwelle, muss von einer Schädigung ausgegangen werden (BJÖRKMAN & DEMMING, 1987, TEZARA et al., 2005).

In Tabelle 2.7 sind abschließend alle durchgeführten Versuche, Analysen und Messmethoden zusammengefasst.

**Tabelle 2.7: Übersicht der durchgeführten Versuche und Analysen der Jahre 2002 bis 2004/2005** (Mineral. = Mineralstoffe, + = durchgeführt, - = nicht durchgeführt).

Versuch	Zeitraum	Pflanze	Durchgeführte Analysen				
			Mineral.	Zucker	Prolin	EL	CF
<b>Stickstoff</b>	07/2002-04/2003	<i>Rosa, Prunus</i>	+	+	+	+	-
<b>Kalium</b>	07/2002-04/2003	<i>Rosa, Prunus</i>	+	-	-	+	-
<b>K/N</b>	07/2003-04/2004	<i>Rosa</i>	+	+	+	+	-
<b>K/N</b>	07/2004-04/2005	<i>Rosa, Prunus</i>	+	-	+	+	+
<b>Phosphor</b>	07/2003-04/2004	<i>Rosa, Prunus</i>	+	+	+	+	+
<b>Phosphor</b>	07/2004-04/2005	<i>Rosa, Prunus</i>	+	-	+	+	+

### Statistische Auswertung

Alle **EL Daten** der verschiedenen Frosttests sind jeweils in vier Datensätze (= vier Testtemperaturen) unterteilt worden. Mit LEVENE'S Test auf Varianzhomogenität ( $\alpha = 0,05$ ) wurde zum einen die Homogenität aller Daten des Testes gemeinsam (bspw. *Rosa* 'Sommerabend' Spross Frühfrost Nov. 2002) und zum anderen der einzelnen Datensätze (bspw. *Rosa* 'Sommerabend' Spross Frühfrost Nov. 2002, -5 °C) überprüft. Der LEVENE-Test kann allerdings nur Varianzhomogenität verneinen, d. h., Heterogenität zeigen. Bei sig. Unterschieden mussten die Daten daher als heterogen betrachtet werden. Anschließend wurde mit Hilfe der ANOVA ( $\alpha = 0,05$ ) ein möglicher Einfluss der Düngevarianten überprüft. In den Datensätzen mit Varianzheterogenität wurde die ANOVA trotz Voraussetzungsverletzung durchgeführt, da es sich um sehr geringe Fallzahlen mit teilweise hohen Streuungen handelte. Zeigte sich durch die ANOVA ein sig. Einfluss der Düngung, so erfolgte im Falle varianzhomogener Datensätze die Auswertung mittels TUKEY-Test. Das Testniveau wurde dabei entsprechend der Anzahl an Testtemperaturen auf  $\alpha/4$  (= 0,0125) adjustiert. Im Falle varianzheterogener Daten wurde der Bonferroni-adjustierte WELCH-Test angewendet.

Die Auswertung der **Analyseergebnisse** erfolgte ähnlich. Die Aufteilung in je vier Datensätze war hier jedoch nicht nötig, da die Inhaltsstoffe als Mischprobe über alle Temperaturen bestimmt wurden. Ansonsten erfolgte die Auswertung, wie oben beschrieben, getrennt nach varianzheterogenen bzw. –homogenen Datensätzen. Der TUKEY-Test (varianzhomogene Daten) wurde dabei zum Testniveau  $\alpha$  (= 0,05) durchgeführt. Varianzheterogene Datensätze wurden wiederum mit Hilfe des Bonferroni-adjustierten WELCH-Tests ausgewertet.

Die statistische Auswertung erfolgte grundsätzlich mit Hilfe des Programms R (2005), Version 2.2.1.

### 3. Einfluss von Stickstoff auf die Frosthärte

#### 3.1 Einleitung

Aufgrund der elementaren Bedeutung von Stickstoff für die Pflanzen (siehe auch Kapitel 1, S. 9) haben sich viele Versuche zum Thema Frosthärte hauptsächlich mit dem Einfluss des Stickstoffs befasst. In der bisher verfügbaren Literatur konnte kein eindeutiger Effekt der Stickstoffdüngung herausgestellt werden (siehe auch Tab. 11.1 im Anhang und Tab. 7.1).

BENZIAN & FREEMAN (1967) fanden eine höhere Tieffrosthärte (Dezember) bei Sämlingen von *Picea sitchensis* und *Tsuga heterophylla* bei Stickstoffdüngung im Herbst. HANSEN (1992) erreichte eine höhere Frosthärte bei Sämlingen von *Larix kaempferi*, wenn der Düngezeitraum bis Mitte Oktober ausgedehnt wurde. Endete die Düngung bereits Anfang September, so zeigten die Pflanzen Nährstoffmangel und die Frosthärte war signifikant erniedrigt. Die länger gedüngten Pflanzen zeigten zwar einen späteren Triebabschluss, dieser führte aber nicht zu einer Erniedrigung der Frosthärte. ALDEN & HERMANN (1971) sowie PÜMPEL et al. (1975) führten ebenfalls eine erhöhte Frosthärte auf einen höheren Stickstoffblattgehalt zurück.

TAULAVUORI et al. (1997) erzielten eine höhere Frosthärte nach Stickstoffdüngung bei *Vaccinium myrtillus* und *Vaccinium vitis-idaea* (TAULAVUORI et al., 2001). Den gleichen Effekt erzielten CAPORN et al. (1994) bei *Calluna vulgaris*. Allen drei Spezies ist die Adaption an magere Standorte gemein. Bei extrem hoher Stickstoffversorgung wurde daher eine verlängerte Vegetationsperiode und damit verbunden eine geringere Frosthärte erwartet. Diese Annahme stellte sich aber in allen drei Versuchen als nicht haltbar heraus (TAULAVUORI et al., 2001).

Eine Erklärung für den positiven Effekt einer Stickstoffdüngung auf die Frosthärte findet sich bei SAKAI & LARCHER (1987): Danach kann eine höhere Stickstoffgabe die Blattgehalte von Stoffen erhöhen, denen eine Schutzfunktion für die zellulären Membranen nachgesagt wird (Cryoprotektion), bspw. Prolin, Arginin und andere Aminosäuren, Proteine (SHEPPARD, 1994) und Nukleinsäuren. Es besteht außerdem die Annahme, dass Pflanzen mit einem hohen Stickstoffgehalt eine frühere Adaption an den Winter zeigen. So erhöhte sich die Frühfrosthärte in *Picea rubens*

nach einer erhöhten Stickstoffgabe (L'HIRONDELLE et al., 1992). Dabei wurde eine geringere Photosyntheserate und verringerte Transpiration gegenüber Vergleichspflanzen mit niedrigerem Stickstoffangebot festgestellt. Nach L'HIRONDELLE et al. (1992) ist die Entwicklung der Frosthärte bei Koniferen mit einer Reduktion der Photosynthese aufgrund von Veränderungen in den Chloroplasten und Stomata verbunden.

Stickstoff beeinflusst nicht nur im Sommer sondern auch während des Winters die Aktivität und Beständigkeit des Photosyntheseapparates. Die Erholung der Photosynthese von Frostereignissen hängt zumindest teilweise von der Syntheserate und/oder dem Ersatz beschädigter Proteine ab (ÖQUIST & MALMBERG, 1989), die zur Verfügung stehende Stickstoffmenge beeinflusst diesen Prozess. HAWKINS et al. (1995) ermittelten bei *Pseudotsuga menziesii*-Sämlingen während des ganzen Winters höhere Frostschäden (nicht signifikant) bei der am niedrigsten mit Stickstoff versorgten Variante. Im gleichen Versuch hatte die Stickstoffdüngung einen signifikanten Effekt auf die Erholung der Nettophotosynthese bei *Thuja plicata*- und *Pseudotsuga menziesii*-Sämlingen. Nach 28 Tagen hatten sich die Varianten mit hohen Stickstoffgaben am besten erholt.

Eine weitere Erklärung für einen positiven Effekt einer Stickstoffdüngung auf die Frosthärte findet sich bei GLERUM (1985): Während der Abhärtung erhöhen sich die Konzentrationen der löslichen Stoffe in den Zellen, dies gilt auch für N, P und K. Eine durchgängige Düngung auf hohem Niveau kann daher die Frosthärte erhöhen, bspw. konnten KLEIN et al. (1989) eine höhere Frosthärte bei ausreichend mit Stickstoff gedüngten als bei gering mit N versorgten *Picea rubens*-Sämlingen feststellen.

Neben den Literaturangaben, die einen positiven Stickstoffeffekt nachweisen, gibt es ebenso viele Versuche, die einen negativen Effekt der Stickstoffdüngung auf die Frosthärte festgestellt haben. So gehen LEVITT (1956, 1966, 1980) und GRANT et al. (1984) davon aus, dass hohe Stickstoffgaben das Wachstum verlängern und damit den Beginn der Akklimatisierung verzögern. Nach LARCHER (1976) zeigen Pflanzen mit optimaler bzw. überoptimaler N-Versorgung außerdem eine geringere Spätfrostresistenz, da es durch hohe Stickstoffgaben zu einem früheren Austrieb im Frühjahr kommen kann. Stickstoffgaben nach Beendigung der Wachstumsperiode

haben bei Koniferen keinen Einfluss auf die Winterfrosthärte gezeigt. Es kam aber zu einem früheren Austrieb im Jahr nach der Düngung, was die Gefahr von Spätfrostschäden erhöhte (ALDHOUS, 1972; BENZIAN et al., 1974). In Versuchen von PÜMPEL et al. (1975) trieben *Picea abies* nach hohen N-Gaben früher aus und hatten eine höhere Spätfrostgefahr. LARSEN (1976) fand bei *Pseudotsuga menziesii*-Sämlingen eine geringere Früh- und Tieffrosthärte bei hohem Stickstoffgehalt der Nadeln. JALKANEN et al. (1998) erreichten eine höhere Frosthärte in Nadeln von *Picea sitchensis* durch Stickstoffmangelernährung. Dieser Effekt war sowohl beim Früh-, als auch beim Spätfrost am deutlichsten zu erkennen. TINGLEY et al. (1938) ermittelten eine geringere Frosthärte bei jungen Apfelbäumen (Sorte 'Baldwin'), die im Oktober mit Ammoniumsulfat gedüngt wurden. WAY (1954) vermutet, dass eine hohe Ammoniumnitratdüngung im Spätherbst die Frosthärte erniedrigt. Eine Untersuchung von EDGERTON (1957) zeigte, dass eine hohe Stickstoffgabe im Herbst vor allem die Frühfrostempfindlichkeit (November) von Apfelzweigen und -rinde (Sorte 'Cortland') erhöht. Nach LEVITT (1956) ist während der Abhärtung ein niedriger Stickstoffgehalt sowie ein hoher Phosphor- und/oder Kaliumgehalt nötig. Nach seiner Meinung fördert N das Wachstum und verzögert damit die Abhärtung. P und K fördern dagegen die Entwicklung der Frosthärte. GRANT et al. (1984) fanden heraus, dass eine erniedrigte Frosttoleranz aufgrund hoher Stickstoffraten zumindest teilweise durch zusätzliche Phosphorgaben, die dem Ungleichgewicht der Nährstoffe entgegen wirkten, überwunden werden konnte. KOSKELA (1970) und HELLEREGREN (1981) sind dagegen der Meinung, dass Stickstoff- oder Phosphorgaben während der Vegetationsperiode das Wachstum bis in den späten Sommer verlängern und dadurch die Abhärtung im Herbst verzögern. ARONSSON (1980) und HELLEREGREN (1981) berichten, dass eine hohe Stickstoffdüngung die Frosthärte von *Pinus sylvestris* beeinträchtigt.

Der Zeitpunkt der Düngergabe beeinflusst nach SKRE (1988) die Frosthärte, eine hohe Stickstoffgabe während der gesamten Vegetationsperiode führte bei vielen Arten zur Erniedrigung der Frosttoleranz (LARSEN et al., 1978; EDWARDS, 1989; LÜDDERS & HENZE, 1971). Stickstoffgaben nach Beendigung des Sprosswachstums erniedrigten die Frühfrosthärte bei *Picea sitchensis* (BENZIAN & FREEMAN, 1967) bzw. führten zu einer geringeren Spätfrosthärte durch früheres Austreiben (BENZIAN et al., 1974). HAWKINS et al. (1996) untersuchten daher den Einfluss des

Düngezeitpunktes auf Sämlinge von *Pseudotsuga menziesii* und *Thuja plicata*. Dabei wurden die Sämlinge in drei Gruppen aufgeteilt: Die Kontrollpflanzen erhielten während des gesamten Versuchszeitraumes die gleiche Düngelösung, die Variante "hoch-niedrig" erhielt erst eine Nährlösung mit hohen Nährstoffgehalten und im Anschluss nur noch eine gering konzentrierte Lösung. Die "niedrig-hoch" Variante wurde entsprechend umgekehrt behandelt. Es ergab sich dabei kein Unterschied im Sprossgehalt der analysierten Elemente. Bei *Pseudotsuga menziesii* zeigte sich aber von Oktober bis Dezember ein signifikanter Einfluss des Düngezeitpunktes auf die Frosthärte, während *Thuja plicata* nur im Oktober und Dezember signifikante Unterschiede in der Frosthärte zeigte. Von Oktober bis Dezember erreichten die *Pseudotsuga menziesii*-Kontrollpflanzen die größte Frosthärte. Die "hoch-niedrig" gedüngten Pflanzen zeigten die niedrigste Frosthärte, während die "niedrig-hoch" gedüngten Varianten zwischen den beiden anderen Varianten lagen. Der Sprossgehalt alleine kann daher nicht bestimmend für die Frosthärte sein, da HAWKINS et al. (1996) Unterschiede in der Frosthärte ermitteln konnten, obwohl sich der Sprossgehalt der untersuchten Elemente nicht unterschied. Diese fehlenden Unterschiede sind evtl. auf Verdünnungseffekte aufgrund unterschiedlichen Wachstums der Varianten zurückzuführen. PELLETT & WHITE (1969), TIMMIS (1974) und HAWKINS et al. (1995) konnten in ihren Arbeiten auch nur eine geringe Korrelation zwischen Nährstoffgehalt und Frosthärte ermitteln. Die signifikanten Unterschiede in der Frosthärte lassen daher auf den Einfluss des Düngezeitpunktes auf die Frosthärte schließen (HAWKINS et al., 1996).

Einige wenige Arbeiten konnten keinen Einfluss einer Stickstoffdüngung auf die Frosthärte ermitteln: PELLETT & WHITE (1969a) und BIGRAS et al. (1989a, 1989b) fanden keinen signifikanten Einfluss einer Stickstoffdüngung im Herbst auf die Akklimatisierung von *Juniperus chinensis*. Nach PELLETT (1973) hat das Stickstoffdüngerniveau während des Sommers und des Herbstes kaum Einfluss auf die Akklimatisierung von Spross und Wurzeln von *Forsythia x intermedia* 'Lynwood' und *Cornus alba* var. *sibirica*. THOMAS & AHLERS (1999) konnten keinen signifikanten Einfluss einer luxuriösen Stickstoffdüngung auf die Tieffrosthärte von *Quercus petraea* und *Quercus robur* finden. WIEMKEN et al. (1996) konnten keinen Effekt einer Stickstoffdüngung auf die Frosthärte von *Picea abies* nachweisen.

TIMMIS (1974) fand keinen Zusammenhang zwischen N-, P- oder K-Gehalten und der Frosthärte von *Pseudotsuga menziesii*. Nach PELLETT & CARTER (1981) wird die Frosthärte nur von den Nährstoffkonzentrationen beeinflusst, wenn diese ein Defizit an N, P oder K verursachen.

Welchen Einfluss die Stickstoffdüngung auf die Frosthärte stecklingsvermehrter Gehölze im ersten Winter hat, ist bisher kaum untersucht worden. Die eingangs erwähnten Arbeiten sind hauptsächlich in Freilandkulturen durchgeführt worden, deren Ergebnisse nicht unbedingt mit den Einflüssen auf stecklingsvermehrte Gehölze korrelieren müssen. Lediglich PELLETT & WHITE (1969a) und PELLETT (1973) haben Arbeiten mit stecklingsvermehrten *Forsythia*, *Cornus* und *Juniperus* veröffentlicht.

Bezüglich der Frosthärte ist die erste Überwinterung stecklingsvermehrter Gehölze eine sehr sensible Phase. In dem auf den folgenden Seiten vorgestellten Versuch ist daher unter kontrollierten Bedingungen beispielhaft der Einfluss einer erhöhten Stickstoffversorgung auf die Frosthärte stecklingsvermehrter *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' untersucht worden. Hypothese war eine Verlängerung der Wachstumsperiode und damit eine geringere Frosthärte der besser mit Stickstoff versorgten Pflanzen.

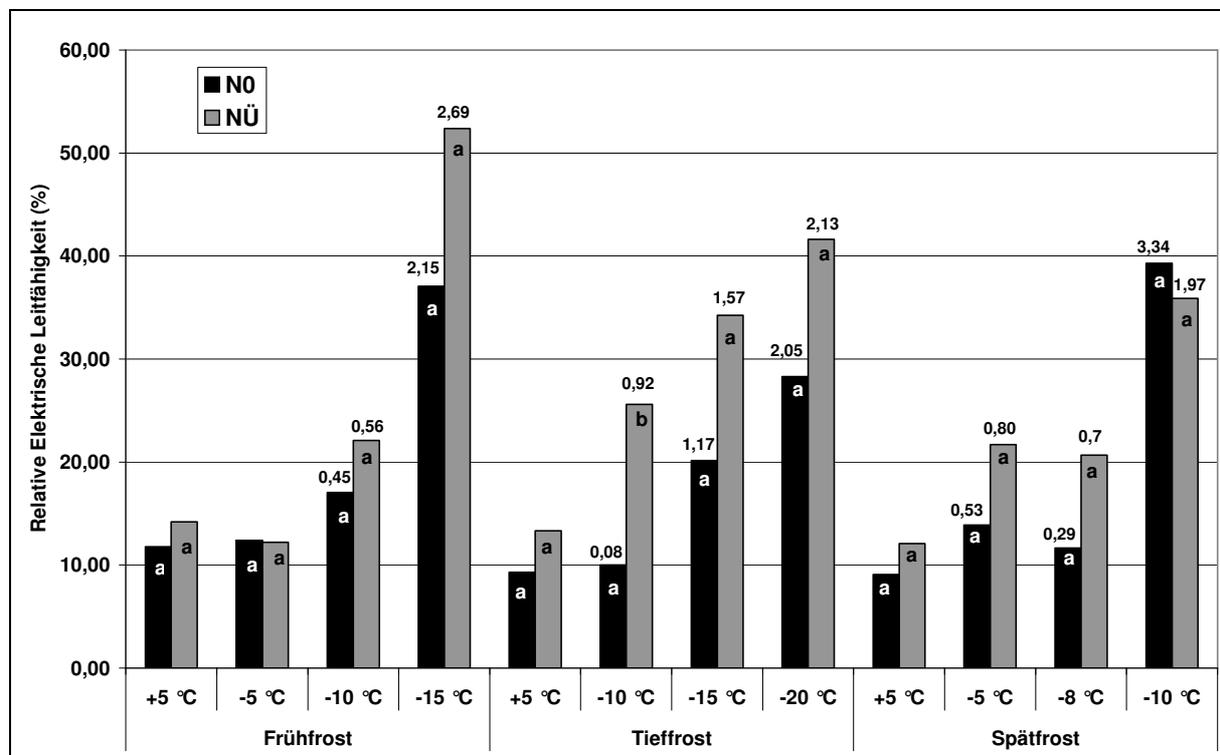
## 3.2 Ergebnisse

Bei den folgenden Ergebnissen handelt es sich um den Stickstoffversuch von November 2002 bis April 2003. Material und Methoden sind in Kapitel 2 nachzulesen.

### 3.2.1 Einfluss von Stickstoff auf die Frosthärte von *Rosa* 'Sommerabend'

#### Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses

Die Variante NÜ wurde bei jeder Testtemperatur unabhängig vom Testzeitpunkt stärker geschädigt als die Variante N0 (Ausnahmen: Frühfrost -5 °C und Spätfrost -10 °C). Die ANOVA ermittelte zu allen drei Testzeitpunkten einen sig. Einfluss der Düngervariante. Im TUKEY-Test konnten jedoch sig. Unterschiede nur für den Tiefrosttest bei -10 °C festgestellt werden. Abbildung 3.1 zeigt neben den ermittelten REL-Werten auch die Vervielfachung der REL-Werte gegenüber der jeweiligen Kontrollmessung. So stieg bspw. im Frühfrosttest die Relative Elektrische Leitfähigkeit der Variante N0 bei -15 °C um das 2,15-fache gegenüber der Kontrolle (+5 °C), während der REL-Wert der Variante NÜ um das 2,69-fache gegenüber der Kontrolle anstieg.



**Abbildung 3.1: Einfluss von Frostungstemperatur und -zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher N-Ernährung.** Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

Trotz fehlender sig. Unterschiede wurden die Testtemperaturen  $-10\text{ °C}$  und  $-15\text{ °C}$  des Frühfrosttestes weiter betrachtet, da ein tendenzieller Zusammenhang zwischen den REL-Werten und den Stickstoffgehalten bestehen könnte. Für den Tief- und Spätfrosttest lagen keine Stickstoffgehalte vor, so dass hier nur die REL-Werte betrachtet werden konnten.

### Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Stickstoff-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalt des Sprosses

Die Variante NÜ enthielt sig. mehr Stickstoff und Prolin als N0 (Abb. 3.2). Die Glucose- und Fructosegehalte der Varianten unterschieden sich nicht sig. voneinander. Mit steigenden Stickstoffgehalten stiegen im Frühfrosttest auch die REL-Werte ( $-10\text{ °C}$  und  $-15\text{ °C}$ , Abb. 3.2). Die Variante NÜ hatte den höchsten Stickstoff- und Prolingehalt und bei  $-10\text{ °C}$  sowie bei  $-15\text{ °C}$  ebenfalls die höchsten REL-Werte.

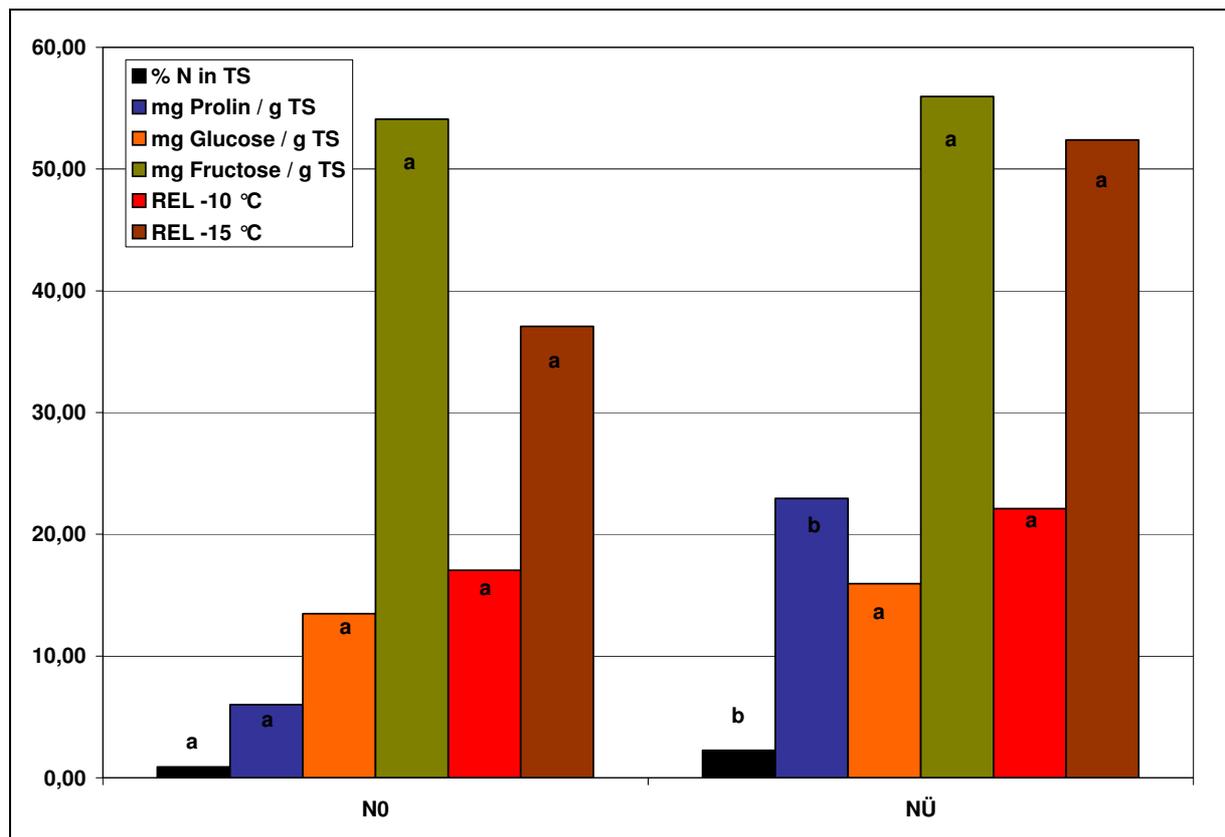
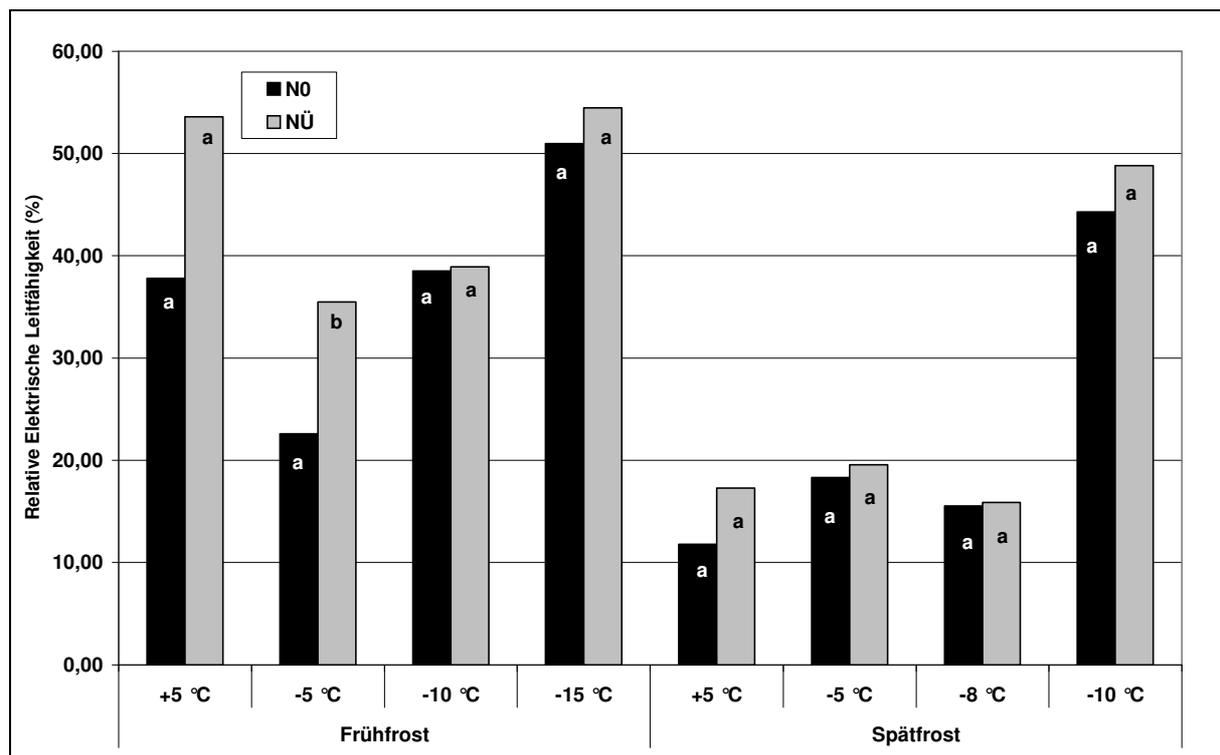


Abbildung 3.2: Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte ( $-10\text{ °C}$  und  $-15\text{ °C}$ ) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

### Relative Elektrische Leitfähigkeit der Wurzeln

Eine vergleichende Betrachtung der REL-Werte der Wurzeln über alle Temperaturen des Frühfrosttestes war nicht möglich, die Messdaten der Kontrollpflanzen (+5 °C) waren höher als die REL-Werte der Frosttestes bei -5 °C und -15 °C (Abb. 3.3). Die Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden. Innerhalb der jeweiligen Testtemperatur unterschieden sich N0 und NÜ nur bei -5 °C im Frühfrosttest sig. voneinander. Bei dieser Temperatur hatte die Variante NÜ sig. höhere REL-Werte als N0. Daher wurde nur die Testtemperatur -5 °C den Stickstoffgehalten gegenübergestellt.



**Abbildung 3.3: Einfluss von Frostungstemperatur und -zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa 'Sommerabend'* (Wurzel) bei unterschiedlicher N-Ernährung.** Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

Die Ergebnisse der EL-Messungen der Wurzeln des Spätfrosttestes schwankten ebenfalls leicht innerhalb der Varianten. Dies galt besonders für die REL-Werte bei -5 °C und -8 °C. Es konnte bei keiner Temperatur ein sig. Unterschied zwischen den Varianten festgestellt werden. Nährstoffanalysen lagen für die Wurzeln des Spätfrosttestes nicht vor, daher konnten hier keine weiter gehenden Aussagen getroffen werden.

### Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Stickstoff-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalt der Wurzeln

Erwartungsgemäß zeigte die Variante NÜ einen sig. höheren N-Gehalt als N0. Der Prolingehalt war in der Variante NÜ ebenfalls sig. höher, während der Glucose- bzw. Fructosegehalt sig. niedriger war als in der Variante N0. Die REL-Werte (-5 °C) stiegen mit steigenden Stickstoffgehalten an. Die Variante NÜ hatte damit sowohl einen sig. höheren REL-Wert als auch einen sig. höheren Stickstoffgehalt als N0 (Abb. 3.4).

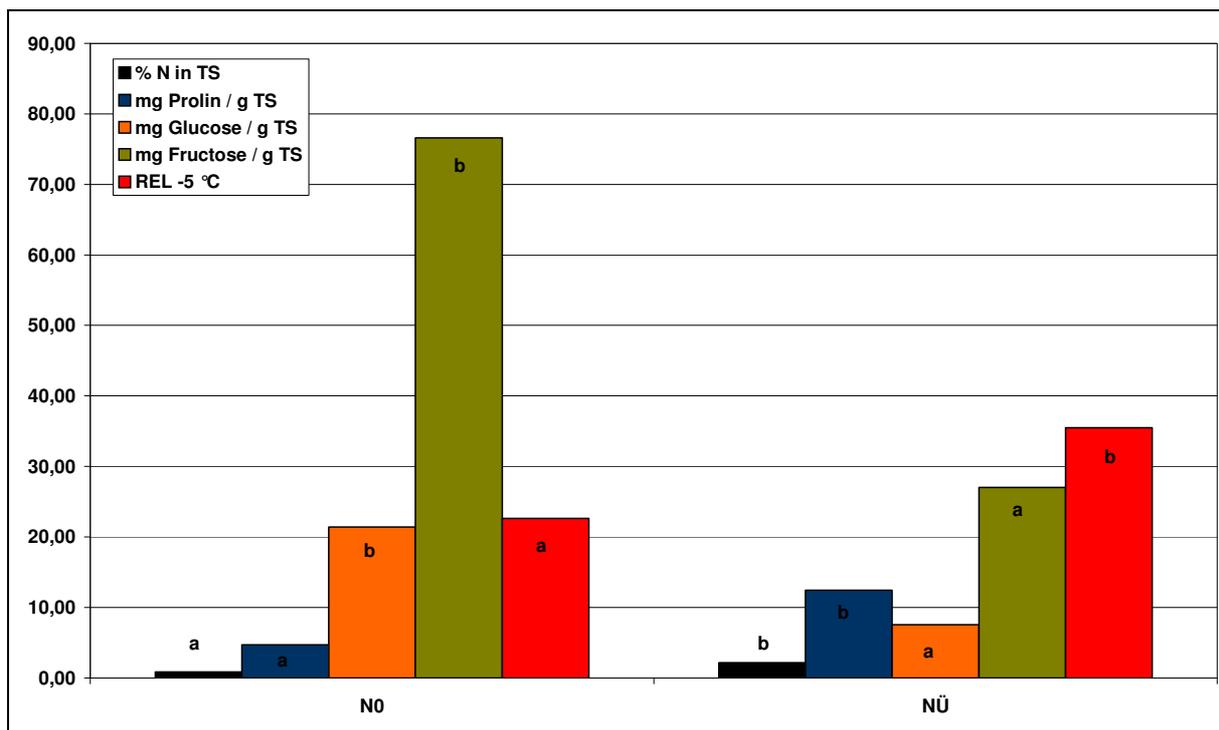


Abbildung 3.4: Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) im Frühfrost. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

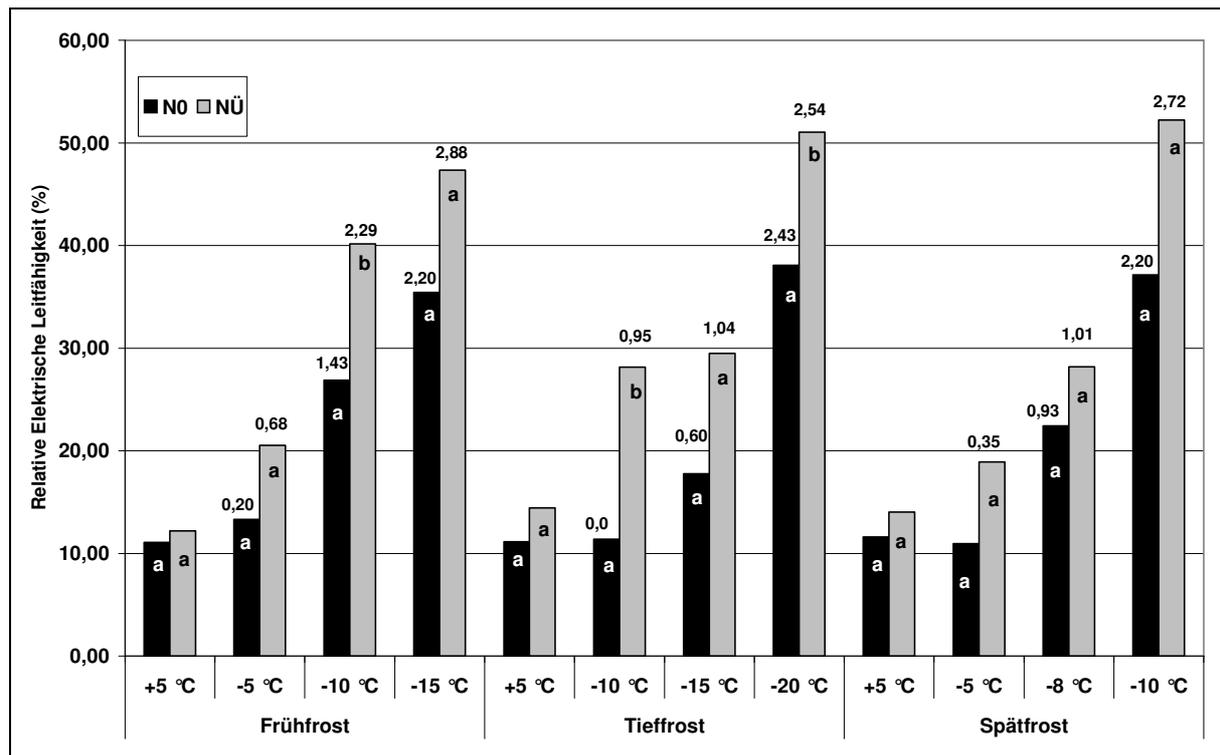
### 3.2.2 Einfluss von Stickstoff auf die Frosthärte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'

#### Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses

Im **Frühfrosttest** führte nur die Testtemperatur -10 °C zu sig. Unterschieden zwischen den Düngevarianten. Die Variante NÜ hatte einen sig. höheren REL-Wert als N0 (Abb. 3.5). Der REL-Wert der Variante NÜ war bei -10 °C 2,29-mal so hoch wie der Kontrollwert. Bei der Variante N0 führte diese Temperatur nur zu einem 1,43-fachen Anstieg des REL-Wertes. Auch bei -15 °C zeigte die Veränderung der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten deutliche Unterschiede (2,20 zu 2,88).

Im **Tiefrosttest** wurde die Variante NÜ bei allen Frosttemperaturen deutlich stärker geschädigt als die Variante N0. Bereits bei -10 °C kam es bei NÜ zu einem Anstieg des REL-Wertes um 95 % während sich der REL-Wert der Variante N0 nur um 2 % gegenüber der Kontrolle veränderte. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wurden bei -10 °C und -20 °C festgestellt (Abb. 3.5). Beide Male hatte die Variante NÜ sig. höhere REL-Werte als N0. Der Unterschied der REL-Werte bei -15 °C musste als nicht sig. eingestuft werden.

Die ANOVA ermittelte im Spätfrosttest ebenfalls einen Einfluss der Düngevariante, trotzdem konnte im TUKEY-Test bei keiner Testtemperatur ein sig. Unterschied zwischen den Varianten gezeigt werden. Auffallend waren jedoch die REL-Werte der Variante NÜ, die bei jeder Testtemperatur höher waren als bei N0 (Abb. 3.5).



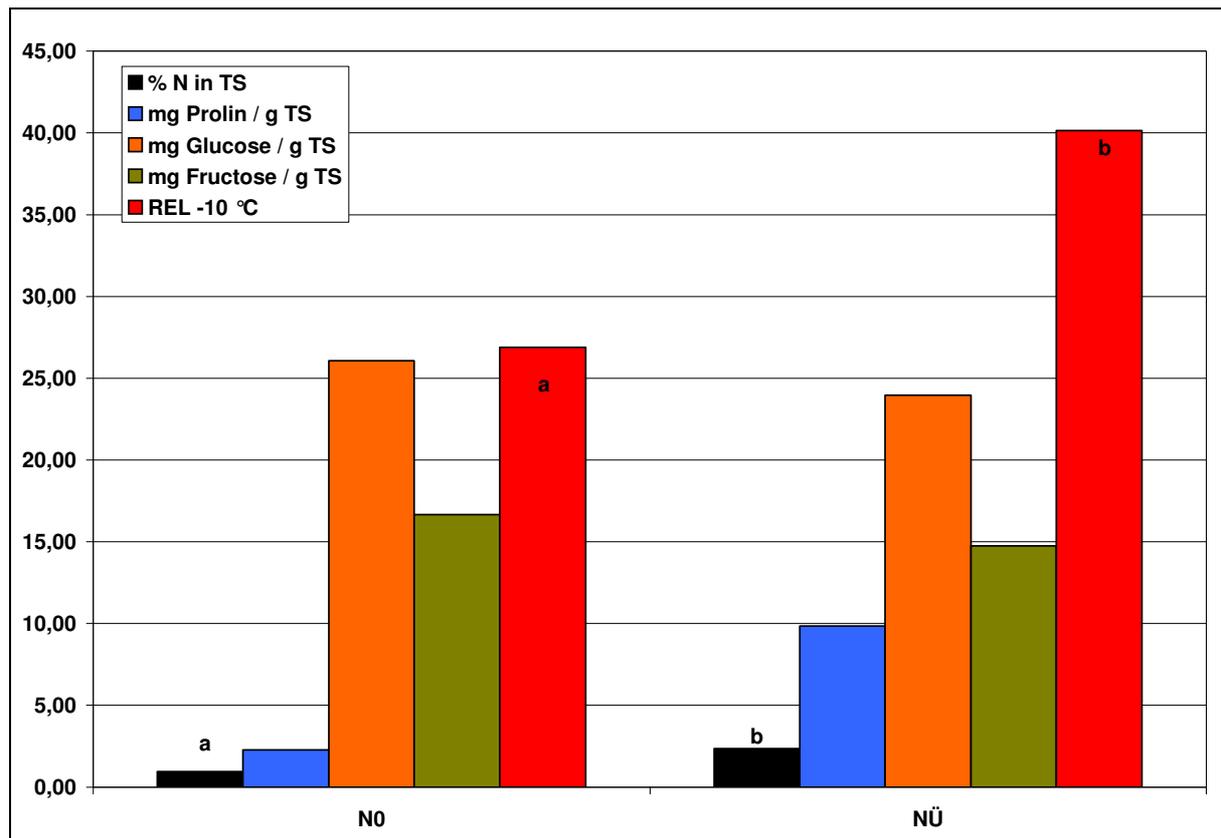
**Abbildung 3.5: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher N-Ernährung.** Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

### Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Stickstoff-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalt des Sprosses

Die Varianten unterschieden sich im Frühfrosttest deutlich in ihrem Stickstoffgehalt (Abb. 3.6). Die Variante NÜ hatte einen sig. höheren N-Gehalt als N0.

Aufgrund der Varianzheterogenität der Analyseergebnisse (LEVENE-Test) für Prolin, Glucose und Fructose musste die weitere statistische Auswertung mit Hilfe des Bonferroni-adjustierten WELCH-Testes fortgeführt werden. Durch das damit verbundene niedrige  $\alpha$  konnten trotz der offensichtlichen Unterschiede in den Prolin-, Glucose- und Fructosegehalten keine Signifikanzen gezeigt werden.

Mit steigendem Stickstoffgehalt stiegen die REL-Werte (-10 °C) an (Abb. 3.6). Die Variante NÜ (sig. höherer Stickstoffgehalt) wurde bei jeder Testtemperatur stärker geschädigt als N0. Die Variante NÜ hatte außerdem einen niedrigeren Glucose- und Fructosegehalt sowie einen höheren Prolingehalt als N0 (nicht sig.).

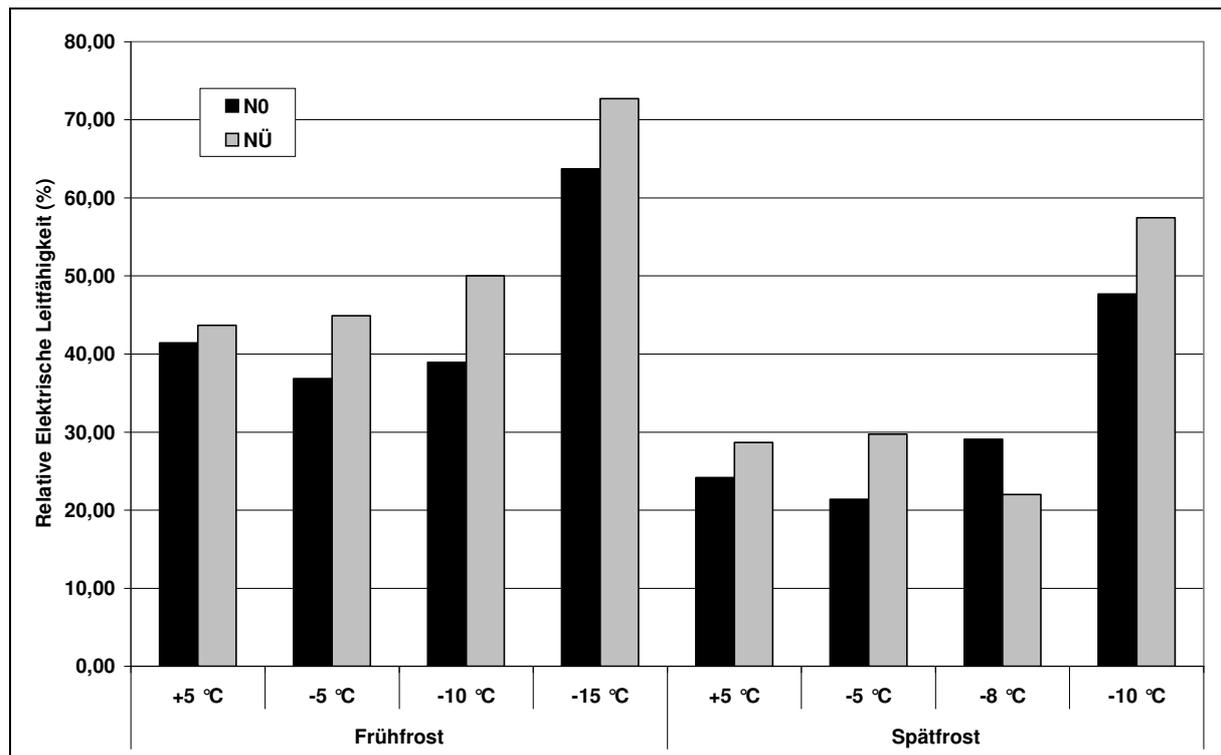


**Abbildung 3.6:** Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolin-, Glucose- und Fructosegehalte unterschieden sich nicht signifikant.

### Relative Elektrische Leitfähigkeit der Wurzeln

Durch die starke Streuung der REL-Werte konnten im Frühfrosttest trotz eines signifikanten Einflusses der Düngevariante (ANOVA) im TUKEY-Test keine sig. Unterschiede zwischen den Varianten nachgewiesen werden (Abb. 3.7). Die vergleichende Betrachtung der REL-Werte über alle Testtemperaturen wurde außerdem durch die Schwankungen der Variante N0 erschwert (Vergleich +5 °C und -5 °C).

Im Spätfrosttest konnte bereits bei der ANOVA kein sig. Einfluss der Düngevariante nachgewiesen werden. Die REL-Werte der Wurzeln schwankten innerhalb der beiden Varianten. Bei N0 sank der REL-Wert bei -5 °C, bei NÜ bei -8 °C unter den ermittelten Wert der Kontrollmessung (Abb. 3.7). Eine Analyse der Mineralstoffgehalte ist nicht erfolgt, es konnten daher keine differenzierten Aussagen getroffen werden. Wie bereits bei *Rosa* 'Sommerabend' erwähnt, waren die Wurzeln in der Tieffrostphase kein Untersuchungsgegenstand.

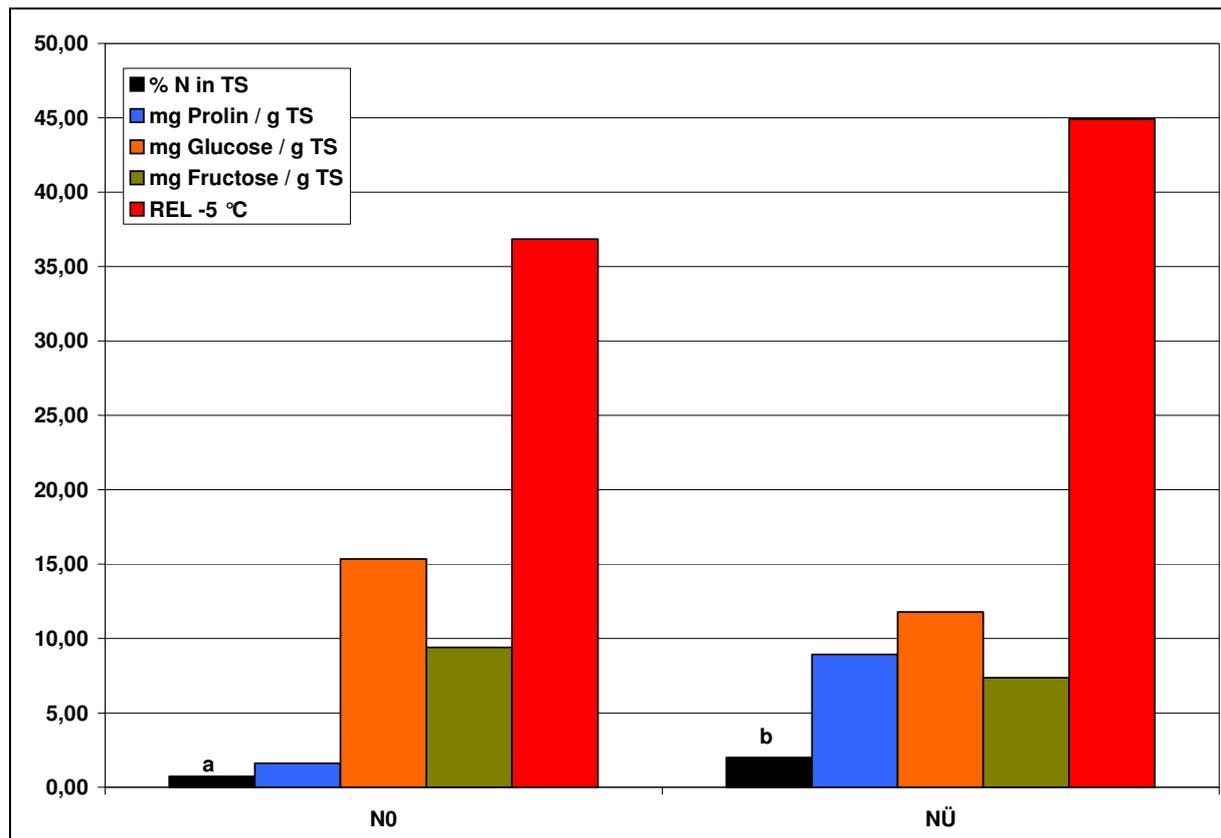


**Abbildung 3.7: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher N-Ernährung.** Zu keinem Zeitpunkt bzw. bei keinem Frosttest unterschieden sich die Varianten signifikant.

### **Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Stickstoff-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalt der Wurzeln**

Die Variante NÜ hatte im Frühfrosttest einen sig. höheren Stickstoffgehalt in den Wurzeln als N0 (Abb. 3.8). Der Prolingehalt unterschied sich aufgrund der starken Streuung der Messwerte nicht signifikant zwischen den beiden Varianten. Für den Glucose- und Fructosegehalt konnten ebenfalls keine sig. Unterschiede gefunden werden.

Wie bereits beim Spross von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' beobachtet, stiegen die REL-Werte (-5 °C) mit steigendem Stickstoffgehalt an (Abb. 3.8). Die Variante NÜ (sig. höherer Stickstoffgehalt) wurde wiederum bei jeder Testtemperatur stärker geschädigt als N0. Die Variante NÜ hatte außerdem, wie auch in den Sprossproben, einen niedrigeren Glucose- und Fructosegehalt als auch einen höheren Prolingehalt als N0 (nicht sig.).



**Abbildung 3.8:** Einfluss der N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Frühfrost. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolin-, Glucose- und Fructosegehalte sowie die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant.

### Vergleich der Frosthärte von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher N-Ernährung

Der direkte Vergleich von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' zeigt die jeweils höheren REL-Werte der Variante NÜ (Abb. 3.9). Somit hat sich für beide Testarten ein negativer Einfluss der höheren N-Versorgung gezeigt.

Abbildung 3.10 verdeutlicht den jeweiligen Anstieg der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten. In Kapitel 2 (Material und Methoden) wurde bereits die unterschiedliche Frostempfindlichkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (sommergrün, wenig frostempfindlich) und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (wintergrün, frostempfindlich) erläutert. Die stecklingsvermehrten Pflanzen reagierten dagegen nicht immer einheitlich.

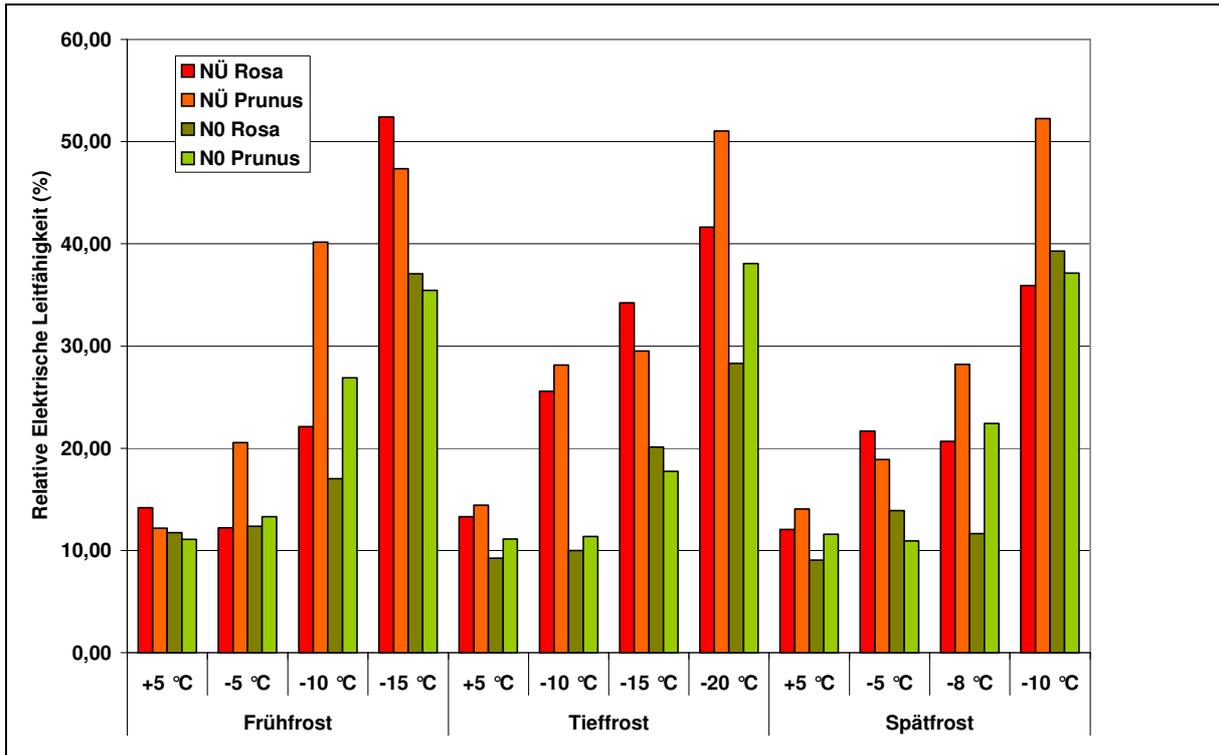


Abbildung 3.9: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher N-Ernährung.

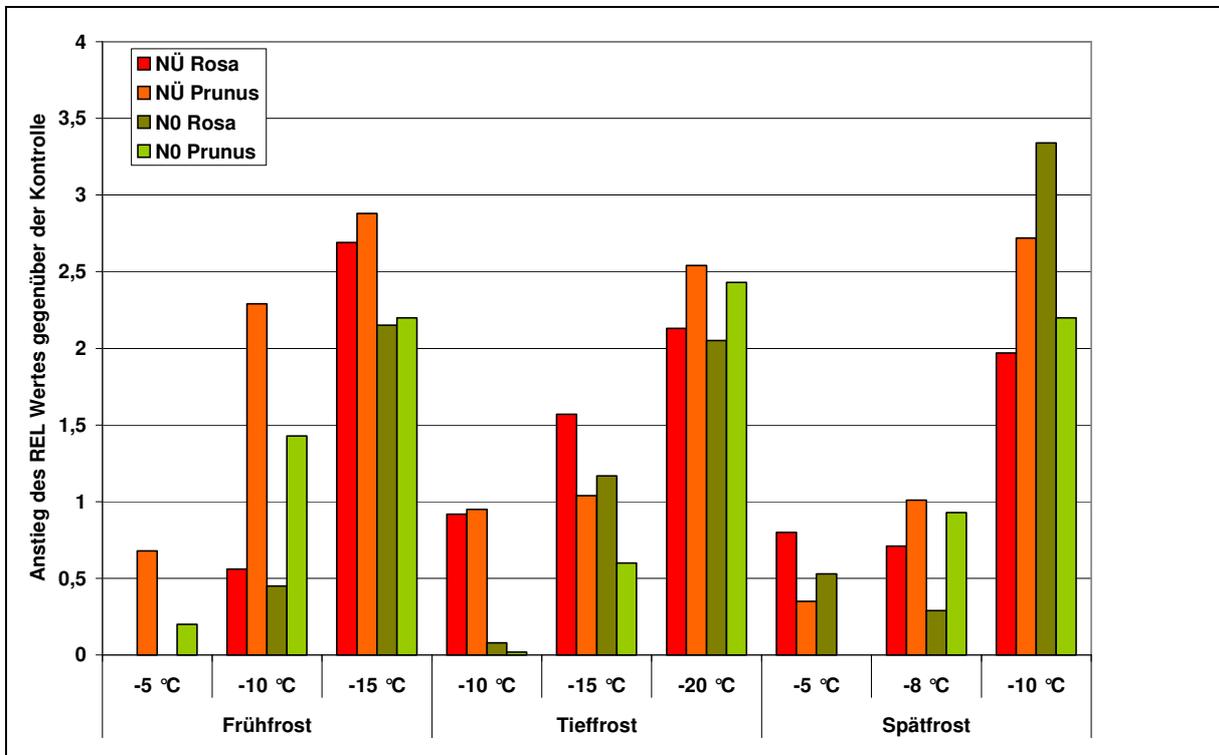


Abbildung 3.10: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher N-Ernährung.

Im Frühfrost bei -5 °C und -10 °C, im Tieffrost bei -20 °C sowie im Spätfrost bei -8 °C stiegen die REL-Werte der *Rosa* 'Sommerabend'-Stecklinge unabhängig von der N-Versorgung weniger an als bei den *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklingen (Abb. 3.10). Im Frühfrost bei -15 °C und im Tieffrost bei -10 °C zeigte sich dagegen kein Unterschied zwischen den beiden Testarten. Sowohl bei *Rosa* 'Sommerabend' als auch bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' stiegen die REL-Werte in der Variante NÜ gegenüber den Kontrollwertern stärker an, als in der Variante N0.

### 3.3 Diskussion

In Tabelle 3.1 sind alle Einzelergebnisse des Stickstoffversuches zusammenfassend dargestellt. Die als sig. unterschiedlich bezeichneten Ergebnisse sind grün hervorgehoben. Nur in zwei Gegenüberstellungen der REL-Werte mit den Stickstoff-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalten ließen sich sig. Unterschiede der REL-Werte nachweisen: *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' Spross -10 °C (Frühfrost) und *Rosa* 'Sommerabend' Wurzel -5 °C (Frühfrost).

**Tabelle 3.1: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher N-Ernährung** (FF = Frühfrost, TF = Tieffrost, SF = Spätfrost, R = *Rosa* 'Sommerabend', P = *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia', S = Spross, W = Wurzel, Pro = Prolin, Gluc = Glucose, Fruc = Fructose, + = Varianten unterschiedlich, - = Varianten waren nicht sig. unterschiedlich, n. b. = nicht bestimmt).

Test	Pfl.	Teil	Sig. Unterschiede vorhanden bei										
			REL						%	mg / g TS			
			+5 °C	-5 °C	-8 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C	N	Pro	Gluc	Fruc	
FF	R	S	-	-	n. b.	-	-	n. b.	+	+	-	-	
FF	R	W	-	+	n. b.	-	-	n. b.	+	+	+	+	
TF	R	S	-	n. b.	n. b.	+	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
SF	R	S	-	-	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
SF	R	W	-	-	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
FF	P	S	-	-	n. b.	+	-	n. b.	+	-	-	-	
FF	P	W	-	-	n. b.	-	-	n. b.	+	-	-	-	
TF	P	S	-	n. b.	n. b.	+	-	+	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
SF	P	S	-	-	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
SF	P	W	-	-	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	

Trotz geringer statistischer Absicherung fiel in allen Frosttests die jeweils stärkere Schädigung der Variante NÜ auf. Dies galt sowohl für *Rosa* 'Sommerabend' als auch für *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'. Eine Differenzierung zwischen Spross- und Wurzelproben ergab sich dabei nicht, ober- und unterirdische Pflanzenteile wurden gleichermaßen bei hohen Stickstoffgehalten stärker geschädigt, als bei niedrigeren Gehalten (Abb. 3.2, 3.4, 3.6 und 3.8).

*Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' enthielten im November 2002 im Mittel annähernd gleich viel Stickstoff (Tab. 3.2). Die Prolin-, Glucose- und Fructosegehalte waren dagegen deutlich unterschiedlich. Trotzdem konnte kein eindeutiger Bezug zwischen Frostempfindlichkeit und Prolin- bzw. Zuckergehalten hergestellt werden. Dagegen zeigte sich für den Stickstoffgehalt ein deutlicher Einfluss auf die Frosthärte. Im Frühfrosttest wurde jeweils die Variante N0 am geringsten und

NÜ am stärksten geschädigt. *Rosa* 'Sommerabend' wurde dabei geringer geschädigt als *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bzw. es zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Varianten.

**Tabelle 3.2: Einfluss der N-Versorgung auf verschiedene Inhaltsstoffe bei *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'** (Pro = Prolin, Gluc = Glucose, Fruc = Fructose).

Pflanze	Probe	N0				NÜ			
		%	mg / g TS			%	mg / g TS		
		N	Pro	Gluc	Fruc	N	Pro	Gluc	Fruc
<i>Rosa</i>	Spross	0,90	6,01	13,48	54,09	2,27	22,93	15,95	55,94
<i>Prunus</i>	Spross	0,94	2,29	26,07	16,66	2,36	9,85	23,95	14,75
<i>Rosa</i>	Wurzel	0,83	4,68	21,41	76,60	2,18	12,44	7,57	27,02
<i>Prunus</i>	Wurzel	0,75	1,60	15,33	9,40	1,99	8,93	11,80	7,36

Signifikante Unterschiede in den tatsächlichen Stickstoffgehalten konnten im Frühfrosttest für beide Versuchspflanzen belegt werden. Der Prolingehalt zeigte nur bei *Rosa* 'Sommerabend' Signifikanzen. Auffallend war der durchgehend höhere Prolingehalt der Variante NÜ. Sig. unterschiedliche Glucose- bzw. Fructosegehalte konnten nur in den Wurzeln von *Rosa* 'Sommerabend' gezeigt werden. Die geringe statistische Absicherung der Prolin-, Glucose- und Fructosedaten ist eine Folge der sehr kleinen Fallzahl des Versuches (6 Pflanzen pro Mischprobe). Aufgrund von Materialmangel konnte nach erfolgter Analyse der Mineralstoffe (neben Stickstoff auch P, K, Mg und Ca; Daten nicht dargestellt) meist nur noch eine einfache Bestimmung von Prolin, Glucose bzw. Fructose erfolgen. Unabhängig davon war aber erkennbar, dass die REL-Werte bei höheren Glucose- oder Fructosegehalten geringer ausfielen. Nur die Sprossproben von *Rosa* 'Sommerabend' enthielten in der Variante NÜ mehr Glucose und Fructose als die Variante N0 (nicht sig.). Die Wurzelproben von *Rosa* 'Sommerabend' (sig.) sowie die Spross- und Wurzelproben von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' enthielten in der Variante NÜ weniger Glucose und Fructose als in der Variante N0 (nicht sig.).

Da sowohl für den Tieffrost- als auch für den Spätfrosttest keine Nährstoffanalysen vorlagen, können lediglich die Ergebnisse der EL-Messung diskutiert werden. Im Tieffrosttest von *Rosa* 'Sommerabend' hatte die Variante NÜ (Sprossproben) bei jeder Temperatur höhere REL-Werte als N0. Für -10 °C konnte ein sig. Unterschied gezeigt werden (Abb. 3.1). Der Spross der Variante NÜ von *Prunus laurocerasus*

'Rotundifolia' hatte bei -10 °C und -20 °C sig. höhere REL-Werte (Abb. 3.5). In den Spätfrosttests konnten bei keiner Variante der beiden Arten weder für die Spross- noch für die Wurzelproben sig. Unterschiede ermittelt werden. Auffällig waren aber in allen Vergleichen die durchgängig höheren REL-Werte der Variante NÜ (Abb. 3.1, 3.3, 3.5 und 3.7). Somit war zu allen drei Testterminen ein negativer Einfluss der erhöhten Stickstoffdüngung für beide Arten zu erkennen.

Die hohen Schwankungen der REL-Werte des Frühfrosttestes haben, wie bereits erwähnt, die statistische Auswertung erschwert. Es könnte sich zum einen um methodenbedingte Schwankungen handeln, dies würde aber der weiten Verbreitung der Methode widersprechen. Zum anderen kann dies ein Hinweis auf eine nicht einheitliche Abhärtung der Pflanzen sein. Dazu ist der Variationskoeffizient (CV) als Maß für die Streuung zu betrachten. Als Hinweis auf eine uneinheitliche Abhärtung, bspw. der Variante NÜ, müsste der Variationskoeffizient höher als bei der Variante N0 liegen. Die vorliegenden Daten ermöglichen aber keine Interpretation in dieser Richtung, die höchste Streuung ist nicht bei nur NÜ, sondern je nach betrachteter Temperatur bei beiden Varianten zu finden (Tab. 3.3).

Variante	°C	STABW	CV
NÜ	5	3,00	0,20
<b>N0</b>	5	7,47	<b>0,63</b>
NÜ	-5	2,25	0,20
<b>N0</b>	-5	4,74	<b>0,43</b>
<b>NÜ</b>	-10	9,11	<b>0,41</b>
N0	-10	8,10	0,39
<b>NÜ</b>	-15	15,65	<b>0,30</b>
N0	-15	7,77	0,21

**Tabelle 3.3: Standardabweichungen (STABW) und Variationskoeffizienten (CV) der Rosa 'Sommerabend' Sprossproben (Frühfrost).** Die höchsten Streuungen je Temperatur sind FETT gekennzeichnet.

Da beide Varianten hohe Streuungen aufweisen, deutet dies auf eine insgesamt nicht einheitliche Abhärtung. Eine möglicherweise vorhandene Heterogenität des Ausgangsmaterials kann ebenfalls nicht als Grund herangezogen werden, da die Stecklinge von jeweils einem Standort stammten, beim Stecken automatisch durchmischt und insgesamt über acht Wochen flüssig gedüngt wurden. Möglich ist jedoch eine versuchsbedingte uneinheitliche Abhärtung. Evtl. ist das Umräumen der Töpfe in ein frostfreies Überwinterungsquartier zu früh erfolgt (KW 39), so dass die Abhärtung nicht bei allen Pflanzen die zweite Stufe erreichen konnte.

Der durchgängig negative Effekt der Stickstoffdüngung auf die Frühfrosthärte war aber trotz teilweise fehlender Signifikanzen und hoher Streuungen zu erkennen und bestätigt die Vermutung der verzögerten Akklimatisierung von LEVITT (1956, 1980) und GRANT et al. (1984). KELLEY (1972) und MATZNER (1974) haben eine geringere Frosthärte bei *Pyracantha coccinea* 'Lalandi', *Ilex crenata* 'Rotundifolia' und *Prunus cerasus* 'Schattenmorelle' beobachtet. Beide Autoren führen ihre Ergebnisse auf einen verzögerten Vegetationsabschluss bzw. eine verzögerte Akklimatisierung zurück.

KOSKELA (1970) fand ebenfalls eine geringere Früh- und Tieffrosttoleranz in Freilandversuchen mit *Pinus sylvestris* und *Picea abies*. PÜMPEL et al. (1975) fanden eine geringere Spätfrosthärte bei gut mit N versorgten *Picea abies*. LARSEN et al. (1978) führen die negative Wirkung eines höheren Stickstoffgehaltes auf die Früh- und Spätfrosttoleranz ebenfalls auf eine Verzögerung des Vegetationsabschlusses im Herbst sowie einen früheren Wachstumsbeginn im Frühjahr zurück.

Die Stickstoffgehalte, die im Stickstoffversuch zu den geringsten Frühfrostschäden geführt haben (Tab. 3.2, Variante N0, linke Spalte), sind nach EVERS (1998) durchweg als Mangelversorgung einzustufen. Dieser stuft Pflanzen mit Stickstoffgehalten unter 1,5 % als Mangelpflanzen ein, Stickstoffgehalte zwischen 2,5 und 5 % werden von EVERS (1998) als optimal angesehen. Die Pflanzen mit den höchsten Frühfrostschäden sind daher vom Stickstoffgehalt als fast optimal versorgte Pflanzen einzustufen (Tab. 3.2, Variante NÜ, rechte Spalte). Ein überhöhter Gehalt kann nicht angenommen werden.

EVERS (1998) differenziert nicht nach verschiedenen Pflanzenarten oder -teilen, so dass in diesem Versuch durchaus eine Über- oder Unterversorgung vorgelegen haben kann. ALT (1990) hat einige Arbeiten zusammengetragen, die Blattgehalte verschiedener Gehölze untersucht haben. Die Angaben für Stickstoff sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

**Tabelle 3.4: Beurteilung der Stickstoffgehalte verschiedener Gehölze**  
(Blattanalyse; Symp.: Symptome sichtbar; verändert nach ALT, 1990).

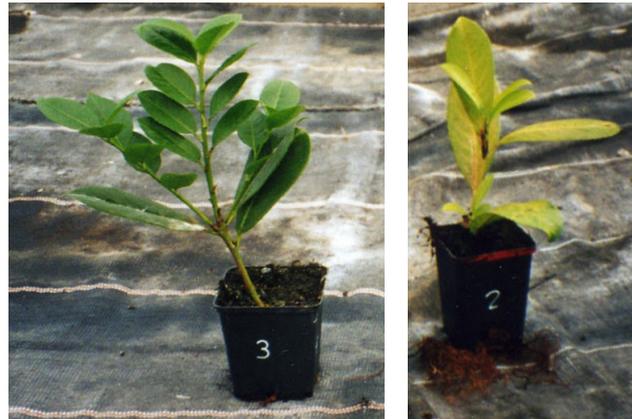
Art	% Stickstoff		Autor
	Mangel	Ausreichend	
<i>Forsythia x intermedia</i>	< 2,0	2,5 – 3,5	RÖBER, R. & RHODE, J., 1982
<i>Ilex 'Burfordii'</i>	< 1,8 – 2,0	> 1,8 – 2,0	GILLIAM, C. H. & WRIGHT, R. D., 1977
<i>Ilex 'Helleri'</i>	< 2,0	> 2,0	GILLIAM, C. H. & WRIGHT, R. D., 1977
<i>Ilex rotundifolia</i>	< 2,4	> 2,4	GILLIAM, C. H. & WRIGHT, R. D., 1977
<i>Lonicera xylosteum</i>		2 - 3	ROHDE, J. & RÖBER, R., 1983
<i>Picea abies</i>	< 0,9 (Symp.)	> 1,5	INGESTAD, 1959
<i>Picea abies</i>	0,7 – 1,6	1,8 – 3,2	WEHRMANN, 1963
<i>Pinus</i>	0,8 – 1,3	1,2 – 2,0	WEHRMANN, 1963
<i>Philadelphus inodorus</i>		2,5 – 3,5	RÖBER, R. & RHODE, J., 1984
<i>Quercus petraea</i>		2,9	NEWNHAM, R. M. & CARLISLE, A., 1969
<i>Quercus robur</i>		2,6	NEWNHAM, R. M. & CARLISLE, A., 1969
<i>Taxus x media</i>		3,9	GOIUN, F. R. & LINK, C. B., 1966

Nach ALT (1990) ist je nach Pflanzenart ein Stickstoffgehalt von 1,5 % (*Picea abies*) bis 3,9 % (*Taxus x media*) als ausreichend anzusehen. Mangelgehalte werden zwischen 0,7 % (*Picea abies*) und 2,4 % (*Ilex rotundifolia*) angegeben. Bei Betrachtung der Stickstoffgehalte von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' ist die Variante N0 mit einem Stickstoffsprossgehalt von 0,90 % bzw. 0,94 % (Tab. 3.2) als Mangelvariante einzustufen. Die Variante NÜ (2,27 % N bzw. 2,36 % N, Tab. 3.2) muss nach dieser Einteilung als ausreichend versorgt betrachtet werden. Bei den von ALT (1990) angegebenen Gehalten handelt es sich um Blattgehalte. In der vorliegenden Arbeit ist jeweils der Nährstoffgehalt des ganzen Sprosses analysiert worden. Der Nährstoffgehalt in Trieben ist laut ALT (1990) niedriger als in Blättern oder Nadeln. Durch die Verwendung von ganzen Sprossproben sind die hier ausgewiesenen Gehalte von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' im Vergleich zu den Quellen von ALT (1990) wahrscheinlich zu niedrig, so dass die Variante NÜ als sehr gut mit Stickstoff versorgt bezeichnet werden kann. Von einem ausgeprägten Überschuss kann aber nicht ausgegangen werden. Arbeiten, die sich direkt mit *Rosa* 'Sommerabend' oder *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' befassen, sind der Autorin nicht bekannt, die genaue Einordnung des Stickstoffgehaltes ist daher schwierig.

Durch die bessere Stickstoffversorgung der Variante NÜ scheint es zu einer längeren Wachstumsperiode gekommen zu sein. Die Abbildungen 3.9 und 3.10 zeigen für *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' je eine Pflanze der Variante NÜ (links) und eine Pflanze der Variante N0 (rechts). Die Variante NÜ ist jeweils

deutlich stärker gewachsen und hat das Wachstum nicht vollständig abgeschlossen (nicht bonitiert). Dadurch hat sich die Abhärtung verzögert, was zu einer geringeren Frühfrosthärte führte. Hierin besteht kein Widerspruch zu den zu Tab. 3.18 gemachten Ausführungen. Der Variationskoeffizient kann zwar als Maß für eine uneinheitliche Abhärtung herangezogen werden, ob der Grund eine verlängerte Wachstumsperiode ist, kann daran aber nicht abgelesen werden.

**Abbildung 3.11:** Stickstoffüberschuss-(NÜ, links) bzw. Stickstoffmangelpflanze (N0, rechts) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' am 05. Nov. 2002 (+5 °C Kontrolle)



**Abbildung 3.12:** Stickstoffüberschuss- (NÜ, links) bzw. Stickstoffmangelpflanze (N0, rechts) von *Rosa* 'Sommerabend' am 05. Nov. 2002 (+5 °C Kontrolle)



TIMMIS (1972) ermittelte ebenfalls einen negativen (nicht sig.) Einfluss einer Stickstoffdüngung auf die Frühfrosthärte von *Pseudotsuga menziesii*. KOSKELA (1970) erreichte bei *Picea abies* und *Pinus sylvestris* eine (nicht sig.) geringere Frühfrosthärte durch Stickstoffdüngung.

LARSEN (1976) und LARSEN et al. (1978) beurteilen vierjährige *Pseudotsuga menziesii*-Sämlinge mit einem Stickstoffgehalt von 2,2 % in den Nadeln als sehr gut versorgt und stellen eine sig. geringere Frühfrosthärte dieser Pflanzen durch visuelle Bonitur fest. Diese Aussage deckt sich mit den hier beschriebenen Ergebnissen: Die

höheren Frostschäden wurden bei Spross-Stickstoffgehalten  $>2,27\%$  ermittelt. Aber auch die gering mit Stickstoff versorgten Sämlinge ( $0,9\%$  N in den Nadeln) zeigten in den Versuchen von LARSEN (1976) und LARSEN et al. (1978) eine geringere Frühfrosthärtigkeit. Die größte Toleranz fanden LARSEN (1976) und LARSEN et al. (1978) bei Stickstoffgehalten zwischen  $1,3\%$  und  $1,4\%$ . Diese Optimumstheorie konnte hier aufgrund der Variantenauswahl (nur zwei Varianten) nicht untersucht werden.

DALEN & JOHNSEN (2004) stellten zu Beginn der Abhärtung einen leicht positiven Effekt eines erhöhten Stickstoffgehaltes in den Nadeln von *Picea abies*-Sämlingen fest. Gegen Ende der Akklimatisierung konnte bei einem Stickstoffgehalt zwischen  $2,0\%$  und  $2,7\%$  kein Einfluss auf die Frühfrosthärtigkeit festgestellt werden.

PELLETT (1973) fand keinen oder nur einen geringen Einfluss von Stickstoff auf die Frühfrosthärtigkeit von stecklingsvermehrten *Forsythia x intermedia* 'Lynwood' und *Cornus alba* 'Sibirica'. Die ermittelten Mineralstoffgehalte sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst. Obwohl PELLETT (1973) sig. Unterschiede durch die Stickstoffdüngewarienten 25, 100, 200 und 300 ppm erreichen konnte, ergaben sich keine sig. Unterschiede im Frühfrosttest. PELLETT (1973) hat aber beim Spross von *Forsythia x intermedia* tendenziell höhere Frostschäden in der höchsten Düngewarienten festgestellt. In den Wurzeln kam es ähnlich wie bei *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' zu Schwankungen, bei denen tiefere Testtemperaturen teilweise geringere Schäden verursacht haben als höhere Temperaturen.

**Tabelle 3.5: Mineralstoffgehalte bei *Forsythia x intermedia* 'Lynwood' aufgeteilt nach Spross und Wurzel am 30. Oktober 1970, Testniveau  $\alpha = 0,05$  Duncan's Multipler Rangtest (nach PELLETT, 1973).**

Variante	Spross (% in TS)				Wurzel (% in TS)			
	N	P	K	Ca	N	P	K	Ca
25 ppm N	0,30 <sup>b</sup>	0,60 <sup>a</sup>	0,70 <sup>a</sup>	0,20 <sup>a</sup>	0,70 <sup>b</sup>	0,80 <sup>b</sup>	1,20 <sup>b</sup>	0,25 <sup>b</sup>
300 ppm N	0,70 <sup>a</sup>	0,50 <sup>a</sup>	0,85 <sup>a</sup>	0,20 <sup>a</sup>	1,60 <sup>a</sup>	0,85 <sup>a</sup>	2,00 <sup>a</sup>	0,50 <sup>a</sup>

Selbst PELLETT's hohe Düngewarienten enthält im Spross weniger Stickstoff als die ohne Stickstoff angezogenen (Variante N0) *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'. PELLETT (1973) hat daher wahrscheinlich aufgrund der relativ niedrigen Stickstoffgehalte nur einen geringen Einfluss der Stickstoffdüngung ermitteln können.

DEHAYES et al. (1989) ermittelten zwar für *Picea rubens* eine Erhöhung der Tieffrosthärte bei steigender Stickstoffdüngung, trotzdem decken sich diese Ergebnisse mit den obigen Ausführungen. Die beste Tieffrosthärte wurde bei der mittleren Düngestufe erreicht (1500 kg N/ha/Jahr). Die höchste Düngestufe (3000 kg N/ha/Jahr) erlitt wieder höhere Frostschäden, war aber dennoch geringer geschädigt, als die nicht gedüngten Kontrollen. Bei *Pseudotsuga menziesii*-Sämlingen war ebenfalls die Tieffrostresistenz bei der am stärksten mit Stickstoff versorgten Variante sig. erniedrigt (LARSEN et al., 1978).

PELLETT & WHITE (1969a) fanden bei bewurzelten Stecklingen von *Juniperus chinensis* 'Hetzii' signifikante Unterschiede im Stickstoffgehalt im Spross (0,79 % bis 1,65 %) und in den Wurzeln (0,70 % bis 1,29 %), konnten aber keine signifikanten Unterschiede in der Tieffrosthärte ausmachen. Die von PELLETT & WHITE (1969a) analysierten N-Gehalte liegen sowohl für den Spross als auch für die Wurzel weit unter den für von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' gefundenen Stickstoffgehalten. Bei höheren Gehalten hätte somit auch bei *Juniperus chinensis* 'Hetzii' ein sig. Unterschied in der Frosthärte auftreten können. Die unterschiedlichen Ergebnisse werden aber auch durch die verschiedenen Frostzeitpunkte (Früh- bzw. Tieffrost) bedingt sein, ein direkter Vergleich ist daher nicht möglich.

ARONSSON (1980) erreichte die höchste Frosttoleranz in Versuchen mit *Pinus sylvestris* bei einem Nadel-Stickstoffgehalt zwischen 1,3 und 1,8 % N in der Trockensubstanz. Bei einem N-Gehalt von 1,8 bis 2,0 % traten in den Freilandversuchen deutlich höhere Frostschäden auf. Gleichzeitig zeigten aber einige der Varianten mit hohem Stickstoffgehalt keine Frostschäden. ARONSSON (1980) vermutet daher die Existenz eines weiteren Faktors oder mehrerer Faktoren neben dem N-Gehalt der Nadeln. Ein möglicher Faktor könnte in diesem Zusammenhang ein bestimmtes Nährstoffverhältnis sein. PAHLSSON (1992) berichtet von einem Anstieg der Verhältnisse N/P und N/K durch Stickstoffdüngung bei *Fagus sylvatica*. Der Einfluss des K/N-Verhältnisses wird für *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' in Kapitel 5 untersucht.

**Fazit:** Die höhere Stickstoffversorgung führte bei stecklingsvermehrten *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' zu einer verlängerten Wachstumsperiode und damit zu einer verzögerten Abhärtung. Die Frühfrosthärte wurde dadurch erniedrigt. Im Tieffrost ist ebenfalls der negative Einfluss des erhöhten Stickstoffgehaltes sichtbar geworden. Die Variante NÜ erreichte bei -10 °C (*Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia') sowie bei -20 °C (*Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia') sig. höhere REL-Werte. Für den Spätfrost können keine statistisch abgesicherten Aussagen getroffen werden. Die Varianten unterschieden sich nicht sig. voneinander. Die Variante NÜ hat aber bei jeder Temperatur höhere REL-Werte als N0 erreicht.

Die Variante N0 kann aber nicht als Düngeempfehlung gelten. Sowohl *Rosa* 'Sommerabend'- als auch *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge zeigten ohne N-Versorgung deutlichen Kümmerwuchs (Vergleich Abb. 3.11 und 3.12). Empfehlenswert ist vielmehr eine Grunddüngung mit bspw. 2 g/L Osmocote, wie von SPETHMANN & HARMS (1993) für Eichenstecklinge empfohlen.

## 4. Einfluss von Kalium auf die Frosthärte

### 4.1 Einleitung

Kalium ist mengenmäßig der zweitwichtigste Mineralstoff für Gehölze, wird aber im Gegensatz zu Stickstoff nicht in die organische Substanz eingebaut. Der Hauptanteil des aufgenommenen Kaliums liegt als freies Ion im Zellsaft vor. Kaliumionen wirken strukturstabilisierend auf Plasmaproteine, -proteide und Enzyme und erhöhen den osmotischen Druck des Zellsaftes. Eine gute Kaliumversorgung ist wichtig für den Wasserhaushalt der Pflanze. Bei zu niedrigen Kaliumgehalten sinkt der Turgor der Zellen, bei ausgeprägtem Kaliummangel kommt es zur Welketracht. Ein hoher Kaliumgehalt in der Zelle führt dagegen zu verstärkter Diffusion von Wassermolekülen in die Zelle (DIEREND, 1995).

Nach DIEREND (1995) erhöht eine gute Kaliumversorgung die Frosttoleranz aufgrund der Gefrierpunktserniedrigung im Zellsaft. Bei einem genaueren Blick auf die verfügbare Literatur zeichnet sich aber ein uneinheitliches Bild über die Wirkung des Kaliums auf die Frosthärte ab. KOSKELA (1970) und CHRISTERSON (1973, 1975) berichten für *Picea abies* und *Pinus sylvestris* von gering positiver bzw. keiner Beeinflussung der Frühfrosthärte durch eine Kaliumdüngung. SARJALA et al. (1997) konnten bei *Pinus sylvestris*-Sämlingen keinen Effekt einer Kaliumdüngung auf die Frosttoleranz in der frühen Abhärtung finden. Abgehärtete Sämlinge und adulte Bäume zeigten dagegen höhere Frostschäden bei höheren Kaliumgehalten. LARSEN et al. (1978) fanden ebenfalls unterschiedliche Wirkungen von Kalium auf Knospen und Nadeln bei *Pseudotsuga menziesii*. Die Nadeln gering mit Kalium versorgter Pflanzen ( $K = 0,35\%$  in TS) waren frühfrosthärter als besser versorgte Pflanzen. Die Tiefrosthärte war dagegen bei den gut mit Kalium versorgten Pflanzen ( $K = 0,66\%$  in TS) höher. CHRISTOFF (1939) und DORSEY & BUSHNELL (1920) kamen zu dem Schluss, dass überoptimale Kaliumversorgung zu einer Verringerung der Frosthärte führt.

Die konträren Untersuchungsergebnisse sowie der Mangel an Berichten über stecklingsvermehrte Gehölze waren der Anlass für die Durchführung des Kaliumversuches im Rahmen dieser Dissertation. Es wurde in Anlehnung an DIEREND (1995) eine bessere Frosthärte bei höheren Kaliumgehalten vermutet.

## 4.2 Ergebnisse

Von November 2002 bis April 2003 wurde ein Kaliumversuch mit drei Kaliumdüngewarianten (K0 = Kaliummangel, KN = Kalium-Normal, KÜ = Kaliumüberschuss) durchgeführt. Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse dieses Versuches dargestellt. Material und Methoden sind in Kapitel 2 nachzulesen.

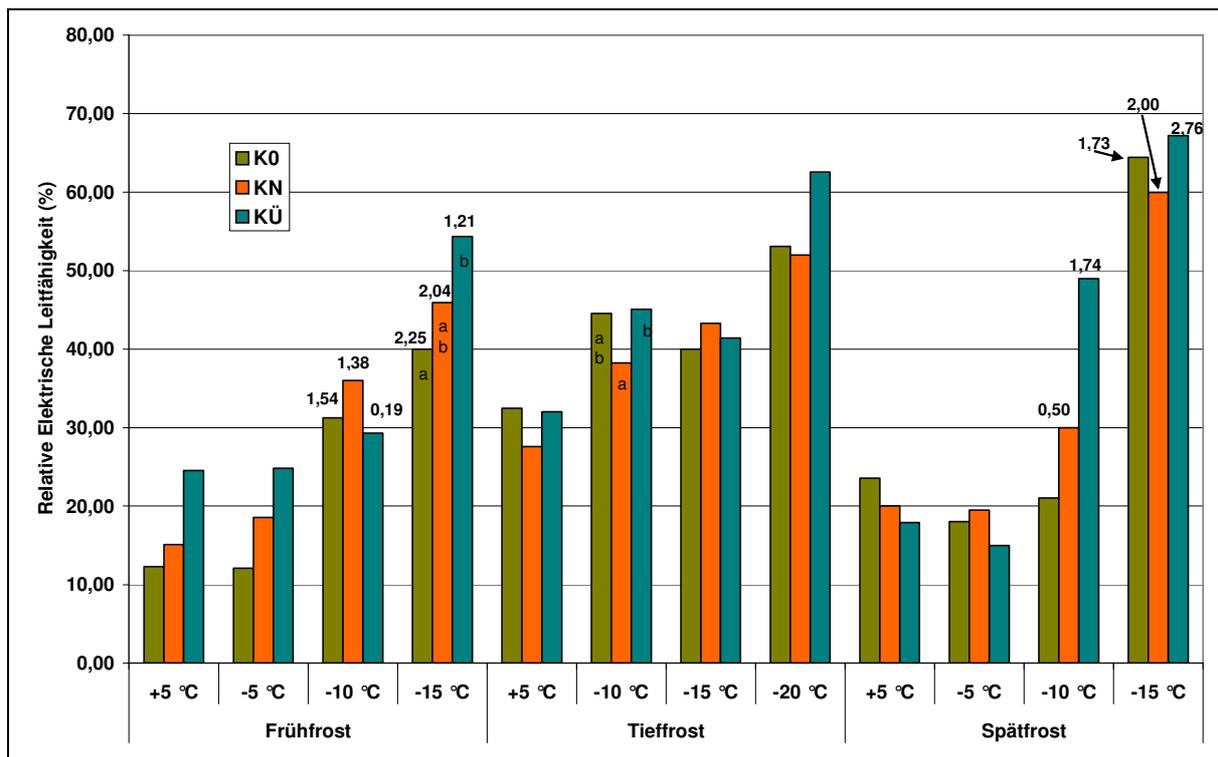
### 4.2.1 Einfluss von Kalium auf die Frosthärte von *Rosa 'Sommerabend'*

#### Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses

Im **Frühfrosttest** haben sich bei allen Varianten die REL-Werte kaum zwischen +5 °C und -5 °C verändert. Bei -10 °C kam es allgemein zu einem Anstieg der REL-Werte, wobei KÜ den geringsten REL-Wert erreichte (nicht sig., Abb. 4.1). Bei der Variante KÜ stieg außerdem der REL-Wert gegenüber der Kontrolle am wenigsten an (Faktor 0,19). Signifikante Unterschiede konnten nur für -15 °C errechnet werden, KÜ erreichte dabei einen sig. höheren REL-Wert als K0. Bei Betrachtung der Veränderung der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten fiel jedoch auf, dass die Variante KÜ den niedrigsten Anstieg (Faktor 1,21) gegenüber der Kontrolle zeigte. Die REL-Werte der Variante K0 (niedrigster REL-Wert bei -15 °C) stiegen dagegen um den Faktor 2,25.

Die Testtemperatur -10 °C führte im **Tiefrosttest** bei KÜ zu einem sig. höheren REL-Wert gegenüber KN (Abb. 4.1). Die REL-Werte lagen jedoch insgesamt sehr hoch. Die REL-Werte aller Varianten haben sich zudem im gleichen Ausmaß gegenüber den Kontrollwerten verändert (Faktor 0,37, 0,39 bzw. 0,41). Die visuelle Bonitur hat das Absterben aller Bonitурpflanzen bei -10 °C festgestellt (Daten nicht dargestellt).

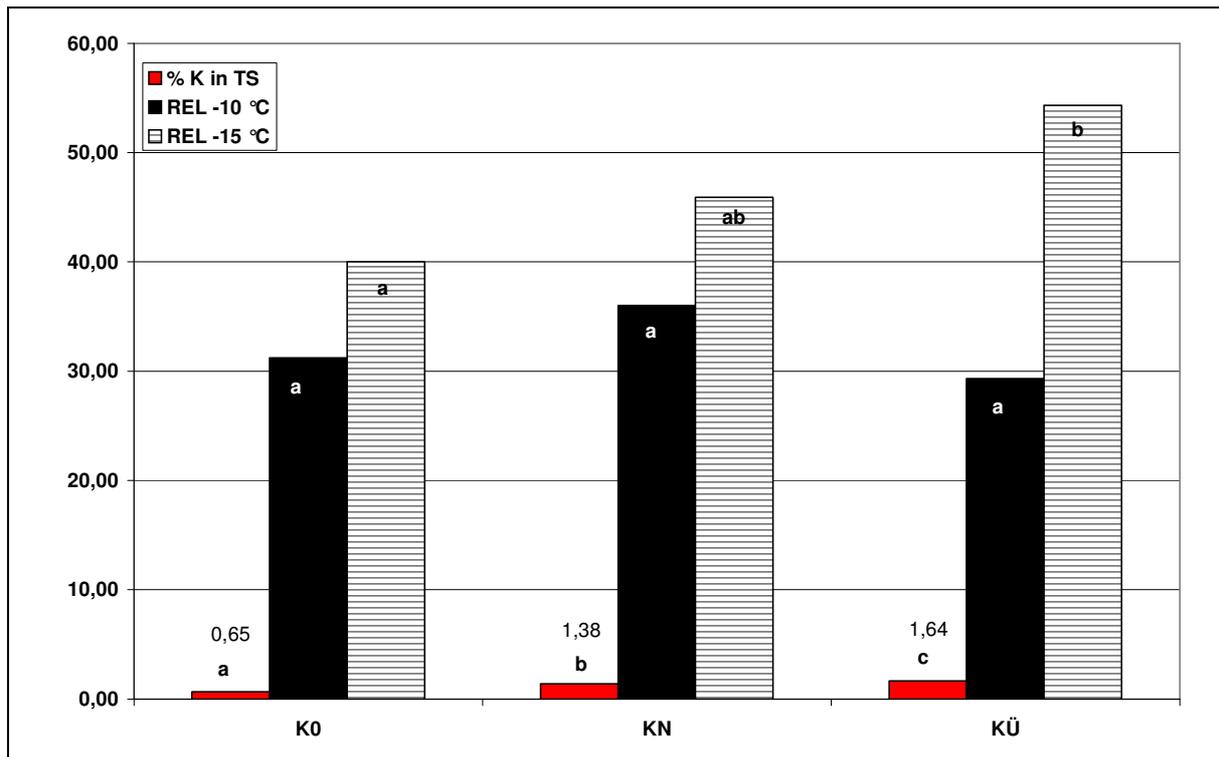
Signifikante Unterschiede waren im **Spätfrosttest** bei keiner Testtemperatur festzustellen. Der sprunghafte Anstieg der REL-Werte bei -15 °C deutet auf das Absterben aller Testpflanzen hin und wurde von der visuellen Bonitur bestätigt (Daten nicht dargestellt). In der Variante KÜ kam es bereits bei -10 °C zu einem starken Anstieg des REL-Wertes (Faktor 1,74), aufgrund der hohen Streuung mussten die Unterschiede aber als nicht sig. eingestuft werden. Die Variante K0 zeigte dagegen bei -10 °C keinerlei Veränderung gegenüber der Kontrolle.



**Abbildung 4.1: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher K-Ernährung.** Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

### Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit und Kaliumgehalt des Sprosses

Alle drei Varianten unterschieden sich im Oktober 2002 sig. im Kaliumgehalt. Die Variante KÜ enthielt sig. am meisten Kalium und erreichte einen sig. höheren REL-Wert (-15 °C) als die Variante K0 (Abb. 4.2). Der Anstieg gegenüber der Kontrolle fiel in der Variante KÜ bei -15 °C (und auch bei -10 °C) jedoch am geringsten von allen drei Varianten aus (Faktor 1,21 bzw. 0,19; Abb. 4.1). Im Tief- und Spätfrosttest sind keine Nährstoffanalysen durchgeführt worden, so dass für diese Zeitpunkte keine weitere Aussage möglich ist.



**Abbildung 4.2:** Einfluss der K-Ernährung auf den K-Gehalt sowie die REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

### Relative Elektrische Leitfähigkeit und Kaliumgehalt der Wurzelproben

Die REL-Werte der Varianten unterschieden sich im Frühfrosttest bei keiner Testtemperatur sig. voneinander. Bei -10 °C erreichte die Variante K0 einen etwas geringeren REL-Wert (nicht sig.) als KN und KÜ. Im Kaliumgehalt ergaben sich dagegen sig. Unterschiede. KN und KÜ enthielten sig. mehr Kalium als K0 (Tab. 4.1). Die Variante K0 erreichte somit bei -10 °C den niedrigsten REL-Wert sowie insgesamt den sig. geringsten Kaliumgehalt.

**Tabelle 4.1:** Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K-Ernährung. Die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant. K-Gehalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

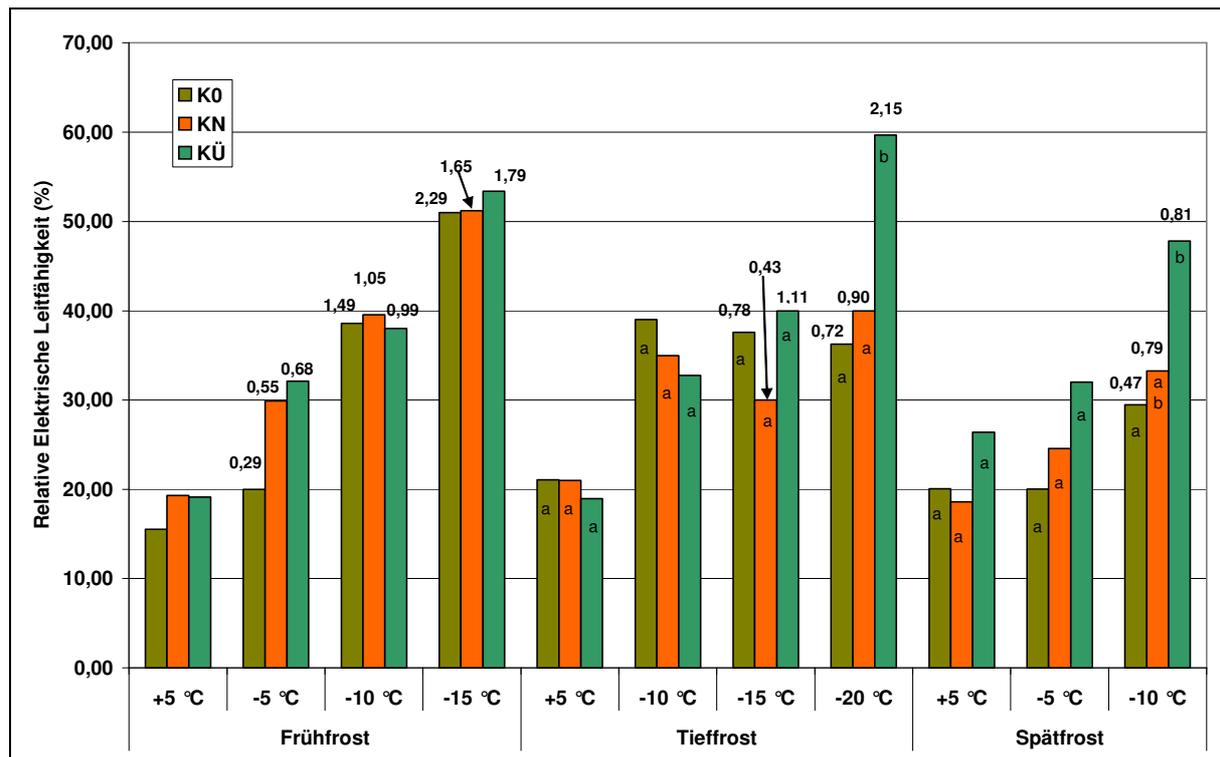
Variante	Relative Elektrische Leitfähigkeit (%) bei				% K
	+5 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	
K0	29,98 <sup>a</sup>	38,50 <sup>a</sup>	42,30 <sup>a</sup>	69,66 <sup>a</sup>	0,42 <sup>a</sup>
KN	35,23 <sup>a</sup>	45,20 <sup>a</sup>	58,87 <sup>a</sup>	70,02 <sup>a</sup>	1,18 <sup>b</sup>
KÜ	37,54 <sup>a</sup>	39,97 <sup>a</sup>	59,60 <sup>a</sup>	80,15 <sup>a</sup>	1,20 <sup>b</sup>

#### 4.2.2 Einfluss von Kalium auf die Frosthärte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'

##### Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses

Bei keiner Testtemperatur konnten im **Frühfrosttest** sig. Unterschiede ermittelt werden. Bei -5 °C stiegen die REL-Werte der Varianten KN und KÜ gegenüber den jeweiligen Kontrollwerten deutlich stärker an als bei der Variante K0. Die Testtemperaturen -10 °C und -15 °C führten dagegen in der Variante K0 zu einem stärkeren Anstieg als bei den beiden anderen Varianten. Im **Tieffrosttest** zeigte sich bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' das gleiche Bild wie zuvor bei *Rosa* 'Sommerabend' beschrieben: Alle Bonitурpflanzen starben bei -10 °C ab (Daten nicht dargestellt). Bei -15 °C und besonders bei -20 °C stiegen die REL-Werte der Variante KÜ stärker an als bei KN oder K0. Sig. Unterschiede in den REL-Werten waren jedoch lediglich bei -20 °C festzustellen. Die Variante KÜ erreichte dabei einen sig. höheren REL-Wert als KN oder K0 (Abb. 4.3). Aufgrund der hohen REL-Werte, sowie den abgestorbenen Bonitурpflanzen ist es aber fraglich, ob die Varianten diese Temperatur überlebt haben.

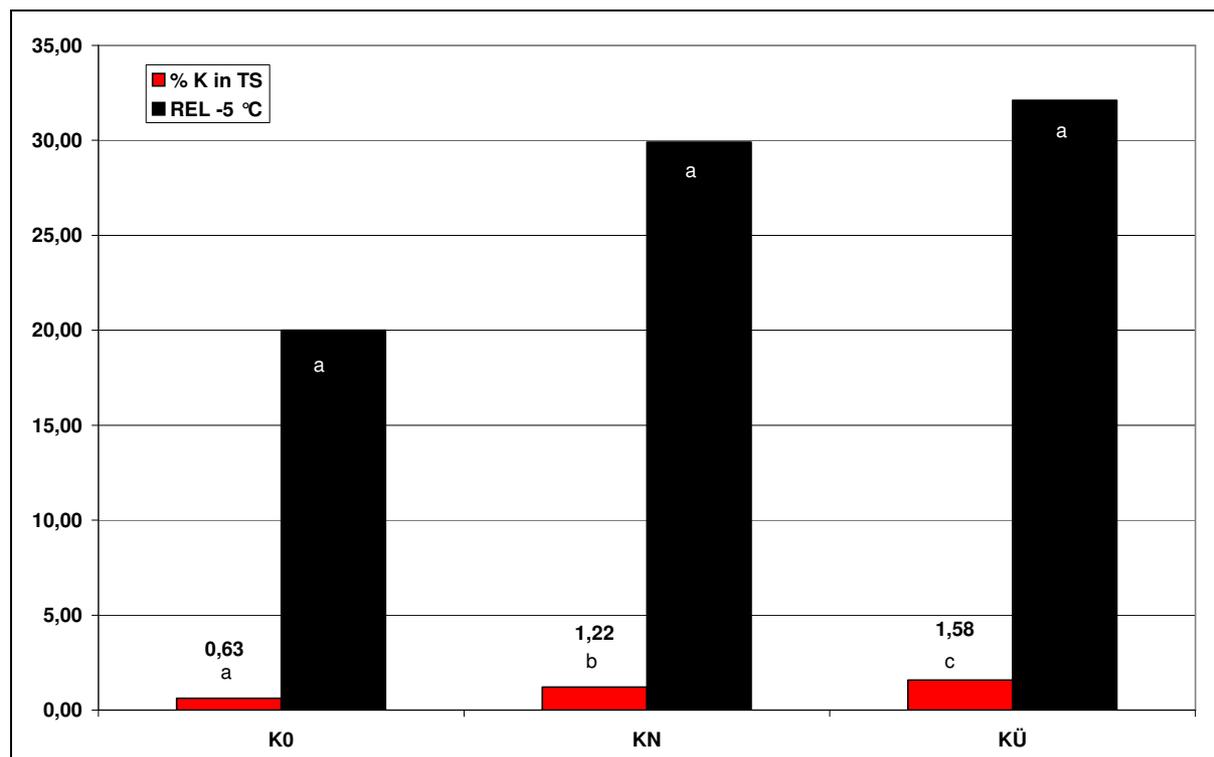
Aufgrund von Materialmangel konnten im **Spätfrosttest** bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' nur zwei Testtemperaturen verwendet werden. Bei -10 °C erreichte KÜ einen sig. höheren REL-Wert als K0. Weitere sig. Unterschiede konnten nicht ermittelt werden. Auffällig ist der bei -10 °C zunächst höhere REL-Wert der Variante KÜ (Abb. 4.3). Nach Berechnung der Steigerung gegenüber den Kontrollwerten, zeigte sich aber dass sich KN und KÜ im gleichen Ausmaß verändert haben (Faktor 0,79 und 0,81), wogegen die Variante K0 einen deutlich niedrigeren Anstieg zeigte (Faktor 0,47).



**Abbildung 4.3: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K-Ernährung.** Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

### Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit und Kaliumgehalt des Sprosses

Die Varianten unterschieden sich jeweils sig. im Kaliumgehalt (Abb. 4.4). Aufgrund der fehlenden Signifikanzen in den REL-Werten ließ sich jedoch kein Zusammenhang zwischen EL-Messung und Kaliumgehalt herstellen. Auffällig ist dennoch der Anstieg der REL-Werte bzw. deren höhere Veränderung gegenüber den Kontrollwerten mit steigendem Kaliumgehalt. Diese Aussage gilt jedoch nur für -5 °C. Sowohl bei -10 °C als auch bei -15 °C zeigte sich ein genau gegensätzlicher Zusammenhang: Mit steigendem K-Gehalt veränderten sich die REL-Werte weniger gegenüber den Kontrollen.



**Abbildung 4.4:** Einfluss der K-Ernährung auf den K-Gehalt sowie die REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

### Relative Elektrische Leitfähigkeit und Kaliumgehalt der Wurzeln

Wie bereits beim Spross erwähnt, sind auch für die Wurzeln keine sig. Unterschiede in den REL-Werten ermittelt worden (Tab. 4.2). Alle Düngevarianten wurden bei jeder Testtemperatur gleichermaßen geschädigt. Der Kaliumgehalt war bei KN und KÜ sig. höher als bei K0. Obwohl KÜ wesentlich stärker mit Kalium versorgt wurde, ist eine Steigerung des K-Gehaltes von KN zu KÜ nicht gelungen. KN und KÜ unterschieden sich nicht im Kaliumgehalt, erreichten aber bspw. bei -5 °C sehr unterschiedliche REL-Werte (KN = 30,92; KÜ = 40,10). Ein Zusammenhang zwischen steigenden REL-Werten und Kaliumgehalten konnte daher nicht hergestellt werden.

**Tabelle 4.2:** Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher K-Ernährung. Die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant. K-Gehalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

Variante	Relative Elektrische Leitfähigkeit (%)				% K
	+5 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	
K0	30,05 <sup>a</sup>	37,52 <sup>a</sup>	40,15 <sup>a</sup>	76,50 <sup>a</sup>	0,62 <sup>a</sup>
KN	29,30 <sup>a</sup>	30,92 <sup>a</sup>	38,09 <sup>a</sup>	75,02 <sup>a</sup>	1,78 <sup>b</sup>
KÜ	37,00 <sup>a</sup>	40,10 <sup>a</sup>	43,89 <sup>a</sup>	81,35 <sup>a</sup>	1,92 <sup>b</sup>

### Vergleich der Frosthärte von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K-Ernährung

Der direkte Vergleich der REL-Werte von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' zeigte häufig höhere REL-Werte für *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Abb. 4.5). Durch die Berechnung des Anstiegs der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten ergibt sich jedoch eine andere Aussage (Abb. 4.6).

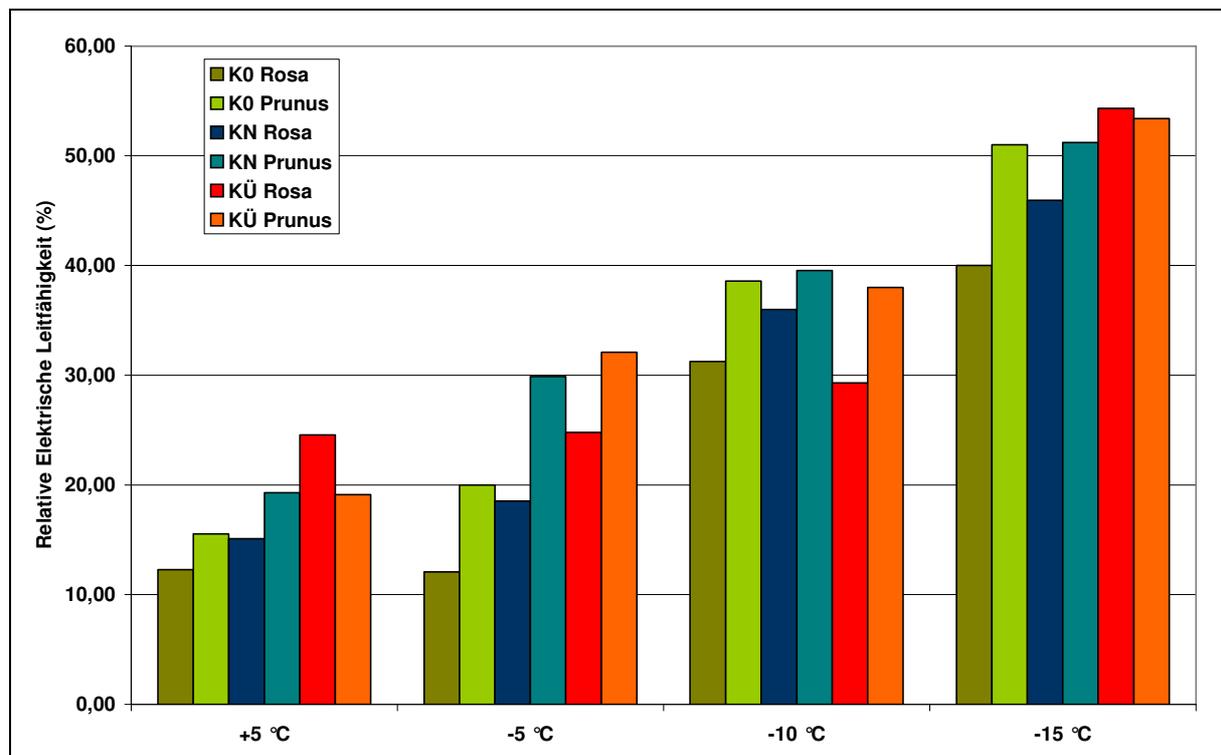
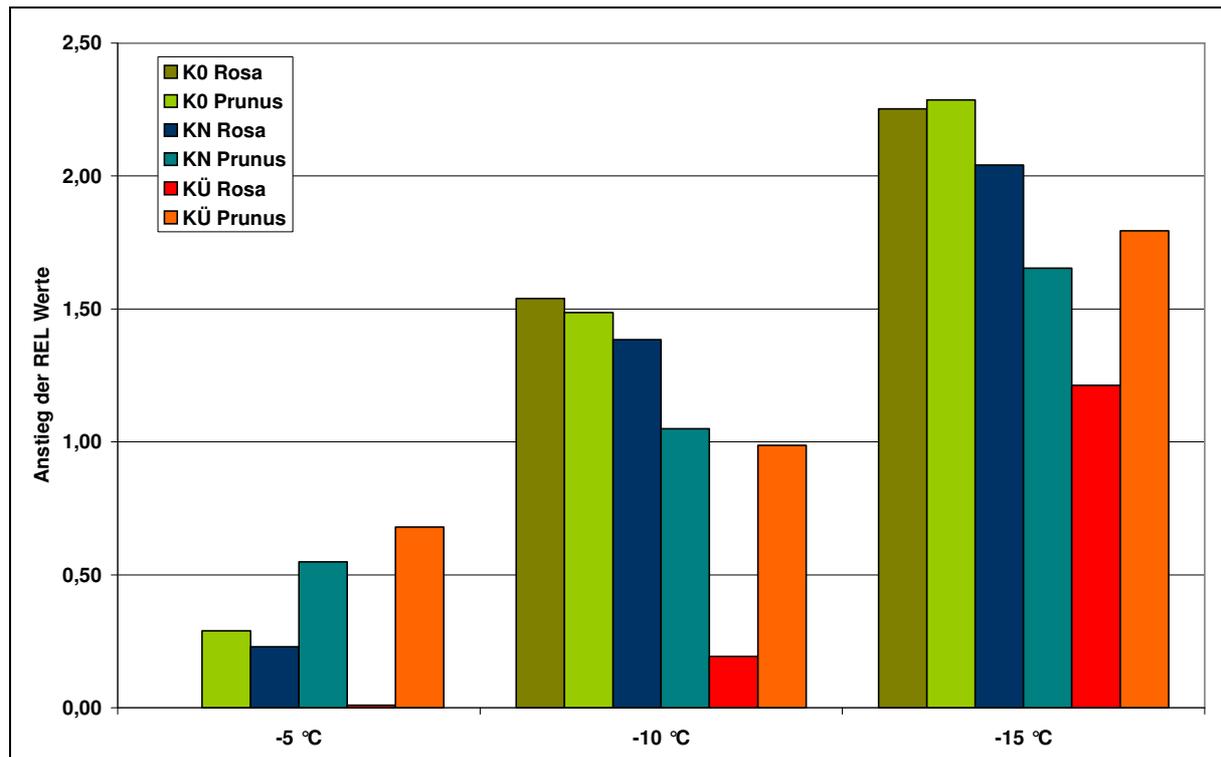


Abbildung 4.5: Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung.

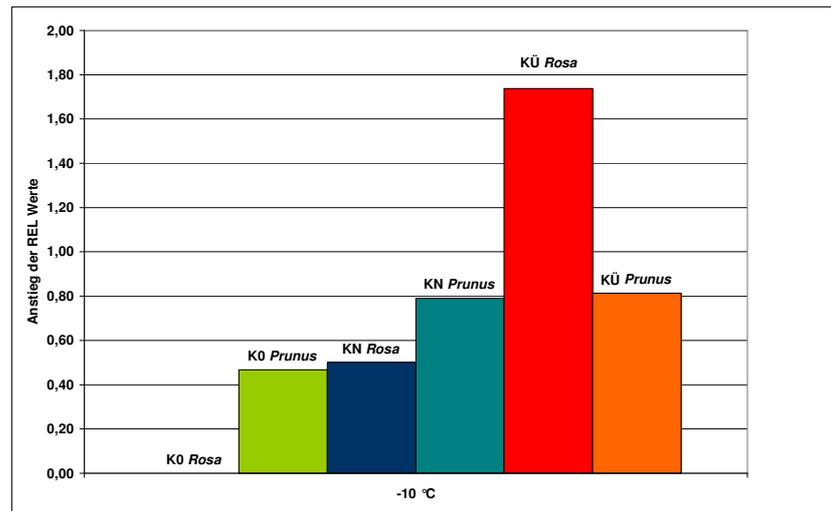
Während es bei *Rosa* 'Sommerabend' erst ab -10 °C zu deutlichen Veränderungen der REL-Werte kam, stiegen die REL-Werte bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bereits bei -5 °C in allen drei Varianten deutlich an (Abb. 4.6). Die Variante KÜ stieg dabei am stärksten an. Bei -10 °C und -15 °C stieg dagegen die Variante K0 stärker an als KN und KÜ, die sich nicht unterschieden. Die REL-Werte der KÜ Variante der *Rosa* 'Sommerabend'-Stecklinge stieg bei -10 °C und -15 °C deutlich geringer an als KN oder K0.



**Abbildung 4.6:** Einfluss der Frostungstemperatur (Frühfrost) auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung.

Da sich die REL-Werte zwischen K0 und KN kaum unterschieden, bei KÜ aber wesentlich geringer anstiegen, lässt sich daraus schließen, dass eine vermehrte K-Gabe bei *Rosa* 'Sommerabend' durchaus einen positiven Effekt auf die Frühfrosthärte gehabt hat. Bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' führte die erhöhte K-Gabe dagegen nicht zu geringeren REL-Werten (= verbesserte Frühfrosthärte), die Varianten KN und KÜ unterschieden sich kaum voneinander.

**Abbildung 4.7: Einfluss der Frostungstemperatur (Spätfrost, -10 °C) auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung.**



Im Spätfrosttest reagierte *Rosa* 'Sommerabend' negativ auf eine erhöhte K-Gabe. Dies verdeutlicht Abbildung 4.7 für die Testtemperatur -10 °C. Während es bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' keinen Unterschied zwischen den REL-Werten der Varianten KN und KÜ gab, stieg der REL-Wert der Variante KÜ von *Rosa* 'Sommerabend' wesentlich stärker an als bei der Variante KN oder K0 (kein Anstieg).

### 4.3 Diskussion

In Tabelle 4.3 sind alle Einzelergebnisse des Kaliumversuches zusammenfassend dargestellt. Die als sig. unterschiedlich bezeichneten Ergebnisse sind grün hervorgehoben.

**Tabelle 4.3: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K-Ernährung (FF = Frühfrost, TF = Tieffrost, SF = Spätfrost, S = Spross, W = Wurzel, + = Varianten waren sig. unterschiedlich, - = Varianten waren nicht sig. unterschiedlich, n. b. = nicht bestimmt).**

Test	Pflanze	Teil	Sig. Unterschiede vorhanden bei					
			REL					%
			+5 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C	K
FF	Rosa	S	-	-	-	+	n. b.	+
FF	Rosa	W	-	-	-	-	n. b.	+
TF	Rosa	S	-	n. b.	+	-	-	n. b.
SF	Rosa	S	-	-	-	-	n. b.	n. b.
FF	Prunus	S	-	-	-	-	n. b.	+
FF	Prunus	W	-	-	-	-	n. b.	+
TF	Prunus	S	-	n. b.	-	-	+	n. b.
SF	Prunus	S	-	-	+	n. b.	n. b.	n. b.

Die im **Frühfrosttest** durchgeführte Analyse des Kaliumgehaltes zeigte jeweils sig. Unterschiede in den Varianten. Hierbei unterschieden sich alle Varianten der Sprossproben beider Versuchsarten sig. voneinander. Die K-Gehalte des Sprosses unterschieden sich nur gering zwischen *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'. Für die Wurzelproben konnte für beide Arten ein sig. niedriger K-Gehalt bei K0 ermittelt werden. *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' enthielt dabei in allen Varianten mehr K in den Wurzeln als *Rosa* 'Sommerabend' (Tab. 4.4).

**Tabelle 4.4: Einfluss der K-Versorgung auf den K-Gehalt von Spross und Wurzel bei *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (K0 = Kaliummangel, KN = Kalium-Normal, KÜ = Kaliumüberschuss).**

Pflanze	Probe	% K		
		K0	KN	KÜ
<i>Rosa</i>	Spross	0,65 <sup>a</sup>	1,38 <sup>b</sup>	1,64 <sup>c</sup>
<i>Prunus</i>	Spross	0,63 <sup>a</sup>	1,22 <sup>b</sup>	1,58 <sup>c</sup>
<i>Rosa</i>	Wurzel	0,42 <sup>a</sup>	1,18 <sup>b</sup>	1,20 <sup>b</sup>
<i>Prunus</i>	Wurzel	0,62 <sup>a</sup>	1,78 <sup>b</sup>	1,92 <sup>b</sup>

Trotz der ermittelten sig. Gehaltsunterschiede konnte kein Zusammenhang zwischen Kaliumgehalt und REL-Werten hergestellt werden. Die Variante KÜ erreichte zwar

sig. höhere REL-Werte als KN (TF *Rosa* -10 °C, TF *Prunus* -20 °C, SF *Prunus* -10 °C) bzw. K0 (FF *Rosa* -15 °C, TF *Prunus* -20 °C), diese konnten jedoch bei beiden Arten nur in den Sprossproben gefunden werden. Außerdem haben sich diese Signifikanzen bei sehr tiefen Testtemperaturen ergeben, bei denen die Bonitурpflanzen bereits alle abgestorben waren. Daher ist keine sinnvolle Interpretierung der sig. Unterschiede möglich. Auffällig waren zunächst die hohen REL-Werte der Variante KÜ. Bei Betrachtung des Anstieges der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten fiel jedoch die Variante K0 auf. Sowohl bei *Rosa* 'Sommerabend' als auch bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' stiegen die REL-Werte dieser Variante bei -10 °C und -15 °C am stärksten aller drei Varianten an.

Für die Wurzelproben konnten zwar sig. Unterschiede in den Kaliumgehalten zwischen K0 und KÜ ermittelt werden, die REL-Werte unterschieden sich jedoch bei beiden Arten nicht signifikant. So haben bspw. die Varianten K0 und KÜ bei -5 °C gleich hohe REL-Werte bei sig. unterschiedlichem K-Gehalt erreicht (Tab. 4.2).

Die Kaliumgehalte der Sprosse der Variante K0 beider Arten sind als Mangelversorgung einzustufen, die Variante KN sind nach der Zusammenstellung von ALT (1990) im Spross ausreichend mit Kalium versorgt, während die Variante KÜ deutlich mit Kalium überversorgt ist (Vergleich Tab. 4.5).

BEATTIE & FLINT (1973) berichten von einem sinkenden N-Gehalt bei steigendem Kaliumgehalt in stecklingsvermehrten *Forsythia x intermedia* 'Lynwood' und führen die geringere Stickstoffaufnahme auf antagonistische Effekte durch K<sup>+</sup> oder Cl<sup>-</sup> zurück. Die Tieffrosthärte war bei hohem K-Gehalt sig. erniedrigt. Als optimaler K-Gehalt für die Frosttoleranz wurde der Gehalt für optimale Trockenmasseproduktion oder knapp darunter ermittelt. Dieser Effekt der geringeren N-Aufnahme konnte bei *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' nicht gefunden werden. Die vorhandenen Mineralstoffdaten zeigten lediglich sig. Unterschiede im Kaliumgehalt, der Stickstoffgehalt blieb davon unbeeinflusst. So enthielten bspw. K0 und KÜ beide 2,30 % N, der K-Gehalt bei K0 lag aber bei 0,63 % K und bei KÜ bei 1,58 % K.

**Tabelle 4.5: Beurteilung der Kaliumgehalte verschiedener Gehölze**  
(Blattanalyse; Symp.: Symptome sichtbar; verändert nach ALT, 1990).

Art	% Kalium		Autor
	Mangel	Ausreichend	
<i>Carpinus betulus</i>	0,3 – 0,45	0,55 – 0,9	WEHRMANN, J., 1963
<i>Fagus sylvatica</i>	< 0,35 (Symp.)	0,9	GRUPPE, W. & SEITZ, P., 1962
<i>Forsythia x intermedia</i>	< 0,25 (Symp.)		ZECH, W., 1969
<i>Larix leptolepsis</i>	< 0,35 (Symp.)	0,7 – 0,8	GRUPPE, W. & SEITZ, P., 1962
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	0,15 – 0,33	0,45- 1,25	WEHRMANN, J., 1963
<i>Lonicera xylosteum</i>		0,5 – 0,6	RÖBER, R. & RHODE, J., 1984
<i>Picea abies</i>		1,5	GOUIN, F. R. & LINK, C. B., 1966
<i>Picea abies</i>	0,3 – 0,45	0,55 – 0,9	WEHRMANN, J., 1963
<i>Picea omorika</i>	< 0,35 (Symp.)	0,9	GRUPPE, W. & SEITZ, P., 1962
<i>Pinus montana</i>	< 0,25 (Symp.)		ZECH, W., 1969
<i>Pinus sylvestris</i>	< 0,35 (Symp.)	0,7 – 0,8	GRUPPE, W. & SEITZ, P., 1962
<i>Pinus</i>	0,15 – 0,33	0,45 – 1,25	WEHRMANN, J., 1963
<i>Philadelphus inodorus</i>		0,5 – 0,6	RÖBER, R. & RHODE, J., 1984
<i>Taxus x media</i>		1,5	GOUIN, F. R. & LINK, C. B., 1966

Im **Tiefrosttest** ergaben sich für die Sprossproben von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' sig. Unterschiede der REL-Werte bei -10 °C bzw. -20 °C. Die REL-Werte lagen in einem sehr hohen Bereich. Die Bonitурpflanzen beider Arten haben bereits -10 °C nicht überlebt, so dass insgesamt davon ausgegangen werden muss, dass bereits die höchste Testtemperatur (-10 °C) zu niedrig gewählt war.

Der **Spätfrosttest** hat bei *Rosa* 'Sommerabend' zu keinen sig. Unterschieden in den Varianten geführt. Die Variante KÜ erreichte aber bereits bei -10 °C einen deutlich höheren REL-Wert als KN und K0. Bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' erreichte die Variante KÜ bei -10 °C einen sig. höheren REL-Wert, bei -5 °C und auch bei der Kontrolle (+5 °C) zeigte KÜ aber ebenfalls erhöhte REL-Werte gegenüber KN bzw. K0. KÜ veränderte sich auch gegenüber den Kontrollwerten stärker als KN oder K0.

Die Tatsache, dass KÜ bereits in den Kontrollmessungen (ohne Frosteinwirkung) höhere REL-Werte erreichte, ist nicht nur im Spätfrosttest von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' sondern auch im Frühfrosttest von *Rosa* 'Sommerabend' aufgetreten. Dies gilt nicht nur für die Spross- sondern auch für die Wurzelproben. Eine ausführliche Erklärung, warum es in der KÜ-Variante unabhängig von der Höhe der Frosttesttemperatur zu höheren REL-Werten gekommen sein könnte, liefern TAIZ & ZEIGER (2000): Mit steigender Kaliumzufuhr wird nicht nur der Kaliumgehalt der Zellen, son-

dern auch der Kaliumgehalt des Interzellularraumes erhöht. Deshalb kann es bei einem bereits ausreichend hohen Kaliumgehalt in der Zelle und weiterem Kaliumantransport aus den Wurzeln zu erhöhten Kaliumgehalten im Interzellularraum des Sprosses kommen. Bei der ersten Messung der Leitfähigkeit, die hauptsächlich durch austretende Kaliumionen verursacht wird (PALTA et al., 1977b), wird daher nicht nur das durch die geschädigte Membran (Frost oder Schneiden der Probe) austretende Kalium gemessen, sondern es werden auch die bereits vor der Frostschädigung im Interzellularraum vorhandenen Kaliumionen erfasst. Dadurch könnte ein erhöhtes Schadniveau unterstellt werden. Bei der Berechnung der REL-Werte nach Formel 1 (Seite 29) können deshalb fehlerhafte bzw. verzerrte Ergebnisse, die einen erhöhten Schaden bei erhöhten Kaliumgehalten errechnen, auftreten. Aus diesem Grund wurde der Anstieg der REL-Werte gegenüber den Kontrollen berechnet. Dies führte insbesondere im Frühfrosttest zu einer anderen Deutung der Ergebnisse. Im Spätfrosttest führte dagegen die Interpretation der REL-Werte zum gleichen Ergebnis, wie die Betrachtung der Veränderungen gegenüber den Kontrollen.

Nach den Sortenbeschreibungen aus Kapitel 2 (Material und Methoden) wäre eine Reaktion der *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' auf eine erhöhte K-Ernährung zu erwarten gewesen. Für *Rosa* 'Sommerabend', als frosthärtere Testart, hätte sich nach bisherigem Wissensstand keine Reaktion auf die K-Ernährung zeigen sollen. *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' reagierten jedoch genau anders als erwartet. Die Frühfrosthärte der *Rosa* 'Sommerabend'-Stecklinge konnte durch die KÜ-Variante erhöht werden, während die *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge keine Veränderung gegenüber der KN-Variante zeigten. Die Spätfrosthärte der *Rosa* 'Sommerabend'-Stecklinge in der KÜ-Variante verringerte sich gegenüber der Variante KN, wogegen die *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge wiederum keinen Unterschied zwischen KN und KÜ erkennen ließen. Dies deutet zum einen darauf, dass junge stecklingsvermehrte Gehölze anders reagieren, als ältere Gehölze. Zum anderen kann durch dieses Ergebnis die Pauschalmeinung, dass Kalium die Frosthärte erhöht, nicht bestehen bleiben.

**Fazit:** Insgesamt hat sich kein eindeutiger Einfluss einer erhöhten Kaliumdüngung auf die Frosthärte gezeigt. *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' reagierten unterschiedlich. Die erhöhte K-Gabe führte im Frühfrost zu einem positiven, im Spätfrosttest jedoch zu einem negativen Effekt auf die Frosthärte der *Rosa* 'Sommerabend'-Stecklinge. Die *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge zeigten dagegen keine Veränderung der Frosthärte bei gesteigerter K-Ernährung.

Die Interpretierung der REL-Werte hat sich in diesem Versuch als nicht eindeutig herausgestellt. Zur Verbesserung der Aussagefähigkeit wurde daher zusätzlich die Steigerung der REL-Werte interpretiert. Darüber hinaus empfiehlt sich zusätzlich eine Frosthärtebestimmung, die nicht auf unterschiedliche K-Gehalte der Varianten reagiert (bspw. TTC, Verbräunung, CF, ...).

## 5. Einfluss des Verhältnisses K/N auf die Frosthärte

### 5.1 Einleitung

Mit der möglichen Beeinflussung der Frosthärte durch das Einstellen bestimmter Nährstoffverhältnisse haben sich bisher nur wenige Autoren beschäftigt. Am häufigsten ist dabei eine Korrelation zwischen dem Verhältnis von Kalium und Stickstoff mit der Frosthärte gelungen.

TIMMIS (1974) hat Versuche mit Sämlingen von *Pseudotsuga menziesii* durchgeführt. Das Niveau der Frosthärte hing dabei nicht vom Gehalt an Stickstoff, Phosphor oder Kalium allein ab. Es ergab sich vielmehr eine Korrelation zwischen dem Verhältnis K/N im Blatt und der Frosthärte, wobei ein Verhältnis von 0,6 als ideal angesehen wurde. Die Auswirkung des Verhältnisses K/N unterstreicht nach WEISER (1970) die Bedeutung von Stickstoff und Kalium in der Abhärtung: Stickstoff ist wichtiger Bestandteil der Proteinsynthese, während Kalium in vielen enzymatischen Reaktionen unabdingbar ist (LEVITT, 1980).

SARJALA et al. (1997) ermittelten bei einem Düngeversuch zur Untersuchung der Abhärtung von *Pinus sylvestris*-Sämlingen (Nadeln) die höchsten Stickstoffgehalte in der Variante mit dem höchsten Kaliumgehalt. Das K/N Verhältnis hat sich dabei aber kaum zwischen den einzelnen Varianten unterschieden.

Nach WITT (1997) führt weder ein hoher Kaliumgehalt zu einer verbesserten Frosthärte noch wird die Frosthärte durch eine hohe Stickstoffversorgung beeinträchtigt. Das Verhältnis dieser beiden Nährstoffe ist von größerer Bedeutung. Bei *Pyracantha crenatoserrata* 'Orange Glow' verringerten sich die Frostschäden, wenn Kalium mindestens in gleicher Höhe wie Stickstoff ( $K/N = 1$ ) oder höher gedüngt wurde.

EDWARDS (1989) fand nur einen schwachen Zusammenhang zwischen den Verhältnissen N/P, N/K und K/P. Nur für *Pinus sylvestris* konnte eine sig. bessere Frühfrohthärte mit dem Verhältnis N/P in Verbindung gebracht werden. Leider hat EDWARDS (1989) nur die Düngevarianten aufgeführt, Gehaltsangaben über die tatsächliche Aufnahme in die Pflanze sind daher nicht verfügbar.

Arbeiten, die sich mit stecklingsvermehrten Gehölzen und dem Einfluss von Nährstoffverhältnissen auf die Frosthärte beschäftigen, sind der Autorin nicht bekannt. Ob sich die Frosthärte durch eine gezielte Düngung eines bestimmten K/N-Verhältnisses verändert, wurde daher von Juli 2003 bis April 2005 an stecklingsvermehrten *Rosa* 'Sommerabend', sowie von Juli 2004 bis April 2005 auch für stecklingsvermehrte *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' untersucht.

## 5.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des K/N-Versuches der Versuchsperiode November 2003 bis April 2005 dargestellt. *Rosa* 'Sommerabend' wurde im gesamten Zeitraum untersucht, *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' nur von November 2004 bis April 2005. Weitere Einzelheiten zu Material und Methoden befinden sich in Kapitel 2.

### 5.2.1 Einfluss des Verhältnisses K/N auf die Frosthärte von *Rosa* 'Sommerabend'

#### Relative Elektrische Leitfähigkeit der Sprossproben

Der TUKEY-Test konnte im **Frühfrosttest November 2003** bei keiner Temperatur sig. Unterschiede zwischen den Varianten ermitteln (Abb. 5.1). Da die REL-Werte des Frosttestes bei -10 °C eine starke Varianzheterogenität besaßen, musste die Auswertung dieser REL-Werte mit dem Bonferroni-adjustierten WELCH-Test erfolgen. Dadurch konnten trotz unterschiedlicher REL-Werte keine Signifikanzen nachgewiesen werden. Dennoch unterschieden sich die Varianten bei -10 °C: Variante E erreichte den höchsten, die Variante C den niedrigsten REL-Wert.

Im **Frühfrosttest November 2004** wurden ebenfalls kaum Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt (Abb. 5.2). Nur bei -8 °C zeigten sich sig. Unterschiede, wobei die Variante C wie auch im Versuchsjahr 2003 den niedrigsten REL-Wert erreicht. Für die höher gedüngten Stickstoffvarianten D und B sind bei dieser Temperatur die höchsten REL-Werte ermittelt worden, die Variante B erreichte einen sig. höheren REL-Wert als A und C. Die REL-Werte des Testes bei -10 °C spiegelten sich auch in der visuellen Bonitur wider: B und D erreichten die höchsten REL-Werte und fünf von sechs Bonitурpflanzen starben ab. Die Variante C erreichte den niedrigsten REL-Wert und nur zwei von sechs Pflanzen starben ab.

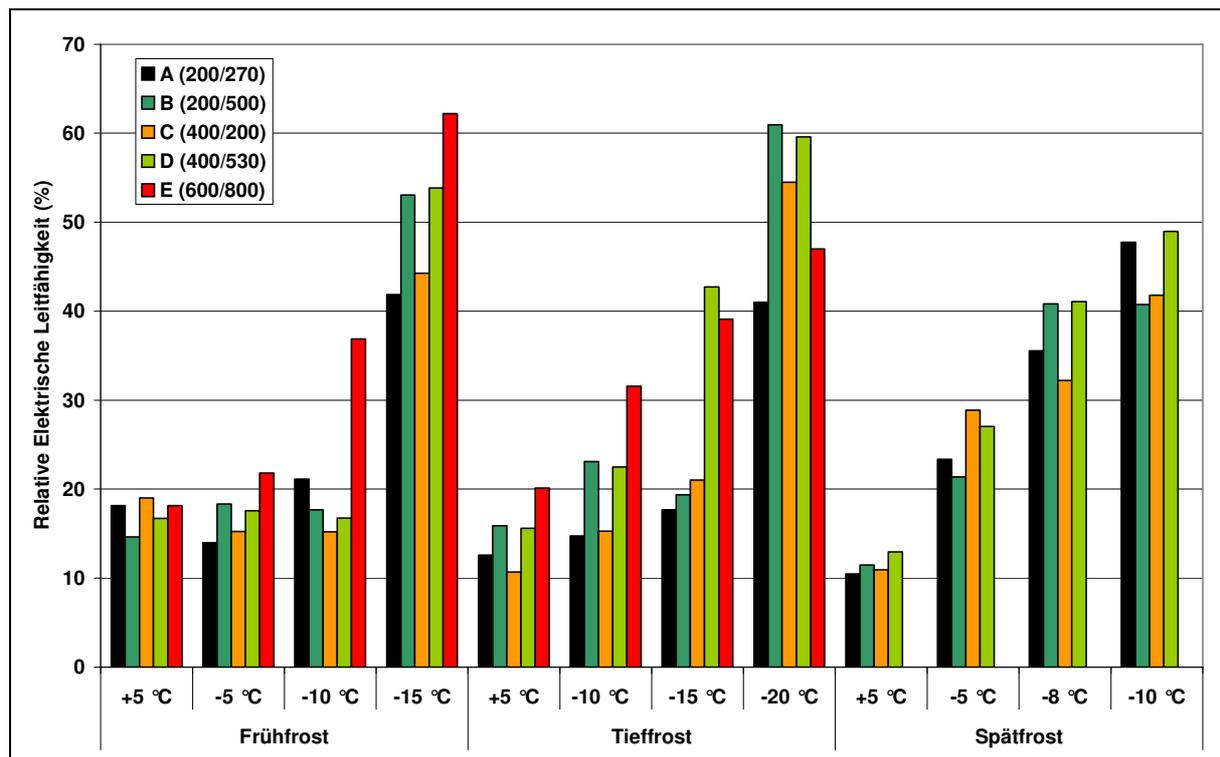
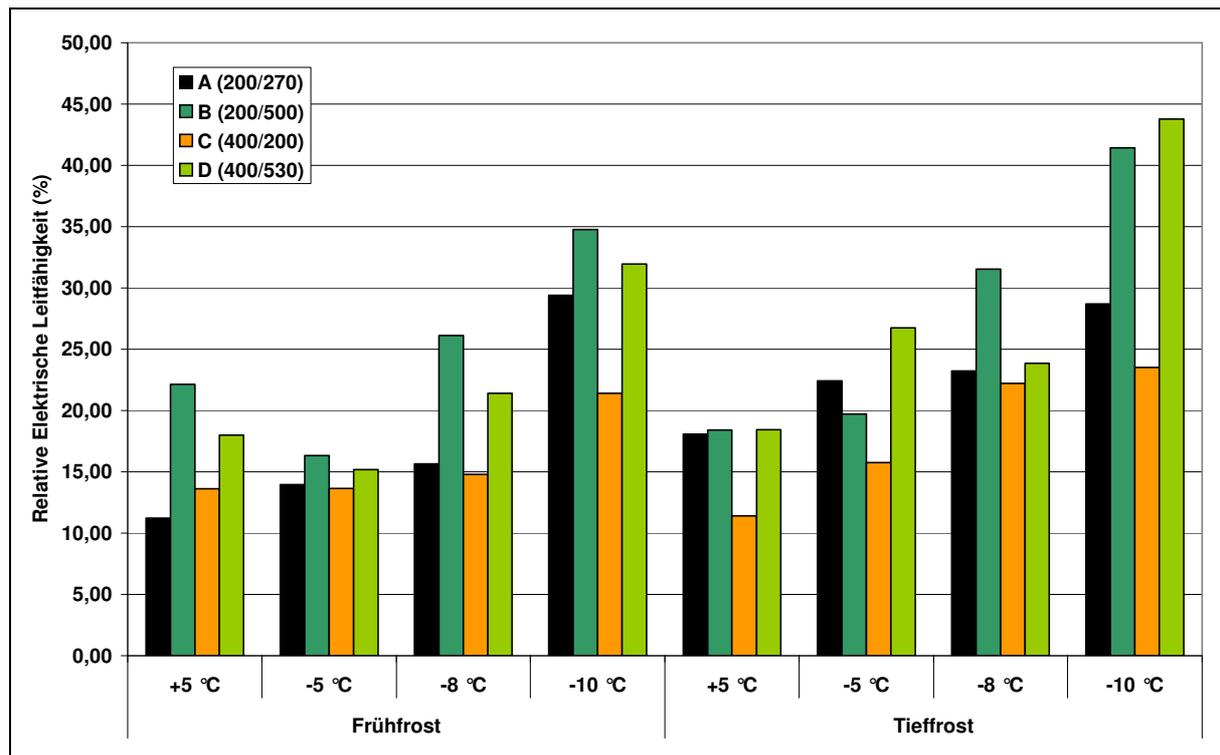


Abbildung 5.1: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004 (Signifikanzen siehe Text).

Für die Testtemperaturen -10 °C und -15 °C ergaben sich im **Tieffrosttest Januar 2004** sig. Unterschiede. Bei -10 °C hatte die Variante E einen sig. höheren REL-Wert als A und C. Die Temperatur -15 °C führte bei D und E zu sig. höheren REL-Werten gegenüber A, B und C (Abb. 5.1).

Im **Tieffrosttest Januar 2005** konnten sig. Unterschiede aufgrund der hohen Streuung der REL-Werte selbst bei -10 °C nicht ermittelt werden (Abb. 5.2). Die adj. p-Werte der Vergleiche zwischen C und B sowie C und D betragen 0,087 bzw. 0,045 und mussten als nicht sig. eingestuft werden. Übereinstimmend mit den hohen Messergebnissen der EL-Messung sind laut visueller Bonitur bei B und D vier von sechs Bonitурpflanzen abgestorben. In der Variante C (niedrigster REL-Wert) überlebten dagegen alle Bonitурpflanzen.



**Abbildung 5.2:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa 'Sommerabend'* (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005 (Signifikanzen siehe Text).

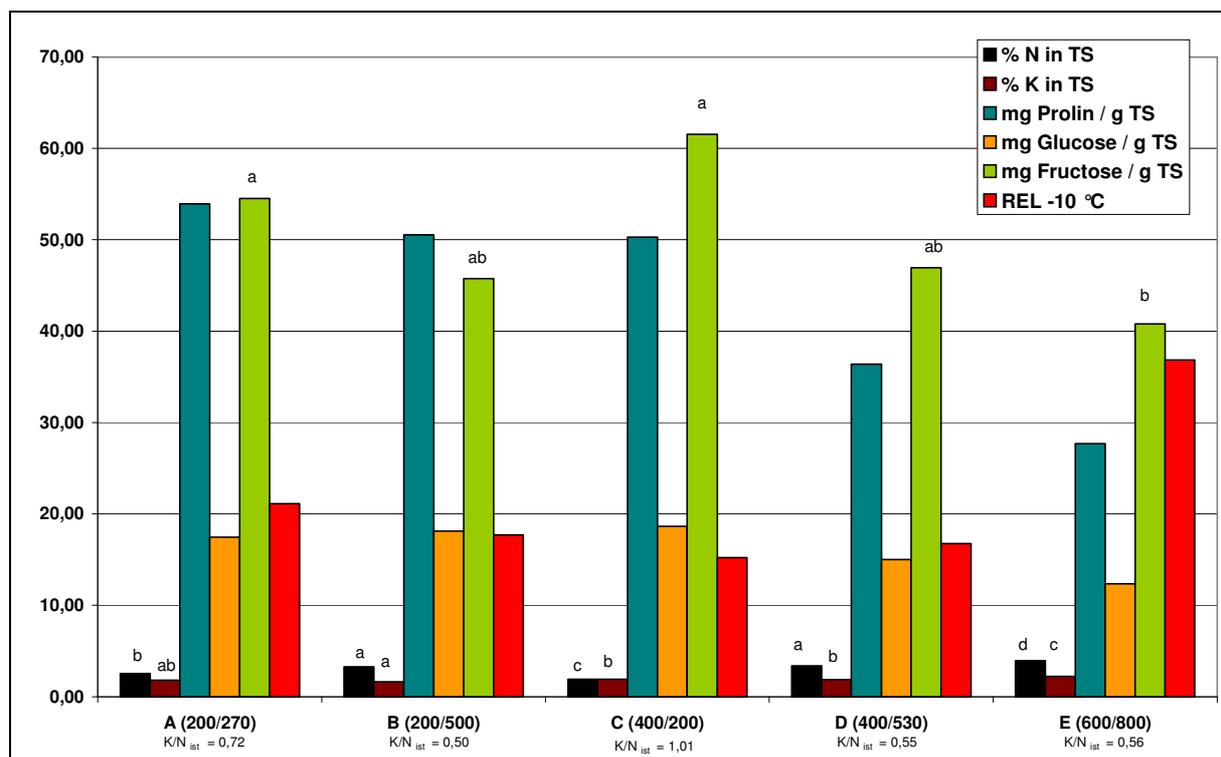
Im **Spätfrosttest April 2004** zeigte die ANOVA keinen Einfluss der Düngevarianten. Daher entfiel eine weitere statistische Auswertung. Bereits die Testtemperatur -5 °C führte einheitlich in allen Varianten zum Anstieg der REL-Werte. Die Varianten D und C erreichten dabei etwas höhere REL-Werte als A und B (Abb. 5.1). Bei -8 °C zeigten B und D den stärksten Anstieg der REL-Werte. Die Temperatur -10 °C überlebte aufgrund der allgemein hohen REL-Werte keine Variante.

Die Analyse des **Spätfrosttestes April 2005** war weder für den Spross noch für die Wurzeln möglich. Aufgrund falscher Bewässerung (Anstaubewässerung) kam es zu einer Annäherung der Varianten. Außerdem sind bei der EL-Messung unerklärliche Schwankungen innerhalb der Varianten aufgetreten, so dass keine sinnvolle Aussage getroffen werden konnte (Daten nicht dargestellt).

## Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Stickstoff-, Kalium-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalt der Sprossproben

### Frühfrost

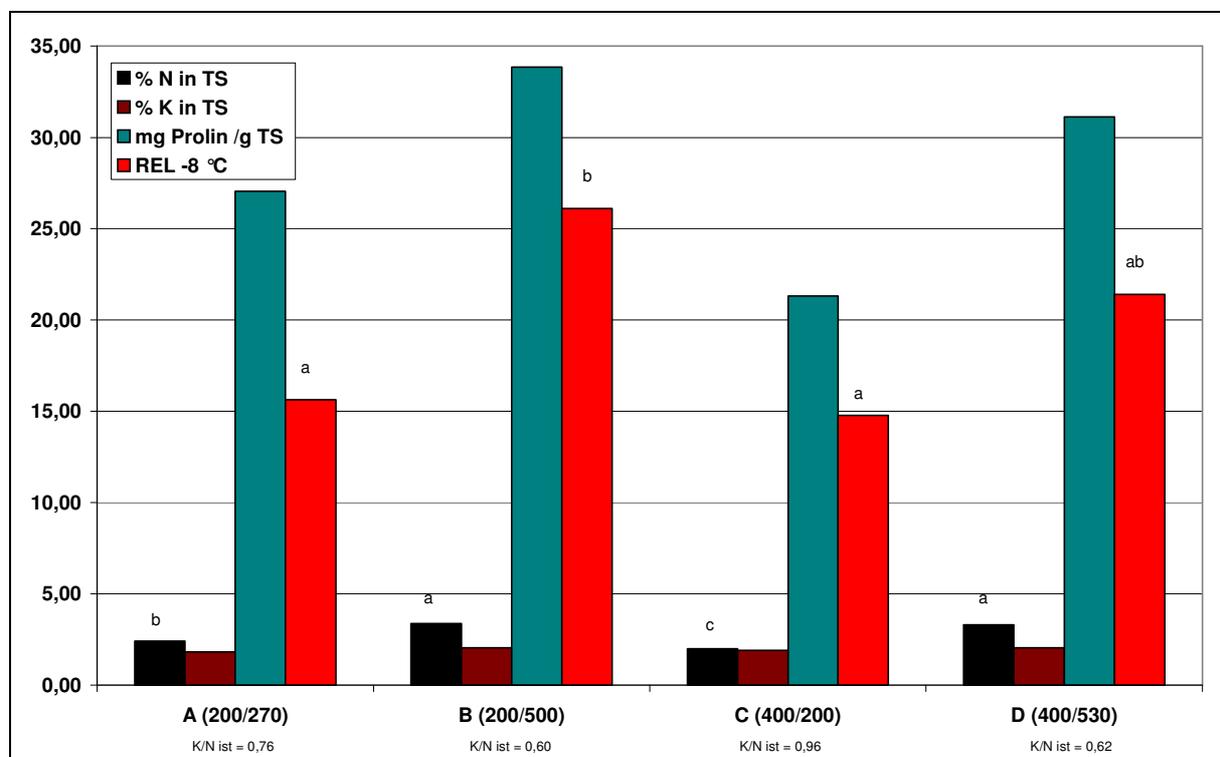
Erwartungsgemäß zeigten in beiden Versuchsjahren die stark mit Stickstoff gedüngten Varianten die jeweils höchsten Gehalte an Stickstoff (Abb. 5.3 und 5.4). Der Stickstoffgehalt erhöhte sich sig. mit steigender Düngergabe. Beim Kaliumgehalt ließ sich ein solcher Zusammenhang nicht feststellen. Zwar hatte die Variante E (nur 2003 getestet) den sig. höchsten Kaliumgehalt, die Varianten A, C und D unterschieden sich aber trotz unterschiedlicher Düngung nicht sig. im Kaliumgehalt. Im November 2004 gab es keine sig. Unterschiede im Kaliumgehalt der Düngevarianten (Abb. 5.4).



**Abbildung 5.3: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2003.** Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolin- und Glucosegehalte sowie die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant. K/N<sub>ist</sub>: in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

Die Varianten A und C enthalten sig. mehr Fructose als E (Abb. 5.3). Trotz großer Unterschiede zwischen den Varianten A und E (Prolin) bzw. C und E (Glucose) konnten für Prolin (Nov. 2003 und Nov. 2004) und Glucose (Nov. 2003) keine Signifikanzen ermittelt werden.

Obwohl im **Frühfrosttest November 2003** sig. unterschiedliche Stickstoff- und Kaliumgehalte festgestellt wurden, konnte kein Zusammenhang mit den REL-Werten hergestellt werden, da sich diese nicht sig. unterschieden. Auffällig ist dennoch die Variante E, die sig. von allen Varianten am meisten Stickstoff und sig. weniger Fructose als die Varianten A und C enthielt (Abb. 5.3). Diese Variante erreichte zugleich den höchsten REL-Wert (-10 °C).



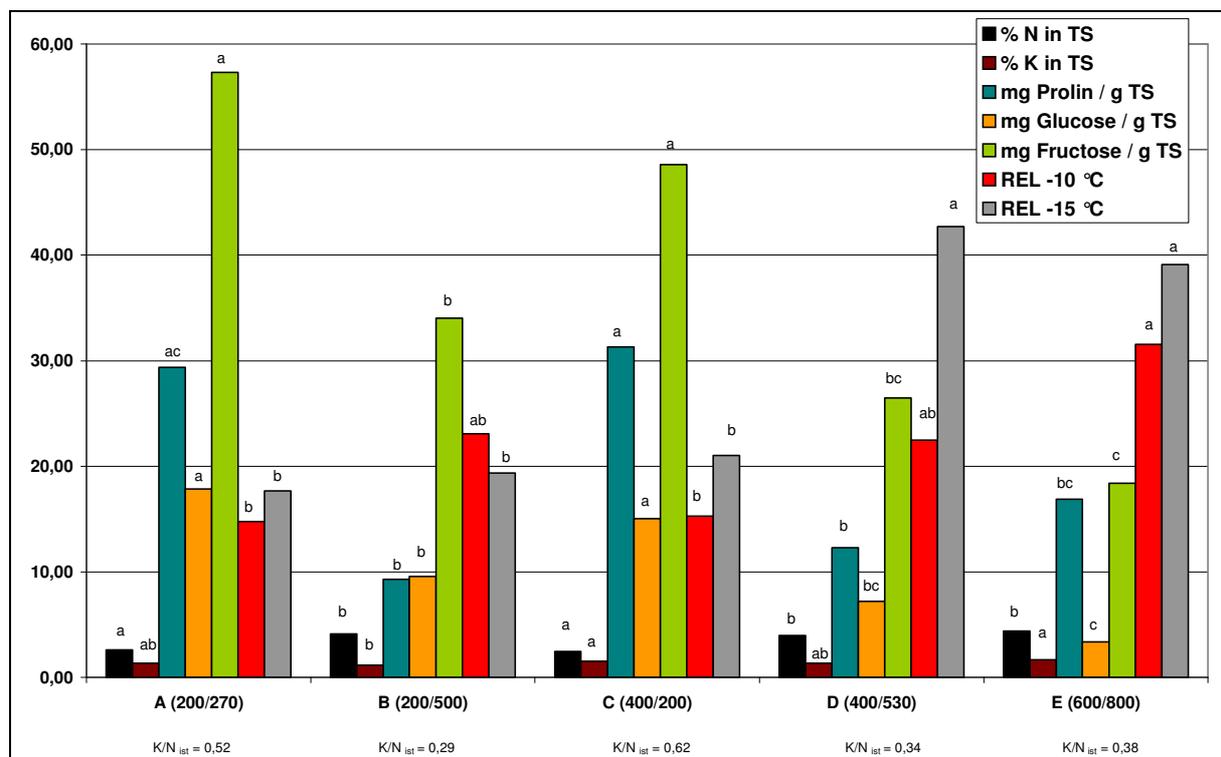
**Abbildung 5.4: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von Rosa 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2004.** Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Kalium- und Prolingehalte unterschieden sich jeweils nicht signifikant.  $K/N_{ist}$ : in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

Im **Frühfrosttest November 2004** stiegen die REL-Werte (-8 °C) bei steigendem Stickstoffgehalt an. Die Varianten B und D enthielten sig. mehr Stickstoff als A und C und erreichten beide höhere REL-Werte (D nicht sig. unterschiedlich von A und C, Abb. 5.4).

Ein Zusammenhang zwischen dem K/N-Verhältnis in der Sprossprobe und der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit konnte für den Frühfrosttest November 2003 nicht hergestellt werden. So erreichten die Varianten D und E zwar deutlich unterschiedliche REL-Werte (nicht sig.), das K/N-Verhältnis ist in beiden Varianten aber identisch gewesen (Abb. 5.3). Im Frühfrosttest November 2004 sank das K/N-Verhältnis in den Sprossproben bei steigenden REL-Werten. Die Variante C mit dem höchsten K/N-Verhältnis (0,96) erreichte den geringsten REL-Wert, die Variante B mit dem geringsten K/N-Verhältnis erreichte dagegen den höchsten REL-Wert (Abb. 5.4).

### Tiefrost

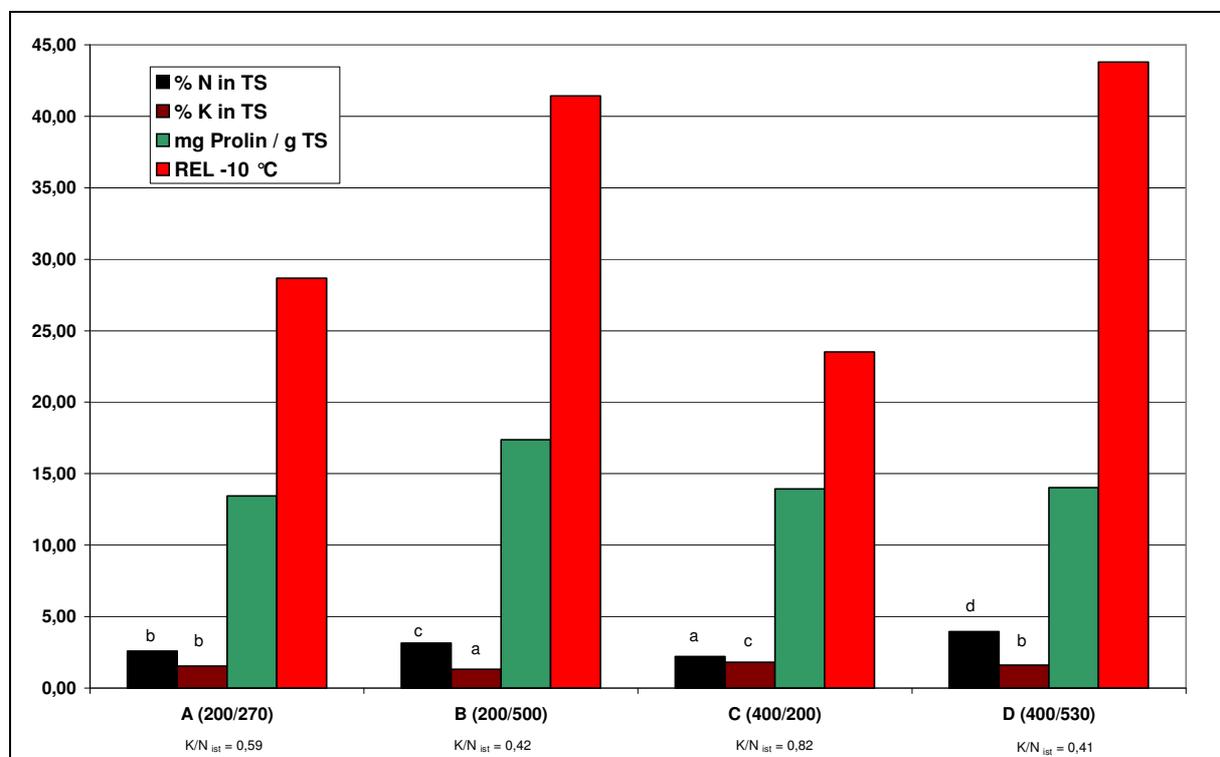
Die Gehalte an Stickstoff und Kalium unterschieden sich im Januar 2004 entsprechend den Düngevarianten. Bei hoher Stickstoffgabe enthielt der Spross entsprechend viel N. Der Stickstoffgehalt der Variante E lag aber nur gering höher als der Gehalt der Varianten B oder D, alle drei Varianten unterschieden sich aber sig. von A und C (Abb. 5.5).



**Abbildung 5.5: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Tiefrost Januar 2004.** Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. K/N<sub>ist</sub>: in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

Die Varianten C und E enthielten sig. mehr Kalium als B. Die Variante D (400 mg K / 530 mg N) enthielt dagegen genauso viel Kalium wie A (200 mg K / 270 mg N), obwohl D mit doppelt soviel K versorgt wurde. Die höher mit Stickstoff versorgten Varianten B, D und E enthielten jeweils sig. weniger Glucose, Fructose und Prolin als die normal mit Stickstoff gedüngten Varianten A und C (Abb. 5.5).

Der Stickstoffgehalt variierte im Januar 2005 ähnlich wie im Januar 2004 entsprechend den Düngevarianten (Abb.5.6). Der Kaliumgehalt der Varianten A und D war wie im Vorjahr identisch. Die Variante B enthielt wieder sig. am wenigsten Kalium. Die Prolingehalte unterschieden sich nicht zwischen den Varianten.



**Abbildung 5.6: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von Rosa 'Sommerabend' (Spröss) im Tieffrost Januar 2005.** Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant. K/N<sub>ist</sub>: in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

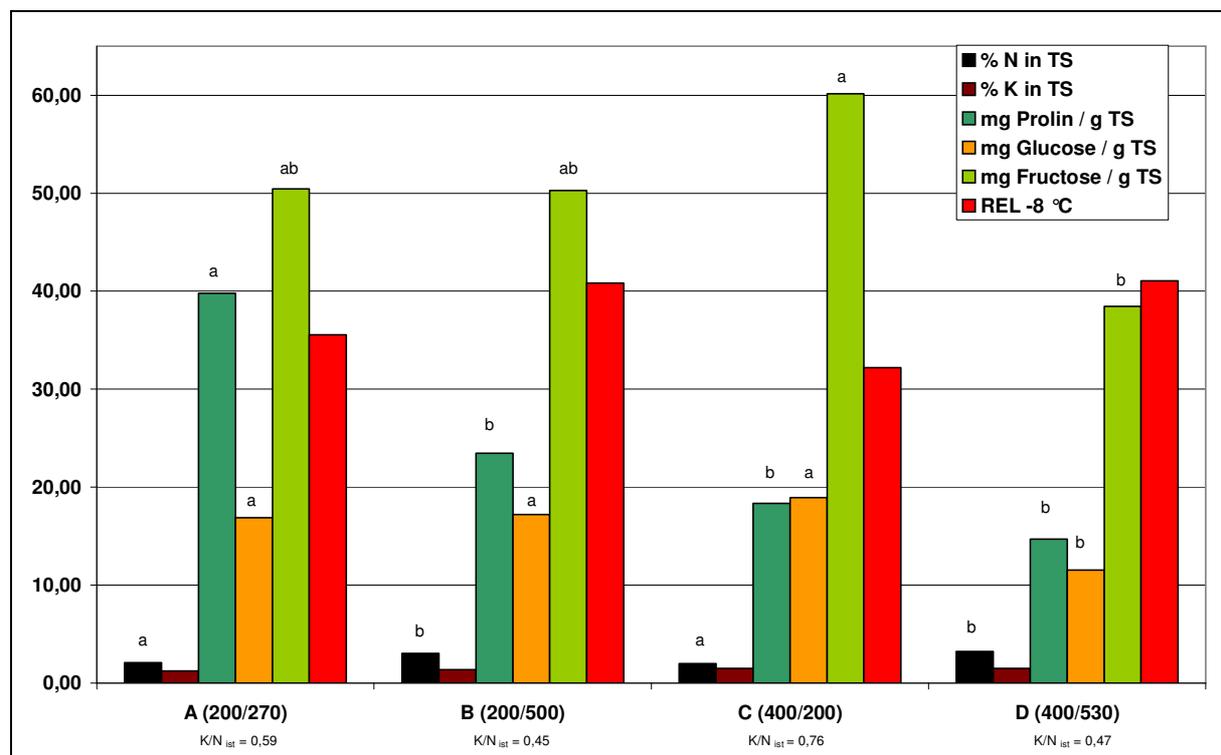
Bei Betrachtung der Testtemperatur -10 °C stiegen im Tieffrosttest beider Versuchsjahre die REL-Werte mit steigendem Stickstoffgehalt an. Ein Zusammenhang zwischen Kalium- und Prolingehalt und steigenden REL-Werten war nicht erkennbar.

(Abb. 5.5 und 5.6). Lediglich der Glucose- und Fructosegehalt sank im Januar 2004 tendenziell mit steigenden REL-Werten (Abb. 5.5).

Im Tieffrosttest Januar 2004 war kein Zusammenhang zwischen K/N-Verhältnis und steigenden REL-Werten erkennbar. Im zweiten Versuchsjahr sank dagegen wie bereits im Frühfrost November 2004 beobachtet, das K/N-Verhältnis mit steigenden REL-Werten. Die Variante C erreichte wiederum den geringsten REL-Wert und das höchste K/N-Verhältnis, die Varianten B und D erreichten die höchsten REL-Werte und die geringsten K/N-Verhältnisse (Abb. 5.6).

### Spätfrost

Die Düngevarianten unterschieden sich im Spätfrosttest April 2004 entsprechend der Versuchsanordnung im Stickstoffgehalt. B und D enthielten sig. mehr Stickstoff als A und C (Abb. 5.7). Der Kaliumgehalt lag bei D und C etwas höher als bei den anderen beiden Varianten (nicht sig.). Die Variante D enthielt sig. am wenigsten Glucose und Fructose. Der Prolingehalt war bei A sig. am höchsten.

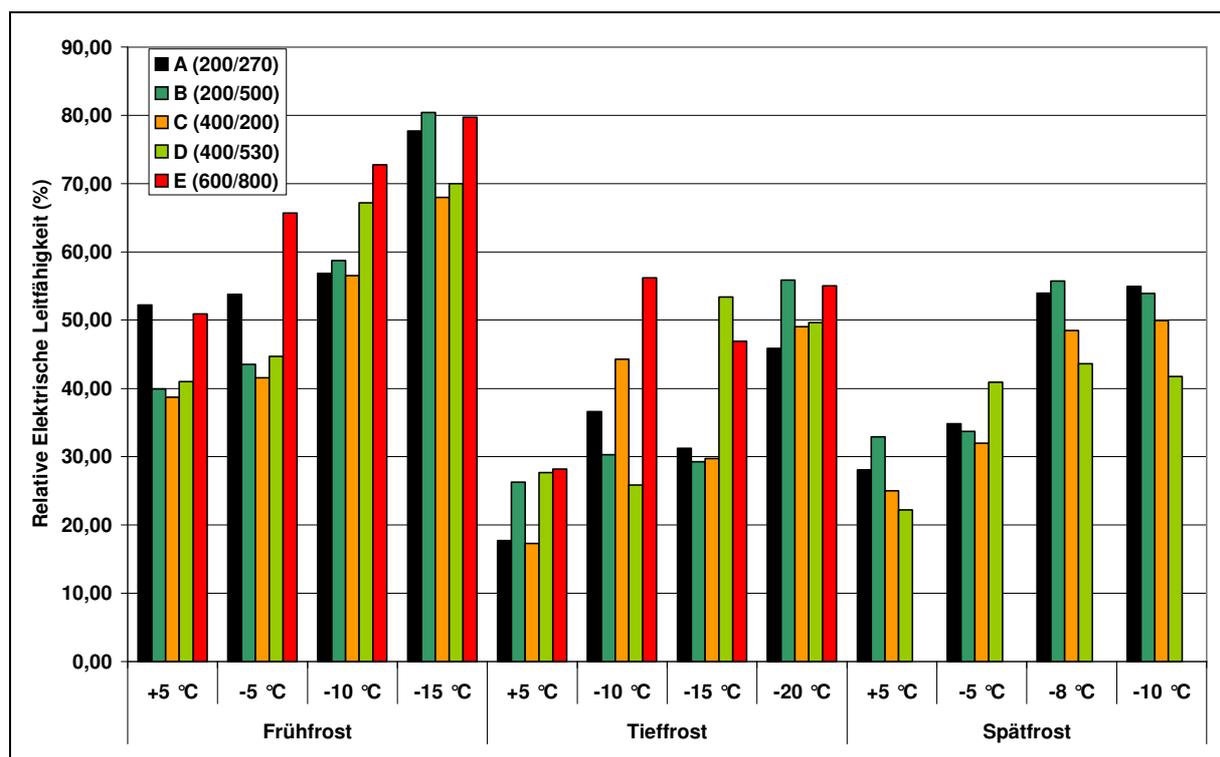


**Abbildung 5.7: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-8 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Spätfrost April 2004.** Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Kaliumgehalte und REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant. K/N<sub>ist</sub>: in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

Bei Betrachtung der Testtemperatur  $-8\text{ °C}$  stieg der Stickstoffgehalt mit steigenden REL-Werten stetig an. Der Glucose- und Fructosegehalt sank tendenziell, während der Prolingehalt keinen Zusammenhang mit steigenden REL-Werten erkennen ließ (Abb. 5.7). Das K/N-Verhältnis sank mit steigenden REL-Werten. Die Variante C erreichte den geringsten REL-Wert und enthielt das höchste K/N-Verhältnis.

### Relative Elektrische Leitfähigkeit der Wurzelproben

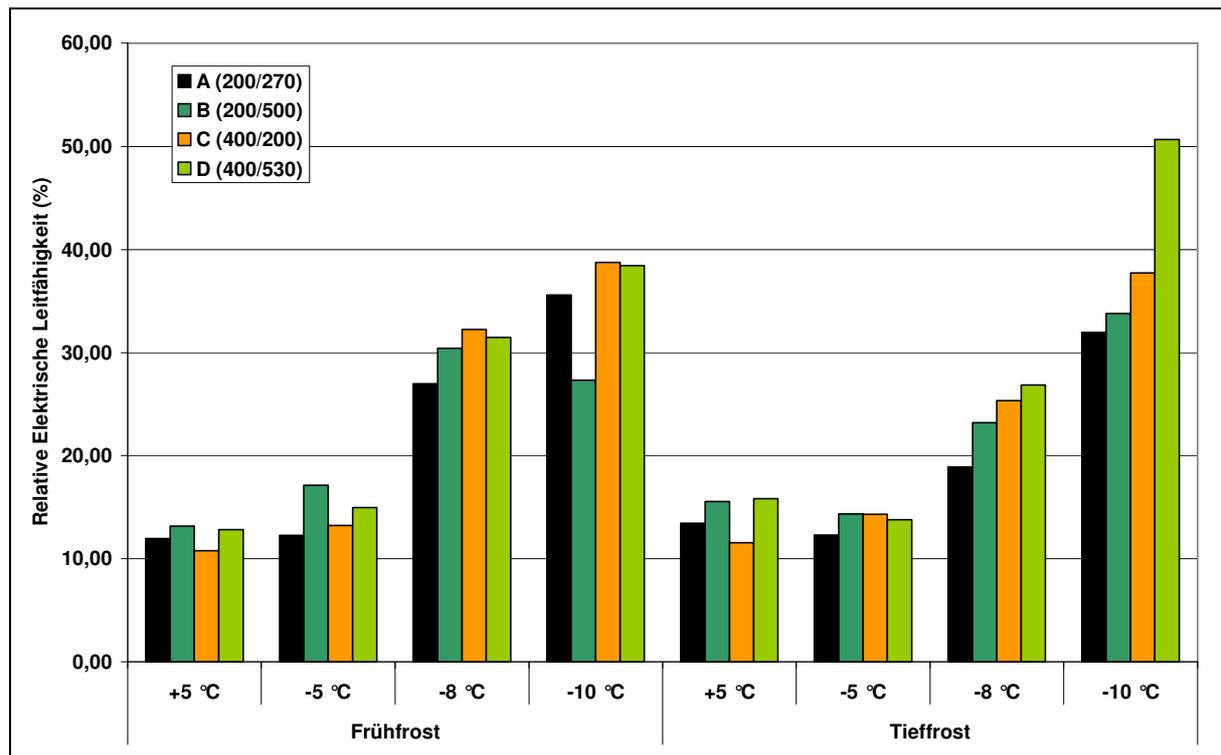
Die REL-Werte der Wurzeln des **Frühfrosttestes November 2003** lagen in einem sehr hohen Bereich. Innerhalb der Varianten gab es jedoch keine Unstimmigkeiten, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Ergebnisse die Schadenssteigerungen (bei sinkender Testtemperatur) korrekt widerspiegeln haben (Abb. 5.8). Sig. Unterschiede konnten bei keiner Temperatur gefunden werden. Bei  $-10\text{ °C}$  stiegen die REL-Werte aller Varianten an, bei der Variante E bereits bei  $-5\text{ °C}$  (nicht sig.).



**Abbildung 5.8:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004 (Signifikanzen siehe Text).

Beim **Frühfrosttest November 2004** (Abb. 5.9) konnten ebenfalls keine sig. Unterschiede gefunden werden. Bei  $-5\text{ °C}$  veränderten sich die REL-Werte aller Varianten

kaum, -8 °C und -10 °C führten zu deutlichen Zunahmen der REL-Werte. Die visuelle Bonitur ermittelte erste stärkere Frostschäden ebenfalls erst bei -8 °C, bei den gering mit Stickstoff versorgten Varianten A und C starben aber bei dieser Testtemperatur noch keine Pflanzen ab. Starke Ausfälle traten bei -10 °C in allen Varianten auf (Daten nicht dargestellt). Im weiteren Text wurde daher nur die Temperatur -8 °C den analysierten Inhaltsstoffen gegenübergestellt.



**Abbildung 5.9:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. Es waren keinerlei signifikante Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden.

Bei der EL-Messung der Wurzeln im **Tieffrosttest Januar 2004** sind bei einigen Varianten nicht erklärbare Schwankungen zwischen verschiedenen Testtemperaturen aufgetreten (bspw. Variante C von -10 °C zu -15 °C, Abb. 5.8). Sig. Unterschiede innerhalb der einzelnen Temperaturen konnten mit dem TUKEY-Test nicht gezeigt werden. Die Differenz zwischen D und E bei -10 °C musste mit einem adj. p-Wert von 0,016 als nicht sig. eingestuft werden. Gleiches galt für die Vergleiche D zu A, B bzw. C bei -15 °C (adj. p-Werte 0,030, 0,016 bzw. 0,018).

Im **Tiefrosttest Januar 2005** konnte der TUKEY-Test ebenfalls keine sig. Unterschiede ermitteln (Abb. 5.9). Bei -10 °C erreichte die Variante D zwar den mit Abstand höchsten REL-Wert, der Abstand zu den anderen Varianten war aber nicht signifikant. Laut visueller Bonitur sind bei -10 °C außerdem alle Pflanzen abgestorben. Daher wurden nur die REL-Werte des -8 °C Frosttestes den Stickstoff-, Kalium- und Prolingehalten gegenübergestellt.

Ebenso wie bei den Sprossdaten zeigte die ANOVA keinen Einfluss der Düngevarianten im **Spätfrosttest April 2004**. Die Variante D erreichte zwar bei -5 °C einen höheren REL-Wert als die anderen Varianten (Tab. 5.1), dieser Unterschied war aber nicht signifikant. Bei -8 °C sind aufgrund der starken Steigerungen der REL-Werte alle Pflanzen abgestorben. Außerdem erfolgte zur Testtemperatur -10 °C kaum noch ein Anstieg der REL-Werte.

**Tabelle 5.1: Einfluss der Frosttemperatur (Spätfrost) auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung.** Die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant.

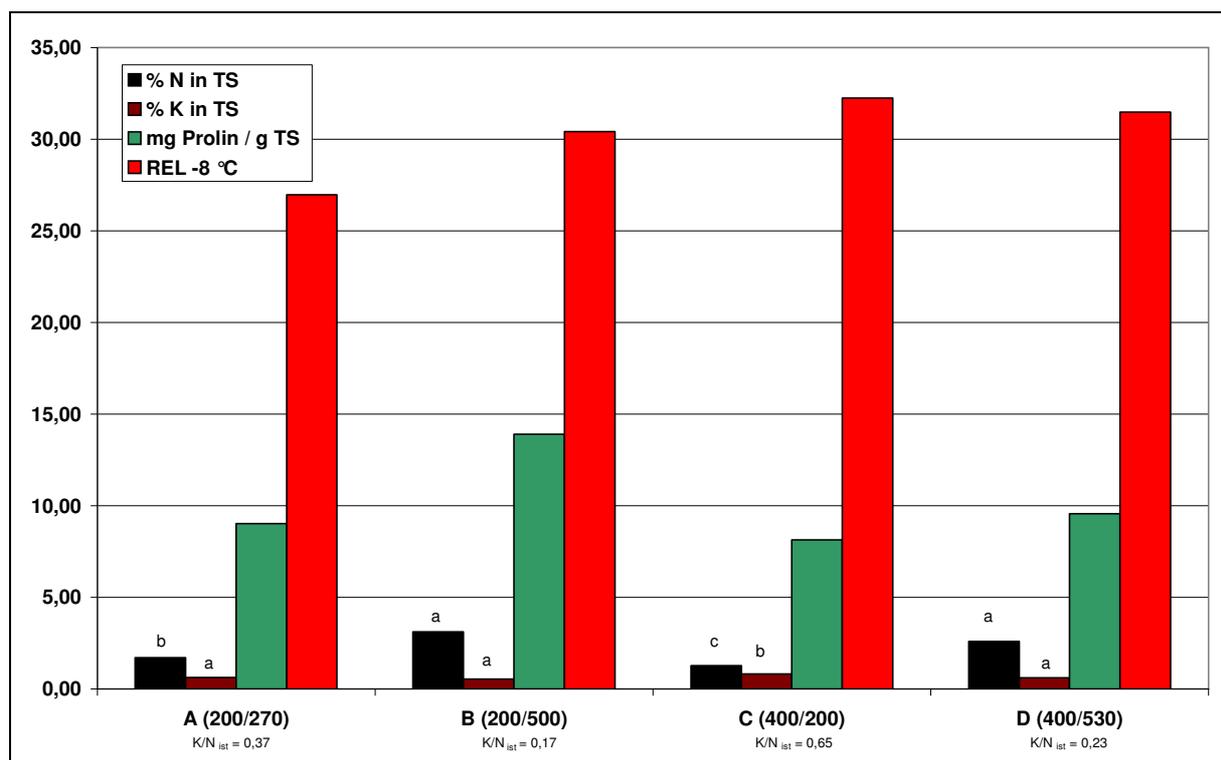
Düngevariante (K/N)	Rel. Elektrische Leitfähigkeit (%)			
	+5 °C	-5 °C	-8 °C	-10 °C
<b>A (200/270)</b>	28,06 <sup>a</sup>	34,82 <sup>a</sup>	53,95 <sup>a</sup>	54,92 <sup>a</sup>
<b>B (200/500)</b>	32,91 <sup>a</sup>	33,71 <sup>a</sup>	55,74 <sup>a</sup>	53,91 <sup>a</sup>
<b>D (400/530)</b>	22,19 <sup>a</sup>	40,88 <sup>a</sup>	43,64 <sup>a</sup>	41,78 <sup>a</sup>
<b>C (400/200)</b>	25,00 <sup>a</sup>	31,99 <sup>a</sup>	48,48 <sup>a</sup>	49,94 <sup>a</sup>

### **Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Stickstoff-, Kalium- und Prolingehalt der Wurzeln**

Die Düngevarianten des **Frühfrosttestes November 2004** unterschieden sich im Stickstoffgehalt entsprechend der Versuchsanordnung. Die Varianten B und D enthielten sig. am meisten, die Variante C sig. am wenigsten Stickstoff. Für Kalium konnte dies nicht festgestellt werden: Die Varianten A und D unterschieden sich nicht sig. im K-Gehalt. Lediglich die Düngevariante C enthielt sig. mehr Kalium als alle anderen Varianten (Abb. 5.10).

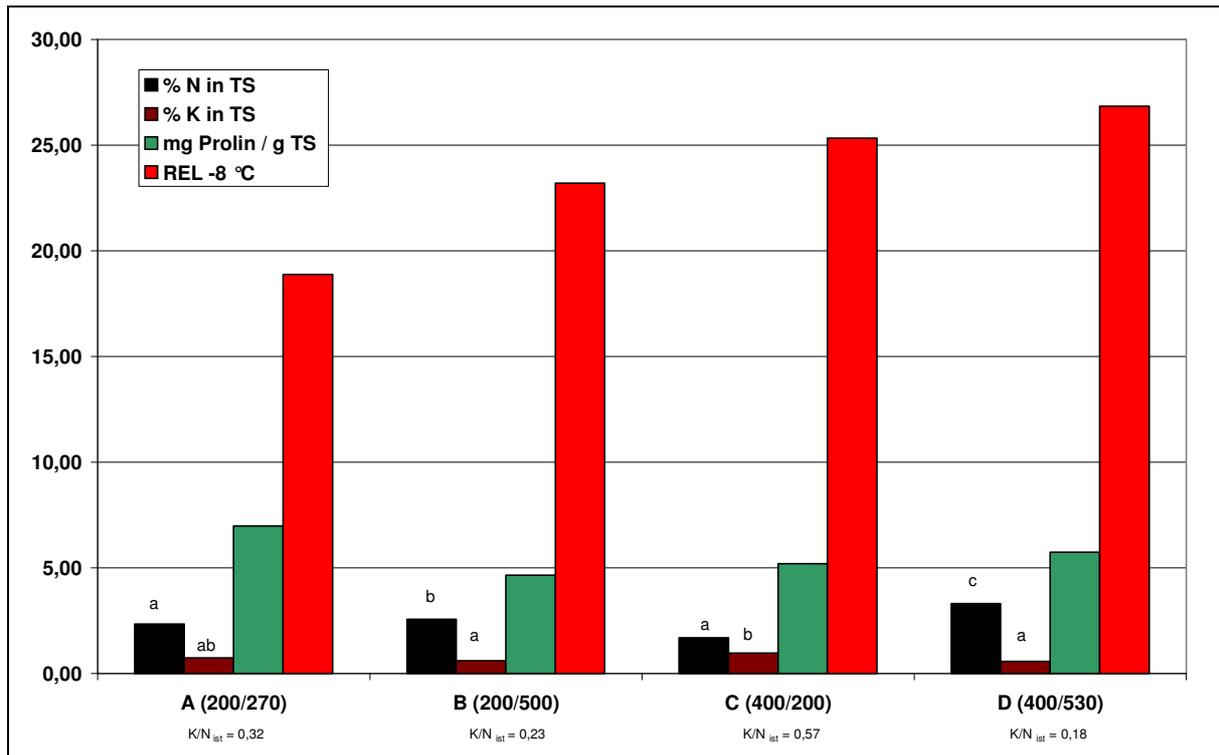
Bei Gegenüberstellung der Stickstoff-, Kalium- und Prolingehalte mit den steigenden REL-Werten (-8 °C) ließen sich keine Zusammenhänge erkennen. Gleiches gilt auch für das K/N-Verhältnis (Abb. 5.10).

Im **Tiefrosttest Januar 2005** enthielten die Varianten B und D sig. mehr Stickstoff als A und C (Abb. 5.11). Der Unterschied zwischen A (wenig N gedüngt) und B (viel N gedüngt) fiel dabei relativ niedrig aus. Auch die Gehalte an Kalium spiegelten nicht immer die Düngevariante wider. So enthält A (wenig K gedüngt, K-Gehalt 0,75 %) mehr Kalium als D (viel K gedüngt, K-Gehalt 0,58 %). Der Prolingehalt unterschied sich nicht sig. zwischen den einzelnen Varianten.



**Abbildung 5.10: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-8 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) im Frühfrost November 2004.** Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant. K/N<sub>ist</sub>: in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

Es ließ sich im Tiefrosttest Januar 2005 kein Zusammenhang zwischen steigenden REL-Werten (-8 °C) und dem Stickstoff-, Kalium- oder Prolingehalt herstellen (Abb. 5.11). Auch des K/N-Verhältnis ließ keine Interpretation im Zusammenhang mit steigenden REL-Werten zu.

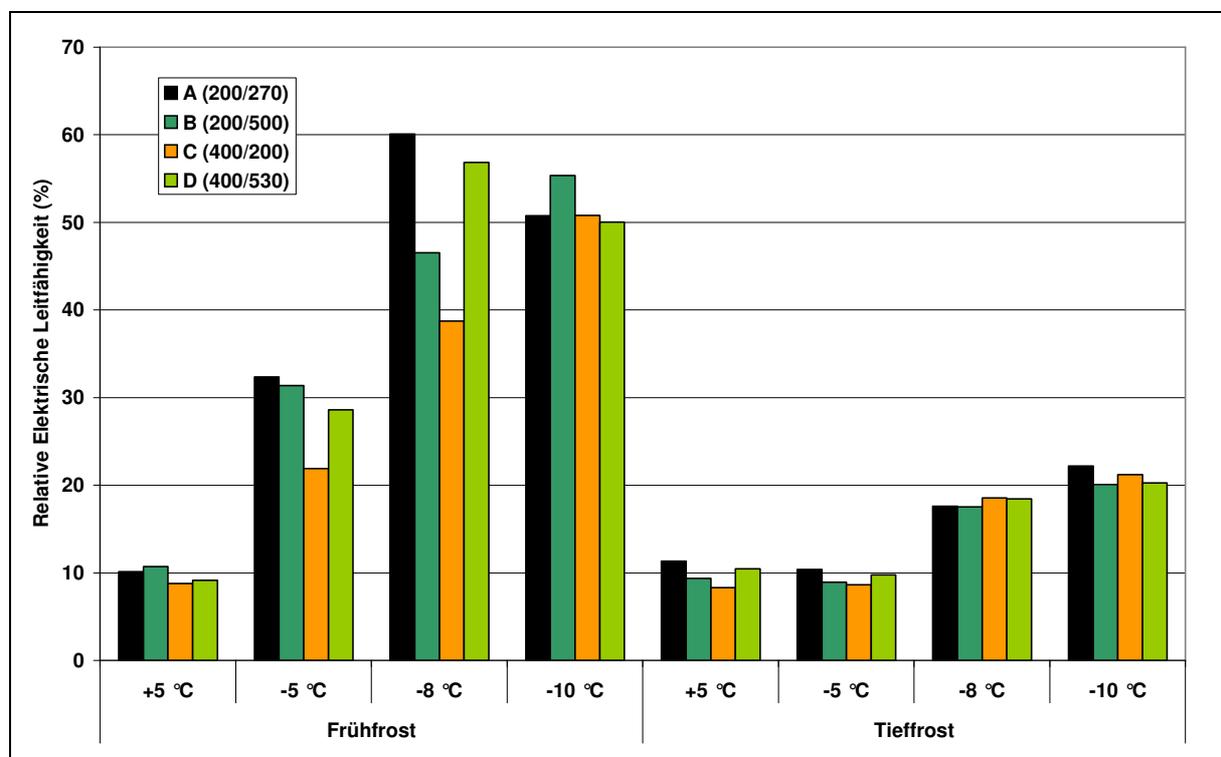


**Abbildung 5.11: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-8 °C) von Rosa 'Sommerabend' (Wurzel) im Tieffrost Januar 2005.** Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant. K/N<sub>ist</sub>: in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

## 5.2.2 Einfluss des Verhältnisses K/N auf die Frosthärte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'

### Relative Elektrische Leitfähigkeit der Sprossproben

Im **Frühfrosttest November 2004** konnten bei keiner Temperatur sig. Unterschiede zwischen den Düngevarianten festgestellt werden (Abb. 5.12). Der offensichtliche Unterschied in den REL-Werten der Varianten A und C bei -8 °C musste mit einem adj. p-Wert von 0,014 als nicht sig. eingestuft werden. Laut visueller Bonitur hat aber keine Pflanze diese Temperatur überlebt (Daten nicht dargestellt). Auch bei der Testtemperatur -5 °C zeigten sich große Unterschiede zwischen den Varianten. Die Düngevariante C hatte den geringsten REL-Wert (21,92 %), die visuelle Bonitur ermittelte mit zwei von sechs abgestorbenen Pflanzen ebenfalls den geringsten Schaden. Die übrigen Varianten zeigten starke Ausfälle oder waren bereits vollständig abgestorben (Variante B, Daten nicht dargestellt). Im weiteren Verlauf wurden daher nur die REL-Werte der Testtemperatur -5 °C weiter betrachtet, um evtl. vorhandene tendenzielle Zusammenhänge mit den analysierten Inhaltsstoffen zu verdeutlichen.



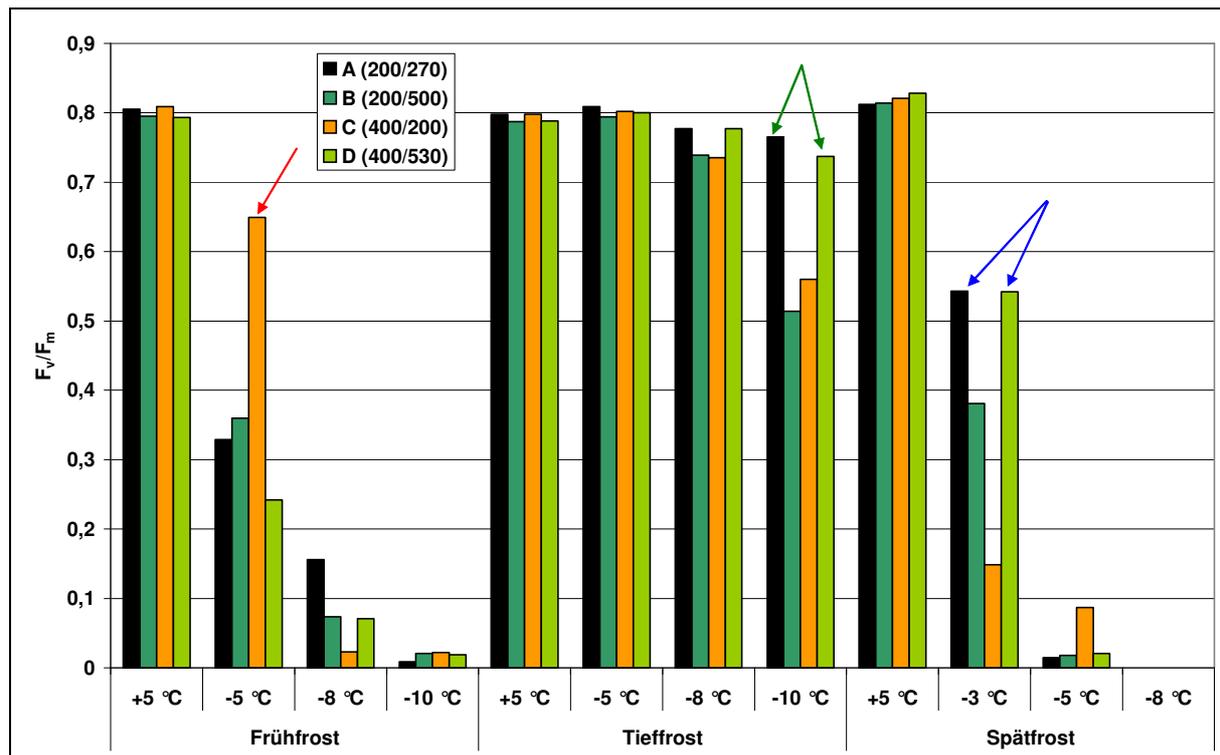
**Abbildung 5.12:** Einfluss von Frostungstemperatur und -zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung. Es waren keinerlei signifikante Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden.

Im **Tiefrosttest Januar 2005** reagierten alle Varianten bei jeder Testtemperatur sehr einheitlich. Zwischen den Varianten gab es keine sig. Unterschiede in den REL-Werten (Abb. 5.12). Unabhängig von der Düngevariante stiegen die REL-Werte ab der Testtemperatur -8 °C leicht an.

Die EL-Messung des **Spätfrosttestes April 2005** war nicht auswertbar, da es zu Schwankungen innerhalb der Varianten gekommen ist. Außerdem haben sich die Unterschiede der Düngevarianten durch ein falsches Bewässerungssystem (Anstau-bewässerung, siehe auch *Rosa 'Sommerabend'*) verwischt. Es kam zur Angleichung der einzelnen Varianten, so wurde z. B. im April 2005 in allen Varianten das gleiche K/N-Verhältnis ermittelt. Eine Auswertung ist daher weder für die Spross- noch für die Wurzelproben möglich gewesen.

### **Chlorophyllfluoreszenzmessung der Blattproben**

Bei der Testtemperatur -5 °C (**Frühfrosttest November 2004**) zeigten alle Varianten bei der CF-Messung direkt nach dem Frostereignis leichte Frostschäden. Bei einer erneuten Messung drei Tage nach dem Frosttest (3T) war nur noch die Variante C am Leben (Abb. 5.13, roter Pfeil), bei allen anderen Varianten sank der Parameter  $F_v/F_m$  sehr stark im Vergleich zur Kontrolle und zur ersten CF-Messung (erste Messung nicht dargestellt). Die Temperaturen -8 °C und -10 °C hat aufgrund der sehr niedrigen  $F_v/F_m$  Werte keine Variante überlebt. Diese Ergebnisse decken sich mit der EL-Messung, bei der für die Variante C der geringste REL-Wert ermittelt wurde. Die visuelle Bonitur stellte bei dieser Variante ebenfalls das Absterben der wenigsten Bonitурpflanzen fest, während die übrigen Varianten z. T. vollständig abstarben (nicht dargestellt). Sig. Unterschiede konnten aber aufgrund der starken Streuung innerhalb der Varianten bei keiner Testtemperatur gefunden werden.



**Abbildung 5.13: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Parameter  $F_v/F_m$  von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung.** Es waren keinerlei signifikante Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden. Erklärung der Pfeile siehe Text.

Die fehlenden Unterschiede zwischen den Varianten bei der EL-Messung im **Tieffrosttest Januar 2005** spiegelten sich auch in der CF-Messung wider (Abb. 5.13). Bei der Messung direkt nach erfolgtem Frosttest (nicht dargestellt) zeigten sich keine Unterschiede, erst bei der 2. CF-Messung waren bei -8 °C Unterschiede erkennbar (nicht sig.). Die  $F_v/F_m$  Werte der Varianten C und B waren etwas niedriger als bei A und D. Das gleiche Bild ergab sich auch für die Testtemperatur -10 °C, wobei hier der Unterschied zwischen den Varianten B und C sowie A und D viel deutlicher wurde (grüne Pfeile). Als sig. konnte aber keiner dieser beschriebenen Unterschiede bezeichnet werden. Die  $F_v/F_m$  Werte bei -10 °C mussten aufgrund starker Varianzheterogenität mit dem Bonferroni-adjustierten WELCH-Test ausgewertet werden. Daher wurden auch hier keine Signifikanzen festgestellt.

Die Messung nach erfolgtem Frosttest (nicht dargestellt) ergab im **Spätfrosttest April 2005** nur für die Variante C bei -3 °C einen niedrigeren  $F_v/F_m$  Wert (nicht sig.). Die übrigen Varianten zeigten nur gering niedrigere  $F_v/F_m$  Werte gegenüber der Kontrolle. Die zweite CF-Messung ermittelte für alle Varianten niedrigere  $F_v/F_m$  Werte,

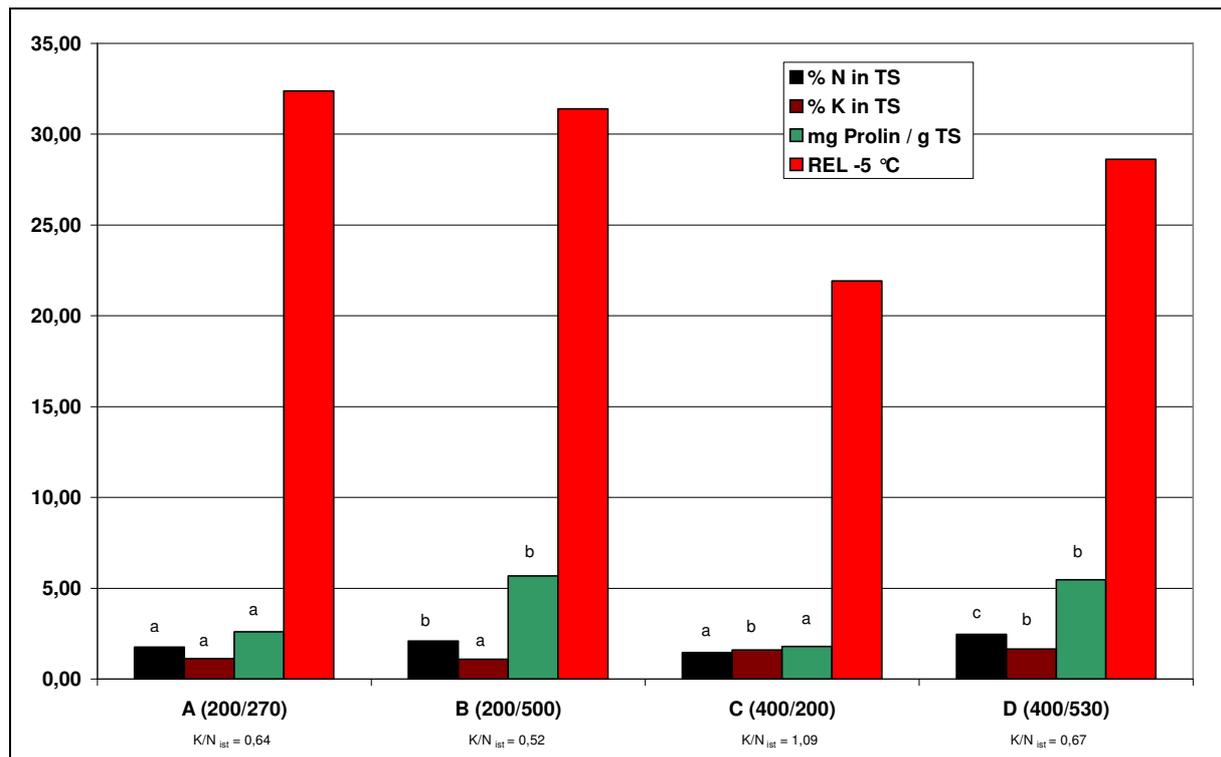
wobei die Werte der Varianten A und D (blaue Pfeile) weniger sanken als bei B und C. Die Testtemperaturen  $-5\text{ °C}$  und  $-8\text{ °C}$  haben schließlich bei allen Varianten zu einem starken Absinken der  $F_v/F_m$  Werte geführt. Keine Variante hat diese beiden Temperaturen überlebt. Die Pflanzen des  $-8\text{ °C}$  Testes waren nach drei Tagen bereits so weit abgestorben, dass keine weitere Messung mehr möglich war. Sig. Unterschiede konnten aufgrund der starken Streuung der Einzeldaten nicht ermittelt werden. Zu bedenken ist bei der Interpretation dieser Daten jedoch, dass sich die Varianten durch die Bewässerung angeglichen haben und bspw. in allen Varianten das gleiche K/N-Verhältnis festgestellt wurde.

### **Vergleich beider Methoden zur Ermittlung der Frosthärte**

Beide Methoden konnten im Früh- und Tieffrost keine signifikanten Unterschiede im Spross der Varianten feststellen. Bei Betrachtung der Abbildungen 5.12 und 5.13 fallen dennoch große Unterschiede zwischen den beiden Methoden auf. Im Frühfrost wird die Variante C bei beiden Methoden als geringer geschädigt eingestuft als die anderen Varianten. Zu diesem Ergebnis kommen beide Methoden. Das Bestimmtheitsmaß  $r^2 = 0,88$  unterstreicht zudem die relativ enge Korrelation beider Methoden. Im Tieffrost ermittelte die EL-Messung keine Unterschiede zwischen den Varianten (Abb. 5.12). Die CF-Messung konnte ebenfalls keine sig. Unterschiede nachweisen, kam aber zu einem sehr viel differenzierteren Ergebnis (Abb. 5.13, grüne Pfeile). Diese Diskrepanz spiegelte sich auch im Bestimmtheitsmaß  $r^2 = 0,40$  wider. Im Spätfrost unterschieden sich die Varianten nicht in der EL-Messung, die CF-Messung zeigte dennoch ein starkes Absinken der  $F_v/F_m$  Werte der Varianten B und C.

### **Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit bzw. des Parameters $F_v/F_m$ und dem Stickstoff-, Kalium- und Prolingehalt des Sprosses**

Entsprechend der Versuchsanstellung unterschieden sich die Varianten im **Frühfrosttest November 2004** sig. in ihren Stickstoff- und Kaliumgehalten (Abb. 5.14). Die stärker mit Stickstoff versorgten Varianten B und D enthalten sig. mehr Prolin als die Varianten A und C.



**Abbildung 5.14: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost.** Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant.  $K/N_{ist}$ : in der Pflanzenprobe analysiertes Verhältnis von mg K/L und mg N/L.

Die analysierten Stickstoff-, Kalium- und Prolingehalte ließen keinen Zusammenhang mit steigenden REL-Werten oder sinkenden  $F_v/F_m$  Werten bei -5 °C erkennen. Auffallend war lediglich das Auftreten der etwas höheren REL-Werte bei den niedrigsten Kaliumgehalten (Varianten A und B, Abb. 5.14), sowie das höchste K/N-Verhältnis bei der Variante C (niedrigster REL-Wert bei -5 °C bzw. höchster  $F_v/F_m$  Wert nach drei Tagen, roter Pfeil in Abb. 5.13).

Die einzelnen Varianten unterschieden sich im **Tiefrosttest Januar 2005**, der jeweiligen Düngung entsprechend, sig. im Stickstoff- und Kaliumgehalt (Tab. 5.2). Der Prolingehalt ist in den hoch mit Stickstoff versorgten Varianten B und D höher als in den Varianten A und C. Der offensichtliche Unterschied zwischen B und C musste dabei aufgrund des p-Wertes von 0,073 als nicht sig. eingestuft werden.

**Tabelle 5.2: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Tieffrost.** Zellen innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

Dünge- variante (K/N)	%		mg / g TS
	N	K	Prolin
<b>A (200/270)</b>	1,81 <sup>a</sup>	1,15 <sup>a</sup>	7,61 <sup>a</sup>
<b>B (200/500)</b>	3,01 <sup>b</sup>	1,03 <sup>a</sup>	14,28 <sup>ab</sup>
<b>C (400/200)</b>	1,96 <sup>a</sup>	1,58 <sup>b</sup>	6,55 <sup>a</sup>
<b>D (400/530)</b>	3,68 <sup>c</sup>	1,58 <sup>b</sup>	16,38 <sup>b</sup>

Da sich die Varianten aufgrund der sehr einheitlichen REL-Werte (Abb. 5.12) nicht voneinander unterscheiden, erlaubte eine Gegenüberstellung mit den analysierten Inhaltsstoffen keine weitere Interpretation. Eine Beziehung zwischen den  $F_v/F_m$  Werten und den untersuchten Inhaltsstoffen war trotz der niedrigeren  $F_v/F_m$  Werte der Varianten B und C (Abb. 5.13) nicht vorhanden. Beide Varianten unterschieden sich sig. im Kalium- und Stickstoffgehalt (Tab. 5.2) wurden aber gleichermaßen stärker geschädigt als die Varianten A und D.

### Relative Elektrische Leitfähigkeit der Wurzelproben

Signifikante Unterschiede konnten nur im **Frühfrosttest November 2004** bei -10 °C festgestellt werden: Die Varianten B und C erreichten sig. höhere REL-Werte als A und D (Abb. 5.15). Laut visueller Bonitur waren aber ab -8 °C bereits alle Pflanzen unabhängig von der Variante abgestorben (Daten nicht dargestellt). Darauf deutet auch der bei -8 °C starke Anstieg der REL-Werte in allen Varianten hin. Die Testtemperatur -5 °C führte im Gegensatz zum Spross (Vergleich Abb. 5.12) nicht zu einer Veränderung der REL-Werte in den Wurzeln.

Wie bereits beim Spross erwähnt, waren auch in den Wurzeln des **Tieffrosttestes Januar 2005** keine sig. Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden (Abb. 5.15). Bei -8 °C erreichte die Variante C zwar einen höheren REL-Wert als A, B oder D, dieser Unterschied war aber nicht signifikant. Die ANOVA konnte keinen Einfluss der Düngung ermitteln.

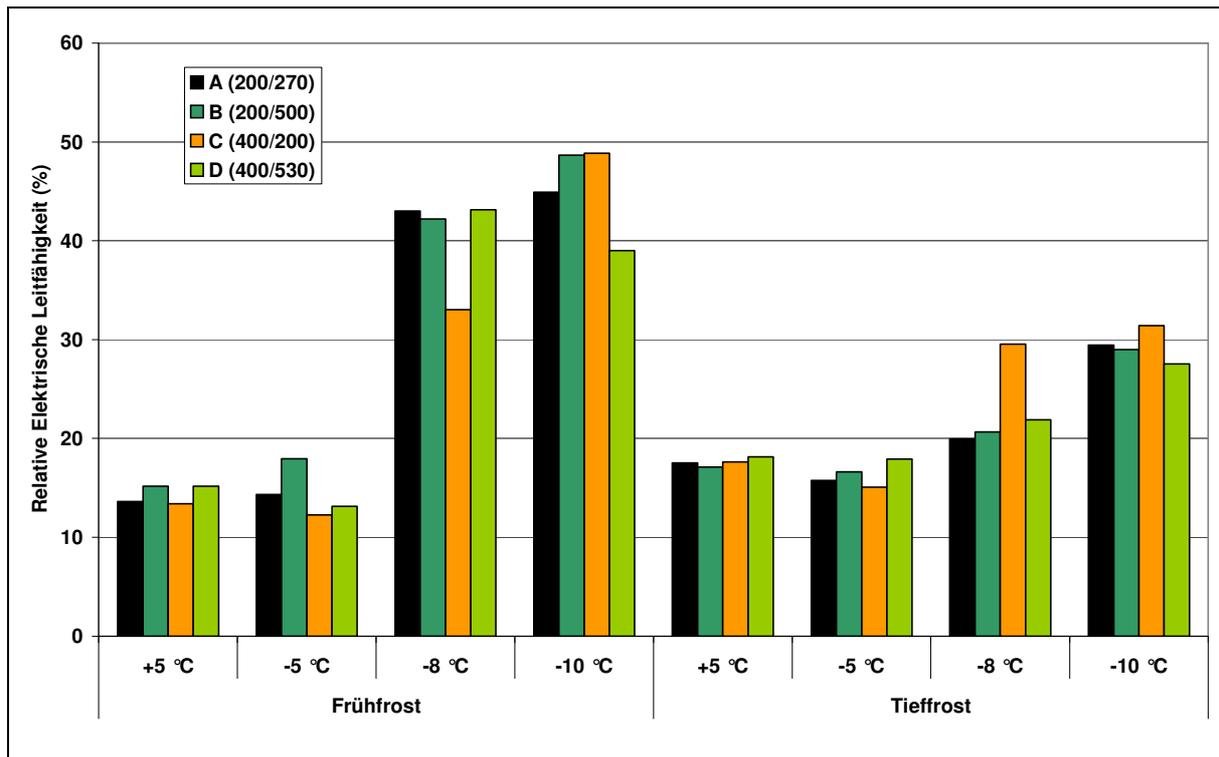


Abbildung 5.15: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung. Signifikanz siehe Text.

### Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Stickstoff-, Kalium- und Prolingehalt der Wurzeln

Entsprechend der Versuchsanstellung unterschieden sich die Wurzeln der einzelnen Varianten im **Frühfrosttest November 2004** in ihrem Stickstoffgehalt: B und D enthielten sig. mehr Stickstoff als A und C (Tab. 5.3). Der Kaliumgehalt war in der Variante C sig. am höchsten. Die Varianten A, B und D unterschieden sich nicht sig. im Kaliumgehalt, so dass sich die verschiedenen Dünge­stufen nicht in den Gehalten wieder finden ließen. Der Prolingehalt war bei A sig. am niedrigsten und bei D sig. am höchsten.

Tabelle 5.3: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Frühfrost. Zellen innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

Dünge- variante (K/N)	%		mg / g TS
	N	K	Prolin
A (200/270)	1,20 <sup>a</sup>	0,56 <sup>ab</sup>	1,06 <sup>a</sup>
B (200/500)	1,66 <sup>b</sup>	0,44 <sup>a</sup>	2,36 <sup>ab</sup>
C (400/200)	1,12 <sup>a</sup>	0,82 <sup>b</sup>	1,22 <sup>ab</sup>
D (400/530)	1,72 <sup>b</sup>	0,53 <sup>a</sup>	2,50 <sup>b</sup>

Es ließen sich keine Zusammenhänge zwischen dem Stickstoff-, Kalium- oder Prolingehalt der Wurzeln und steigenden REL-Werten herstellen. Auch das Verhältnis K/N ließ keine weitere Deutung zu.

**Tabelle 5.4: Einfluss der K/N-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Tieffrost.** Zellen innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

Dünge- variante (K/N)	%		mg / g TS
	N	K	Prolin
<b>A (200/270)</b>	1,35 <sup>a</sup>	1,24 <sup>a</sup>	2,19 <sup>a</sup>
<b>B (200/500)</b>	2,19 <sup>b</sup>	1,07 <sup>a</sup>	2,33 <sup>a</sup>
<b>C (400/200)</b>	1,20 <sup>a</sup>	1,45 <sup>a</sup>	1,23 <sup>a</sup>
<b>D (400/530)</b>	2,05 <sup>b</sup>	1,41 <sup>a</sup>	2,26 <sup>a</sup>

Die Varianten B und D enthielten im **Tieffrosttest Januar 2005** sig. mehr Stickstoff als A und C (Tab. 5.4). Die Kaliumgehalte waren dagegen nicht sig. verschieden, C und D enthielten aber am meisten Kalium. Der Prolingehalt variierte nicht zwischen den Varianten. Ein Zusammenhang zwischen Stickstoff-, Kalium- Prolingehalt oder dem K/N-Verhältnis und steigenden REL-Werten ließ sich im Tieffrosttest Januar 2005 nicht erkennen.

### Vergleich der Frosthärte von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher K/N-Ernährung

Die *Rosa* 'Sommerabend'- und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge reagierten im Frühfrost wie in Kapitel 2 beschrieben. Die REL-Werte der *Rosa* 'Sommerabend'-Stecklinge stiegen erst bei  $-8\text{ °C}$  bzw. bei  $-10\text{ °C}$  an. Im Gegensatz dazu stiegen die REL-Werte der *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge bereits bei  $-5\text{ °C}$  deutlich an. Da alle Varianten von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' stärker anstiegen als die *Rosa* 'Sommerabend'-Varianten, lässt dies auf eine generell höhere Frühfrostempfindlichkeit der *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Stecklinge unabhängig von der K/N-Düngegabe schließen (Abb. 5.16). Im Tieffrost zeigten sich dagegen keine Unterschiede der beiden Testarten. Ab  $-8\text{ °C}$  stiegen bei beiden Testarten die REL-Werte an, wobei sich mal bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' und mal bei *Rosa* 'Sommerabend' ein höherer Anstieg zeigte.

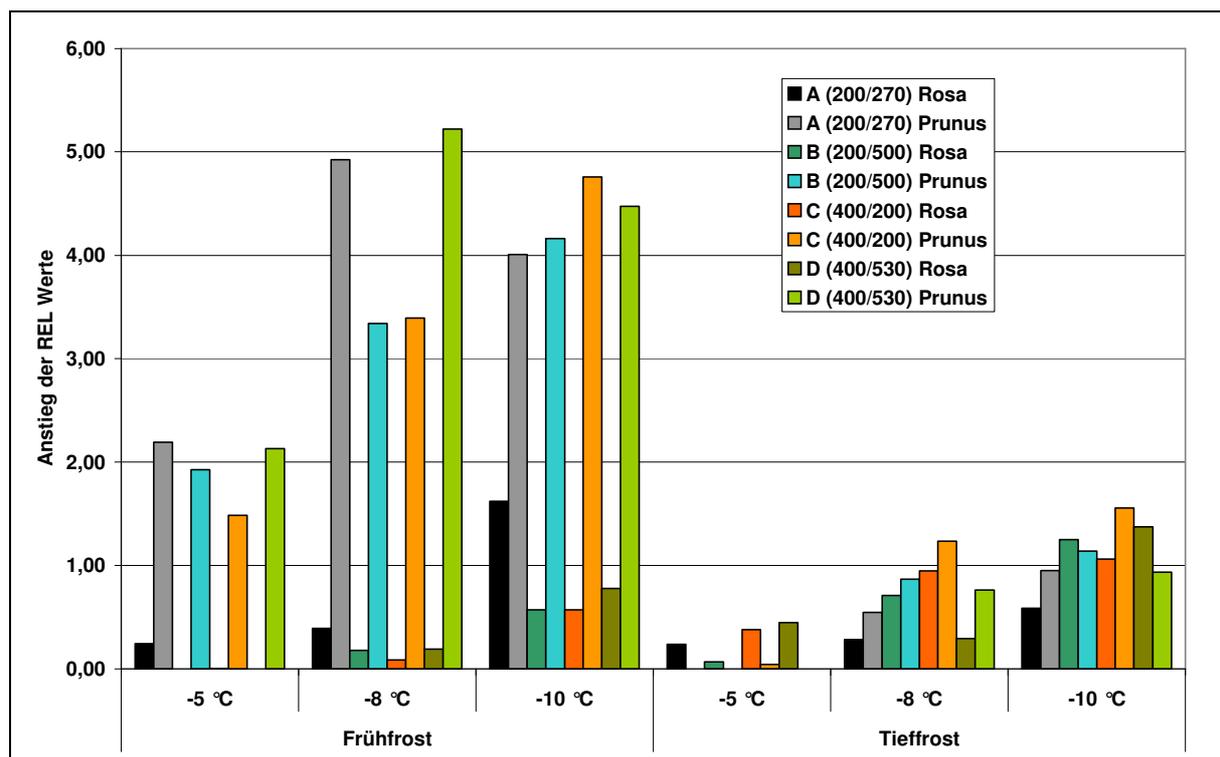


Abbildung 5.16: Einfluss von Frostungstemperatur und -zeitpunkt auf den Anstieg der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit des Sprosses von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' bei unterschiedlicher K/N-Ernährung.

### 5.3 Diskussion

In Tabelle 5.5 sind die Einzelergebnisse des K/N-Versuches zusammenfassend dargestellt. Die sig. unterschiedlichen Ergebnisse sind grün hervorgehoben.

**Tabelle 5.5: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von *Rosa 'Sommerabend'* und *Prunus laurocerasus 'Rotundifolia'* bei unterschiedlicher K/N-Ernährung** (FF = Frühfrost, TF = Tieffrost, SF = Spätfrost, R = Rosa, P = Prunus, S = Spross, W = Wurzel, + = Varianten waren sig. unterschiedlich, - = Varianten waren nicht sig. unterschiedlich, n. b. = nicht bestimmt).

Test	Teil	Sig. Unterschiede vorhanden bei										
		bei °C						%		mg / g TS		
		+5	-5	-8	-10	-15	-20	N	K	Pro	Gluc	Fruc
FF Nov. 03 (R)	S	-	-	n. b.	-	-	n. b.	+	+	-	-	+
FF Nov. 04 (R)	S	-	-	+	-	n. b.	n. b.	+	-	-	n. b.	n. b.
TF Jan. 04 (R)	S	-	n. b.	n. b.	+	+	-	+	+	+	+	+
TF Jan. 05 (R)	S	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	+	-	n. b.	n. b.
SF April 04 (R)	S	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	-	+	+	+
SF April 05 (R)	S	Keine Auswertung möglich										
FF Nov. 03 (R)	W	-	-	n. b.	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
FF Nov. 04 (R)	W	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	+	-	n. b.	n. b.
TF Jan. 04 (R)	W	-	n. b.	n. b.	-	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
TF Jan. 05 (R)	W	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	+	-	n. b.	n. b.
SF April 04 (R)	W	-	-	-	-	n. b.	n. b.	n. b.				
SF April 05 (R)	W	Keine Auswertung möglich										
FF Nov. 04 (P)	S EL	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	+	+	n. b.	n. b.
FF Nov. 04 (P)	S CF	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	+	+	n. b.	n. b.
TF Jan. 05 (P)	S EL	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	+	+	n. b.	n. b.
TF Jan. 05 (P)	S CF	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	+	+	n. b.	n. b.
SF April 05 (P)	S CF	Keine Auswertung möglich										
FF Nov. 04 (P)	W	-	-	-	+	n. b.	n. b.	+	+	+	n. b.	n. b.
TF Jan. 05 (P)	W	-	-	-	-	n. b.	n. b.	+	-	-	n. b.	n. b.

Nur sehr selten konnte ein Zusammenhang zwischen REL-Werten und den analysierten Inhaltsstoffen gezeigt werden. In den meisten Fällen konnten keine sig. Unterschiede in den REL-Werten nachgewiesen werden, Signifikanzen in den Stickstoff-, Kalium- oder Prolingehalten sind dagegen häufig aufgetreten. Dennoch waren tendenzielle Einflüsse in den Sprossproben von *Rosa 'Sommerabend'* erkennbar: Varianten mit einem höheren Stickstoffgehalt wurden stärker geschädigt als Varianten mit einem niedrigeren Stickstoffgehalt (bspw. Abb. 5.3, 5.6, 5.7). Für Kalium, Prolin, Glucose und Fructose konnten diese Effekte nicht gezeigt werden. In den Wurzelproben von *Rosa 'Sommerabend'* konnten weder sig. noch tendenzielle Zusammenhänge nachgewiesen werden.

Bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' konnten weder für die Spross- noch für die Wurzelproben Zusammenhänge zwischen der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit und den analysierten Inhaltsstoffen gezeigt werden. Auch tendenzielle Einflüsse sind nicht aufgetreten.

Die Anzahl der interpretierbaren Ergebnisse von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' war insgesamt sehr gering. Der Grund hierfür lag evtl. in zu hoch gewählten Testtemperaturen, so dass sich keine Unterschiede in der Frosttoleranz zeigen konnten: Bspw. haben sich die REL-Werte im Tieffrosttest 2005 bei keiner Temperatur unterschieden, die Stickstoff-, Kalium- und Prolingehalte unterschieden sich dagegen signifikant (Vergleich Abb. 5.12 und Tab. 5.2). Möglicherweise hatten die analysierten Inhaltsstoffe aber auch keinen Einfluss auf die Spross-Frosthärte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia', so dass sich aus diesem Grund keine Signifikanzen ergeben haben.

Das eigentlich in diesem Versuch zu untersuchende Nährstoffverhältnis K/N konnte nur selten mit den Frostschäden des Sprosses in Verbindung gebracht werden. Dies kann daran liegen, dass die bei der Düngung eingestellten Verhältnisse kaum in den Pflanzen wieder zu finden waren. So haben bspw. alle Pflanzen der Variante C eine Düngung von 400 mg Kalium / 200 mg Stickstoff erhalten. Daraus sollte sich ein Verhältnis von 2,00 ergeben. Tatsächlich ist dieser Wert in keinem Versuch erreicht worden. Das höchste Verhältnis mit einem Wert von 1,09 wurde im November 2004 im Spross von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' gefunden (Abb. 5.14). Dieses Ergebnis deutet auf eine geringere Kaliumaufnahme hin. Diese Beobachtung entspricht den Ergebnissen von LARSEN et al. (1978): Bei Versuchen mit *Pseudotsuga menziesii* konnte ab einem Kaliumgehalt von 0,65 % trotz höherer Düngung keine weitere Steigerung des K-Gehaltes erreicht werden. Nach LARSEN et al. (1978) deuten die Relation zwischen K-Gabe und K-Gehalt auf eine Art Sättigung.

Das K/N-Verhältnis lag bei geringen Spross-Frostschäden tendenziell höher als bei stärkeren Spross-Frostschäden (Vergleich Abb. 5.6, 5.7., 5.14) Dies deckt sich mit den Ergebnissen von TIMMIS (1974), der für *Pseudotsuga menziesii*-Sämlinge ein ideales K/N-Verhältnis von 0,6 ermittelte. Zu erwähnen ist aber, dass TIMMIS (1974) Nadeln untersucht hat, während es sich bei dieser Arbeit um Sprossproben handelte.

BENZIAN & FREEMAN (1967) ermitteln für *Picea sitchensis*-Sämlinge die geringsten Frühfrostschäden bei einem K/N-Verhältnis von 1,125. Die stärksten Frostschäden traten bei einem K/N-Verhältnis von 0,5 auf. Daraus lässt sich folgern, dass geringere Frostschäden bei einem höheren Verhältnis von K/N auftreten. WITT (1997) kommt dagegen zu einem konträren Ergebnis: Bei *Pyracantha crenatoserrata* 'Orange Glow' sanken die Frostschäden, wenn K/N = 1 oder niedriger (bis zu 0,5) vorlag. Im Gegensatz zu BENZIAN & FREEMAN (1967) hat WITT (1997) aber nur die Düngevarianten und nicht die tatsächlichen Gehalte in den Pflanzen angegeben. Da in dem hier vorgestellten K/N-Versuch bei keiner Düngevariante ein Verhältnis von K/N > 1,09 zu erreichen war und dieses Phänomen auch bei LARSEN et al. (1978) auftrat, ist die Schlussfolgerung von WITT (1997) in Zweifel zu ziehen.

Die beiden verwendeten Methoden zur Bestimmung der Frosthärte zeigten nur im Frühfrost eine gute Korrelation ( $r^2 = 0,88$ ). Weder im Tieffrost noch im Spätfrost konnte diese Übereinstimmung erreicht werden. Erschwerend kommt außerdem hinzu, dass die CF-Messung im Spätfrost trotz Angleichung der Varianten (nicht sig.) Unterschiede ermittelt hat. Es konnte somit keine für alle Testtermine gleichermaßen gute Korrelation erreicht werden. Dies könnte an den unterschiedlichen Messorten (Chloroplastenmembran bzw. Messung der austretenden Elektrolyte) gelegen haben. BINDER & L'HIRONDELLE (2001) haben jedoch eine Korrelation von  $r^2 = 0,97$  nachweisen können. Die unterschiedlichen Messorte können daher nicht der Grund für das teilweise geringe Bestimmtheitsmaß gewesen sein. Es zeigte sich hier vielmehr der negative Einfluss der hohen Anzahl an verschiedenen Düngevarianten, sowie die in diesem Fall damit verbundene geringe Fallzahl innerhalb der einzelnen Varianten.

**Fazit:** Für das K/N-Verhältnis konnte kein eindeutiger Zusammenhang zur Frosttoleranz hergestellt werden. Dies liegt zum einen daran, dass sich die angestrebten K/N-Verhältnisse nicht in den Pflanzen etablieren konnten. Zum anderen unterschieden sich die Varianten trotz sig. Nährstoffunterschiede nicht in den REL-Werten. Teilweise konnten zwar Zusammenhänge erkannt werden – bspw. der negative Einfluss eines höheren Stickstoffgehaltes auf den Spross von *Rosa* 'Sommerabend' (Abb. 5.3, 5.6 oder 5.7), daraus konnte aber in keinem Fall ein Einfluss des K/N-Verhältnisses abgeleitet werden.

## 6. Einfluss von Phosphor auf die Frosthärte

### 6.1 Einleitung

Phosphor ist als Bestandteil von Nukleinsäuren und Phospholipiden in den Membranen ein wichtiges Strukturelement der Pflanzen. Außerdem ist Phosphor an der Speicherung und Weiterleitung von Energie bspw. durch ATP oder ADP beteiligt (WIGNARAJAH, 1995; DIEREND, 1995). Phosphormangel verursacht Veränderungen der Mitochondrien-Struktur (JOKELA, 1998).

Die wenigen durchgeführten Untersuchungen zeigen meist einen positiven Effekt der Phosphordüngung auf die Frosthärte, besonders in Fällen, wo ohne Düngung Mangelerscheinungen auftraten. So ermittelte KOSKELA (1970) eine erhöhte Früh- und Tieffrosttoleranz bei *Pinus sylvestris*, *Larix sibirica* (nach ERHARDT et al. (2000) *Larix russica*) und *Picea abies*. CHARLON (1958) erreichte eine Erhöhung der Spätfrosttoleranz durch erhöhte Phosphorversorgung.

ALAZARD (1985) fand einen positiven Effekt des Phosphorgehaltes auf die Frosthärte von Koniferen. Phosphorgaben während der Abhärtung erhöhen nach EDWARDS (1989) die Frosthärte von *Pinus banksiana*. Ebenso konnten REDFERN & CANNELL (1982) eine höhere Frühfrosthärte der Nadeln von *Picea sitchensis* durch Phosphordüngung erreichen. WILLEMOT (1975) und GUSTA & FOWLER (1977) vermuten, dass Phosphor eher für die Regeneration von frostgeschädigten Geweben, als zur Entwicklung der Frosttoleranz gebraucht wird.

MALCOLM & FREEZAILLAH (1975) wiesen bei mit Phosphor gedüngten *Picea sitchensis* eine geringere Frühfrosthärte im Vergleich zu nicht gedüngten Kontrollen nach. Dieser Effekt wurde allerdings der verlängerten Vegetationsperiode und nicht dem direkten Einfluss des Phosphors auf die Frosthärte zugeschrieben. ARONSSON (1980) hat ebenfalls einen negativen Einfluss einer hohen P-Gabe auf die Frosthärte von *Pinus sylvestris* ermittelt. JALKANEN et al. (1998) erreichten eine höhere Frosthärte in Nadeln von *Picea sitchensis* durch Phosphormangelernährung. Dieser Effekt war beim Früh- als auch beim Spätfrost am deutlichsten zu erkennen. In Versuchen von LARSEN (1976) waren die gut mit Phosphor versorgten *Pseudotsuga menziesii* (P = 0,22 %) deutlich frühfrostepfindlicher als Pflanzen mit geringem P-Gehalt (P =

0,11 %). Dabei ist aber auch zu beachten, dass die gut mit Phosphor versorgten Pflanzen ebenfalls hohe N-Gehalte (N = 1,9 %) aufwiesen. DEHAYES et al. (1989) konnten dagegen keinen Einfluss einer zusätzlichen Phosphordüngung bei 3-jährigen *Picea rubens*-Sämlingen finden.

Bei der Sichtung der verfügbaren Literatur fällt die häufige Verwendung von *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga* oder *Larix* auf. Der Grund hierfür liegt in der forstwirtschaftlichen Bedeutung dieser Nadelgehölze. Gegenstand vieler der gesichteten Untersuchungen war dabei entweder der Einfluss des sauren Regens (bspw. CAPE et al., 1991) oder eines Nährstoffmangels (bspw. JALKANEN et al., 1998) auf die verwendeten Gehölze. Der Einfluss der Phosphorversorgung wird meist nur am Rande bearbeitet. Berichte über Untersuchungen an laubabwerfenden Gehölzen konnten nicht in der Literatur gefunden werden. Das Gleiche gilt auch für stecklingsvermehrte Gehölze.

## 6.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Phosphorversuches der Versuchsperiode November 2003 bis April 2005 dargestellt.

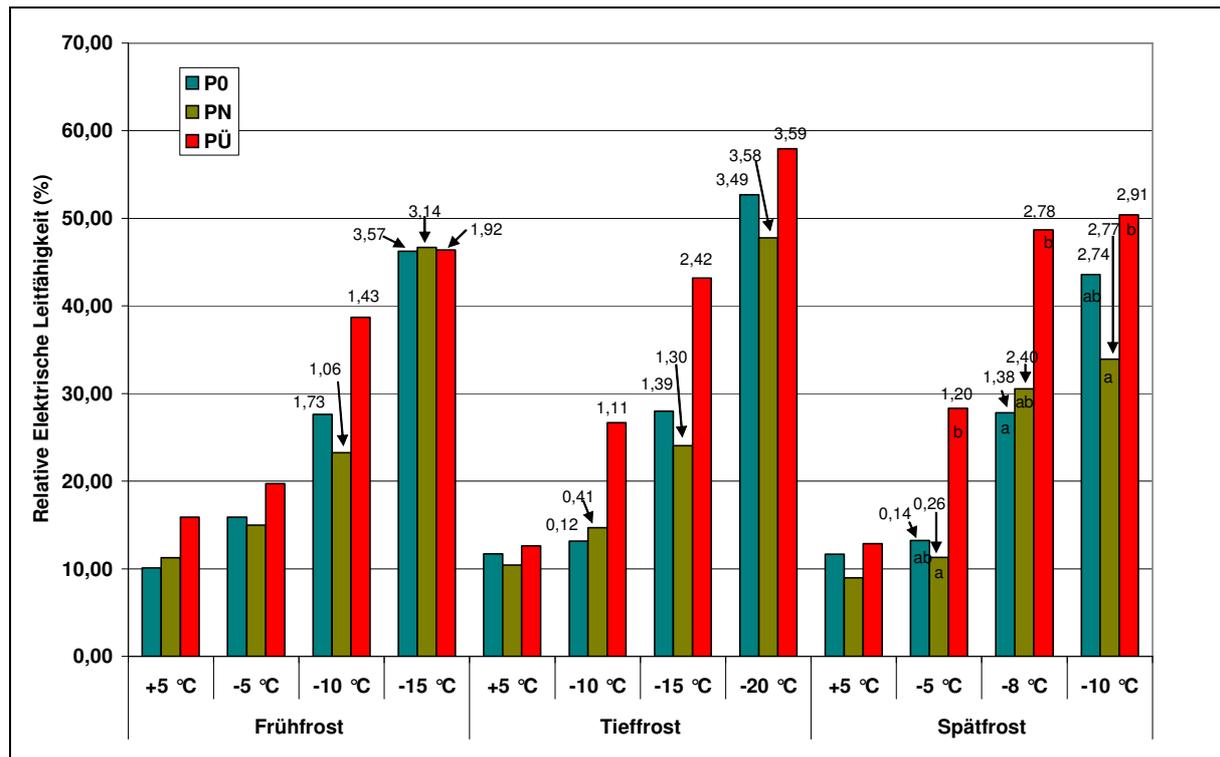
### 6.2.1 Einfluss von Phosphor auf die Frosthärte von *Rosa 'Sommerabend'*

#### Relative Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses

Die ANOVA ermittelte im **Frühfrosttest November 2003** keinen signifikanten Einfluss der Düngevariante (Abb. 6.1). Bei -10 °C erreichte PÜ zwar den höchsten REL-Wert, bei der Variante P0 kam es jedoch zu einem stärkeren Anstieg des REL-Wertes gegenüber der Kontrolle als bei PÜ (Faktor 1,73 gegenüber Faktor 1,43). Laut visueller Bonitur waren bei dieser Temperatur bereits alle Bonitурpflanzen abgestorben (Daten nicht dargestellt).

Im **Frühfrosttest November 2004** konnten sig. Unterschiede bei -5 °C ermittelt werden (TUKEY-Test, Abb. 6.2). Die Variante PÜ hatte bei dieser Temperatur einen deutlich höheren REL-Wert als PN und P0 (beide adj. p-Werte 0,000). Eine Veränderung gegenüber der Kontrolle war jedoch nicht zu erkennen. Die Testtemperatur -10 °C musste aufgrund der Varianzheterogenität mit Hilfe des Bonferroni-adjustierten WELCH-Testes ausgewertet werden und führte zu keinen sig. Unterschieden zwischen den Düngevarianten. Der REL-Wert der Variante PÜ lag deutlich über den REL-Werten der Varianten PN bzw. P0. Bei der Berechnung der Veränderung gegenüber den jeweiligen Kontrollwerten fiel jedoch der wesentlich stärkere Anstieg innerhalb der Variante P0 auf (1,07 gegenüber 0,69 bei PÜ).

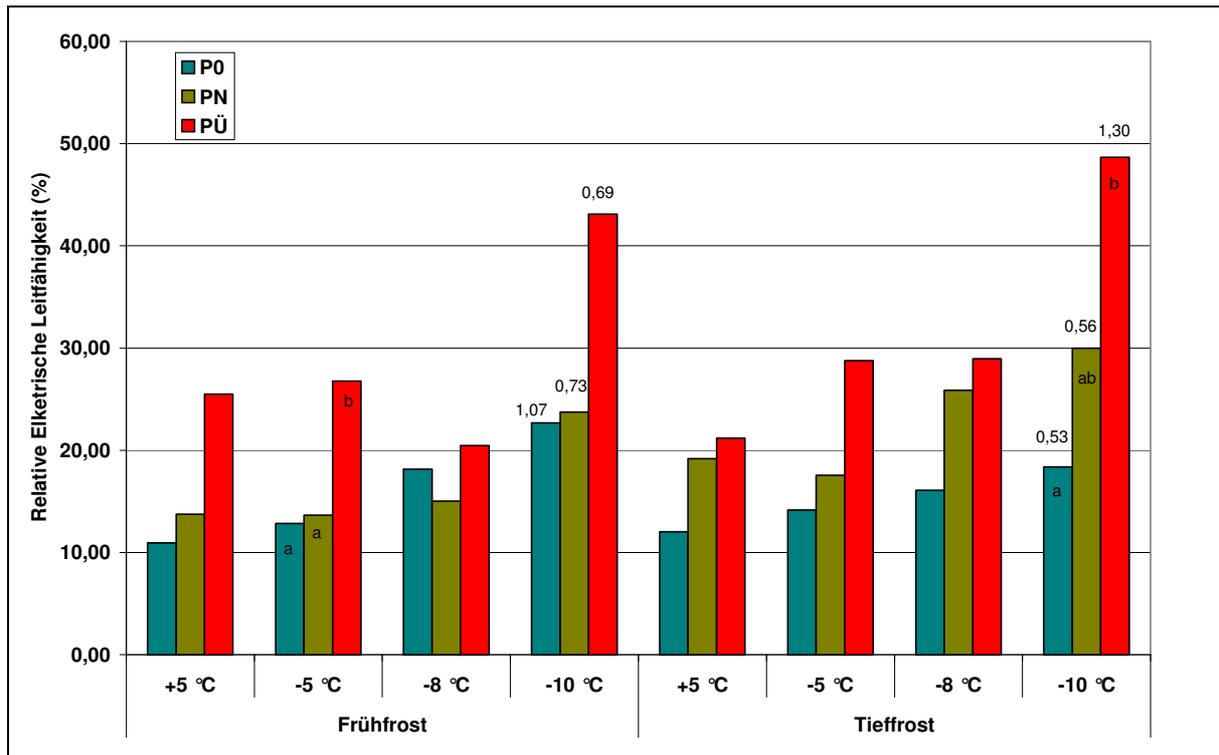
Aufgrund der Varianzheterogenität mussten die REL-Werte der Testtemperaturen -10 °C und -15 °C im **Tiefrosttest Januar 2004** mit Hilfe des Bonferroni-adjustierten WELCH-Testes ausgewertet werden. Trotz des jeweils höheren REL-Wertes und des stärkeren Anstieges gegenüber der Kontrolle unterschied sich die Variante PÜ bei -10 °C und -15 °C nicht sig. von PN oder P0 (Abb. 6.1). Die Testtemperatur -15 °C führte laut visueller Bonitur zum Absterben aller Bonitурpflanzen (Daten nicht dargestellt).



**Abbildung 6.1: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004.** Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

Im **Tieffrosttest Januar 2005** ließen sich signifikante Unterschiede in den REL-Werten nur für die Testtemperatur -10 °C ermitteln: PÜ hatte einen sig. höheren REL-Wert als PM (adj. p-Wert 0,001; Abb. 6.2), alle Boniturlpflanzen dieser Variante starben ab (Daten nicht dargestellt). Bei -5 °C und -8 °C zeigten die Varianten nur geringe Veränderungen gegenüber den Kontrollen.

Im **Spätfrosttest April 2004** erreichte die Variante PÜ in jeder Testtemperatur sig. höhere REL-Werte als PN (-5 °C und -10 °C) bzw. P0 (-8 °C). Die REL-Werte stiegen gegenüber den Kontrollwerten ebenfalls stärker an als bei PN oder P0. Die Variante PN zeigte jedoch bei -8 °C und bei -10 °C eine fast ebenso starke Veränderung gegenüber der Kontrolle. Der Vergleich von PÜ und P0 bei -5 °C musste mit einem adj. p-Wert von 0,017 als nicht sig. eingestuft werden (Abb. 6.1).



**Abbildung 6.2:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

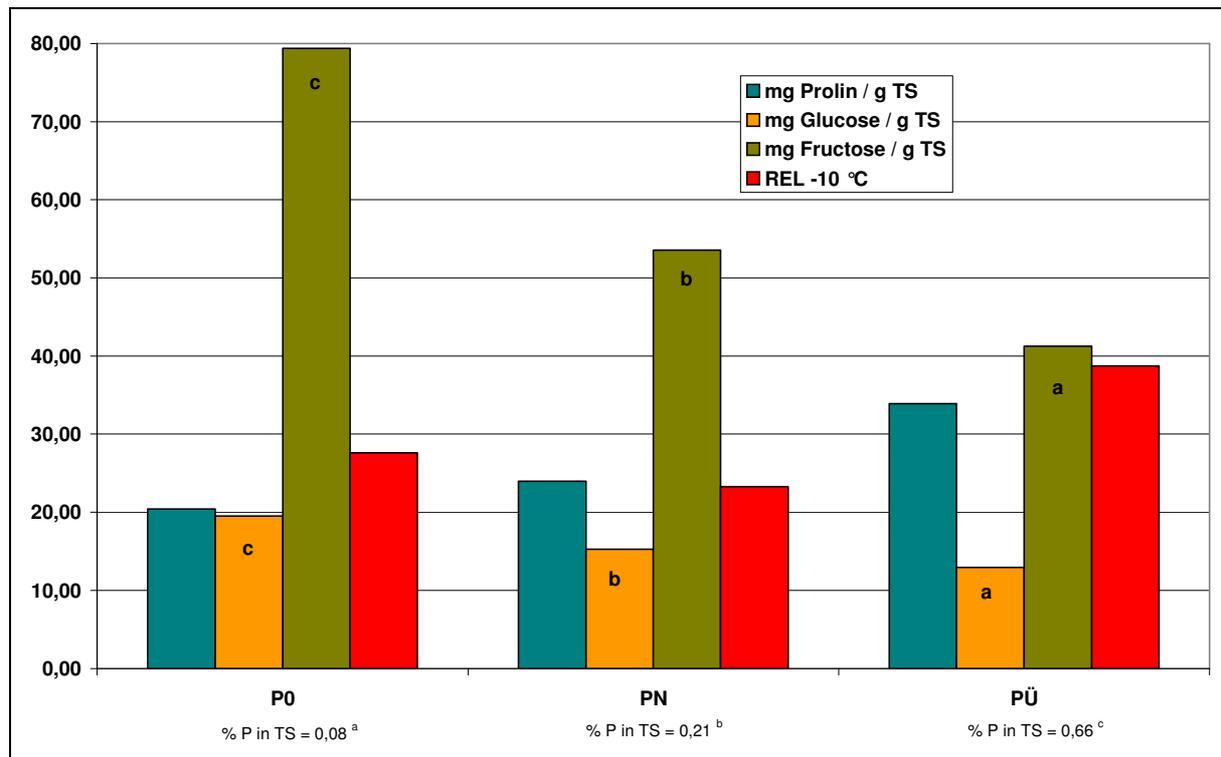
Eine Auswertung der REL-Werte war im **Spätfrosttest April 2005** nicht möglich, da es durch eine nicht optimal gewählte Bewässerung (Anstau) zu Schwankungen innerhalb der Varianten gekommen ist (Daten nicht dargestellt).

### Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Phosphor-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalt des Sprosses

#### Frühfrost

Alle drei Varianten unterschieden sich im **November 2003** sig. im Phosphorgehalt voneinander. PÜ enthielt sig. am meisten, P0 sig. am wenigsten Phosphor (Abb. 6.3). Aufgrund der geringen Fallzahl musste der ermittelte Gehaltsunterschied der Varianten für Prolin als nicht sig. eingestuft werden. Die Zuckeranalysen ergaben dagegen sig. Unterschiede aller drei Varianten. P0 enthielt am meisten, PÜ am wenigsten Glucose und Fructose. PÜ enthielt außerdem sig. mehr Stickstoff (3,20 % N

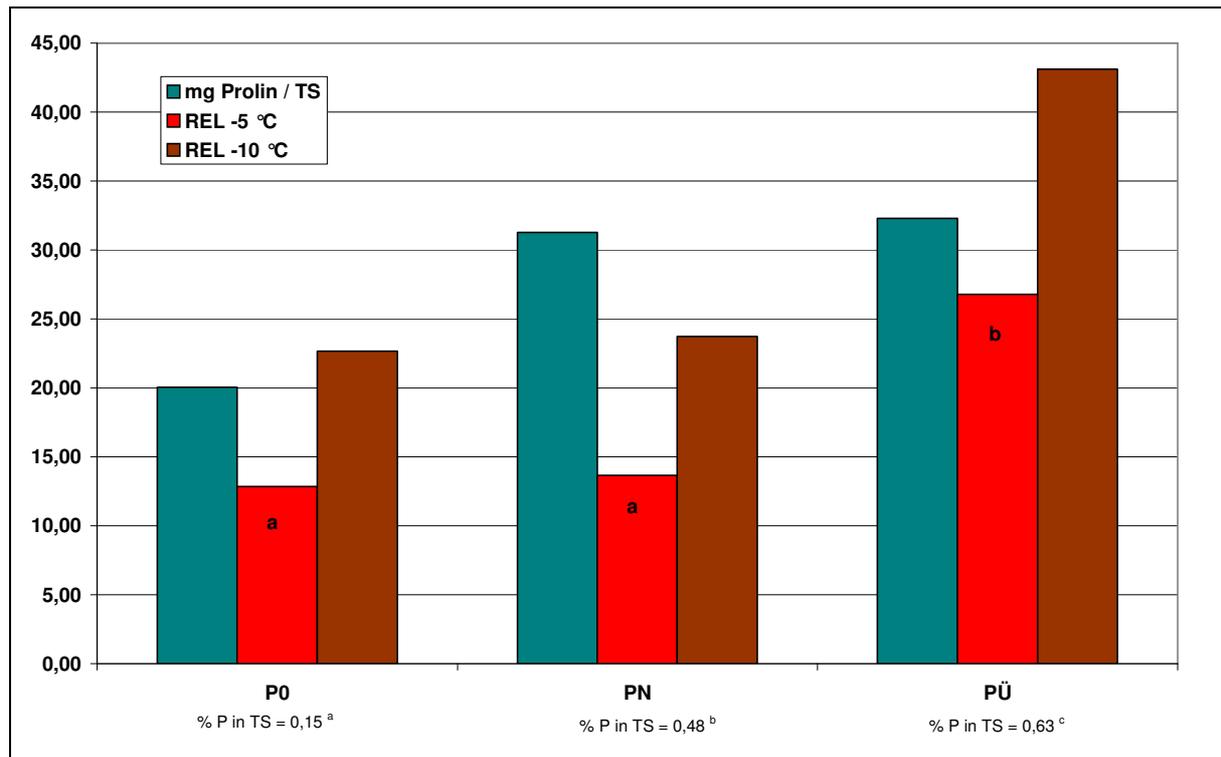
in TS ) als PN (1,54 % N in TS) und P0 (1,50 % N in TS; Stickstoffgehalte sind grafisch nicht dargestellt).



**Abbildung 6.3: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von Rosa 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2003.** Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant.

Im **November 2004** enthielt die Variante PÜ sig. am meisten Phosphor (Abb. 6.4). Der Stickstoffgehalt war ebenfalls wie bereits im November 2003 in der Variante PÜ sig. am höchsten (3,20 % N in TS, Daten nicht dargestellt). Wie bereits im Vorjahr konnten die vorhandenen Gehaltsunterschiede bei Prolin durch die geringe Fallzahl nicht als sig. eingestuft werden.

In beiden Versuchsjahren konnte kein direkter Zusammenhang zwischen steigendem P-Gehalt und steigenden REL-Werten hergestellt werden. Auffällig waren allerdings die höchsten Frostschäden im Zusammenhang mit den höchsten P-Gehalten, sowie den sig. höchsten N-Gehalten. Zu beachten ist jedoch der jeweils stärkste Anstieg der REL-Werte gegenüber der Kontrolle in der Variante P0 bei -10 °C. Das bedeutet, dass PÜ zwar in beiden Jahren die höchsten P-Gehalte und die höchsten REL-Werte (-10 °C) aufwies, die gravierenderen Veränderungen waren aber in der Variante P0 mit dem niedrigsten P-Gehalt zu finden.

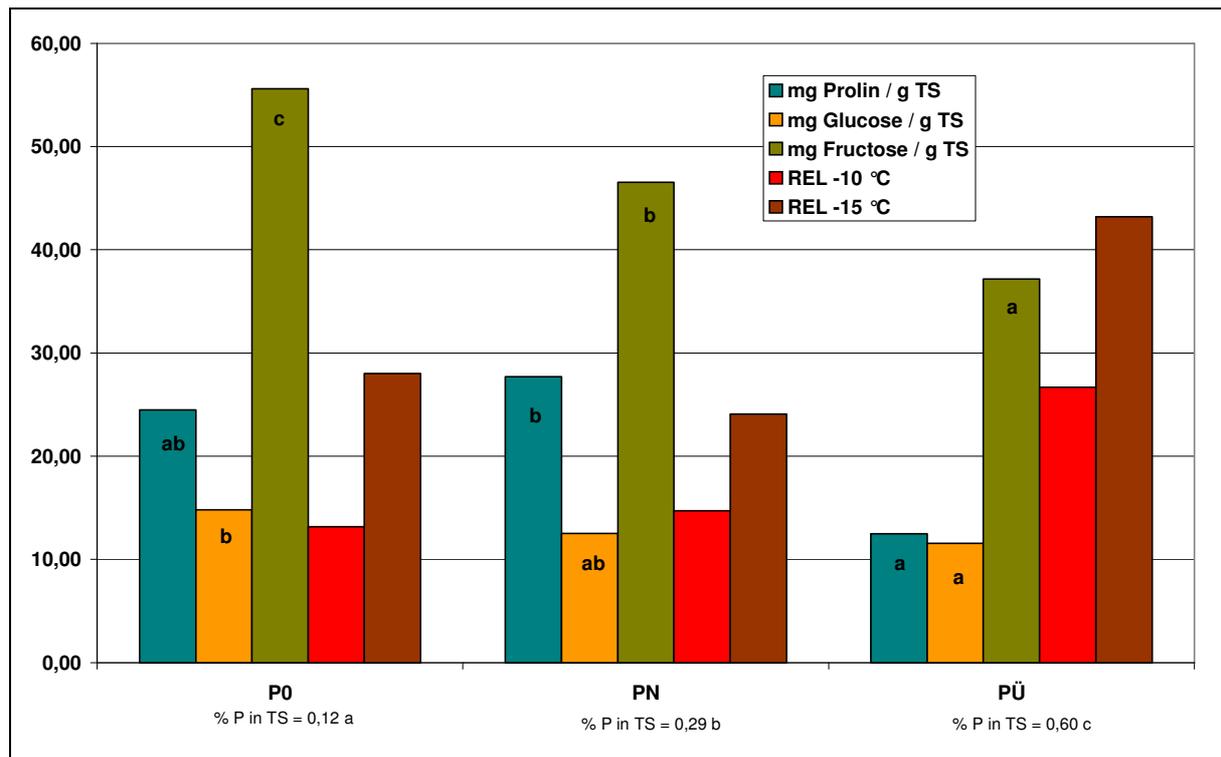


**Abbildung 6.4:** Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C und -10 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Frühfrost November 2004. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte bei -10 °C unterschieden sich nicht signifikant.

Der Prolingehalt stieg mit steigendem P-Gehalt. Ein eindeutiger Zusammenhang mit steigenden REL-Werten ließ sich aber in beiden Jahren nicht erkennen. Die im November 2003 bestimmten Glucose- und Fructosegehalte der drei Varianten ließen ebenfalls keinen Zusammenhang mit steigenden REL-Werten erkennen. Auffällig war jedoch der geringste Glucose- und Fructosegehalt bei der am stärksten geschädigten Variante PÜ (Abb. 6.3).

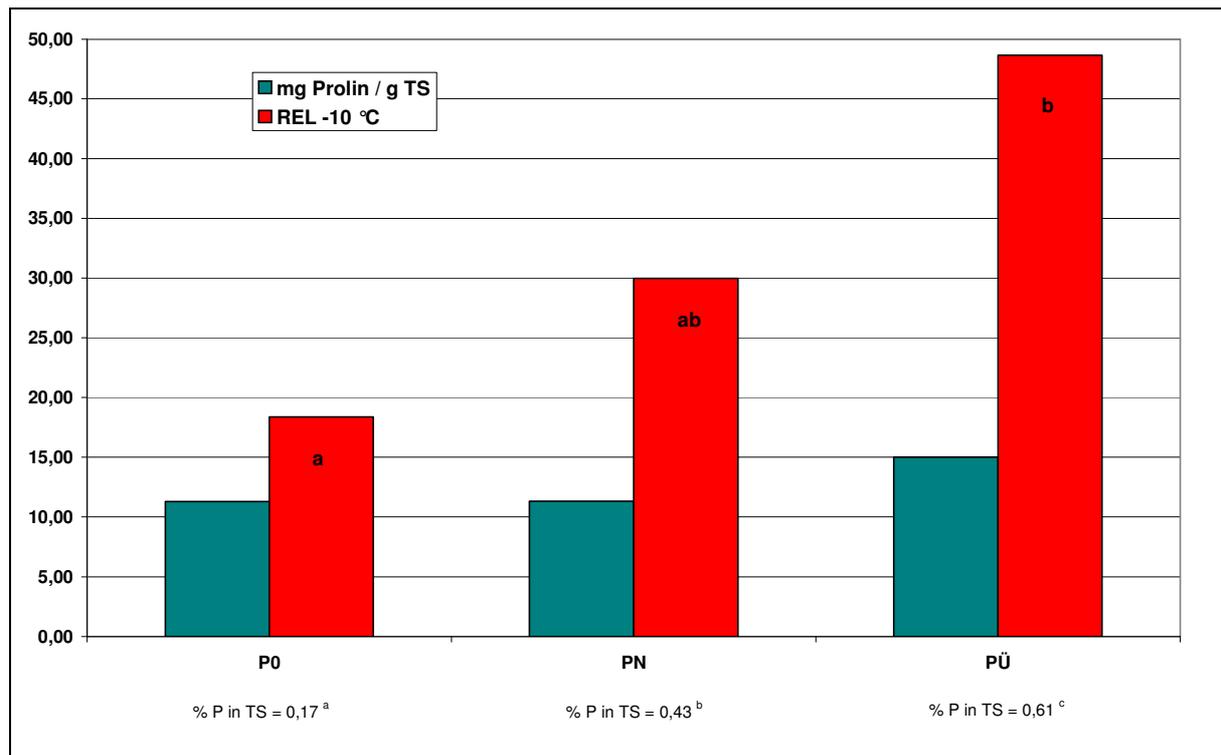
### Tiefrost

Im **Januar 2004** zeigten sich deutliche Unterschiede im Phosphorgehalt. Dieser lag bei PÜ etwa doppelt so hoch wie bei PN und fünfmal so hoch wie bei P0. Alle Varianten unterschieden sich sig. voneinander (Abb. 6.5). Die Variante PÜ enthielt außerdem sig. mehr Stickstoff (3,26 % N in TS) als PM und P0 (Daten nicht dargestellt).



**Abbildung 6.5:** Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C und -15 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Tieffrost Januar 2004. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die REL-Werte unterscheiden sich nicht signifikant.

Im Januar 2004 stiegen die REL-Werte (-10 °C) bei steigenden Phosphorgehalten an, bei -15 °C zeigte sich dagegen kein Zusammenhang zwischen steigenden Phosphorgehalten und REL-Werten (Abb. 6.5). Laut visueller Bonitur hat, unabhängig von der Variante, keine Pflanze diese Temperatur überleben können. Bei beiden Temperaturen erreichte jedoch die Variante PÜ (sig. am meisten P und N) den höchsten REL-Wert. Bei -10 °C stiegen die REL-Werte mit sinkendem Glucose- und Fructosegehalt, die Variante PÜ enthielt sig. am wenigsten Fructose sowie sig. weniger Glucose als P0.

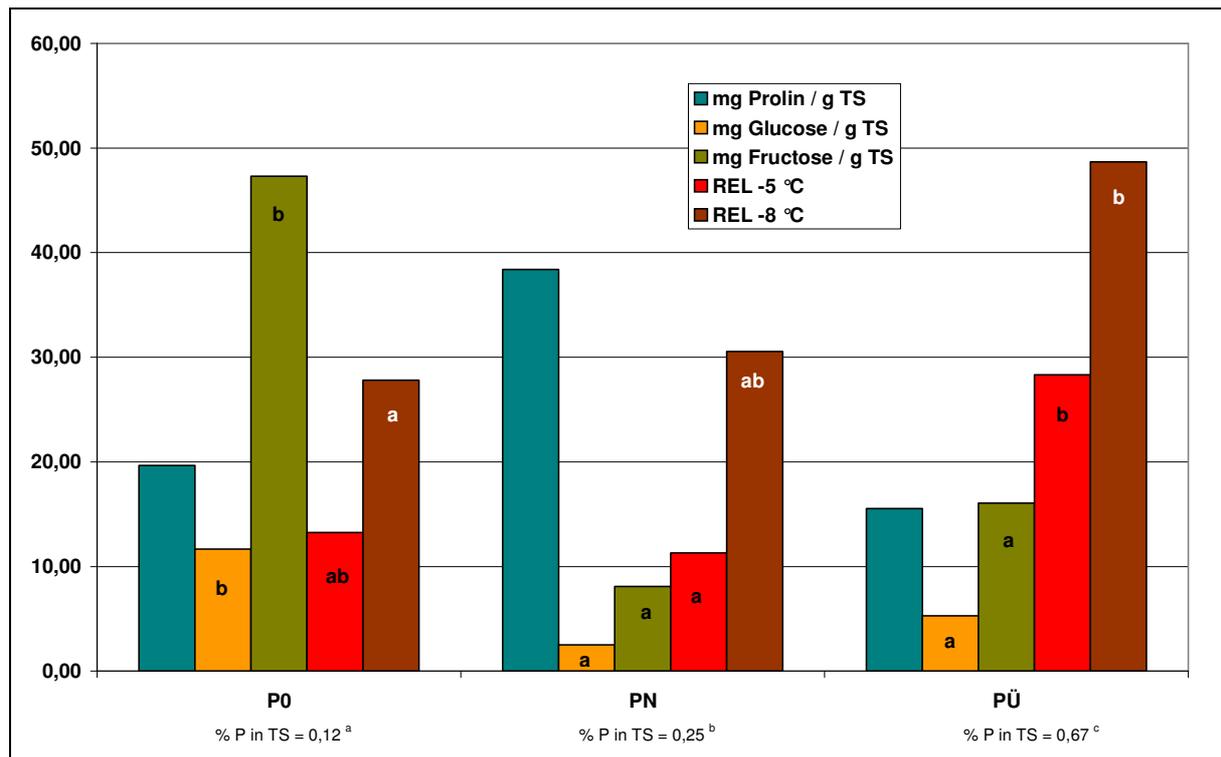


**Abbildung 6.6:** Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) von *Rosa 'Sommerabend'* (Spross) im Tieffrost Januar 2005. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte unterschieden sich nicht signifikant.

Im **Januar 2005** unterschieden sich alle drei Varianten wie bereits im Januar 2004 sig. in ihren Phosphorgehalten (Abb. 6.6). Mit steigendem P-Gehalt stiegen die REL-Werte (-10 °C) an. Die Variante PÜ erreichte wiederum den höchsten REL und enthielt außerdem sig. mehr Stickstoff (3,20 % N in TS) als PN und P0 (Daten nicht dargestellt). Die Prolingehalte unterschieden sich nicht signifikant, die Variante PÜ enthielt jedoch mehr Prolin als PN und P0.

### Spätfrost

Im **April 2004** entsprachen die Unterschiede im P-Gehalt den Düngestufen (Abb. 6.7). Alle Varianten unterschieden sich sig. voneinander, PÜ enthielt sig. am meisten, P0 sig. am wenigsten Phosphor. PÜ enthielt außerdem sig. mehr Stickstoff (2,51 % N in TS) als PN (Daten nicht dargestellt). Der Glucose- und Fructosegehalt lag in der Variante P0 sig. höher als bei PÜ und PN. Für den Prolingehalt konnten trotz deutlich unterschiedlicher Gehalte in den Varianten keine Signifikanzen berechnet werden.



**Abbildung 6.7:** Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C und -8 °C) von *Rosa* 'Sommerabend' (Spross) im Spätfrost April 2004. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte unterschieden sich nicht signifikant.

Mit steigendem Phosphorgehalt stiegen die REL-Werte bei -8 °C an. Für -5 °C und -10 °C (-10 °C grafisch nicht dargestellt) war dieser Zusammenhang nicht deutlich erkennbar. Die Variante PÜ erreichte bei allen drei Temperaturen die höchsten REL-Werte. Bei -8 °C und -10 °C stiegen die REL-Werte der Variante PN jedoch in einem ähnlichen Verhältnis wie in der Variante PÜ. Beiden Varianten war gemein, dass sie einen sig. geringeren Fructose- und Glucosegehalt als P0 auswiesen.

Im Spätfrosttest **April 2005** ist es durch die Anstaubewässerung zu einer Angleichung der Varianten gekommen. Dies war insbesondere am Phosphorgehalt ersichtlich (Tab. 6.1). Die Düngevariante P0 enthielt zwar sig. weniger Phosphor als PÜ, der Phosphorgehalt der Varianten PN und PÜ war aber trotz unterschiedlicher Düngung nicht sig. verschieden. Der Stickstoffgehalt war bei PÜ wieder sig. höher (2,71 % N in TS) als bei PM und PN. Der Prolingehalt unterschied sich nicht sig. zwischen den Varianten. Im Spätfrosttest 2005 konnte durch die nicht auswertbaren REL-Werte keine Gegenüberstellung mit den Analyseergebnissen erfolgen.

**Tabelle 6.1: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von *Rosa 'Sommerabend'* (Spross) im Spätfrost April 2005.** Zellen innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte unterschieden sich nicht signifikant.

Dünge- variante	%	mg / g TS
	P	Pro
PÜ	0,45 <sup>b</sup>	16,44 <sup>a</sup>
PN	0,43 <sup>b</sup>	8,33 <sup>a</sup>
P0	0,37 <sup>a</sup>	13,69 <sup>a</sup>

### Relative Elektrische Leitfähigkeit der Wurzeln

Für die Wurzeln konnten ebenso wie beim Spross im **Frühfrosttest November 2003** keine sig. Unterschiede gefunden werden (Abb. 6.8). Insgesamt lagen die REL-Werte der Wurzeln bereits bei +5 °C in einem extrem hohen Bereich. Bei der Testtemperatur -5 °C war der größte Anstieg des REL-Wertes bei der Variante P0 zu verzeichnen. Laut visueller Bonitur hat keine Variante -10 °C oder -15 °C überlebt.

Im **November 2004** konnten ebenfalls keine sig. Unterschiede errechnet werden. Zwar führte die Testtemperatur -8 °C zu deutlichen Zunahmen der REL-Werte, besonders bei der Variante P0, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Die REL-Werte der Variante PÜ veränderten sich bei allen drei Testtemperaturen am geringsten gegenüber den Kontrollwerten (Abb. 6.9).

Wie schon im Spross konnten auch für die Wurzeln im **Tiefrosttest Januar 2004** keine sig. Unterschiede ermittelt werden (Abb. 6.8). Bei -10 °C stiegen die REL-Werte aller Varianten gleichermaßen im Vergleich zur Kontrolle stark an. Die REL-Werte der Variante PN stiegen bei -15 °C am stärksten an, jedoch hat keine Boniturlpflanze diese Temperatur überlebt (Daten nicht dargestellt).

Im **Tiefrosttest Januar 2005** ließen sich ebenfalls keine sig. Unterschiede feststellen. Die deutlichen Unterschiede zwischen PÜ und PN bei -8 °C und -10 °C mussten als nicht sig. eingestuft werden. Die REL-Werte der Variante PÜ stiegen sowohl bei -8 °C als auch bei -10 °C geringer an, als die REL-Werte der Variante PN (Abb. 6.9).

Im **Spätfrosttest April 2004** konnten keine sig. Unterschiede zwischen den REL-Werten der Wurzeln gefunden werden (Abb. 6.8). Bei -8 °C und -10 °C stiegen die REL-Werte der Variante PN deutlich stärker an als die Werte der Variante PÜ. Die Auswertung der REL-Werte des Spätfrosttestes 2005 entfällt für die Wurzeln aus den beim Spross bereits erwähnten Gründen (Seite 104).

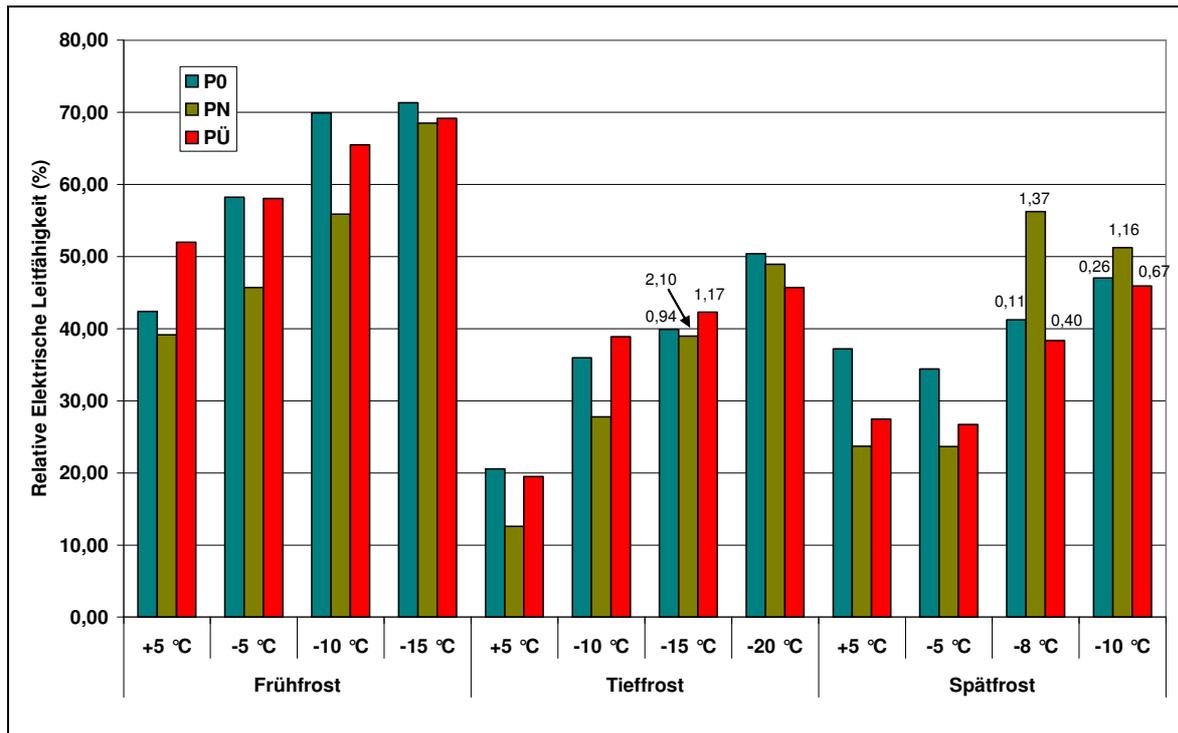


Abbildung 6.8: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004. Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Es gab zu keinem Testzeitpunkt sig. Unterschiede zwischen den Varianten.

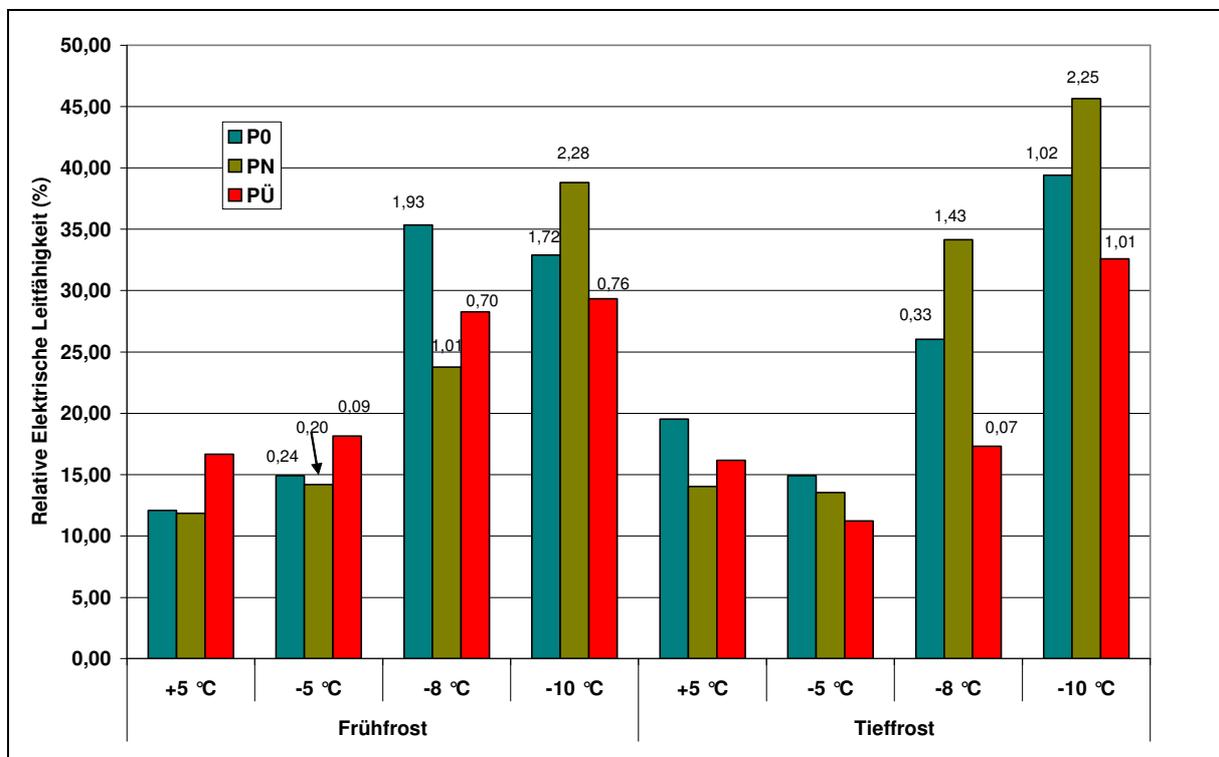


Abbildung 6.9: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Es gab zu keinem Testzeitpunkt sig. Unterschiede zwischen den Varianten.

## Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Phosphor- und Pro- lingehalt der Wurzeln

### Frühfrost

Alle drei Düngevarianten unterschieden sich im Frühfrosttest November 2004 sig. voneinander. Die Variante PN enthielt dabei sig. mehr Phosphor als die Variante PÜ, die sig. mehr Prolin als P0 enthielt (Tab. 6.2).

**Tabelle 6.2: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) im Frühfrost November 2004.** Zellen innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

Dünge- variante	%	mg / g TS
	P	Pro
PÜ	0,30 <sup>b</sup>	24,65 <sup>b</sup>
PN	0,38 <sup>c</sup>	17,00 <sup>ab</sup>
P0	0,09 <sup>a</sup>	9,30 <sup>a</sup>

Weder bei -8 °C noch bei -10 °C ließ sich ein Zusammenhang zwischen steigendem Phosphorgehalt und steigenden REL-Werten feststellen.

### Tiefrost

Der Phosphorgehalt variierte im Tiefrost Januar 2005 sig. zwischen den drei Varianten. PÜ enthielt sig. am meisten Phosphor (Tab. 6.3). Im Gegensatz zum Spross enthielt die Variante P0 sig. mehr Stickstoff (3,02 % N in TS) als PÜ bzw. PN. Für Prolin wurden keine sig. Unterschiede festgestellt. Dies ist auf die geringe Fallzahl zurückzuführen, so dass die vorhandenen Unterschiede nicht als sig. verschieden gewertet werden konnten.

**Tabelle 6.3: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) im Tiefrost Januar 2005.** Zellen innerhalb einer Spalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich.

Dünge- variante	%	mg / g TS
	P	Pro
PÜ	0,50 <sup>c</sup>	9,10 <sup>a</sup>
PN	0,42 <sup>b</sup>	8,54 <sup>a</sup>
PM	0,13 <sup>a</sup>	4,01 <sup>a</sup>

Weder bei -8 °C noch bei -10 °C war ein Zusammenhang von steigendem Phosphorgehalt und steigenden REL-Werten erkennbar.

### Spätfrost

PÜ und PM hatten im April 2005 den gleichen Phosphorgehalt (Tab. 6.4). Alle anderen Nährstoffe zeigten ebenfalls kaum Unterschiede zwischen den Düngevarianten (Daten nicht dargestellt). Dies ist eine Bestätigung des bereits mehrfach vermuteten Bewässerungsfehlers. Aufgrund der fehlerhaften REL-Werte und der fast vollständigen Übereinstimmung der Varianten war daher keine weitere sinnvolle Aussage für die Wurzeln von *Rosa* 'Sommerabend' möglich.

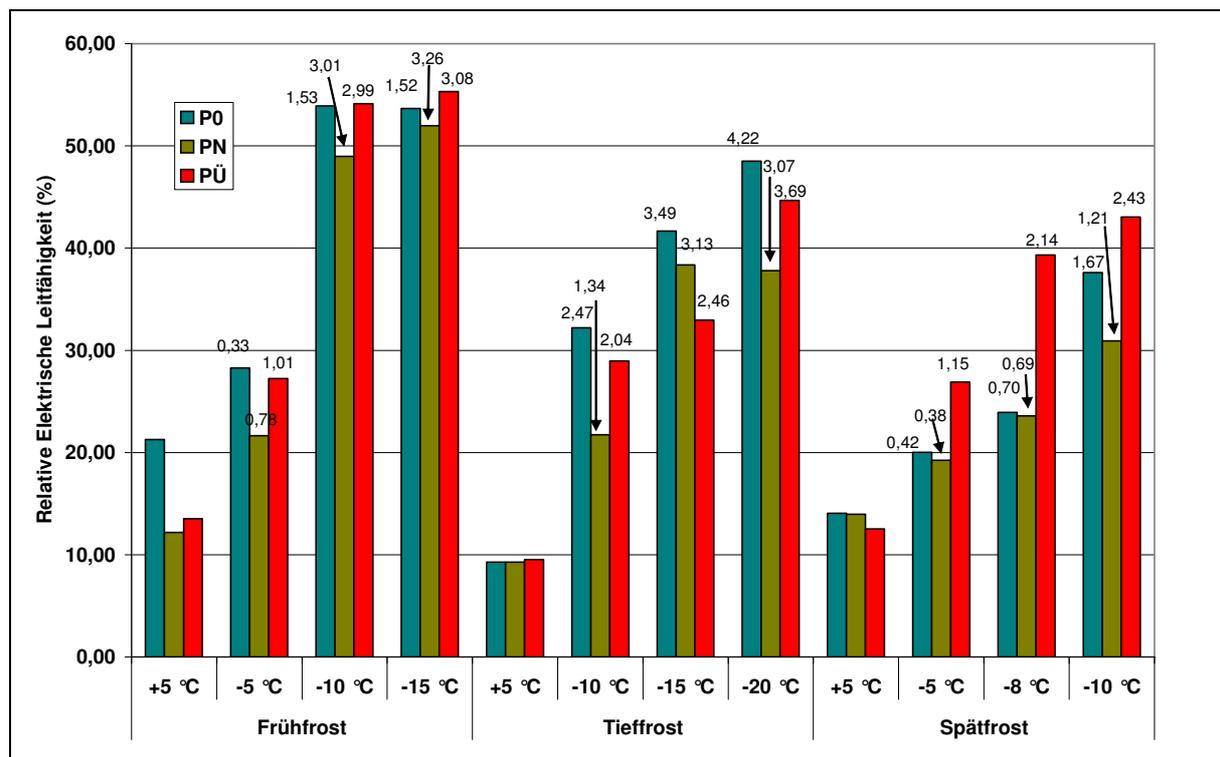
**Tabelle 6.4: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt von *Rosa* 'Sommerabend' (Wurzel) im Spätfrost April 2005.** Es gab keine sig. Unterschiede.

Dünge- variante	%	mg / g TS
	P	Pro
PÜ	0,34 <sup>a</sup>	1,77 <sup>a</sup>
PN	0,23 <sup>a</sup>	2,01 <sup>a</sup>
PM	0,34 <sup>a</sup>	1,94 <sup>a</sup>

## 6.2.2 Einfluss von Phosphor auf die Frosthärte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'

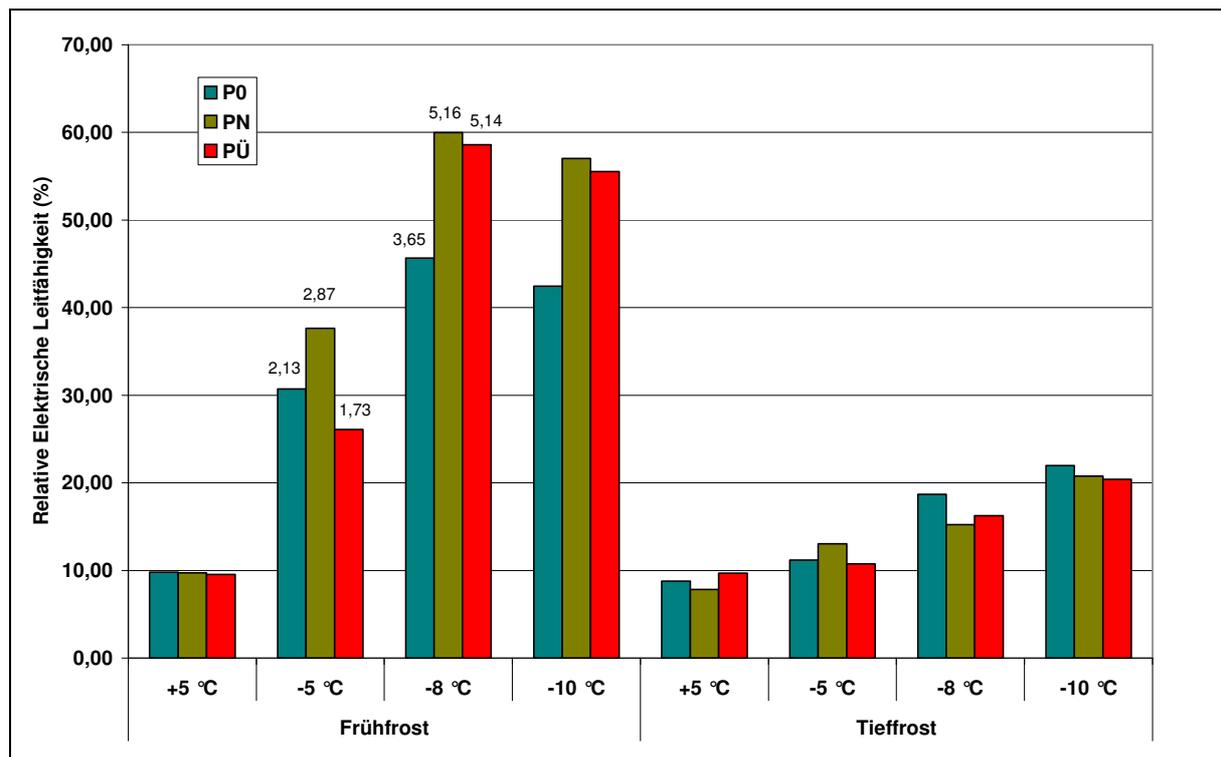
### Elektrische Leitfähigkeit des Sprosses

Im **Frühfrosttest November 2003** konnten keine sig. Unterschiede zwischen den Varianten ermittelt werden (Abb. 6.10). Bei -10 °C und -15 °C kam es sowohl bei PN als auch bei PÜ zu einem starken Anstieg der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten. Beide Varianten unterschieden sich nicht (-10 °C) bzw. nur gering (-15 °C) voneinander. Im Gegensatz sind die REL-Werte der Variante P0 nur halb so stark angestiegen. Die Testtemperaturen -10 °C und -15 °C hat jedoch laut visueller Bonitur keine Variante überlebt (Daten nicht dargestellt). Aber auch bei -5 °C erreichte P0 zwar den höchsten REL-Wert, veränderte sich aber nur um den Faktor 0,33 gegenüber der Kontrolle (PN Faktor 0,78, PÜ Faktor 1,01). Daher wurden in der weiteren Auswertung nur die REL-Werte bei -5 °C weiter betrachtet.



**Abbildung 6.10:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004. Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Es gab zu keinem Testzeitpunkt sig. Unterschiede zwischen den Varianten.

Im Frühfrosttest November 2004 stiegen bereits bei -5 °C die REL-Werte in allen Varianten an, wobei die Variante PÜ den geringsten Anstieg gegenüber der Kontrolle aufwies (Abb. 6.11). Sig. Unterschiede konnten mittels des TUKEY-Tests nicht errechnet werden. Bei -8 °C starben alle Bonitурpflanzen ab (Daten nicht dargestellt), daher wurden im weiteren Verlauf wiederum nur die REL-Werte von -5 °C betrachtet.



**Abbildung 6.11: Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005.** Die Zahlen über den Säulen geben die Veränderung gegenüber der jeweiligen Kontrolle an. Es gab zu keinem Testzeitpunkt sig. Unterschiede zwischen den Varianten.

Im **Tieffrosttest Januar 2004** konnten keine sig. Unterschiede ermittelt werden (Abb. 6.10). Bereits die Testtemperatur -10 °C führt bei allen Varianten zu einem starken Anstieg der REL-Werte, wobei der Anstieg in der Variante PN geringer ausfiel als bei P0 und PÜ (ebenso bei -20 °C). Im weiteren Verlauf wurden nur die REL-Werte des Frosttestes bei -10 °C weiter ausgewertet. Bei -15 °C zeigte die Variante PÜ den geringsten Anstieg der REL-Werte gegenüber der Kontrolle. Die sehr hohen REL-Werte und die weiter unten beschriebenen Ergebnisse der CF-Messung (Abb. 6.12) deuten jedoch auf das Absterben aller Varianten ab -15 °C hin.

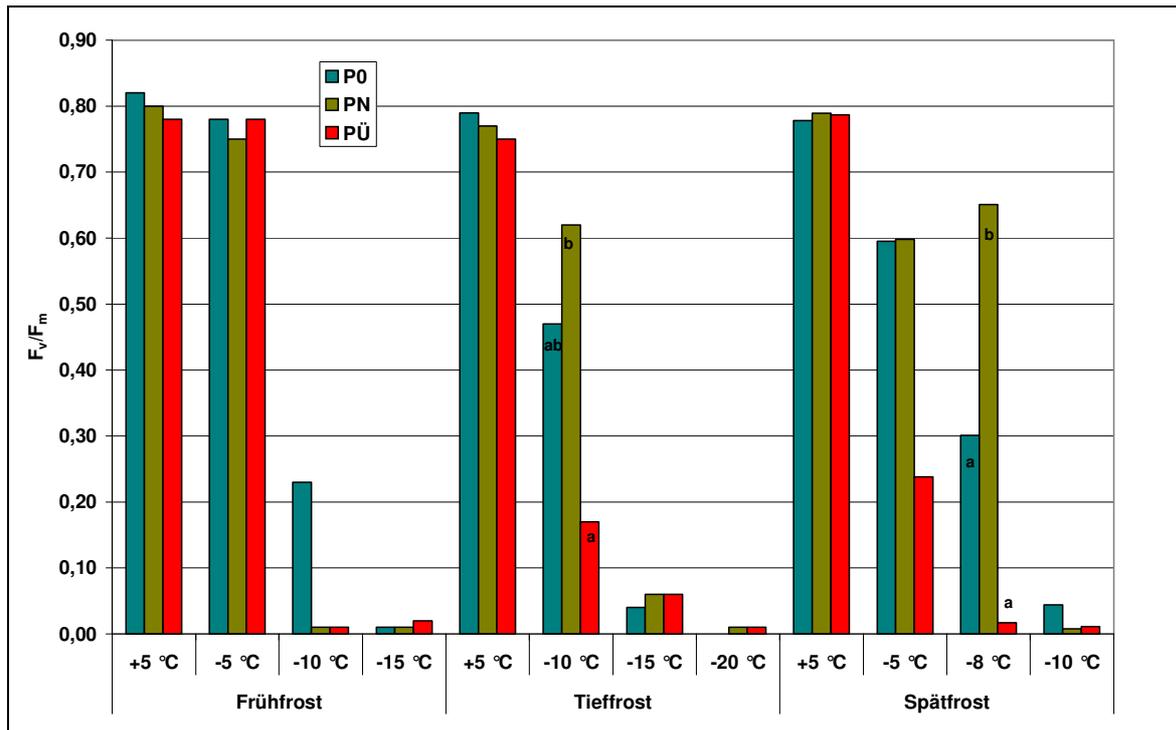
Aufgrund der nur sehr geringen Unterschiede der REL-Werte konnte die ANOVA im **Tiefrosttest Januar 2005** ebenfalls keinen signifikanten Einfluss der Düngung errechnen (Abb. 6.11). Bei jeder Temperaturerniedrigung kam es zu einem leichten Anstieg der REL-Werte in allen Varianten.

Wie bereits bei *Rosa* 'Sommerabend' konnten auch für den Spross von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' im **Spätfrosttest April 2004** keine sig. Unterschiede ermittelt werden (Abb. 6.10). Die Variante PÜ erreichte nicht nur bei jeder Testtemperatur den jeweils höchsten REL-Wert, sondern zeigte auch jeweils die größte Veränderung gegenüber der Kontrolle. Im **Spätfrostversuch April 2005** war eine Auswertung der REL-Werte wie bei *Rosa* 'Sommerabend' ausführlich begründet nicht möglich (Daten nicht dargestellt).

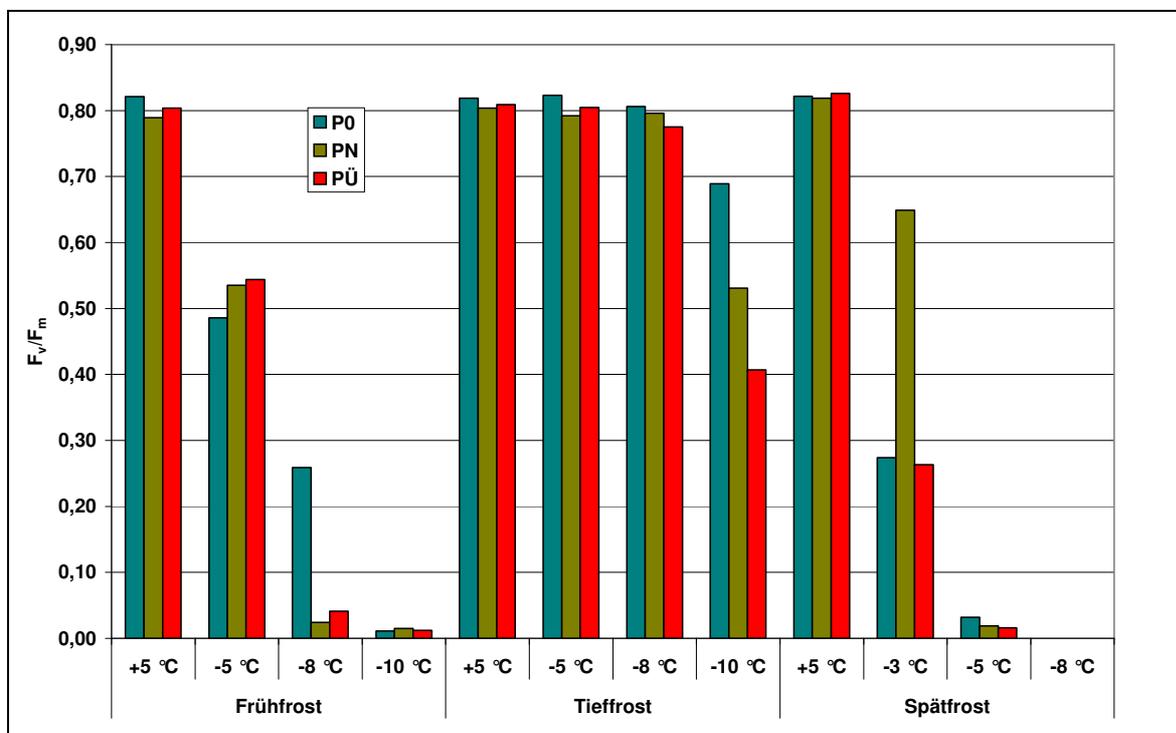
### **Chlorophyllfluoreszenzmessung der Blattproben**

Die CF-Messung bestätigte im **Frühfrosttest November 2003** das Absterben aller Pflanzen ab der Testtemperatur -10 °C. Weder die Messung nach erfolgtem Frosttest (Daten nicht dargestellt), noch die Messung nach drei Tagen, konnte Unterschiede zwischen den Varianten feststellen (Abb. 6.12). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen des TUKEY-Testes für die REL-Werte, der ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ermitteln konnte. Da es keinen Unterschied zwischen den  $F_v/F_m$  Werten der Varianten gab, ist auf eine Gegenüberstellung mit den Analyseergebnissen verzichtet worden.

Im **Frühfrosttest November 2004** können, wie schon bei den REL-Werten, keine sig. Unterschiede in den  $F_v/F_m$  Werten der Varianten gefunden werden (Abb. 6.13). Bei -5 °C sanken die  $F_v/F_m$  Werte aller Varianten ab. Die Testtemperaturen -8 °C und -10 °C hat keine Pflanze überlebt (sehr niedrige  $F_v/F_m$  Werte, siehe auch REL-Werte in Abb. 6.11).



**Abbildung 6.12:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Parameter  $F_v/F_m$  von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchsjahr 2003/2004. Die Messung erfolgte drei Tage nach dem Frostereignis. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben waren bei gleichem Testzeitpunkt sowie gleicher Testtemperatur signifikant unterschiedlich.



**Abbildung 6.13:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf den Parameter  $F_v/F_m$  von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchsjahr 2004/2005. Die Messung erfolgte drei Tage nach dem Frostereignis, Signifikanzen siehe Text.

Die CF-Messung im **Tieffrosttest Januar 2004** bestätigte die ermittelten REL-Werte. Alle Varianten werden bereits bei  $-10\text{ °C}$  stark geschädigt (Abb. 6.12): Für PN konnte nur noch ein  $F_v/F_m$  von 0,62 ermittelt werden, P0 und PÜ starben ab. Das entsprach den Beobachtungen der visuellen Bonitur. Die Variante PN konnte sich jedoch nicht erholen, die Bonitur stellte auch bei dieser Variante nach einigen Wochen das Absterben aller Pflanzen fest (Daten nicht dargestellt).

Im **Tieffrosttest Januar 2005** ermittelte die CF-Messung genauso wie die EL-Messung und die visuelle Bonitur keine Unterschiede zwischen den Varianten bei  $-5\text{ °C}$  und  $-8\text{ °C}$  (Abb. 6.13). Die Testtemperatur  $-10\text{ °C}$  führte bei den Varianten PÜ und PN zu deutlich niedrigeren  $F_v/F_m$  Werten als in der Variante P0 (nicht sig.). Im Gegensatz dazu hatte die EL-Messung keine Unterschiede bei  $-10\text{ °C}$  feststellen können.

Die CF-Messung des **Spätfrostes April 2004** bestätigte im Trend die Ergebnisse der EL-Messung (Tab. 6.12). Die Testtemperatur  $-5\text{ °C}$  führte bei P0 und PN nur zu geringen Schäden, während PÜ bereits starke Schäden zeigte. Dies war aufgrund des niedrigen  $F_v/F_m$  Wertes von 0,238 ersichtlich. Bei  $-8\text{ °C}$  kam es auch bei P0 zu starken Frostschäden ( $F_v/F_m = 0,301$ ), PN wurde sig. geringer geschädigt als P0 und PÜ. Die Testtemperatur  $-10\text{ °C}$  hat keine Variante überlebt ( $F_v/F_m < 0,05$ ).

Die CF-Messung des **Spätfrosttestes April 2005** entsprach den Beobachtungen der visuellen Bonitur (Daten nicht dargestellt). Bei  $-3\text{ °C}$  kam es bei PN zu leichten Schäden, während P0 und PÜ abstarben (Abb. 6.13). Bei  $-5\text{ °C}$  und  $-8\text{ °C}$  haben beide Methoden das Absterben aller Varianten festgestellt. Sig. Unterschiede konnten aufgrund der hohen Streuung der Messergebnisse nicht errechnet werden. Aufgrund der fehlerhaften Bewässerung wurde von einer weiteren Interpretierung Abstand genommen.

### **Vergleich beider Methoden zur Ermittlung der Frosthärte**

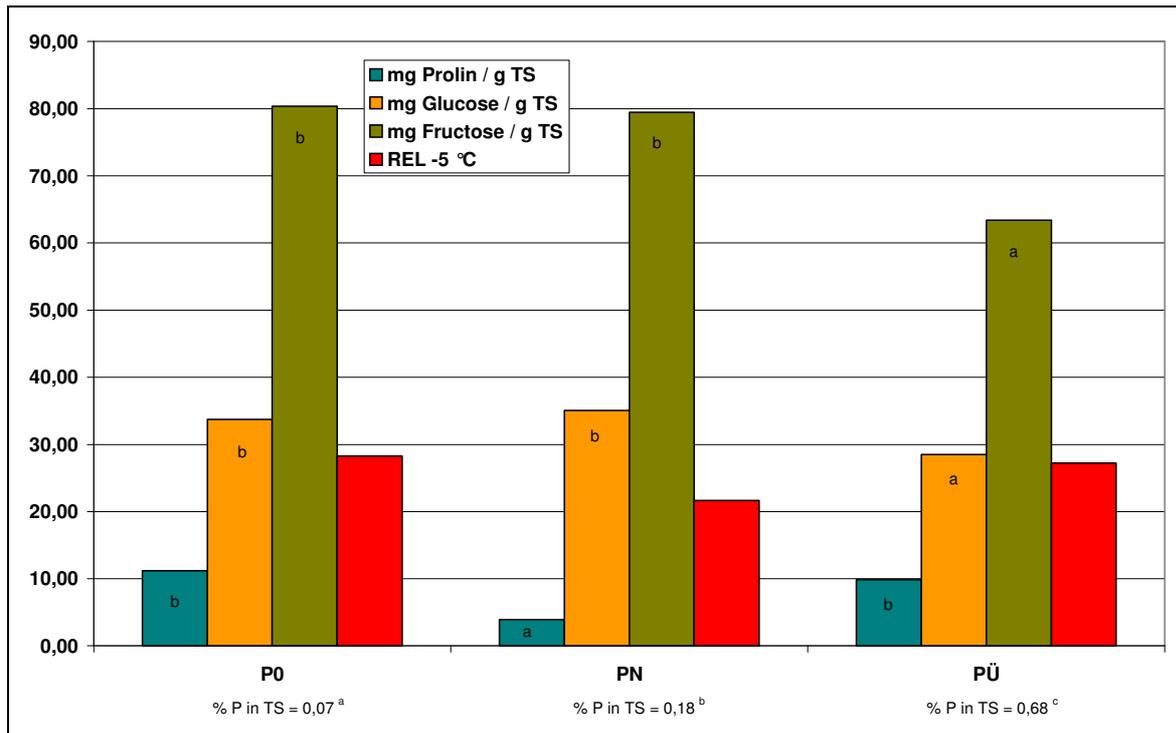
Beide Methoden kamen im gesamten Versuchsjahr 2003/2004 sowie im Frühfrosttest November 2004 zu gleichen Ergebnissen. Diese spiegelten sich im Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) wieder, das jeweils zwischen 0,87 und 0,91 lag. Im Tieffrosttest Januar 2005 konnte nur ein  $r^2$  von 0,48 erreicht werden. Dies lag an den unterschiedlichen Ergebnissen der beiden Methoden bei  $-10\text{ °C}$ : Während die EL-Messung kaum Unterschiede zwischen den Varianten feststellte, konnten mit der CF-Messung deutliche (nicht sig.) Unterschiede ermittelt werden.

### **Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Parameter $F_v/F_m$ , Phosphor-, Prolin-, Glucose- und Fructosegehalt des Sprosses**

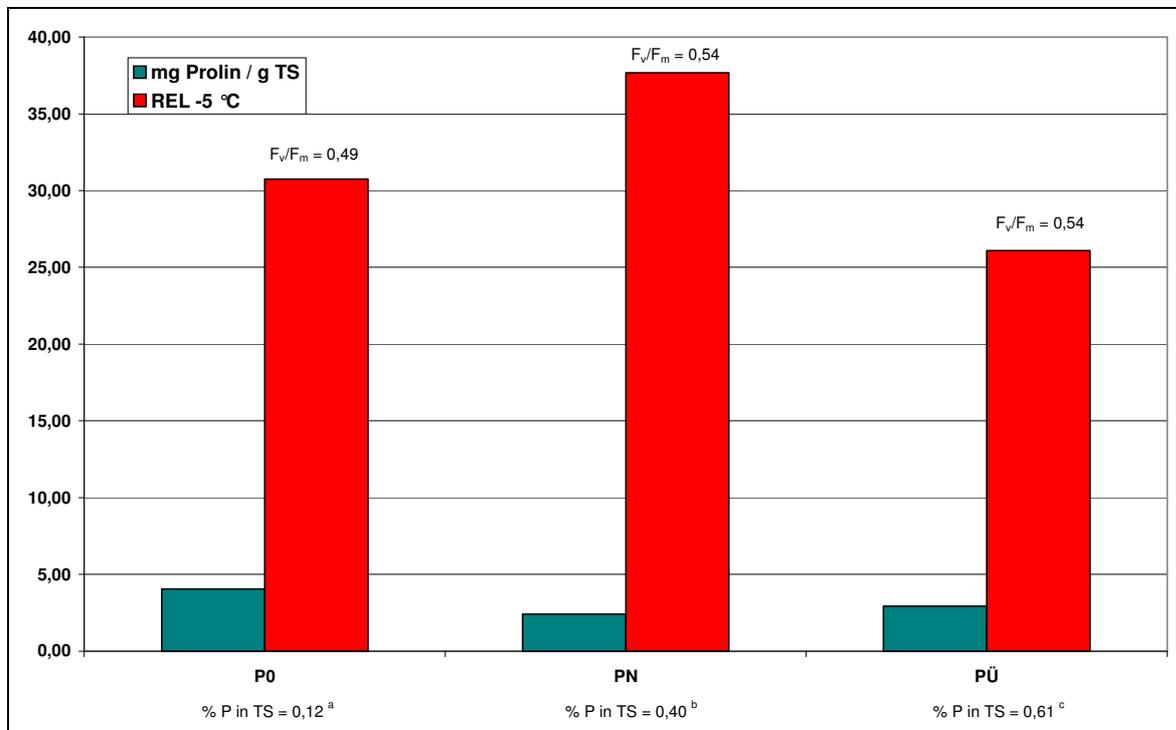
#### **Frühfrost**

Alle drei Düngevarianten unterschieden sich im **Frühfrost November 2003** signifikant voneinander im Phosphorgehalt (Abb. 6.14). PÜ und P0 enthielten sig. mehr Prolin als PN, der Glucose- und Fructosegehalt lag bei P0 und PN sig. höher als bei PÜ. Ein Zusammenhang zwischen steigenden P-Gehalten und steigenden REL-Werten war nicht erkennbar. Gleiches galt für die Fructose- und Glucosegehalte. Mit steigendem Prolingehalt stiegen dagegen die REL-Werte an.

Im **Frühfrost November 2004** unterschieden sich alle Varianten sig. voneinander im Phosphorgehalt (Abb. 6.15). PÜ enthielt sig. am meisten, P0 sig. am wenigsten Phosphor. Der Prolingehalt unterschied sich nicht sig. zwischen den Varianten. Es ergab sich kein Zusammenhang zwischen steigenden P-Gehalten und steigenden REL-Werten ( $-5\text{ °C}$ ) bzw. sinkenden  $F_v/F_m$  Werten.



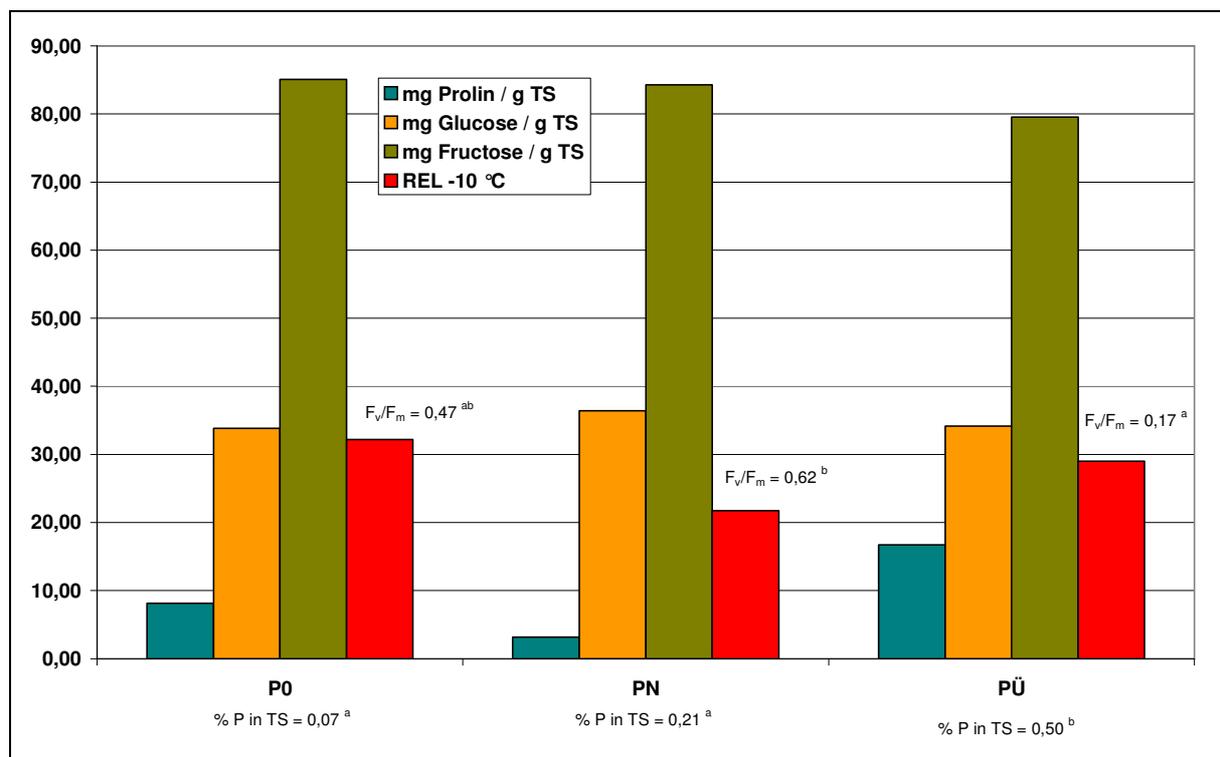
**Abbildung 6.14:** Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost November 2003. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant.



**Abbildung 6.15:** Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-5 °C) und F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> Werte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Frühfrost November 2004. Phosphorgehalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant.

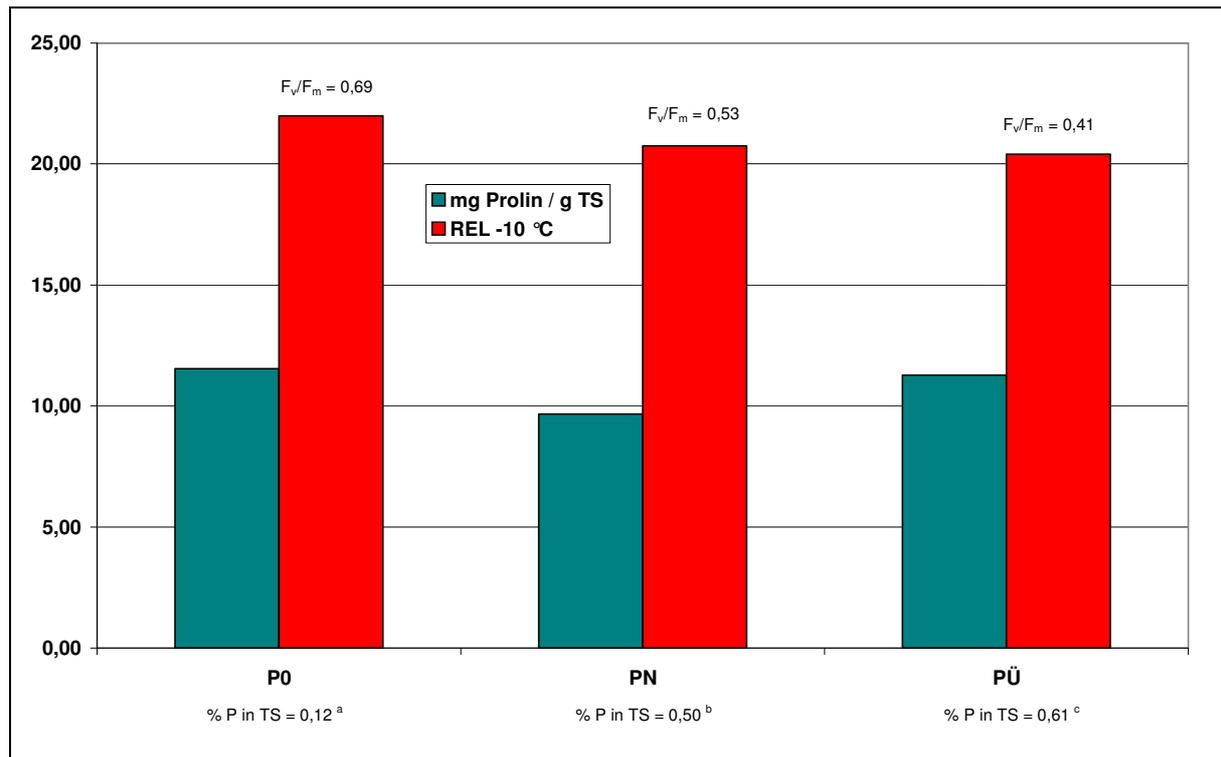
## Tiefrost

Der Phosphorgehalt der einzelnen Varianten entsprach im **Tiefrosttest Januar 2004** der Versuchsanstellung, wobei PÜ sig. mehr Phosphor als P0 und PN enthielt. PÜ enthielt außerdem am meisten, PN am wenigsten Prolin. Für Prolin konnten aber, ebenso wie für Glucose und Fructose, keine sig. Unterschiede ermittelt werden. Es ergab sich kein Zusammenhang zwischen steigenden P-Gehalten und der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit oder den  $F_v/F_m$  Werten. Lediglich die Variante PÜ enthielt am meisten Phosphor und erreichte dabei den geringsten  $F_v/F_m$  Wert (Abb. 6.16).



**Abbildung 6.16: Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-10 °C) und  $F_v/F_m$  Werte (-10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Tiefrost Januar 2004.** Werte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolin-, Glucose-, Fructosegehalte sowie die REL-Werte unterschieden sich nicht signifikant.

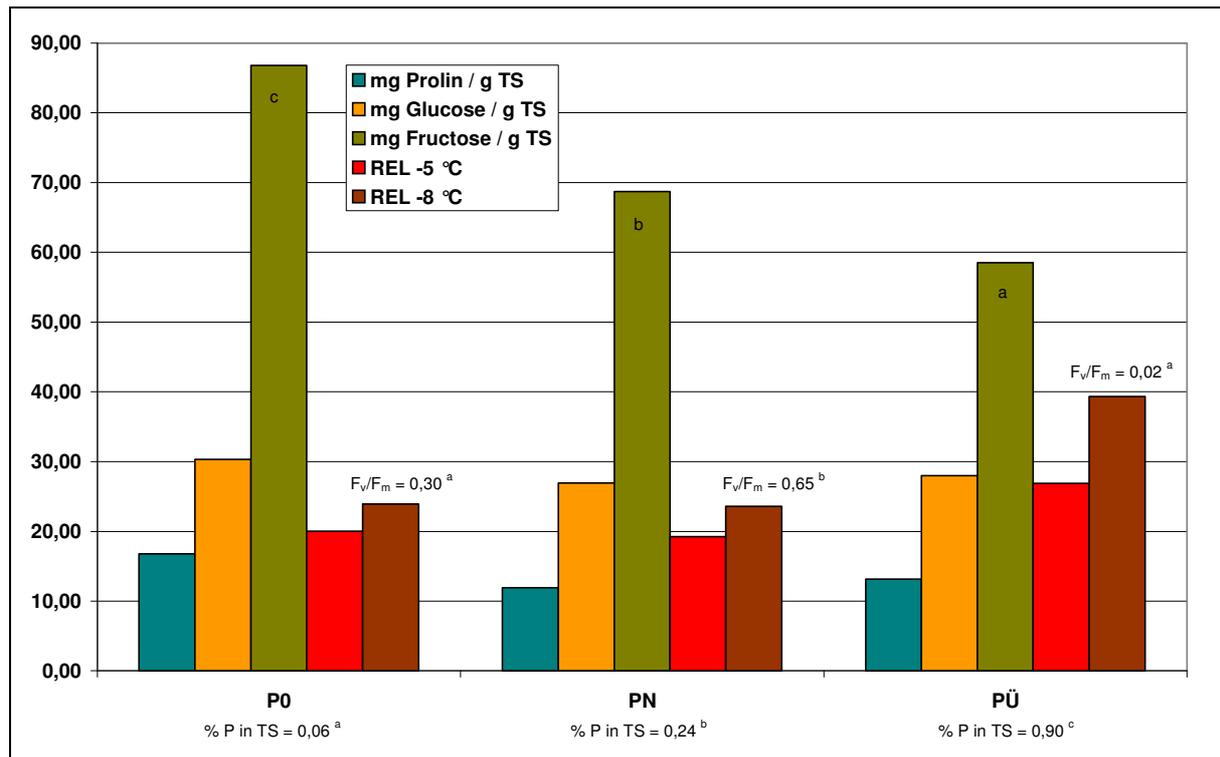
Im **Tiefrost Januar 2005** unterschieden sich die Varianten sig. im Phosphorgehalt voneinander. PÜ enthielt sig. am meisten, P0 sig. am wenigsten Phosphor. Der Prolingehalt unterschied sich nicht sig. zwischen den Varianten (Abb. 6.17). Mit steigendem Phosphorgehalt sanken die REL-Werte (nicht sig.). Gegenteilige Zusammenhänge waren bei der Analyse der  $F_v/F_m$  Werte zu erkennen, diese sanken bei steigendem Phosphorgehalt deutlich ab.



**Abbildung 6.17: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-10 °C) und  $F_v/F_m$  Werte (-10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Tiefrost Januar 2005.** Phosphorgehalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte und  $F_v/F_m$  Werte unterschieden sich nicht signifikant.

### Spätfrost

Die Varianten unterschieden sich im **Spätfrosttest April 2004** sig. in ihren Phosphor-, und Fructosegehalten (Abb. 6.18). Für Prolin und Glucose konnten keine sig. Unterschiede festgestellt werden. Es konnte kein Zusammenhang zwischen steigenden P-Gehalten und steigenden REL-Werten bzw. sinkenden  $F_v/F_m$  Werten hergestellt werden. Die Variante PÜ enthielt jedoch sig. am meisten Phosphor und erreichte den höchsten REL-Wert sowie den niedrigsten  $F_v/F_m$  Wert (beides bei -5 °C und -8 °C). Mit steigendem P-Gehalt sank außerdem der Gehalt an Fructose.



**Abbildung 6.18:** Einfluss der P-Ernährung auf verschiedene Inhaltsstoffe sowie REL-Werte (-5 °C und -8 °C) und  $F_v/F_m$  Werte (-8 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Spätfrost April 2004. Phosphorgehalte bzw.  $F_v/F_m$  Werte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind sig. unterschiedlich. Die Prolin- und Glucosegehalte sowie die REL-Werte (-5 °C und -8 °C) unterschieden sich nicht signifikant.

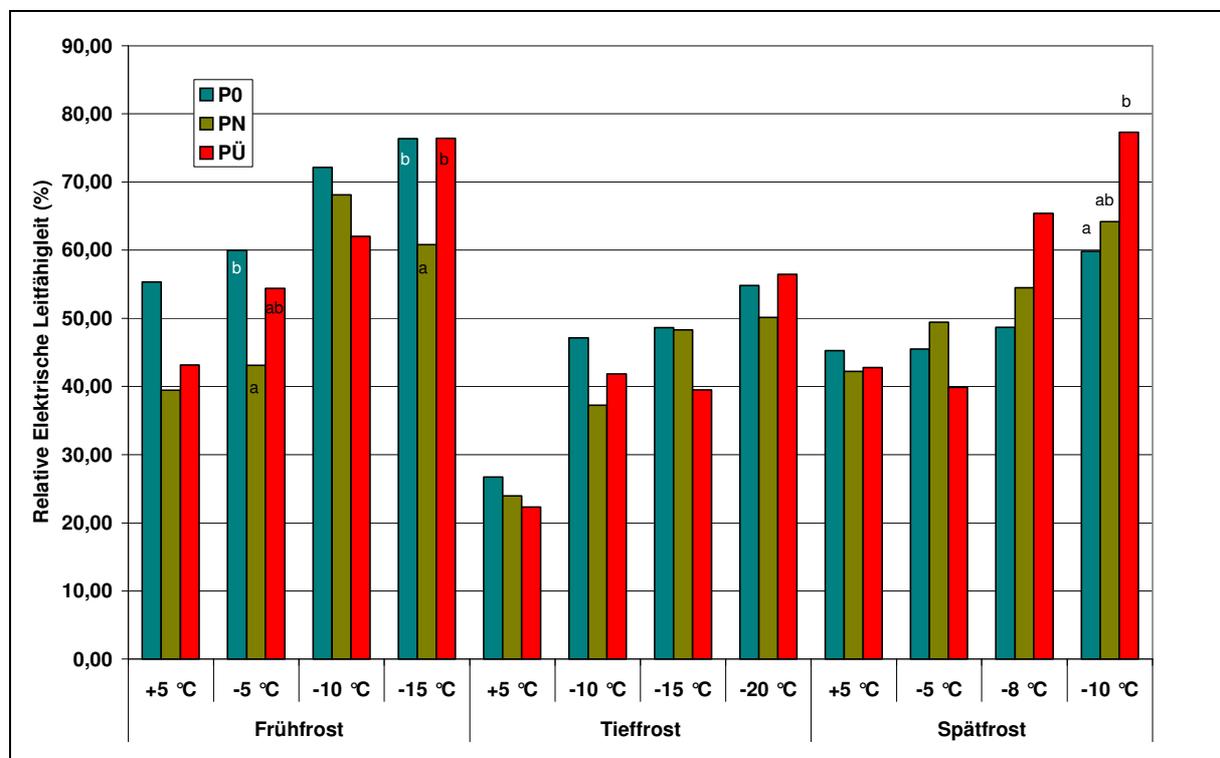
Im **Spätfrost April 2005** waren die Phosphorgehalte in allen Varianten gleich. Besonders auffällig war der hohe Phosphorgehalt der Variante P0, die keinen Phosphordünger erhalten hat. Zusätzlich ist der P-Gehalt bei PÜ unerwartet niedrig im Vergleich zu 2004 (Vergleich Abb. 6.18). Dieses Phänomen ist, wie bereits bei den Ergebnissen für *Rosa* 'Sommerabend' erwähnt, nur mit der Anstaubewässerung zu erklären.

**Tabelle 6.5:** Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalte von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Spross) im Spätfrost April 2005. Es gab keine sig. Unterschiede.

Düngevariante	%	mg / g TS
	P	Pro
PÜ	0,51 <sup>a</sup>	5,71 <sup>a</sup>
PN	0,49 <sup>a</sup>	5,56 <sup>a</sup>
P0	0,47 <sup>a</sup>	6,01 <sup>a</sup>

### Elektrische Leitfähigkeit der Wurzeln

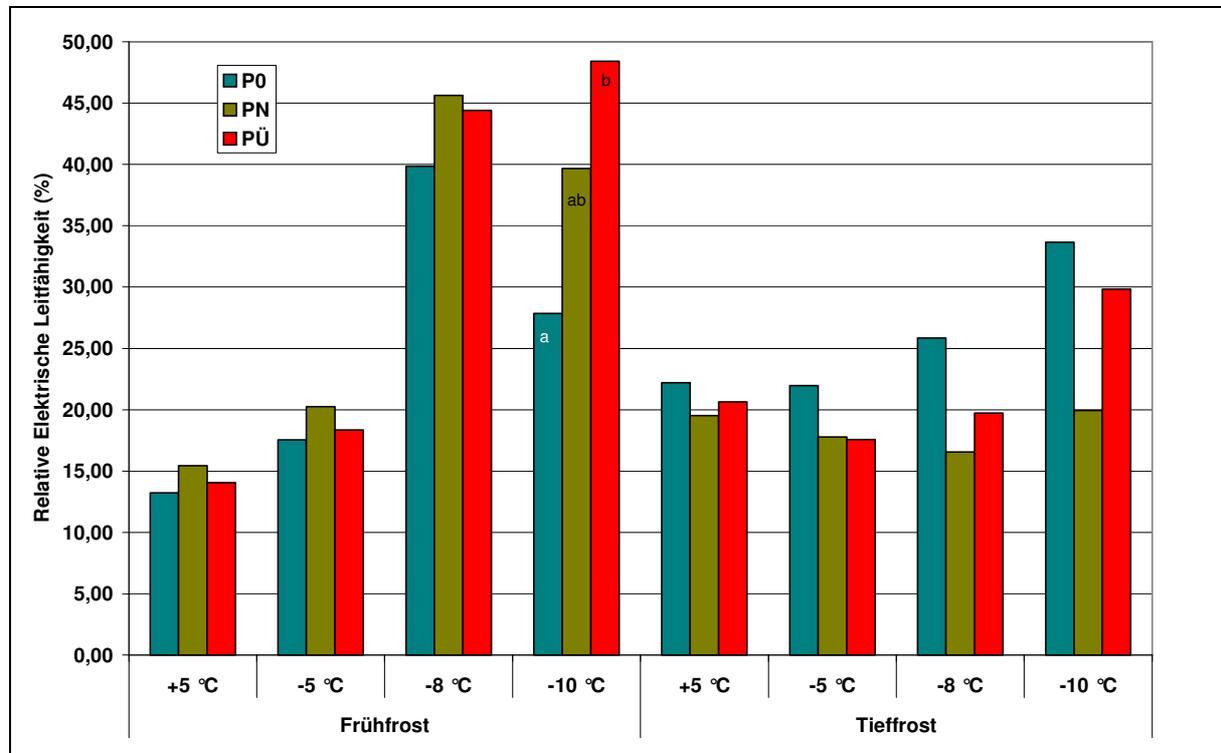
Die gesamten REL-Werte der Wurzeln lagen im **Frühfrost November 2003** wie auch bei *Rosa* 'Sommerabend' in einem sehr hohen Bereich (Abb. 6.19). Sig. Unterschiede waren nur bei -5 °C und -15 °C nachweisbar. Bei dieser Temperatur hatte die Variante PN sig. niedrigere REL-Werte als P0 (-5 °C) bzw. PÜ und P0 (-15 °C). Bei -5 °C stiegen die REL-Werte der Variante PÜ im Vergleich mit der Kontrolle stärker an als bei PN oder P0. Für die Testtemperatur -10 °C ließen sich keine Signifikanzen feststellen. Laut visueller Bonitur waren bei dieser Temperatur bereits alle Pflanzen abgestorben (Daten nicht dargestellt). Im weiteren Verlauf wurden daher nur die REL-Werte bei -5 °C weiter analysiert.



**Abbildung 6.19:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2003/2004. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

Bei der EL-Messung im **November 2004** konnten für die Wurzeln nur bei -10 °C sig. Unterschiede zwischen den Varianten nachgewiesen werden (Abb. 6.20). Laut visueller Bonitur sind die Boniturlpflanzen aber bereits bei -8 °C vollständig abgestorben. Im weiteren Verlauf wurde daher lediglich die Testtemperatur -5 °C ausgewertet. Bei dieser Temperatur stiegen die REL-Werte aller Varianten gleichermaßen im

Vergleich zur Kontrolle an: Die Variante PN erreichte einen leicht höheren (nicht sig.) REL-Wert als PÜ bzw. P0.



**Abbildung 6.20:** Einfluss von Frostungstemperatur und –zeitpunkt auf die Relative Elektrische Leitfähigkeit von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) bei unterschiedlicher P-Ernährung im Versuchszeitraum 2004/2005. Säulen gleicher Farbe mit unterschiedlichen Buchstaben sind bei gleicher Temperatur zum gleichen Testzeitpunkt signifikant unterschiedlich.

Bereits bei -10 °C kam es im **Tieffrosttest Januar 2004** zu einem starken Anstieg der REL-Werte gegenüber den Kontrollwerten (Abb. 6.19). Wie schon beim Spross konnten auch für die Wurzeln keine sig. Unterschiede errechnet werden. Die Variante P0 erreichte bei -10 °C den höchsten REL-Wert. Im Vergleich zur Kontrollmessung stiegen die REL-Werte von P0 und PÜ gleich stark an (Anstieg nicht in Abb. 6.19 dargestellt).

Im **Tieffrosttest Januar 2005** kam es innerhalb aller Varianten zu Schwankungen in den REL-Werten. Eine Berechnung des Anstiegs der REL-Werte im Vergleich zu den Kontrollwerten ließ daher keine sinnvolle Interpretation zu. Innerhalb einer Temperaturstufe ist aber für P0 jeweils der höchste REL-Wert ermittelt worden (Abb. 6.20). Mittels TUKEY-Test konnten keine sig. Unterschiede gezeigt werden. Da sich die

REL-Werte bei -5 °C im Vergleich mit den Kontrollwerten nicht verändert haben, wurden im weiteren Text nur die REL-Werte bei -8 °C und -10 °C interpretiert.

Im **Spätfrosttest April 2004** konnten sig. Unterschiede in den REL-Werten der Wurzeln nur bei -10 °C gefunden werden (Abb. 6.19). PÜ erreichte einen sig. höheren REL-Wert als P0. Der deutlich erhöhte REL-Wert der Variante PÜ bei -8 °C war dagegen nicht sig. unterschiedlich von P0 oder PN.

Im **Spätfrosttest April 2005** war ebenso wie beim Spross eine Auswertung der REL-Werte der Wurzeln aufgrund von starken Schwankungen innerhalb der Varianten nicht möglich (Daten nicht dargestellt). Eine Interpretation im Zusammenhang mit den P-Gehalten wurde daher nicht durchgeführt.

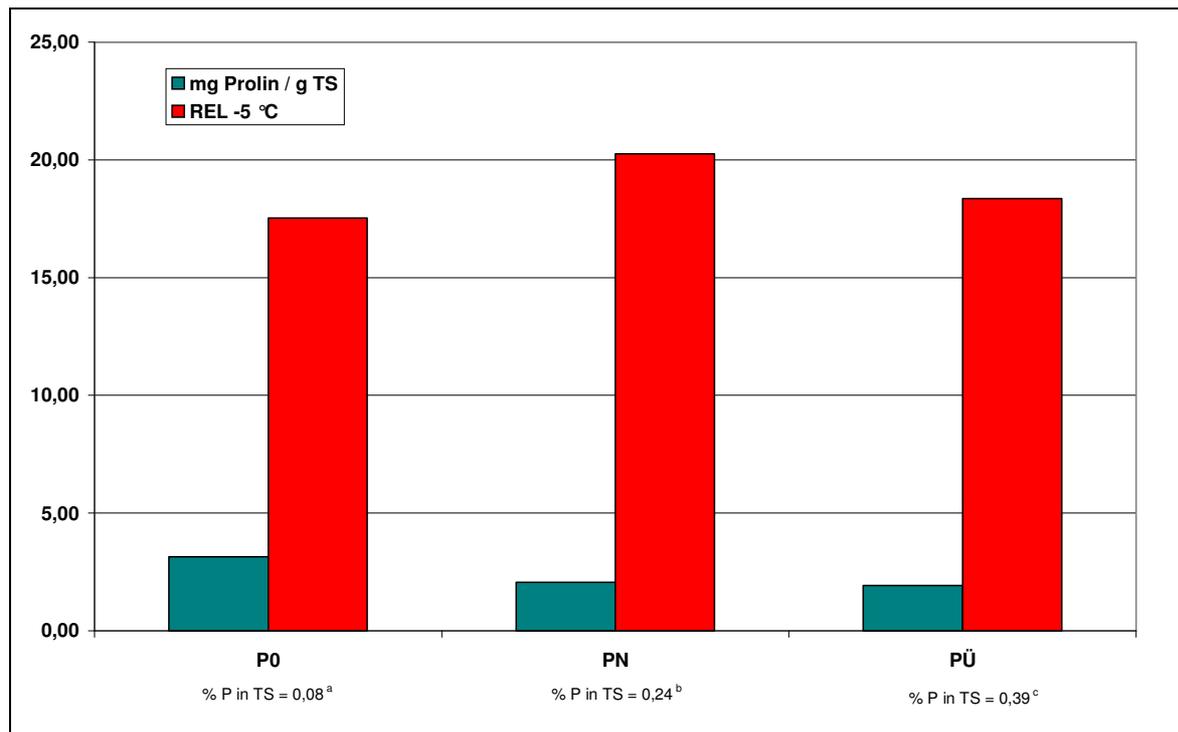
### **Beziehung zwischen Relativer Elektrischer Leitfähigkeit, Phosphor- und Prolingehalt der Wurzeln**

#### **Frühfrost**

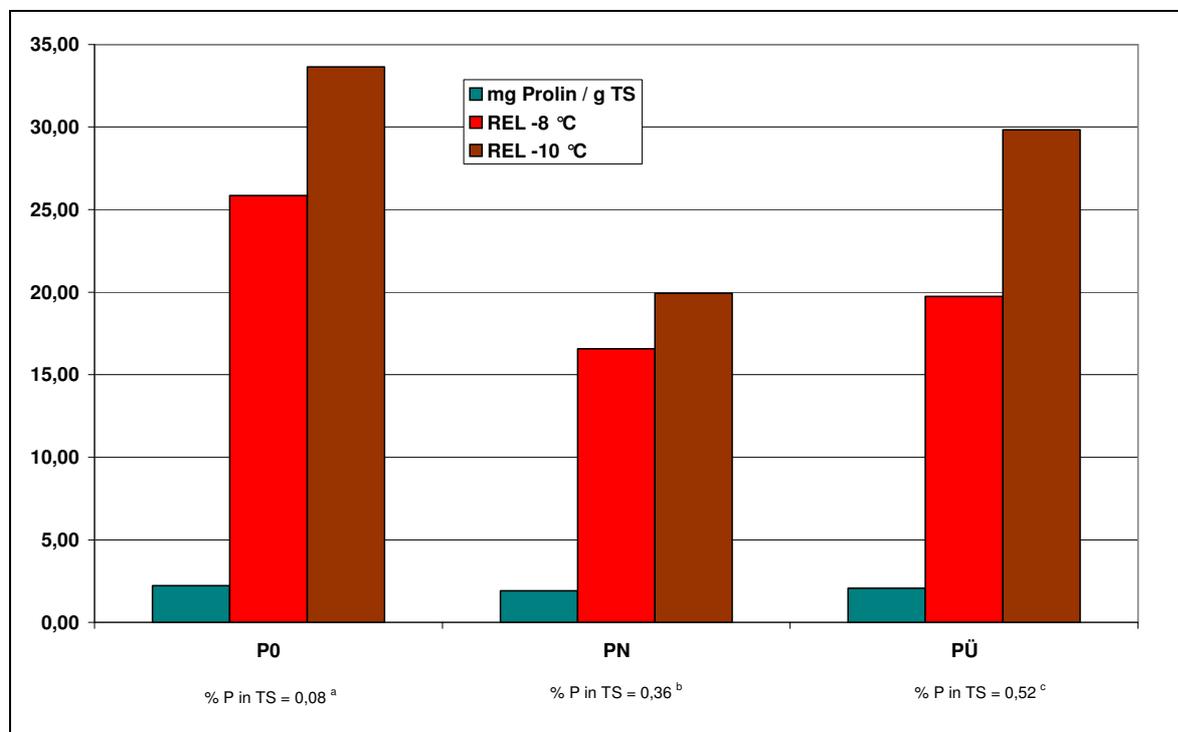
Im **Frühfrosttest November 2004** entsprachen die Phosphorgehalte der Varianten wie auch beim Spross der Versuchsanstellung und unterschieden sich jeweils sig. voneinander (Abb. 6.21). Ein Zusammenhang zwischen steigenden Phosphorgehalten und REL-Werten (-5 °C) war nicht nachweisbar. Der Prolingehalt unterschied sich nicht sig. zwischen den Varianten, sank jedoch mit steigendem P-Gehalt.

#### **Tiefrost**

Alle drei Düngevarianten unterschieden sich im Januar 2005 sig. in ihren Phosphorgehalten. PÜ enthielt außerdem sig. mehr Stickstoff (2,05 % N in TS) als PN und P0 (Daten nicht dargestellt). Die Prolingehalte unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Weder für die REL-Werte (-8 °C und -10 °C) noch für den Prolingehalt war ein Zusammenhang mit steigenden Phosphorgehalten nachweisbar.



**Abbildung 6.21: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-5 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Frühfrost November 2004.** Phosphorgehalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte (-5 °C) unterschieden sich nicht signifikant.



**Abbildung 6.22: Einfluss der P-Ernährung auf den Phosphor- und Prolingehalt sowie REL-Werte (-8 °C und -10 °C) von *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' (Wurzel) im Tieffrost Januar 2005.** Phosphorgehalte mit unterschiedlichen Buchstaben sind signifikant unterschiedlich. Die Prolingehalte und REL-Werte (-8 °C und -10 °C) unterschieden sich nicht signifikant.

### 6.3 Diskussion

In Tabelle 6.6 sind die Einzelergebnisse des P-Versuches zusammenfassend dargestellt. Die sig. unterschiedlichen Ergebnisse sind grün hervorgehoben.

**Tabelle 6.6: Vergleich der signifikanten Ergebnisse von *Rosa 'Sommerabend'* und *Prunus laurocerasus 'Rotundifolia'* bei unterschiedlicher P-Ernährung** (FF = Frühfrost, TF = Tieffrost, SF = Spätfrost, R = Rosa, P = Prunus, S = Spross, W = Wurzel, + = Varianten waren sig. unterschiedlich, - = Varianten waren nicht sig. unterschiedlich, n. b. = nicht bestimmt).

Test	Teil	Sig. Unterschiede vorhanden bei								
		bei °C					%	mg / g TS		
		-5	-8	-10	-15	-20	P	Pro	Gluc	Fruc
FF Nov. 03 (R)	S	-	n. b.	-	-	n. b.	+	-	+	+
FF Nov. 04 (R)	S	+	n. b.	-	-	n. b.	+	-	n. b.	
TF Jan. 04 (R)	S	n. b.		-	-	-	+	+	+	+
TF Jan. 05 (R)	S	-	-	+	n. b.		+	-	n. b.	
SF April 04 (R)	S	+	+	+	n. b.		+	-	+	+
FF Nov. 03 (R)	W	-	n. b.	-	-	n. b.	n. b.			
FF Nov. 04 (R)	W	-	n. b.	-	-	n. b.	+	+	n. b.	
TF Jan. 04 (R)	W	n. b.		-	-	-	n. b.			
TF Jan. 05 (R)	W	-	-	-	n. b.		+	-	n. b.	
SF April 04 (R)	W	-	-	-	n. b.		n. b.			
FF Nov. 03 (P)	S EL	-	n. b.	-	-	n. b.	+	+	+	+
FF Nov. 03 (P)	S CF	-	n. b.	-	-	n. b.	Siehe FF Nov. 03 (P) S EL			
FF Nov. 04 (P)	S EL	-	n. b.	-	-	n. b.	+	-	n. b.	
FF Nov. 04 (P)	S CF	-	n. b.	-	-	n. b.	Siehe FF Nov. 04 (P) S EL			
TF Jan. 04 (P)	S EL	n. b.		-	-	-	+	-	-	-
TF Jan. 04 (P)	S CF	n. b.		+	-	-	Siehe TF Jan. 04 (P) S EL			
TF Jan. 05 (P)	S EL	-	-	-	n. b.		+	-	n. b.	
TF Jan. 05 (P)	S CF	-	+	-	n. b.		Siehe TF Jan. 05 (P) S EL			
SF April 04 (P)	S EL	-	-	-	n. b.		+	-	-	+
SF April 04 (P)	S CF	-	+	-	n. b.		Siehe SF April 04 (P) S EL			
FF Nov. 03 (P)	W	+	n. b.	-	+	n. b.	n. b.			
FF Nov. 04 (P)	W	-	n. b.	-	+	n. b.	+	-	n. b.	
TF Jan. 04 (P)	W	n. b.		-	-	-	n. b.			
TF Jan. 05 (P)	W	-	-	-	n. b.		+	-	n. b.	
SF April 04 (P)	W	-	-	+	n. b.		n. b.			

Nur selten konnte eine Beziehung zwischen steigenden Phosphorgehalten und der Relativen Elektrischen Leitfähigkeit nachgewiesen werden. Häufig unterschieden sich die REL-Werte dabei nicht signifikant. Die Phosphorgehalte der drei Varianten unterschieden sich dagegen bei jeder Analyse sig. voneinander. Signifikante Unterschiede im Prolingehalt konnten nur bei drei Untersuchungen nachgewiesen werden,

die Glucose- und Fructosegehalte unterschieden sich (sofern analysiert) bei *Rosa* 'Sommerabend' immer sig. voneinander, während sich die Zuckergehalte bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' sowohl signifikant als auch nicht sig. unterschieden.

Sofern ein Einfluss des steigenden Phosphorgehaltes nachgewiesen werden konnte, beschränkte sich dies auf die Tieffrostphase (Spross) von *Rosa* 'Sommerabend'. Im Spätfrost (Spross) ließ sich nur bei -8 °C im April 2004 ein Zusammenhang zeigen. Für die Wurzeln ist in keinem Frosttest eine Beziehung zwischen Phosphorgehalt und Relativer Elektrischer Leitfähigkeit nachweisbar gewesen. Dies gilt sowohl für *Rosa* 'Sommerabend' als auch für *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'. Zu beachten ist dabei aber, dass es sich bei den Wurzeln nur um Ergebnisse eines Jahres (Versuchsjahr 2004/2005) gehandelt hat, wobei zusätzlich der Spätfrost für beide Testarten nicht auswertbar war. Die weiteren Ausführungen beziehen sich daher immer nur auf die Ergebnisse der Spross-Untersuchungen.

Im **Frühfrost** gab es weder für *Rosa* 'Sommerabend' noch für *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' einen Zusammenhang zwischen steigenden Phosphorgehalten und REL-Werten. Auffällig war jedoch bei *Rosa* 'Sommerabend', dass die Variante PÜ den höchsten P-Gehalt und die höchsten REL-Werte aufwies. Zusätzlich enthielt diese Variante in beiden Versuchsjahren sig. am meisten Stickstoff sowie den geringsten Glucose- und Fructosegehalt in der Frühfrostphase. Der Anstieg gegenüber den Kontrollmessungen war jedoch in der Variante P0 (sig. niedrigster P-Gehalt) stärker als in der Variante PÜ.

Die Ergebnisse der Frühfrosttests decken sich mit denen von PELLETT (1973). Dieser fand nur einen geringen negativen Einfluss (max. 2 bis 3 °C Unterschied zwischen den Varianten) der Phosphordüngung auf die Frühfrosthärte stecklingsvermehrter *Forsythia x intermedia* 'Lynwood' und *Cornus alba* 'Sibirica'. Den höchsten Frostschaden ermittelte PELLETT (1973) bei hoher Stickstoffdüngung und gleichzeitig hoher Phosphordüngung. Dieser Zusammenhang war auch bei *Rosa* 'Sommerabend' zu erkennen. Der mittlere N-Gehalt von 3,20 % (in TS) lag dabei nach EVERS (1989) und ALT (1990) zwar im optimalen bzw. ausreichenden Bereich (Tab. 3.7), der P-Gehalt mit 0,66 % (in TS) kann nach EVERS (1989) aber nicht mehr als optimal bezeichnet werden und nähert sich dem toxischen Bereich. In der Zusammenstellung

von ALT (1990) werden P-Gehalte zwischen 0,11 % und 0,44 % als ausreichend angesehen (Tab. 6.7). Die in *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' gefundenen durchschnittlichen 0,66 % P bzw. 0,61 % P stellen somit, wie angestrebt, eine Überversorgung dar.

**Tabelle 6.7: Beurteilung der Phosphorgehalte verschiedener Gehölze**  
(Blattanalyse; Symp.: Symptome sichtbar; verändert nach ALT, 1990).

Art	% Phosphor		Autor
	Mangel	Ausreichend	
<i>Forsythia x intermedia</i>	< 0,15	0,2 – 0,3	RÖBER, R. & RHODE, J., 1982
<i>Lonicera xylosteum</i>		0,3	ROHDE, J. & RÖBER, R., 1983
<i>Picea abies</i>	< 0,05 (Symp.)	> 0,11	INGESTAD, T., 1959
<i>Picea abies</i>	< 0,06 – 0,1	0,2 – 0,3	WEHRMANN, J., 1963
<i>Picea omorika</i>	< 0,12		GRUPPE, W. & SEITZ, P., 1962
<i>Pinus</i>	0,05 – 0,11	0,13 – 0,20	WEHRMANN, J., 1963
<i>Pinus sylvestris</i>		0,15 – 0,17	SMILDE, K. W., 1973
<i>Philadelphus inodorus</i>		0,4 – 0,5	RÖBER, R. & RHODE, J., 1984
<i>Populus x canadensis</i>		0,23	SMILDE, K. W., 1973
<i>Pseudotsuga menziesii</i>		0,14	SMILDE, K. W., 1973
<i>Quercus petraea</i>		0,22	NEWNHAM, R. M. & CARSLISLE, A., 1969
<i>Quercus robur</i>		0,44	NEWNHAM, R. M. & CARSLISLE, A., 1969
<i>Salix alba</i>		0,35 – 0,38	SMILDE, K. W., 1973
<i>Sorbus aucuparia</i>	< 0,18		GRUPPE, W. & SEITZ, P., 1962
<i>Syringa vulgaris</i>	< 0,15		GRUPPE, W. & SEITZ, P., 1962
<i>Taxus x media</i>		0,36	GOIUN, F. R. & LINK, C. B., 1966

LARSEN et al. (1978) fanden bei gut mit Phosphor versorgten *Pseudotsuga menziesii* (P = 0,22 %) eine geringere Frühfrost- (Knospen und Nadeln) und Tieffrosthärte (Nadeln), gegenüber Pflanzen mit geringerem P-Gehalt (P = 0,11 %). LARSEN et al. (1978) stellten ebenso wie PELLETT (1973) höhere Stickstoffgehalte (hier 1,91 % N) in Pflanzen mit hohem Phosphorgehalt fest.

### Tieffrost

In beiden Versuchsjahren konnte für *Rosa* 'Sommerabend' ein eindeutiger Zusammenhang zwischen steigenden P-Gehalten und steigenden REL-Werten nachgewiesen werden. Die Variante PÜ wurde jeweils am stärksten geschädigt und enthielt sig. mehr Phosphor und Stickstoff als die anderen beiden Varianten. Im Januar 2004 enthielt PÜ - wie bereits beim Frühfrosttest festgestellt - sig. weniger Glucose und Fructose, im Januar 2005 sig. mehr Prolin als PN bzw. P0.

Für *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' wurden für die Tieffrostphase unterschiedliche Ergebnisse ermittelt. Im Januar 2004 ermittelte weder die CF- noch die EL-Messung eine Beziehung zwischen P-Gehalt und REL-Werten. Die Variante PÜ erreichte aber den geringsten  $F_v/F_m$  Wert bei  $-10\text{ °C}$ . Im Januar 2005 sanken die REL-Werte bei steigenden P-Gehalten, während die CF-Messung das Absinken der  $F_v/F_m$  Werte bei steigendem P-Gehalt dokumentierte. Die gewählten Methoden kamen somit zu einem genau gegenteiligen Ergebnis, was durch das Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0,48$  verdeutlicht wurde. Dies widerspricht den Ergebnissen von BINDER & L'HIRONDELLE (zit in. BURR et al., 2001), die eine Korrelation von  $r^2 = 0,97$  zwischen beiden Methoden nachgewiesen haben. Es könnte sich hierbei um einen Fehler bei der EL-Messung gehandelt haben, da es nur in diesem Tieffrosttest zum Absinken der REL-Werte bei sinkenden Frosttemperaturen gekommen ist. Dies widersprach den der EL-Messung zugrunde liegenden Theorien (Vergleich Kapitel 2). Im Versuchsjahr 2003/2004 sowie im Frühfrosttest November 2004 konnten, wie erwartet, gute Korrelationen von 0,87 bis 0,91 erreicht werden.

In der Literatur sind kaum Untersuchungen zum Einfluss des Phosphors auf die Tieffrosthärte vorhanden. MEYER (1965) ermittelte für *Forsythia x intermedia* höhere Tieffrostschäden bei hohen Stickstoffgaben parallel zu hohen Phosphorgaben. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen für *Rosa* 'Sommerabend'. Bei einem negativen Einfluss einer höheren Phosphordüngung kam es zu einem Anstieg des Stickstoffgehaltes in der Pflanze.

### **Spätfrost**

Im Spätfrosttest April 2004 konnte für  $-8\text{ °C}$  ein deutlicher Zusammenhang zwischen P-Gehalt und REL-Werten gezeigt werden. Für die Testtemperaturen  $-5\text{ °C}$  und  $-10\text{ °C}$  war dies nicht der Fall. Die Variante PÜ erreichte jedoch jeweils die höchsten REL-Werte. Hier ist aber anzumerken, dass sich die Variante PN bei  $-8\text{ °C}$  und  $-10\text{ °C}$  ebenso stark gegenüber den jeweiligen Kontrollwerten veränderte wie die Variante PÜ. Beiden Varianten war ein gegenüber der Variante P0 geringerer Glucose- und Fructosegehalt gemein.

Für *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' konnte im April 2004 keine Beziehung zwischen REL-Werten und P-Gehalt nachgewiesen werden. Die Variante PÜ erreichte

aber die höchsten REL-Werte und die niedrigsten  $F_v/F_m$  Werte aller Varianten. PÜ enthielt am meisten Phosphor und am wenigsten Fructose (beides sig.).

**Fazit:** Ein erhöhter Phosphorgehalt hat sich bei beiden Arten negativ auf die Früh-, Tief- und Spätfrosthärte ausgewirkt. Die Variante PÜ enthielt aber auch häufig mehr Stickstoff als PN oder P0. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von LARSEN et al. (1978), die bei hohen Phosphorgehalten ebenfalls hohe Stickstoffgehalte bei *Pseudotsuga menziesii* feststellten. MALCOLM & FREEZAILLAH (1975) führen erhöhte Frühfrostschäden nach einer Phosphordüngung bei *Picea sitchensis* auf einen verzögerten Wachstumsabschluss zurück. Ein hoher Phosphorgehalt wirkte sich daher nur indirekt auf die Frosttoleranz aus.

## 7. Zusammenfassende Diskussion

Zur leichteren Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit sind in den Tabellen 11.1 und 11.2 im Anhang (S. 168) alle der Autorin bis März 2006 bekannten Arbeiten zum Thema Frosthärte und Düngung aufgelistet. Auffällig ist die überproportional häufige Verwendung von *Picea*, *Pinus* oder *Pseudotsuga*. Untersuchungen an laubabwerfenden Gehölzen haben sich meist mit *Malus domestica* oder *Prunus persica* befasst. Keine dieser Literaturstellen kann direkt mit einer anderen Untersuchung verglichen werden. Alle Autoren haben, sofern überhaupt verzeichnet, verschiedene Materialien (Sämlinge, Stecklinge, alte Bäume, Naturstandorte) bzw. Testobjekte (Sprosstücke, Wurzeln, Nadeln) verwendet. Eine ähnlich große Variation findet sich auch in der Verwendung der Methoden: Neben der Verbräunung sind die visuelle Bonitur (vB) und die Elektrische Leitfähigkeitsmessung (EL) die am häufigsten angewandten Methoden. Die bisher verfügbaren Zusammenstellungen von LARSEN (1976a) und BIGRAS et al. (2001) haben zwar den untersuchten Nährstoff und die Pflanzenart aufgeführt, Angaben zu Temperaturbereichen, verwendeten Methoden oder Testobjekten wurden dagegen nicht verzeichnet. Wie aus den Tabellen 11.1 und 11.2 ersichtlich, sind diese Angaben oftmals nicht verfügbar, was den Vergleich der verschiedenen Versuche weiter erschwert.

In Tabelle 7.1 sind die in der Literatur gefundenen Effekte aus der Zusammenstellung im Anhang (Tab. 11.1 und 11.2) getrennt nach negativem (-), positivem (+) und neutralem (0) Einfluss aufsummiert. Die Kategorie "neutral" enthält dabei auch die Untersuchungen, die uneinheitliche Ergebnisse (+-, 0+ oder 0-) hervorgebracht haben.

**Tabelle 7.1: Einfluss von Stickstoff, Phosphor und Kalium auf die Frosttoleranz in Literaturberichten** (FF = Frühfrost, TF = Tieffrost, SF = Spätfrost, ? = keine Angabe des Frostzeitpunktes).

Nährstoff		?	FF	TF	SF		
Stickstoff	-	17	-	6	7	-	6
	+	6	+	7	1	+	1
	0	22	0	17	4	0	3
Phosphor	-	5	-	6	2	-	1
	+	4	+	2	3	+	4
	0	10	0	1	2	0	1
Kalium	-	5	-	3	3	-	3
	+	15	+	10	4	+	5
	0	17	0	5	4	0	0

In den meisten Fällen wird der untersuchte Frostzeitpunkt (Früh-, Tief- oder Spätfrost) angegeben. Viele Untersuchungen verzichten aber auf eine genaue Angabe. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse ist der Testzeitpunkt aber zwingend notwendig. Nach LENNARTSSON (2003) sind Früh- und Spätfrostphasen die kritischen Zeitpunkte für das Überleben der Pflanzen, da zu diesen Terminen die Frosttoleranz noch oder bereits wieder niedrig ist, so dass Fröste erhebliche Schäden anrichten können. In diesem Zusammenhang sind auch die Versuche von BERGAN (1958) und LARSEN (1976a) zu erwähnen: BERGAN (1958) fand einen sig. positiven Einfluss der Stickstoffdüngung auf die Früh- und Tieffrosttoleranz bei *Picea abies*. Im Spätfrosttest zeigte sich dagegen ein sig. negativer Effekt. LARSEN (1976a) konnte bei 4-jährigen *Pseudotsuga menziesii* Sämlingen im Früh- und Tieffrost einen sig. negativen Effekt der Stickstoffdüngung nachweisen, während im Spätfrosttest kein Einfluss mehr zu erkennen war. Diese beiden Versuche verdeutlichen die Wichtigkeit der Angabe des Testzeitpunktes. Eine Überprüfung der Versuche, die keinen Testzeitpunkt angeben, könnte eine veränderte Interpretation des Einflusses des untersuchten Nährstoffes mit sich bringen. Die meisten Untersuchungen ohne Zeitangabe hatten den Einfluss von Stickstoff oder Kalium als Versuchsfrage.

Bei den Experimenten, die unter Angabe des Testzeitpunktes veröffentlicht wurden, wird Stickstoff am häufigsten eine negative oder keine Wirkung (meist Frühfrost) zugeschrieben. Die Kaliumdüngung wird besonders im Frühfrost als positiv bewertet, wogegen die Einschätzung des Effektes der Phosphordüngung im Frühfrost negativ, im Tief- und Spätfrost aber eher positiv ausfällt. Nur fünf Arbeiten haben sich mit allen drei Frostzeitpunkten befasst. Dabei handelt es sich um *Calluna vulgaris* (SÆBØ et al., 2001), *Picea abies* (BERGAN, 1958; KOSKELA, 1970), *Pinus sylvestris* (KOSKELA, 1970), *Picea sitchensis* (JALKANEN et al., 1998) und *Pseudotsuga menziesii* (LARSEN, 1976a).

Viele Autoren haben sich gezielt nur mit dem Einfluss der Düngung auf die Frühfrosttoleranz befasst. Hypothese dieser Versuche ist die Annahme, dass die Düngung durch eine verlängerte Wachstumsperiode die Abhärtung verzögert und dadurch die Frühfrosttoleranz vermindert.

## Eigene Ergebnisse

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse dieser Arbeit den o.a. Literaturangaben gegenübergestellt. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass es sich bei den verfügbaren Literaturstellen hauptsächlich um Ergebnisse mit Freilandpflanzen handelt. Diese Ergebnisse sind daher nicht unbedingt auf die erste Winterperiode stecklingsvermehrter Gehölze übertragbar.

## Stickstoff

Eine erhöhte Stickstoffdüngung hat sich negativ auf die Frosthärte von stecklingsvermehrten *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' ausgewirkt. Sowohl im Stickstoffversuch als auch im K/N-Versuch konnte eine Verringerung der Frosthärte durch erhöhte Stickstoffdüngung gezeigt werden.

Die erhöhte Stickstoffversorgung könnte bei beiden Arten zu einer verlängerten Wachstumsperiode und damit zu einer verzögerten Abhärtung geführt haben (nicht bonitiert). Die Frühfrosthärte wurde durch eine erhöhte Stickstoffversorgung erniedrigt. Im Tieffrost ist ebenfalls der negative Einfluss des erhöhten Stickstoffgehaltes sichtbar geworden. Die Variante NÜ erreichte jeweils sig. die höchsten REL-Werte (Ausnahme *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' -15 °C). Für den Spätfrost konnten keine statistisch abgesicherten Aussagen getroffen werden, da sich die Varianten nicht sig. voneinander unterschieden. Die Variante NÜ erreichte aber bei jeder Temperatur die höchsten REL-Werte. Die in der Literatur teilweise vertretene Meinung, dass die Wirkung hoher Stickstoffgaben mit einer erhöhten Kaliumdüngung abgemildert werden könne, konnte nicht pauschal bestätigt werden. Im Rahmen der Versuche zur vorliegenden Arbeit wurde vielmehr ein gegenteiliger Effekt beobachtet: Bei einem hohen N-Gehalt und gleichzeitig hohem K-Gehalt stiegen die REL-Werte an (Vergleich K/N Versuch Januar 2004, *Rosa* 'Sommerabend', Abb. 5.5).

KELLEY (1972) hat für stecklingsvermehrte *Pyracantha coccinea* ebenfalls einen negativen Effekt einer Stickstoffdüngung gefunden. Hierbei hat es sich um einen Containerversuch im Freiland gehandelt, die Bonitur der Pflanzen erfolgte erst im Mai, eine genauere Festlegung auf Früh-, Tief- oder Spätfrostschäden ist daher nicht möglich. Für stecklingsvermehrte *Cornus alba*, *Forsythia x intermedia* (PELLETT, 1973) und *Juniperus chinensis* 'Hetzii' (PELLETT & WHITE, 1969a) konnte weder im

Spross noch in den Wurzeln ein Effekt der Stickstoffdüngung auf die Frühfrosthärte festgestellt werden. Arbeiten jüngeren Datums und solche mit anderen Testzeitpunkten sind nicht verfügbar.

### **Kalium**

Für Kalium sind keine eindeutigen Ergebnisse gefunden worden, *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' reagierten unterschiedlich auf eine erhöhte K-Gabe. So zeigte sich bei *Rosa* 'Sommerabend' im Frühfrost ein positiver, im Spätfrost jedoch ein negativer Effekt der vermehrten K-Düngung auf die Frosthärte. Bei *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' wurde die Frosthärte dagegen nicht von gesteigerten K-Gaben beeinflusst.

Es konnte somit keine eindeutig positive Wirkung von Kalium auf die Frosthärte gefunden werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen für andere stecklingsvermehrte Gehölze. Bei stecklingsvermehrten *Pyracantha coccinea* zeigte die Kaliumdüngung keinen Einfluss auf die Frosttoleranz (KELLEY, 1972). BEATTIE & FLINT (1973) ermittelten für stecklingsvermehrte *Forsythia x intermedia* eine geringere Tieffrosthärte. CHANDLER (1954) berichtet von einem negativen Effekt einer Kaliumübersorgung, da dadurch die Aufnahme anderer Nährstoffe, wie Magnesium oder Calcium vermindert würde. Düngeempfehlungen, die eine bessere Abhärtung durch zusätzliche Kaliumgaben postulieren, sind daher in Frage zu stellen und können durch die Autorin nicht bestätigt werden.

### **Phosphor**

Ein erhöhter Phosphorgehalt hat sich im Phosphorsteigerungsversuch bei beiden Arten negativ auf die Früh-, Tief- und Spätfrosthärte ausgewirkt. Die jeweils am stärksten geschädigte Variante PÜ enthielt aber auch immer am meisten Stickstoff. Somit hat die erhöhte Phosphordüngung zu einer stärkeren Stickstoffaufnahme geführt. LARSEN et al. (1978) kamen bereits bei *Pseudotsuga menziesii* zum gleichen Ergebnis.

Die einzige verfügbare Untersuchung mit stecklingsvermehrten Gehölzen bei unterschiedlicher P-Düngung wurde von PELLETT (1973) veröffentlicht. Bei *Cornus alba* und *Forsythia x intermedia* sank die Frühfrosthärte nach erhöhter P-Düngung sowohl

im Spross als auch in den Wurzeln. Im gleichen Versuch konnte PELLETT (1973) aber keinen Einfluss des Stickstoffs nachweisen, so dass es sich hier, im Gegensatz zu den eigenen Ergebnissen, um einen Effekt handelt, der explizit der erhöhten P-Düngung zugeschrieben werden kann.

### **Nährstoffverhältnis K/N**

Das Verhältnis von **K/N** konnte nur selten mit Frostschäden in Verbindung gebracht werden. In diesen Fällen lag das K/N-Verhältnis bei geringen Spross-Frostschäden tendenziell höher als bei stärkeren Spross-Frostschäden. BENZIAN & FREEMAN (1967) ermitteln bei *Picea sitchensis*-Sämlingen ebenfalls die geringsten Frostschäden bei einem hohen K/N-Verhältnis ( $K/N = 1,125$ ). Ein hohes K/N-Verhältnis ist daher zur Verminderung von Frostschäden anzustreben. Insgesamt konnte aber kein eindeutiger Einfluss des K/N-Verhältnisses nachgewiesen werden.

Das als höchste Variante geplante Verhältnis von 2 (400 mg K / 200 mg N) konnte in der vorliegenden Arbeit nicht erreicht werden. Trotz gesteigerter Kaliumgabe ist es zu keiner erhöhten Aufnahme bei *Rosa* 'Sommerabend' gekommen. Dieses Phänomen wurde bereits von LARSEN et al. (1978) beschrieben: Bei Versuchen mit *Pseudotsuga menziesii* konnte ab einem Kaliumgehalt von 0,65 % trotz höherer Düngung keine weitere Steigerung des K-Gehaltes erreicht werden.

### **Zucker**

Höhere Glucose- und Fructosegehalte haben sich im Stickstoffversuch positiv auf die Frosthärte ausgewirkt. Im K/N- bzw. Phosphorversuch schwankten die Gehalte der Varianten sehr stark, auffällig war aber dennoch der höhere Glucose- und Fructosegehalt der geringer geschädigten Varianten. Nach SCHILLING (2000) führt Stickstoffüberschuss zur Verminderung des Kohlehydratgehaltes, weil der zur vermehrten Bildung organischer Stickstoffverbindungen verwendete C-Anteil nicht mehr zur Kohlehydratablagerung zur Verfügung steht. Diese Einschätzung deckt sich mit den in der vorliegenden Arbeit gefundenen Ergebnissen: Bei höherem Stickstoffgehalt war der Glucose- und Fructosegehalt unabhängig von der Versuchsanstellung erniedrigt.

## Prolin

Die Akkumulation von Prolin ist meist in Zusammenhang mit Trockenstress (ASPINALL & PALEG, 1981) oder Salzstress (KREEB, 1996) untersucht worden. Ein höherer Prolingehalt wird dabei mit einem höheren Toleranzniveau in Verbindung gebracht. In Frosthärteversuchen ohne Düngungssteigerung ist ebenfalls eine gute Korrelation gefunden worden (KAROLEWSKI & PUKACKI, 1995). Für Untersuchungen der Frosthärte mit Veränderungen der Düngegaben scheint Prolin dagegen weniger geeignet zu sein. Bei *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' zeigt sich ein negativer Einfluss eines höheren Prolingehaltes, bis auf wenige Ausnahmen, nur im Zusammenhang mit erhöhten Stickstoffgehalten. Prolin muss daher eher als Stickstoffspeicherform und nicht als Stressindikator angesehen werden.

## Chlorophyllfluoreszenzmessung

Neben dem Einfluss der Düngung ist auch die Eignung der Chlorophyllfluoreszenzmessung zur Überprüfung der Frosttoleranz bei stecklingsvermehrten Gehölzen untersucht worden. Zur Interpretation wurde dabei ausschließlich das Verhältnis  $F_v/F_m$  herangezogen. Dieses Verhältnis der variablen zur maximalen Fluoreszenz hat sich in den vergangenen Jahren zu einem wichtigen und leicht messbaren Parameter zur Überprüfung des physiologischen Zustandes des Photosyntheseapparates entwickelt (KRAUSE & WEIS, 1991). Für viele verschiedene Spezies liegt der normale Bereich des  $F_v/F_m$  Verhältnisses bei  $\sim 0,8$  (BJÖRKMAN & DEMMIG, 1987).

Mehrere Untersuchungen haben in den vergangenen Jahren auch die Eignung zur Messung der Frosttoleranz gezeigt. Gute Ergebnisse wurden für *Pinus contorta*, *Pinus sylvestris* (LINDGREN & HÄLLGREN, 1993), *Pseudotsuga menziesii* (FISKER et al., 1995) und *Picea glauca* (GILLIES & BINDER, 1997) gefunden. Bei diesen Versuchen wurden jedoch keine unterschiedlichen Düngegraden untersucht.

Die Chlorophyllfluoreszenzmessung wurde an *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'-Pflanzen des K/N-Versuchs und im Phosphorversuch an zwei verschiedenen Tagen nach erfolgtem Frost durchgeführt. Die erste Messung erfolgte wenige Stunden nach Beendigung des Frosttestes, die zweite Messung drei Tage später. Dabei wurden unterschiedliche Ergebnisse ermittelt. Die zweite Messung korrelierte hierbei besser mit der EL-Messung. Dasselbe Phänomen fand ÖGREN (1999a) bei Herkunftsver-

suchen mit *Salix viminalis*: Zwei Tage nach Beendigung des Frühfrosttestes konnten nur geringe Unterschiede zwischen den Herkünften ermittelt werden. Die  $F_v/F_m$  Werte lagen zwischen 0,75 und 0,78. Bei einer erneuten Messung 12 Tage nach erfolgtem Frosttest wurden  $F_v/F_m$  Werte zwischen 0,30 und 0,80 gemessen. Der Grund hierfür liegt in der Messmethodik der gewählten Verfahren. Nach LENNARTSSON (2003) dient die Elektrolytmethode der Feststellung des primären Frostschadens, während die Chlorophyllfluoreszenzmethode das Ausmaß des sekundären Frostschadens ermittelt. Dieser kann sich aber erst einige Zeit nach dem Frostereignis ausprägen, eine zeitnahe Messung ist daher nicht ausreichend interpretierbar. PALTA et al. (1978) erwähnen, dass die Elektrolyte nicht nur von abgestorbenen Zellen, sondern auch von noch lebenden aber geschädigten Zellen abgegeben werden. Geschädigte Zellen, die mit der EL-Messung erfasst werden, können daher zum Teil noch Photosynthese betreiben und werden bei der CF-Messung als geringer geschädigt erfasst.

Bei der Chlorophyllfluoreszenzmessung handelt es sich um eine sehr empfindliche Messmethode. Die zu untersuchenden Pflanzen müssen das gleiche physiologische Alter haben, dunkeladaptiert und gleichmäßig gewässert sein. Unter diesen Voraussetzungen kann diese Methode erfolgreich in Frosttests eingesetzt werden (CALKINS & SWANSON, 1990). Der Nachteil liegt in der Beschränkung auf chlorophyllhaltiges Material, eine Messung der Wurzelfrosttoleranz ist damit zwangsläufig ausgeschlossen. Vorteilhaft ist die nicht destruktive Anwendung dieser Methode. Dies erlaubt eine längere Beobachtung der gleichen Pflanze oder des gleichen Blattes (bzw. der gleichen Nadel bei Nadelgehölzen). Die Chlorophyllfluoreszenzmessung ist daher sehr gut zur Beobachtung der Ab- bzw. Enthärtung geeignet. In der vorliegenden Arbeit ist diese Methode, soweit der Autorin bekannt, zum ersten Mal zur Frosthärtebestimmung unterschiedlich gedüngter Varianten verwendet worden. Dabei wurde bei der Ermittlung der Schädigungen der Pflanzen eine gute Übereinstimmung mit der Elektrischen Leitfähigkeitsmessung festgestellt ( $r^2 = 0,87$  bis  $0,91$ ; statistisch nicht abgesichert). Ein weiterer Vorteil ist außerdem die gleichzeitige Anwendung der visuellen Bonitur sowie der CF-Messung an den gleichen Pflanzen. Dies ist bei der EL-Messung je nach Versuchsfrage nicht immer möglich.

## 8. Zukunftsaussichten

In allen drei Versuchsjahren hat sich gezeigt, dass eine Nährstoffüberprüfung zeitnah zum jeweiligen Frosttermin nötig ist. Die Nährstoffgehalte verändern sich während des Herbstes und Winters. Ein Zusammenhang zwischen Mineralstoffgehalten und Frosttoleranz ist daher nur bei zeitgleicher Analyse erkennbar. Dies bedeutet zwar einen erheblichen Mehraufwand an Laborarbeiten, die Ergebnisse sind aber ohne diesen Aufwand nur bedingt interpretierbar. Einige der in der Literatur vorhandenen Untersuchungen beurteilen ganze Winterperioden auf der Grundlage von Mineralstoffgehalten des vorausgegangenen Herbstes oder des nachfolgenden Frühjahres. So haben HAWKINS et al. (1995) von September bis März monatlich Frosttests durchgeführt, eine Mineralstoffanalyse erfolgte aber nur im September und April.

Die in der Literatur verfügbaren Ergebnisse sind kaum untereinander vergleichbar. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden je nach Autor verschiedene Pflanzenteile mit unterschiedlichen Methoden und Temperaturbereichen untersucht. Um eine einheitliche Beurteilung der Düngewirkung auf die Frosthärte zu ermöglichen, müssten aber alle Pflanzen unter den gleichen Bedingungen getestet werden. Dies erfordert eine Standardisierung in folgender Weise:

1. Einheitliche Vorbehandlung, d. h. zeitlich definierte Akklimatisierung in der Klimakammer (bspw. 2 h bei +5 °C)
2. Definierte Programmierung der Klimakammer (Abkühlung / Auftauen mit 5 °C / h, Dauer der Tiefsttemperatur 8 h, Definition der sinnvollen Temperaturstufen)
3. Verwendung mehrerer Methoden zur Frosttoleranzprüfung

Es müssen verlässliche, möglichst nicht destruktive Methoden entwickelt werden. Einen guten Ansatz bietet dabei die Chlorophyllfluoreszenzmethode, die aber chlorophyllhaltiges Material benötigt und daher bei laubabwerfenden Gehölzen nur bedingt einsetzbar ist. Auf genetischer Ebene wäre die Untersuchung der Genexpression im Zusammenhang mit der Ab- und Enthärtung ein moderner Ansatz zu Analyse der Frosttoleranz verschiedener Gehölze (Vergleich Kapitel 1, S. 9).

Eine große Bedeutung für das Überleben der Pflanzen haben die Wurzeln sowie der Wurzelhals. Stirbt letzterer ab, kann sich die gesamte Pflanze nicht regenerieren (LARCHER, 1994). Die Wurzeln sind bisher häufig nur unter verschiedenen Lagerungsbedingungen untersucht worden (siehe auch WANG & ZWIAZEK, 1999). Den Einfluss der Düngung auf die Frosttoleranz der Wurzeln haben nur PELLETT (1973) und HAVIS et al. (1972) untersucht. Um die Düngewirkung auf die Frosttoleranz der Pflanze insgesamt zu beurteilen, müssten daher sowohl der Spross als auch die Wurzeln untersucht werden. Die praktische Umsetzung ist aber fraglich. Unter Laborbedingungen können ganze Pflanzen untersucht werden, will aber der Praktiker seine Freilandpflanzen oder große Containerpflanzen überprüfen, ist eine Untersuchung der Wurzeln kaum praktikabel.

Neben der reinen Düngerwirkung muss auch das Substrat betrachtet werden. In der vorliegenden Arbeit handelt es sich um diesjährige in Töpfen gesteckte Jungpflanzen. Die Substratzusammensetzung (Torf : Sand, 3 : 1) wurde dabei nicht variiert, die Autorin hält einen Einfluss aber für möglich. Torf gilt als "frostanziehend", die Wurzeln könnten somit negativ beeinflusst worden sein. Wird gerade dieser Pflanzenteil stark geschädigt, ist evtl. das Überleben der gesamten Pflanze gefährdet. Eine Überprüfung verschiedener Substratzusammensetzungen hält die Autorin daher für unbedingt notwendig.

Eine ähnliche Bedeutung für die Wurzelfrosttoleranz hat die Topfgröße. Werden die Stecklinge in kleinen Töpfen bewurzelt und überwintert, können die Frostschäden höher ausfallen, als in großen Töpfen. Bei größeren Töpfen kommt aber das Argument des Platzbedarfes zum Tragen. Die Entwicklung eines geeigneten Systems kann daher ein ebenfalls lohnenswerter Ansatz zur Verbesserung der Frosttoleranz stecklingsvermehrter Gehölze sein.

## 9. Kritik der eigenen Arbeit und Verbesserungsvorschläge

Bei jeder praktischen Versuchsanstellung ergeben sich im Laufe der Arbeit Verbesserungsmöglichkeiten. Im Folgenden sollen daher einige Punkte aufgearbeitet werden:

Die statistische Auswertung wurde durch die geringe Fallzahl und eine teilweise sehr hohe Streuung erschwert. Besonders im K/N-Versuch 2003 mussten häufig offensichtliche Unterschiede der REL-Werte als nicht sig. bezeichnet werden. Der Grund hierfür war die hohe Anzahl an Varianten, in diesem Fall fünf Düngestufen. Eine bessere Aussage hätte mit drei bis vier Düngestufen bzw. einer höheren Fallzahl erreicht werden können. Letztere war aber mit über 2500 bewurzelten Stecklingen (Versuchsjahr 2004/2005) bereits an der bearbeitbaren Kapazitätsgrenze angekommen. Außerdem konnte der Einfluss der Anzahl der Varianten auf die statistische Absicherung der Daten im Vorhinein nicht vorhergesehen werden.

In der Literatur werden teilweise LT50 Werte bei der Elektrolytmethode angegeben, aufgrund der geringen Fallzahl und der hohen Streuung musste in der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet werden.

Die EL-Messung der Wurzeln hat nicht immer zu sinnvollen Aussagen geführt. Die innerhalb der einzelnen Varianten teilweise aufgetretenen Schwankungen (z. B. REL-Wert bei  $-5\text{ °C}$  höher als bei  $-8\text{ °C}$ , Vergleich Abb. 3.3) sind auf unzureichende Auswaschung zurückzuführen, so dass kleinste Substratrückstände an den Wurzeln die Leitfähigkeitsmessung gestört haben. Eine Verbesserung kann auch durch eine veränderte Probenauswahl erreicht werden. In der vorliegenden Arbeit wurden nur die 2 cm Material unterhalb des Wurzelhalses verwendet. BIGRAS (1997) hat Fein- und Hauptwurzeln sowie das ganze Wurzelsystem von *Picea mariana*-Containerpflanzen untersucht. Die Feinwurzeln erreichten bei allen Temperaturen ( $-5\text{ °C}$  bis  $-25\text{ °C}$ ) die höchsten, das gesamte Wurzelsystem die niedrigsten REL-Werte. Die Ergebnisse für die Hauptwurzeln lagen dazwischen. Enthalten die Proben jedoch einen zu hohen Anteil Feinwurzeln, so kann es zur Ermittlung eines überhöhten Frostschadens kommen (BIGRAS & CALMÉ, 1994). Die richtige Interpretation von Wurzel REL-Werten erfordert daher Kenntnis über die Anteile an Fein- und

Grobwurzeln in der untersuchten Probe. STUDER et al. (1978) gehen davon aus, dass eine richtige Beurteilung der Wurzelfrosthärte nur möglich ist, wenn die Frosthärte von jungen und älteren Wurzeln ermittelt wird.

Die visuelle Bonitur hat nur "lebend" und "abgestorben" aufgezeichnet. Eine prozentuale Ermittlung hätte eine genauere Aussage ermöglicht. Des Weiteren wäre die Verwendung einer größeren Anzahl von Bonitурpflanzen sinnvoll gewesen. Dies hätte jedoch eine erhöhte Anzahl bewurzelter Stecklinge erfordert (s.o.).

Die CF-Messung wurde direkt nach dem Frosttest und drei Tage später durchgeführt. Dabei ist eine hohe Streuung zwischen den Einzeldaten aufgetreten. Eine weitere Messung wäre hierbei empfehlenswert, um eine genauere Differenzierung zwischen den Varianten zu ermöglichen, die Streuung zu vermindern und damit die statistische Auswertung zu erleichtern (siehe auch Kapitel 7). Denkbar ist auch die Messung an verschiedenen Geweben. In der vorliegenden Arbeit ist jeweils das zweitjüngste Blatt verwendet worden. An den gleichen Pflanzen könnten auch ältere Blätter oder Sprossstücke gemessen werden. Dadurch könnte die Frosttoleranz der gesamten Pflanze besser beurteilt werden.

*Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' wurden jeweils frostfrei in einem ungeheizten Gewächshaus überwintert. Die Temperaturen sanken dabei kaum unter 0 °C. Dadurch wurde evtl. die zweite Stufe der Abhärtung nicht oder nicht einheitlich erreicht. Um diesen Punkt zu klären, wäre eine Abhärtung unter kontrollierten Bedingungen anzuraten.

Nach LINDÈN (2002) sind indirekte Indikatoren, wie die Bestimmung des Zuckergehaltes, meist nur für einige Pflanzen oder Gewebe, aber nicht als generelle Methode zur Ermittlung der Frosthärte geeignet. Diese Methoden ermitteln die Frosthärte ohne Frosteinwirkung und müssten daher für jede Pflanzenart neu kalibriert werden. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit. Es zeigte sich zwar ein tendenziell positiver Einfluss bei höheren Glucose- oder Fructosegehalten, differenzierte Aussagen sind aber nicht möglich gewesen. Zu überdenken ist auch, ob die Zuckerbestimmung aufgrund der Beeinflussung der Kohlehydratsynthese durch die verschiedenen Dünge­stufen in diesem Zusammenhang überhaupt eine sinnvolle

Methode darstellt. Zumindest in der vorliegenden Arbeit konnten weder der Glucose- noch der Fructosegehalt als geeignete Indikatoren für die Frosttoleranz herausgearbeitet werden.

Die angestrebten Düngenniveaus sind nicht immer erreicht worden, so ist z. B. im Stickstoffversuch (Kapitel 3) keine ausgeprägte Überversorgung eingetreten. Im K/N-Versuch (Kapitel 5) konnte das höchste Verhältnis (400 mg K / 200 mg N; K/N = 2) nicht erreicht werden. Vorversuche wären daher angebracht gewesen. Außerdem ist die Auswahl der Varianten im Stickstoffversuch zu überdenken: Die Varianten NÜ und N0 stellen letztendlich nur zwei extreme Stickstoffvarianten dar. Eine weitere flüssig gedüngte Variante mit einem mittleren Stickstoffgehalt von bspw. 260 mg N / L, hätte als Kontrolle verwendet werden sollen. Damit wären differenzierte Aussagen möglich gewesen.

Die Probenahmen zur Zucker-, Prolin- und Mineralstoffbestimmung sind als Mischproben erfolgt. Dadurch war eine statistische Auswertung gemeinsam mit den REL-Werten nicht möglich. Die Gegenüberstellungen konnten daher nicht statistisch abgesichert werden. Wäre die Probenahme getrennt nach Testtemperaturen erfolgt, hätten die Inhaltsstoffe pro Temperatur (z. B. bei -5 °C) mit den REL-Werten (ebenefalls -5 °C) zusammen ausgewertet können.

Ungeachtet der o. a. Ausführungen konnten dennoch eindeutige Einflüsse der Düngung erkannt werden: So hat sich die erhöhte Stickstoffdüngung negativ auf Frühfrosthärte von *Rosa* 'Sommerabend' und *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia' ausgewirkt. Die in der Literatur häufig angegebene positive Wirkung des Kaliums konnte in keinem Versuch eindeutig bestätigt werden. Es hat sich im Gegenteil kein oder ein uneinheitlicher Effekt eines erhöhten K-Gehaltes gezeigt. Eine erhöhte Phosphordüngung wirkte sich über eine vermehrte Stickstoffaufnahme negativ auf die Früh-, Tief- und Spätfrosthärte beider Arten aus. Für alle drei untersuchten Mineralstoffe ist dennoch eine moderate, ausgewogene Düngung zu empfehlen. Die mangelhaft versorgten Pflanzen wurden zwar geringer geschädigt, alle Mangelpflanzen zeigten jedoch eindeutigen Kümmerwuchs.

Die Chlorophyllfluoreszenzmessung zeigte sich auch bei unterschiedlichen Dünge-  
stufen als geeignete Methode zur Bestimmung der Frosthärte chlorophyllhaltigen Ma-  
terials. Die Literaturzusammenstellungen in den Tabellen 11.1 und 11.2 sind von der  
Autorin aufgestellt worden und in dieser Ausführlichkeit bisher nicht bekannt gewe-  
sen. Sie bilden eine gute Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten zum Thema  
Frosthärte und Düngung.

## 10. Literaturverzeichnis

- AKCA, Y.; MURADODLU, F.; ASMA, B. M.** (2000): Study on the frost tolerance of important apricot (*Prunus armenica* L.) cultivars. *Acta Horticulturae* 525: [http://www.actahort.org/books/525/525\\_51.htm](http://www.actahort.org/books/525/525_51.htm)
- ÅKERMAN, A.** (1927): Studien über den Kältetod und die Kälteresistenz der Pflanzen. Berlingska Boktryck. Lund, Schweden
- ALAZARD, P.** (1985): Frost resistance of maritime pine. *Annales de recherches sylvicoles, Association Foret-Cellulose, France*, 165-217
- ALDEN, J. & HERMANN, R. K.** (1971): Aspects of the cold hardiness mechanism in plants. *Bot. Rev.* 37: 37-142
- ALDHOUS, J. R.** (1972): Nursery practices. UK For. Comm. Bull. No. 43
- ALT, D.** (1990): Düngen in der Baumschule – Freilandquartiere. Thalacker, Braunschweig
- ALSCHER, R. G. & CUMMING, J. R.** (1990): Stress Responses in Plants: Adaptation and Acclimation Mechanisms. Wiley-Liss, New York
- ANDRE, P. & WEERTS, J.** (1973): Developpement hivernal de semis de douglas. *Can. J. For. Res.* 3: 222-227
- ANONYM** (2006): Aminosäuretabelle. [www.biologe.de](http://www.biologe.de)
- ANONYM** (2001): Bundesgehölzsichtung – *Prunus laurocerasus*. [http://www.gehoelzsichtung.de/index\\_prunus.htm](http://www.gehoelzsichtung.de/index_prunus.htm)
- ARGENT, G. & MCFARLANE, M.** (2002): Rhododendrons in Horticulture and Science, International Rhododendron Conference, Edinburgh
- ARONSSON, A.** (1980): Frost hardiness in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): 2. Hardiness during winter and spring in young trees of different mineral nutrient status. *Studia Forestalia Suecica* 155: 1-27
- ARONSSON, A.; INGESTAD, T.; LÖÖF, L.-G.** (1976): Carbohydrate metabolism and frost hardiness in pine and spruce seedlings grown at different photoperiods and thermoperiods. *Physiol. Plant.* 36: 127-132
- ARORA R.** (2004): Adaptations and Responses of Woody Plants to Environmental Stresses. Haworth Press, Binghamton, NY, USA
- ARORA, R.; LIM, C.-C; KREBS, S. L.; MARIAN, C. O.** (2002): A genetic and physiological study of *Rhododendron* cold hardiness. In: ARGENT, G. & MCFARLANE, M. (2002): 208-216

- ARORA, R. & PALTA, J. P.** (1986a): Protoplasmic swelling as a Symptom of Freezing Injury in Onion Bulb Cells. *Plant Physiol.* 82: 625-629
- ARORA, R. & PALTA, J. P.** (1986b): Protective effect of extracellular calcium on the rate of K<sup>+</sup> leakage and the loss of turgidity in freeze injured onion cells. *Plant Physiol.* 80 (Supplement): 108
- ARORA, R. & PALTA, J. P.** (1991): A Loss in the Plasma Membran ATPase Activity and Its Recovery Coincides with Incipient Freeze-Thaw Injury and Postthaw Recovery in Onion Bulb Scale Tissue. *Plant Physiol.* 95: 846-852
- ARTLIP, T.; CALLAHAN, A.; BASSETT, C.; WISNIEWSKI, M.** (1997): Seasonal expression of dehydrin gene in sibling deciduous and evergreen genotypes of peach. *Plant Mol Biol.*, 33: 61-70,
- ARTUS, N. N.; UEMURA, M.; STEPONKUS, P. L.; GILMOUR, S. J.; LIN, C.; THOMASHOW, M. F.** (1996): Constitutive expression of the cold-regulated *Arabidopsis thaliana* *COR15a* gene affects both chloroplast and protoplast freezing tolerance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93: 13404-13409
- ASASHINA, E.** (1961): Intracellular freezing and frost resistance in egg-cells of the sea urchin. *Nature (Lond.)* 191: 1263-1265
- ASPINALL, D. & PALEG, L. G.** (1981): Proline Accumulation: Physiological Aspects. In: PALEG, L. G. & ASPINALL, D. (1981): 205-241
- ATTERSON, J.** (1966): Slow-acting inorganic fertilizers. Rep. On For. Res., Forestry Commission, 21-23
- BAUER, H.; HARRASSER, J.; BENEDETTA, G.; LARCHER, W.** (1971): Jahrgang der Temperaturresistenz junger Holzpflanzen im Zusammenhang mit ihrer jahreszeitlichen Entwicklung. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 84: 561-570
- BATES, L. S.; WALDEN, R. P.; TEARE, J. D.** (1973): Rapid determination of free proline in water stress studies. *Plant Soil* 39: 205
- BÄRTELS, A.** (1995): Der Baumschulbetrieb. Ulmer, Stuttgart
- BEATTIE, D.J. & FLINT, H.L.** (1973): Effect of K Level on Frost Hardiness of Stems of *Forsythia x intermedia* Zab. 'Lynwood'. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 98: 539-541
- BELTRAM, V.** (1958): Bor als Frostschutz. *AFZ* 10: 147-148
- BENZIAN, B.** (1966): Effects of nitrogen and potassium concentrations in conifer seedlings on frost damage. Extracted from Report on Rothamsted Expt. Sta., Harpenden, Herts, England, For. Abstr. 28: 510

- BENZIAN, B. & FREEMAN, S. C. R.** (1967): Effect of "late-season" N and K topdressings applied to conifer seedlings and transplants, on nutrient concentrations in the whole plant and on growth after transplanting. Report on forest research, Great Britain, Forestry Commission London, S. 135-140
- BENZIAN, B.; BROWN, R. M.; FREEMAN, S. C. R.** (1974): Effect of late-season topdressings of N (and K) applied to conifer transplants in the nursery on their survival and growth on British forest sites. *Forestry* 47: 153-184
- BERGAN, J.** (1958): Et gjødslingsforsøk i en yngre granplanting i troms. *Det Norske Skogsforsøksvesen*, 15/3, 253-273
- BIGRAS, F. J.** (1997): Root cold tolerance of black spruce seedlings: viability tests in relation to survival and growth. *Tree Physiology* 17: 311-318
- BIGRAS, F. J. & CALMÉ, S.** (1994): Viability tests for estimating root cold tolerance of black spruce seedlings. *Can. J. of For. Res.* 24: 1039-1048
- BIGRAS, F. J. & COLOMBO, S. J.** (2001): *Conifer Cold Hardiness*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London
- BIGRAS, F. J. & D'AOUST, A.** (1992): Hardening and dehardening of shoots and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and long days. *Can. J. For. Res.* 22: 388-396
- BIGRAS, F. J. & D'AOUST, A. L.** (1993): Influence of photoperiod on shoot and root frost tolerance and bud phenology of white spruce seedlings (*Picea glauca*). *Can. J. For. Res.* 23: 219-228
- BIGRAS, F. J.; GONZALEZ, A.; D'AOUST, A. L.; HÉBERT, C.** (1996): Frost hardiness, bud phenology and growth of containerized *Picea mariana* seedlings grown at three nitrogen levels and three temperature regimes. *New For.* 12: 243-259
- BIGRAS, F. J.; RIOUX, J. A.; PAQUIN, R.; THERRIEN, H.-P.** (1989a): Influence of photoperiod and temperature on the evolution of frost tolerance, growth, water content, sugars, starch and proline of shoots and roots of juniper (*Juniperus chinensis* L. 'Pfitzerana'). *Can. J. Plant Sci.* 69: 305-316
- BIGRAS, F. J.; RIOUX, J. A.; PAQUIN, R.; THERRIEN, H.-P.** (1989b): Effect of late fertilization on container-grown junipers (*Juniperus chinensis* L. 'Pfitzeriana Aurea'). *Can. J. Plant Sci.* 69: 967-977
- BIGRAS, F. J.; RYPPÖ, A.; LINDSTRÖM, A.; STATTTIN, E.** (2001): Cold acclimation and deacclimation of shoots and roots of conifers seedlings. In: BIGRAS, F. J. & COLOMBO, S. J. (2001): 57-88
- BINDER, W. D. & L'HIRONDELLE, S. J. L.** (2001); unpublished data. zit. in: BURR et al. (2001): 382

- BJÖRKMAN, O. & DEMMING, B.** (1987): Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyllfluorescence characteristics at 77K among vascular plant of diverse origins. *Planta* 170: 489-504
- BLÖDNER, C.; SKROPPIA, T.; JOHNSEN, Ø.; POLLE, A.** (2005): Freezing tolerance in two Norway spruce (*Picea abies* [L.] progenies is physiologically correlated with drought tolerance. *Journal of Plant Physiology* 162: 549-558
- BOEHRINGER** (1984): Methoden der enzymatischen Lebensmittelanalytik mit Einzelreagentien. Boehringer Mannheim GmbH, Biochemica
- BOROVSKII, G. B.; STUPNIKOVA, I. V.; ANTIPINA, A. I.; VLADIMIROVA, S. V.; VOINIKOV, V. K.** (2002): Accumulation of dehydrin-like proteins in the mitochondria of cereals in response to cold, freezing, drought and ABA treatment, *BMC Plant Biology*, Vol. 2, [http:// www.biomedcentral.com/ 1471/2229/2/5](http://www.biomedcentral.com/1471/2229/2/5)
- BROWN, L. M. & HELLEBUST, J. A.** (1978): Sorbitol and proline as intracellular osmotic solutes in the green alga *Stichococcus bacillaris*. *Can. J. Bot.* 56: 676-679
- BRUNOLD, CH.; RÜEGSEGGER, A.; BRÄNDLE, R.** (1996): Stress bei Pflanzen. Haupt, Wien
- BRUNS** (2003): Sortimentkatalog 2003 / 2004.
- BURGTORF, H.** (1968): Exempel paa kaliumbrist hos gran planterad paa aakermark. Rapp. Uppsats. afd. Skogsekol. Skogshoegs. Stockholm 7: 1-19
- BURKE, M. J.; GUSTA, L. V.; QUAMME, H. A.; WEISER, C. J.; LI, P. H.** (1976): Freezing and injury in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 27: 507-528
- BURR, K. E.; HAWKINS, C. D. B.; L'HIRONDELLE, S. J.; BINDER, W. D.; GEORGE, M. F.; REPO, T.** (2001): Methods for measuring Cold Hardiness of Conifers. In: BIGRAS, F. J. & COLOMBO, S. J. (2001): 367-401
- CAFFREY, M.; FONSECA, V.; LEOPOLD, A. C.** (1988): Lipid-Sugar Interactions. Relevance to anhydrous biology. *Plant Physiol.* 86: 754-758
- CALKINS, J. B. & SWANSON, B. T.** (1990): The Distinction between Living and Dead Plant Tissue – Viability Tests in Cold Hardiness Research. *Cryobiology* 27: 194-211
- CAPE, J. N.; LEITH, I. D.; FOWLER, D.; MURRAY, M. B.; SHEPPARD, L. J.; EAMUS, D.; WILSON, R. H. F.** (1991): Sulphate and ammonium in mist impair the frost hardening of red spruce seedlings. *New Phytol.* 118: 119-126
- CAPORN, S. J. M.; RISAGER, M.; LEE, J. A.** (1994): Effect of nitrogen supply on frost hardiness in *Calluna vulgaris* (L.) Hull. *New Phytol.* 128: 461-468

- CARRIER, L. E.** (1943): Environment and rose hardiness. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 61: 573-580
- CHANDLER, W. H.** (1954): Cold resistance in horticultural plants: a review. Proc. Am. Soc. Hortic. Sci. 64: 552-572
- CHANDLER, W. H.** (1913): The killing of plant tissues by low temperature. Mo. Agr. Expt. Sta. Res. Bul. 8
- CHARLON, J. C.** (1958): Die Düngewirkung von Thomasphosphat bei Waldbäumen. Phosphorsäure 18: 220-224
- CHEN, T. H. H.; BURKE, M. J.; GUSTA, L. V.** (1995): Freezing Tolerance in Plants: An Overview. In: LEE, R. E.; WARREN, G. J.; GUSTA, L. V. (1995): 115-135
- CHERRY, J. H.** (1989): Environmental Stress in Plants. Springer, Berlin
- CHRISTERSSON, L.** (1975): Frost-hardiness in *Pinus sylvestris* L. seedlings at different levels of potassium and calcium fertilization. Can. J. For. Res. 5: 738-740
- CHRISTERSSON, L.** (1973): The effect of inorganic nutrients on water economy and hardiness of conifers. Part 1: The effect of varying potassium, calcium, and magnesium levels on water content, transpiration rate, and the initial phase of development of frost hardiness of *Pinus sylvestris* L. seedlings. Studia Forestalia Suecica 103: 1-26
- CHRISTOFF, M. A.** (1939): Untersuchungen über die Kältefestigkeit der Wintergerste. Z. Pflanzenzucht 23: 47-90
- COLEMAN, M. D.; HINCKLEY, T. M.; MCNAUGHTON, G.; SMIT, B. A.** (1992): Root cold hardiness and native distribution of subalpine conifers. Can. J. For. Res. 22: 932-938
- COLOMBO, S. J.** (1994): Timing of Cold Temperature Exposure Affects Root and Shoot Frost Hardiness of *Picea mariana* Container Seedlings. Scand. J. For. Res. 9: 52-59
- COLOMBO, S. J. & SMITH, W. A.** (1987): Response of containerized black spruce and jack pine seedlings to fertilization rate and growing medium. Ont. Minist. Nat. Res. For. Res. Rep. No. 116
- COLOMBO, S. J.; ZHAO, S.; BLUMWALD, E.** (1995): Frost Hardiness Gradients in Shoot and Roots of *Picea mariana* Seedlings. Scand. J. For. Res. 10: 32-36
- COOLING, E. N.** (1967): Frost resistance in *Eucalyptus grandis* following the application of fertilizer borate. Rhod. Zamb. Mal. J. Agric. Res. 5/1: 97-100
- COOPER, J. R. & WIGGANS, C. B.** (1929): A study of the effect of commercial fertilizers on the performance of peach trees. Ark. Agr. Expt. Sta. Bul. 239

- CORCUERA, L.; MORALES, F.; ABADIA, A.; GIL-PELEGRIN, E.** (2005): The effect of low temperatures on the photosynthetic apparatus of *Quercus ilex* subsp. *ballota* at its lower and upper altitudinal limits in the Iberian peninsula and during a single freezing-thawing cycle. *Trees* 19: 99-108
- CORREIA, P. J. & MARTINS-LOUCÃO, M. A.** (1997): Leaf nutrient variation in mature carob (*Ceratonia siliqua*) trees in response to irrigation and fertilization. *Tree Physiology* 17: 813-819
- COULTAS, L.** (1965): The influence of fertilizers on the nutrition and the performance of certain grown evergreens. Ph.D. thesis. University of Minnesota, St. Paul, MN, USA
- COX, S. E. & STUSHNOFF, C.** (2001): Temperature related shifts in soluble carbohydrate content during dormancy and cold acclimation in *Populus tremuloides*. *Can. J. For. Res.* 31: 730-737
- CRANE, H. L.** (1924): Experiments in fertilizing peach trees. West. Va. Agr. Expt. Sta. Bul. 183
- CROWE, J. H.; CARPENTER, J. F.; CROWE, L. M.; ANCHORDOGUY, T. J.** (1990): Are freezing and dehydration similar stress vectors? A comparison of modes of interaction of stabilizing solutes with biomolecules. *Cryobiology* 27: 219-231
- CULLINAN, F. P.** (1931): Some relationships between tree response and internal composition of shoots of the peach. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 28: 1-5
- DALEN, L. S. & JOHNSEN, Ø.** (2004): CO<sub>2</sub> enrichment, nitrogen fertilization and development of freezing tolerance in Norway spruce. *Trees* 18: 10-18
- DAVIES, D. D.** (1987): *The Biochemistry of Plants, Volume 12: Physiology of Metabolism.* Academic Press, New York
- DEHAYES, D. H.; INGLE, M. A.; WAITE, C. E.** (1989): Nitrogen fertilization enhances cold tolerance of red spruce seedlings. *Can. J. For. Res.* 19: 1037-1043
- DEHAYES, D. H.; SCHABERG, P. G.; HAWLEY, G. J.; BORER, C. H.; CUMMING, J. R.; STRIMBECK, G. R.** (1997): Physiological implications of seasonal variation in membrane-associated calcium in red spruce mesophyll cells. *Tree Physiology* 17: 687-695
- DELAUNEY, A. J. & VERMA, D. P. S.** (1993): Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal* 4: 215-223
- DEXTER, S. T.** (1932): Investigations of the Hardiness of Plants by Measurement of Electrical Conductivity. *Plant Physiology* 7: 63-78
- DEXTER, S. T.; TOTTINGHAM, W. E.; GRABER, L. F.** (1930): Preliminary results in measuring the hardiness of plants. *Plant Physiology* 5: 215-223

- DIEREND, W.** (1995): Düngung im Freiland. In: BÄRTELS, A. (1995): 381-412
- DILLER, K. R.** (1975): Intracellular freezing: effect of extracellular supercooling. *Cryobiology* 12: 480-485
- DORSEY, M. J. & BUSHNELL, J. W.** (1920): The Hardiness Problem. *Proc. Amer. Soc Hort Sci.* 17: 210-224
- DURYEA, M. L.** (1985): Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, OR, USA
- DURZAN, D. J.** (1968): Nitrogen metabolism of *Picea glauca*. I. Seasonal changes of free amino acids in buds, shoot apices, and leaves, and the metabolism of uniformly labelled <sup>14</sup>C-L-arginine by buds during the onset of dormancy. *Can. J. Bot.* 46: 909-919
- EDGERTON, L. J.** (1957): Effect of nitrogen fertilization on cold hardiness of apple trees. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 70: 40-45
- EDGERTON, L. J. & HARRIS, R. W.** (1950): Effect of nitrogen and cultural treatment on Elberta peach fruit bud hardiness. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 55: 51-55
- EDWARDS, I. K.** (1989): The Effects of Mineral Nutrition on Hardening-Off of Conifer Seedlings. In: LANDIS, T. D. (1989): 98-102
- EDWARDS, G. S.; PIER, P. A.; KELLY, J. M.** (1990): Influence of ozone and soil magnesium status on the cold hardiness of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings. *New Phytol.* 115: 157-164
- ERHARDT, W.; GÖTZ, E.; BÖDEKER, N.; SEYBOLD, S.** (2000): Zander – Handwörterbuch der Pflanzennamen. 16. Auflage, Ulmer, Stuttgart
- EVERS, G.** (1998): Düngelexikon für den Gartenbau. 1. Auflage, Thalacker Medien, Braunschweig
- FAULKNER, R.** (1959): Summary of recent research into nitrogen manuring of conifers in nursery seedbeds in Scotland and northern England. *Rep. on Frost. Res.*, 141-160
- FAUSTOV, V. V.** (1965): The effect of mineral nutrition on the winter hardiness of gooseberries. *Agrobiologia* 2: 289-290
- FISKER, S. E.; ROSE, R.; HAASE, D. L.** (1995): Chlorophyll fluorescence as a measure of cold hardiness and freezing stress in 1 + 1 Douglas fir seedlings. *For. Sci.* 41: 564-575
- FOWLER, D.; CAPE, J. N.; DEANS, J. D.; LEITH, I. D.; MURRAY, M. B.; SMITH, R. I.; SHEPPARD, L. J.; UNSWORTH, M. H.** (1989): Effects of acid mist in the frost hardiness of red spruce seedlings. *New Phytol.* 113: 321-335

- GILLIAM, C. H. & WRIGHT, R. D.** (1977): Effect of four nitrogen levels on soil, soil solution and tissue nutrient levels in three container-grown *Ilex* cultivars. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 102: 662-664 (zit. in: ALT (1990): S. 19)
- GILLIES, S. L. & BINDER, W. D.** (1997): The effect of subzero temperatures in the light and dark on cold-hardened, dehardened and newly flushed white spruce (*Picea glauca* [Moench.] Voss) seedlings. New For. 13: 91-104
- GLEASON, J. F.; DURYEA, M.; ROSE, R.; ATKINSON, M.** (1990): Nursery and field fertilization of 2+0 ponderosa pine seedlings: the effect on morphology, physiology, and field performance. Can. J. For. Res. 20: 1766-1772
- GLERUM, C.** (1985): Frost hardiness of coniferous seedlings: principles and applications. In: DURYEA, M. L. (1985): 107-123
- GORKE, H.** (1906): Über chemische Vorgänge beim Erfrieren der Pflanzen. Landwirtsch. Vers. Sta. 65: 149-160
- GOODALE, G. L.** (1885): Gray' Botanical Textbook, Vol. 2. Physiological Botany. Ivison, Blakeman, Taylor, New York (zit. in: LEVITT, J. (1956): 8)
- GOUIN, F. R. & LINK, C. B.** (1966): The effects of various levels of nitrogen, phosphorus, and potassium on the growth and chemical composition of *Taxus media* cv. 'Hatfieldi'. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 89: 702-705 (zit. in: ALT, D. (1990): 19)
- GRANT, C. A.; STOBBE, E. H.; RACZ, G. J.** (1984): The effect of N and P fertilization on winter survival of winter wheat under zero tilled and conventionally tilled management. Can. J. Soil Sci. 64: 293-296
- GREEN, W. J. & BALLOU, F. H.** (1904): Winter killing of peach trees. Report of investigations in the Lake Erie fruit belt. Ohio Agr. Expt. Sta. Bul. 157: 115-134
- GRUPPE, W. & SEITZ, P.** (1962): Untersuchungen über die Nährstoffversorgung von Baumschulgehölzen. I. Mangelerscheinungen in Gefäßversuchen und in Baumschulen. Gartenbauwissenschaft 27: 247-268 (zit. in: ALT, D. (1990): 19)
- GUSTA, L. V.; FOWLER, D. B.** (1977): Factors affecting the cold survival of winter cereals. Can. J. Plant Sci. 57: 213-219
- GUY, C. L.; NIEMI, K. J.; BRAMBL, R.** (1985): Altered gene expression during cold acclimation in spinach. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 82: 3673-3677
- HALE, M. & ORCUTT, D. M.** (1987): The physiology of plants under stress. Wiley & Sons, Canada
- HÄLLGREN, J.-E. & ÖQUIST, G.** (1990): Adaptations to Low Temperatures. In: ALSCHER, R. G. & CUMMING, J. R. (1990): 265-293

- HANSEN, J. M.** (1992): Effects of nutritional factors on frost hardening in *Larix leptolepis* (Sieb. & Zucc.) Gord. Scand. J. For. Res. 7: 183-192
- HARBORNE, J. B.** (1995): Ökologische Biochemie – Eine Einführung. Spektrum, Heidelberg
- HARVEY, R. B.** (1918): Hardening process in plants and developments from frost injury. J. Agr. Res. 15: 83-112
- HAVIS, L. & LEWIS, I. P.** (1938): Winter injury of fruit trees in Ohio. Ohio Agr. Expt. Sta. Bul. 596
- HAVIS J. R.; FITZGERALD, R. D.; MAYNARD, D. N.** (1972): Cold hardiness response of *Ilex crenata* Thunb. cv. Hetzii roots to nitrogen source and potassium. Hort. Sci. 7: 195-196
- HAWKINS, B. J.; DAVRADOU, M.; PIER, D.; SHORTT, R.** (1995): Frost hardiness and winter photosynthesis of *Thuja plicata* and *Pseudotsuga menziesii* seedlings grown at three rates of nitrogen and phosphorous supply. Can. J. For. Res. 25: 18-28
- HAWKINS, B. J.; HENRY, G.; WHITTINGTON, J.** (1996): Frost hardiness of *Thuja plicata* and *Pseudotsuga menziesii* seedlings when nutrient supply varies with season. Can. J. For. Res. 26:1509-1513
- HEBER, U. & SANTARIUS, K. A.** (1964): Loss of adenosine triphosphate synthesis caused by freezing and its relationship to frost hardiness problems. Plant Physiol. 39: 712-719
- HEINKE, F.** (1983): Untersuchungen zur stressinduzierten Prolinakkumulation in unterschiedlichen pflanzlichen Geweben. Dissertation, Humboldt Universität Berlin
- HELLERGREN, J.** (1981): Frost hardiness development in *Pinus sylvestris* seedlings in response to fertilization. Physiologia Plantarum 52 : 297-301
- HEUER, B.** (1999): Osmoregulatory Role of Proline in Plants Exposed to Environmental Stresses. In: PESSARAKLI, M. (1999): 675-695
- HIGGINS, B. B.; WALTON, G. P.; SKINNER, J. J.** (1943): The effect of nitrogen fertilizer on cold injury of peach trees. Ga. Agr. Expt. Sta. Bul. 226
- HINCHA, D. K.; SIEG, F.; SCHMITT, J. M.** (1998): Protection of thylakoid membranes from freeze-thaw damage by proteins. In: LI, P.H. & CHEN, T. H. H. (1998): 143-152
- HINESLEY, L. E.; PHARR, D. M.; SNELLING, L. K.; FUNDERBURK, S. R.** (1992): Foliar raffinose and sucrose in four conifer species: relationship to seasonal temperature. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 117: 852-855

- HIRSH, A. G.** (1987): Vitrification in Plants as a Natural form of Cryoprotection. *Cryobiology* 24: 214-228
- HIRSH, A. G.; WILLIAMS, R. J.; MERYMAN, H. T.** (1985): A novel method of natural cryoprotection – Intracellular glass formation in deeply frozen *Populus*. *Plant Physiol.* 79: 41-56
- HUNTER, J.** (1775): Experiments on animals and vegetables, with respect to the power of producing heat. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 65: 446-458  
(zit. in: LEVITT, J. (1956): 5)
- HUYTSEE, R. V.; WEISER, C. J.; LI, P. H.** (1967): Cold acclimation in *Cornus stolonifera* under natural and controlled photoperiod and temperature. *Bot. Gazette* 128: 200-205
- ILJIN, W. S.** (1933): Über den Kältetod der Pflanzen und seine Ursachen. *Protoplasma* 20: 105-124
- INGESTAD, T.** (1959): Studies on the nutrition of forest tree seedlings. II. Mineral nutrition of spruce. *Physiol. Plantarum* 12: 568-593 (zit. in: ALT (1990): 19)
- JALKANEN, R. E.; REDFERN, D. B.; SHEPPARD, L. J.** (1998): Nutrient deficits increase frost hardiness in Sitka spruce (*Picea sitchensis*) needles. *For. Ecol. Manag.* 107: 191-201
- JELLINEK, H. H. G.** (1972): Water structure and the water polymer interface. Plenum, New York
- JOINER, J. N. & ELLIS, J. R.** (1964): Effects of varying levels of nitrogen and potassium on cold hardiness of 'George Tabor' azaleas. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 77: 525-527
- JOKELA, A.** (1998): Structural and Functional Responses of Scots pine needles to nutrient stress. *Acta Universitatis Ouluensis, Oulu, A* 308
- JOKELA, A.; SARJALA, T.; HUTTUNEN, S.** (1998): The structure and hardening status of Scots pine needles at different potassium availability levels. *Trees* 12: 490-498
- JÖNSSON, A. M.; KIVIMÄENPÄÄ, M.; STJERNQUIST, I.; SUTINEN, S.** (2001): Frost hardiness in bark and needles of Norway spruce in southern Sweden. *Trees* 15: 171-176
- KALDY, M. S. & FREYMAN, S.** (1984): Free amino acids in unhardened and cold-hardened winter wheat crowns. *J. Plant Nutr.* 7: 1103-1111
- KAROLEWSKI, P. & PUKACKI, P. M.** (1995): Free proline as an indicator of the sensitivity of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) to low temperature. *Arbor. Kornickie* 40: 159-167

- KAWANA, A.; NAKAHARA, M.; SUGIMOTO, B.; HORUHATA, H.** (1964): The effect of fertilization on the growth and frost-damage of sugi (*Cryptomeria japonica* D.) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa* E.). J. Jap. For. Soc. 46: 355-363
- KELLEY, J.D.** (1972): Nitrogen and Potassium Rate Effects on Growth, Leaf Nitrogen and Winter Hardiness of *Pyracantha coccinea* 'Lalandi' and *Ilex crenata* 'Rotundifolia'. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 97(4): 446-448
- KENNARD, W. D.** (1949): Defoliation of Montgomerency sour cherry trees in relation to winter hardiness. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci 53: 129-133
- KERNER VON MARILAUN, A.** (1894): The natural history of plants. Vol. 1, part 2. Holt, New York (zit. in: LEVITT, J. (1956): 8)
- KIM, Y. T. & GLERUM, C.** (1995): Seasonal free amino acid fluctuations in red pine and white spruce needles. Can. J. For. Res. 25: 697-703
- KLEIN, R. M.; PERKINS, T. D.; MYERS, H. L.** (1989): Nutrient status and winter hardiness of red spruce foliage. Can. J. For. Res. 19: 754-758
- KOPITKE, J. C.** (1941): The effect of potash salts upon the hardening of coniferous seedlings. J. For. 39: 555-558
- KORDES** (2005): Rosen – Produktkatalog 2005/06. W. Kordes' Söhne, [www.kordes-rosen.com](http://www.kordes-rosen.com)
- KOSKELA, V.** (1970): On the occurrence of various damages on Norway spruce, scots pine, silver birch and sibirian larch in the forest fertilization experimental area in Kivisuo. Folia Forestalia 78: 1-25
- KRAUSE, G. H. & WEIS, E.** (1991): Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 42: 313-349
- KREEB, K. H.** (1996): Salzstress. In: BRUNOLD et al. (1996): 149-172
- KRÜSSMANN, G.** (1997): Die Baumschule. 6. Auflage, Parey, Berlin
- L'HIRONDELLE, S. J.; JACOBSON, J. S.; LASSOIE, J. P.** (1992): Acidic mist and nitrogen fertilization effects on growth, nitrate reductase activity, gas exchange, and frost hardiness of red spruce seedlings. New Phytol. 121: 611-622
- LANDIS, T. D.** (1989): Proceedings, Intermountain Forest Nursery Association, August 14-18, 1989, USDA Forest Service General Technical Report RM-184, Bismarck, North Dakota
- LARCHER, W.** (1976): Ökologie der Pflanzen. Ulmer, Stuttgart
- LARCHER, W.** (1994): Ökologie der Pflanzen. 5. Auflage, Ulmer, Stuttgart

- LARCHER, W.; HÄCKEL, H.; SAKAI, A.** (1985): Handbuch der Pflanzenkrankheiten, Band 1: Die nichtparasitären Krankheiten, 5. Lieferung: Meteorologische Pflanzenpathologie, Witterung und Klima als Umweltfaktoren, Kälte und Frost. Parey, Berlin
- LARSEN, J. B.** (1976): Untersuchungen über die Frostempfindlichkeit von Douglasienherkünften und über den Einfluss der Nährstoffversorgung auf die Frostresistenz der Douglasie. *Der Forst- und Holzwirt* 15: 299-302
- LARSEN, J. B.** (1976a): Frostresistenz der Douglasie (*Pseudotsuga menziessii* (Mirb.) Franco). Dissertation, Universität Göttingen
- LARSEN, J. B.; MUHLE, O.; LOHBECK, H.** (1978): Untersuchungen zur Bestandesbegründung der Douglasie. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, J. d. Sauerländer's Verlag, Frankfurt (Main)
- LEE, R. E.; WARREN, G. J.; GUSTA, L. V.** (1995): Biological Ice Nucleation and its Applications. American Phytopathological Society
- LENNARTSSON, M.** (2003): Cold Hardening and Dehardening in *Salix*. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea
- LEVITT, J.** (1956): The Hardiness of Plants. Academic Press, New York
- LEVITT, J.** (1962): A sulfhydryl-disulfide hypothesis of frost injury and resistance of plants. *J. Theoret. Biol.* 3: 355-391
- LEVITT, J.** (1966): Cryochemistry of plant tissue. *Cryobiology* 3: 243-251
- LEVITT, J.** (1966a): Winter Hardiness in Plants. In: MERYMAN (1996): 495-563
- LEVITT, J.** (1980): Responses of plants to environmental stresses, Vol. 1: Chilling, Freezing and high temperature stresses. Academic Press, New York
- LI, P. H. & CHEN, T. H. H.** (1998): Plant cold hardiness: molecular biology, biochemistry and physiology. Plenum Press, New York
- LI, P. H.; CHRISTERSSON, L.** (1993): Advances in plant cold hardiness. CRC Press, Boca Raton
- LI, P. H. & SAKAI, A.** (1978): Plant cold hardiness and freezing stress: Mechanisms of crop implications. Vol. 1, Academic Press, Inc., New York
- LI, P. H. & SAKAI, A.** (1982): Plant cold hardiness and freezing stress. Academic Press, Inc., New York
- LIM, C. C.; KREBS, S. L.; ARORA, R.** (1999): A 25kD dehydrin associated with genotype- and age-dependent leaf freezing tolerance in *Rhododendron*: a genetic marker for cold hardiness? *Theor. Appl. Genet.*, 99: 912-920

- LINDÉN, L.** (2002): Measuring Cold Hardiness in Woody Plants. Academic Dissertation, University of Helsinki
- LINDGREN, K. & HÄLLGREN, J. - E.** (1993): Cold acclimation of *Pinus contorta* and *Pinus sylvestris* assessed by chlorophyll fluorescence. *Tree Physiol.* 13: 97-106
- LÜDDERS, P. & HENZE, J.** (1971): Der Einfluss jahreszeitlich unterschiedlicher Stickstoffversorgung auf das Wachstum von Apfelbäumen VII. Der Einfluss auf die Frosthärte einjähriger Triebe. *Gartenbauwissenschaft* 36: 339-348
- LÜTTGE, U. & CLARKSON, D. T.** (1989): Mineral nutrition: Potassium. *Progress in Botany* 50: 51-73
- LYONS, J. M.** (1973): Chilling injury in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24: 445-466
- LYR, H.; FIEDLER, H.-J.; TRANQUILLINI, W.** (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Fischer, Stuttgart
- MALCOLM, D. C. & FREEZAILLAH, C. Y.** (1975): Early frost damage on Sitka spruce seedlings and the influence of phosphorous nutrition. *Forestry* 48: 139-145
- MARSCHNER, H.** (1995): Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London
- MARTEM'YANOV, P. B. & PSHINA, N. B.** (1973): Growth and over wintering of exotics under various conditions of soil and foliar dressing. *Byull. Gl. Bot. Sada* 87: 50-52
- MATZNER, F.** (1974): Einfluss steigender Stickstoffgaben auf die Frosthärte einjähriger Triebe der 'Schattenmorelle'. *Gartenbauwissenschaft* 39: 225-240
- MAZELIS, M.** (1980): Amino Acid Catabolism. In: MIFLIN, B. J. (1980): 541-567
- MAZUR, P.** (1969): Freezing injury in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 20: 419-445
- MCMUNN, R. L. & DORSEY, M. J.** (1935): Seven years results of the hardiness of Elberta fruit buds in a fertilizer experiment. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 32: 239-243
- MEDVEDEV, S. S.** (2005): Calcium Signaling System in Plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 52: 249-270
- MENGEL, K.** (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Fischer, Jena
- MERYMAN, H. T.** (1966): Cryobiology. Academic Press London, New York
- MEYER, M. M.** (1965): The influence of nutrition and root temperature on the dormant season nutrient content and spring growth of *Taxus x media* and *Forsythia x intermedia*. PhD Thesis, Cornell University, Ithaca, New York

- MIFLIN, B. J.** (1980): The Biochemistry of Plants. Volume 5: Amino Acids and Derivatives. Academic Press, New York
- MILLER, B.; TIMMER, V.; STAPLES, C.; FARINTOSH, L.** (1995): Exponential fertilization of white spruce greenhouse transplants at Orono Nursery. Ont. Minist. Res. Nat. Nursery Notes No. 130
- MITYGA, H. G. & LANPHEAR, F. O.** ( 1971): Factors influencing the cold hardiness of *Taxus cuspidata* roots. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 96: 83-87
- MOOR, H.** (1964): Die Gefrier-Fixation lebender Zellen und ihre Anwendung in der Elektronenmikroskopie. Z. Zellforsch. 62: 546-580
- MORI, T.** (1974): Seasonal changes of soluble nitrogen and free amino acids in *Cryptomeria japonica* seedlings. J. Jpn. For. Soc. 56: 347-352
- NCBI Datenbank:** <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez>
- NEWNHAM, R. M. & CARLISLE, A.** (1969): The nitrogen and phosphorus nutrition of seedlings of *Quercus robur* L. and *Q. petraea* (Mattuschka) Liebl..J. Ecol. 57: 271-284 (zit. in. ALT, D. (1990): 19)
- O'CARROL, N.** (1972): Chemical weed control and its effect on the response to K fertilization. Irish For. 29: 20-31
- ODLUM, K. D.; BLAKE, T J.; KIM, Y. T.; GLERUM, C.** (1993): Influence of photoperiod and temperature on frost hardiness and free amino acid concentration in black spruce seedlings. Tree Physiol. 13: 275-282
- ÖGREN, E.** (1997): Relationship between temperature, respiratory loss of sugar and premature dehardening in dormant Scots pine seedlings. Tree Physiology 17: 47-51
- ÖGREN, E.** (1999a): Fall frost resistance in willows used for biomass production. I. Characterization of seasonal and genetic variation. Tree Physiology 19: 749-754
- ÖGREN, E.** (1999b): Fall frost resistance in willows used for biomass production. II. Predictive relationships with sugar concentration and dry matter content. Tree Physiology 19: 755-760
- ÖQUIST, G. & MALMBERG, G.** (1989): Light and temperature dependent inhibition of photosynthesis in frost-hardened and un-hardened seedlings of pine. Photosynthesis Research 20: 261-277
- OTTEN, M.** (1992): Einfluss der Stickstoff- und Kaliumernährung auf das Wachstum und die Frostresistenz von Gehölzen. Studienarbeit, Uni Hannover
- PAHLSSON, A. M. B.** (1992): Influence of nitrogen fertilization on minerals, carbohydrates aminoacids and phenolic compounds in beech (*Fagus sylvatica* L.) leaves. Tree Physiol. 10: 93-100

- PALEG, L. G. & ASPINALL, D.** (1981): The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants. Academic Press, New York
- PALTA, J. P.** (1990): Stress interactions at the cellular and membran levels. HortScience 25: 1377-1381
- PALTA, J. P.; LEVITT, J.; STADELMANN, E. J.** (1977a): Freezing Injury in Onion Bulb Cells I. Evaluation of the conductivity method and analysis of ion and sugar efflux from injured cells. Plant Physiol. 60: 393-397
- PALTA, J. P.; LEVITT, J.; STADELMANN, E. J.** (1977b): Freezing Injury in Onion Bulb Cells. II. Post-thawing injury or recovery. Plant Physiol. 60: 398-401
- PALTA, J. P.; LEVITT, J.; STADELMANN, E. J.** (1978): Plant Viability Assay. Cryobiology 15: 249-255
- PALTA, J. P.; LI, P. H.** (1978): Cell membrane properties in relation to freezing injury In: LI, P. H. & SAKAI, A. (1978): 93-115
- PALTA, J. P. & WEISS, L. S.** (1993): Ice formation and freezing injury: an overview on the survival mechanisms and molecular aspects of injury and cold acclimation in herbaceous plants. In: LI, P. H. & CHRISTERSSON, L. (1993): 143-175
- PALTA, J. P. & LI, P. H.** (1980): Alterations in membrane transport properties by freezing injury in herbaceous plants: evidence against rupture theorie. Physiol. Planta 50. 169-175
- PALTA, J. P.; JENSEN, K. G.; LI, P. H.** (1982): Cell membrane alterations following a slow freeze-thaw cycle; ion leakage, injury and recovery. In: LI, P. H. & SAKAI A. (1982): 221-242
- PATTERSON, B. D. & GRAHAM, D.** (1987): Temperature and Metabolism. In: DAVIES, D. D. (1987): 153-200
- PELLETT, N. E.** (1973): Influence of Nitrogen and Phosphorus Fertility on Cold Acclimation of Roots and Stems of Two Container-Grown Woody Plant Species. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 98: 82-86
- PELLETT, H. M. & CARTER, J. V.** (1981): Effect of nutritional factors on cold hardiness of plants. Horticultural Reviews 3: 144-171
- PELLETT, N. E. & WHITE, D. B.** (1969): Effect of Soil Nitrogen and Soil Moisture Levels on the Cold Acclimation of Container Grown *Juniperus chinensis* 'Hetzii'. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 94: 457-459
- PELLETT, N. E. & WHITE, D. B.** (1969a): Relationship of Seasonal Tissue Changes to Cold Acclimation of *Juniperus chinensis* 'Hetzii'. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 94: 460-462

- PESSARAKLI, M.** (1995): Handbook of Plant and Crop Physiology. Dekker, New York
- PESSARAKLI, M.** (1999): Handbook of Plant and Crop Stress. Dekker, New York
- PIETILÄINEN, P. & LÄHDESMÄKI, P.** (1986): Free amino acid and protein levels, and (gamma)-glutamyl-transferase activity in *Pinus sylvestris* apical buds and shoots during the growing season. Scand. J. For. Res. 1: 387-395
- POMEROY, M. K. & SIMINOVITCH, D.** (1971): Seasonal cytological changes in secondary phloem parenchyma cells in *Robinia pseudoacacia* in relation to cold hardiness. Can. J. Bot. 49: 787-795
- PROEBSTING, E. L. JR.** (1961): Cold hardiness of Elberta peach fruit buds as influenced by nitrogen level and cover crops. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 77: 97-106
- PUKACKI, P. & PUKACKA, S.** (1987): Freezing stress and membrane injury of Norway spruce (*Picea abies*) tissues. Physiol. Plant. 69: 156-160
- PÜMPEL, B.** (1973): Über die Auswirkungen von Düngung und Mykorrhiza-Impfung auf Wachstum, Entwicklung, Mykorrhizabildung und Frostresistenz junger Fichten und Zirben. Dissertation, Leopold-Franzens Universität, Innsbruck
- PÜMPEL, B.; GÖBL, F.; TRANQUILLINI, W.** (1975): Wachstum, Mykorrhiza und Frostresistenz von Fichtenjungpflanzen bei Düngung mit verschiedenen Stickstoffgaben. European J. of Forest Pathology 5: 83-97
- R** (2005): <http://www.R-project.org>. Version 2.2.1
- RASMUSSEN, D. H. & MACKENZIE, A. P.** (1972): Effect of solute in ice-solution interfacial free energy: calculation from measured homogeneous nucleation temperatures. In: JELLINEK, H. H. G. (1972): 126-145
- RAWLINGS, C. O. & POTTER, G. F.** (1937): Unusual and severe winter injury to the trunks of McIntosh apple trees in New Hampshire. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 34: 44-48
- REDFERN, D. B. & CANNELL, M. G. R.** (1982): Needle damage in Sitka spruce caused by early autumn frosts. Forestry 55: 39-46
- REPO, T.; ZHANG, G.; RYYPÖ, A.; RIKALA, R.** (2000): The electrical impedance spectroscopy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) shoots in relation to cold acclimation. J. Exp. Bot. 51: 2095-2107
- RIKALA, R. & REPO, T.** (1997): The effect of late summer fertilization on the frost hardening of second-year Scots pine seedlings. New For. 14: 33-44

- ROHDE, J. & RÖBER, R.** (1983): Ertragsmerkmale, Substrat- und Blattmineralstoffgehalt bei *Forsythia*, *Lonicera* und *Philadelphus*. II. *Lonicera xylosteum*. Gartenbauwissenschaft 48: 202-209
- RÖBER, R. & ROHDE, J.** (1982): Ertragsmerkmale, Substrat- und Blattmineralstoffgehalt bei *Forsythia*, *Lonicera* und *Philadelphus*. I. *Forsythia x intermedia* 'Spectabilis'. Gartenbauwissenschaft 47: 102-110
- RÖBER, R. & ROHDE, J.** (1984): Ertragsmerkmale, Substrat- und Blattmineralstoffgehalt bei *Forsythia*, *Lonicera* und *Philadelphus*. III. *Philadelphus inodorus* L. var. *grandiflorus* A. Gray. Gartenbauwissenschaft 49: 77-84
- RYPPÖ, A.; REPO, T.; VAPAAVUORI, E.** (1998): Development of freezing tolerance in roots and shoots of Scots pine seedlings at nonfreezing temperatures. Can. J. For. Res. 28: 557-565
- SÆBØ, A.; HÅLAND, Å.; SKRE, O.; MORTENSEN, L.M.** (2001): Influence of Nitrogen and winter climate stresses on *Calluna vulgaris* (L.) Hull..Annals of Botany 88: 823-828
- SAKAI, A.** (1962): Studies on the frost hardiness of woody plants. 1. The causal relation between sugar content and frost hardiness. Contr. Inst. Low. Temp. Sci. B. 11: 1-40
- SAKAI, A. & LARCHER, W.** (1987): Frost Survival of Plants – Responses and Adaptation to Freezing Stress. Springer, Berlin
- SAKAI, A. & YOSHIDA, S.** (1968): The role of sugar and related compounds in variations of freezing resistance. Cryobiology 5: 160-174
- SALISBURY, F. B. & ROSS, C. W.** (1992): Plant Physiology. 4<sup>th</sup> edition, Wadsworth, Belmont
- SANTARIUS K. A. & HEBER, U.** (1967): Das Verhalten von Hill Reaktion und Photophosphorylierung isolierter Chloroplasten in Abhängigkeit vom Wassergehalt; II: Wasserentzug über CaCl<sub>2</sub>. Planta (Berl.) 73: 109-137
- SARJALA, T. & KAUNISTO, S.** (1993): Needle polyamin concentrations and potassium nutrition in Scots pine. Tree Physiol. 13: 87-96
- SARJALA, T.; TAULAVUORI, K.; SARVONEN, E.-M.; EDFAST, A.-B.** (1997): Does availability of potassium affect cold hardening of Scots pine through polyamine metabolism? Physiol. Plant. 99:56-62
- SATO, Y. & MUTO, K.** (1951): Factors affecting cold resistance in tree seedlings. II. On the effect of potassium salts. Res. Bull. Expt. For. Hokkaido Univ. 15: 81-96
- SATO, Y. & MUTO, K.** (1964): Factors affecting cold resistance in tree seedlings. 2. On the effect of potassium salts. Res. Bull. Coll. Exper. Forest., Hokkaido University 15: 81-96

- SCHILLING, G.** (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Ulmer, Stuttgart
- SCHOBERT, B.** (1979): Die Akkumulierung von Prolin in *Phaeodactylum tricornutum* und die Funktion der "compatible solutes" in Pflanzenzellen unter Wasserstress. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 92: 23-30
- SCHOBERT, B.** (1980): The importance of water activity and water structure during hyperosmotic stress in algae and higher plants. Biochem. Physiol. Pflanzen, 175: 91-103
- SCHÖPF, J. D.** (1788): Über die Temperatur der Pflanzen. Naturforsch. (Halle) 23: 1-36 (zit. in: LEVITT, J. (1956): 5)
- ŠEBÁNEK, J.** (1992): Plant Physiology. Elsevier, Amsterdam
- SHEPPARD, L. J.** (1994): Causal mechanisms by which sulphate, nitrate and acidity influence frost hardiness in red spruce: review and hypothesis. New Phytol. 127: 69-82
- SIKORSKA, E. & KACPERSKA, A.** (1982): Freezing-induced membrane alterations: injury or adaptation?. In: LI, P. H. & SAKAI, A. (1982): 261-272
- SIMINOVITCH, D.** (1981): Common and Disparate Elements in the Processes of Adaptation of Herbaceous and Woody Plants to Freezing – A Perspective. Cryobiology 18: 166-185
- SINGH, B.** (1999): Plant amino acids. Dekker, New York
- SKRE, O.** (1988): Frost resistance in forest trees: a literature survey. Medd. Nor. Inst. Skogforsk, 40 (9): 1-35
- SMALLEY, T. J. & DIRR, M. A.** (1986): The overwinter survival problems of rooted cuttings. The Plant Propagator, 34: 10-14
- SMALLWOOD, M.; & BOWLES, D. J.** (2002): Plants in a cold climate. Phil. Trans R. Soc. Lond. B. 357: 831-847
- SMILDE, K. W.** (1973): Phosphorus and micronutrient metal uptake by some tree species as affected by phosphate and lime applied to an acid sandy soil. Plant and Soil 39: 131-148 (zit. in: ALT, D. (1990): S. 19)
- SMITH, W. W. & TINGLEY, M. A.** (1940): Frost rings in fall fertilized McIntosh apple trees. Proc. Amer. Soc. Hort. Soc. 37: 110-112
- SMIT-SPINKS, B.; SWANSON, B. T.; MARKHART, A. H. III.** (1985): Changes in water relations, water flux, and root exudate abscisic acid content with cold acclimation of *Pinus sylvestris*. L.. Austr. J. Plant Physiol. 11: 431-441

- SOUTH, D. B.; DONALD, D. G. M.; RAKESTRAW, J. L.** (1993): Effect of nursery culture and bud status of freeze injury to *Pinus taeda* and *P. elliotii* seedlings. S. Afr. For. J. 166: 37-45
- SPETHMANN, W.** (1998): Factors Affecting Rooting of Difficult-to-Root Plants. Combined Proceedings International Plant Propagators' Society 48 : 200-205
- SPETHMANN, W.** (1992): Stecklingsvermehrung von Laubbaumarten. Deutscher Gartenbau 36(2): 42-48
- SPETHMANN, W. & HARMS, P.** (1993): Influence of fertilized substrate on rooting and growth of oak cuttings. Ann. Sci. Forestieres 50 (Suppl. 1): 308-313
- STAMP, P.** (1996): Niedrige Temperaturen. In: BRUNOLD et al. (1996): S. 71-88
- STEINERT, A. & BIELKA, S.** (1990): Die Bestimmung von freiem Prolin in gestressten Pflanzen. Arch. Züchtungsforschung Berlin 20: 199-204
- STEPONKUS, P.L.** (1984): Role of the plasma membrane in freezing injury and cold acclimation. Ann. Rev. Plant Physiol. 35: 543-584
- STEPONKUS, P. L. & LANPHEAR, F.O.** (1967): Refinement of the Triphenyl Tetrazolium Chloride Method of Determining Cold Injury. Plant Physiol. 42: 1423-1426
- STEPONKUS, P.L.; GOOD, G. L., WIEST, S. C.** (1976): Root hardiness of woody plants. Am. Nurseryman 144: 75-79
- STRANSKY, H.** (1999): Prolinbestimmung.  
[www.uni-tuebingen.de/abot/WS99/LA-GP.pdf](http://www.uni-tuebingen.de/abot/WS99/LA-GP.pdf)
- STRAUSS, G. & HAUSER, H.** (1986): Stabilization of lipid bilayer vesicles by sucrose during freezing. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 83: 2422-2426
- STUDER, E. J.; STEPONKUS, P. L.; GOOD, G. L.; WIEST, S. C.** (1978): Root hardiness of container-grown ornamentals. HortScience 13: 172-174
- STUSHNOFF, C.; SEUFFERHELD, M. J.; CREEGAN, T.** (1998): Oligosaccharides as endogenous cryoprotectants in woody plants. In: LI, P. H. & CHEN, T. H. H. (1998): 301-309
- SUDDS, R. H. & MARSH, R. S.** (1943): Winter Injury to Trunks of Young Bearing Apple Trees in West Virginia Following a Fall Application of Nitrate of Soda. American Society for Horticultural Science 42: 293-297
- TAIZ, L. & ZEIGER, E.** (2000): Physiologie der Pflanzen. Spektrum, Heidelberg
- TANAKA, Y.** (1974): Increasing cold resistance of container-grown douglas-fir seedlings. J. For. 72: 349-352

- TAULAVUORI, K.** (1998): Cell effusate pH in relation to frost resistance and views of its applications. *Acta Universitatis Ouluensis*, Oulu, A 313
- TAULAVUORI, E.; LAINE, K.; TAULAVUORI, K.; PAKONEN, T.; SAARI, E.** (1997): Winter hardening and glutathione status in the bilberry (*Vaccinium myrtillus*) in response to trace gases (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) and nitrogen fertilization. *Physiol. Plant.* 101:192-198
- TAULAVOURI, K; TAULAVOURI, E.; NIINIMAA, A.; LAINE, K.** (2001): Acceleration of frost hardening in *Vaccinium vitis-idaea* by nitrogen fertilization. *Oecologia* 127: 321-323
- TEZARA, W.; MARIN, O.; RENGIFO, E.; MARTINEZ, D.; HERRERA, A.** (2005): Photosynthesis and photoinhibition in two xerophytic shrubs during drought. *Photosynthetica* 43: 37-45
- THOMAS, F. M & AHLERS, U.** (1999): Effects of excess nitrogen on frost hardiness and freezing injury of above-ground tissue in young oaks (*Quercus petraea* and *Q. robur*). *New Phytol.* 144: 73-83
- THOMASHOW, M. F.** (1998): Role of Cold-Responsive Genes in Plant Freezing Tolerance. *Plant Physiol.*, 118: 1-7
- THOMPSON, G. A.** (1989): Molecular Changes in Membrane Lipids During Cold Stress. In: CHERRY, J. H. (1989): 249-257
- THOMPSON, J. F.** (1980): Arginine Synthesis, Proline Synthesis, and Related Processes. In: MILFIN, B. J. (1980): 375-402
- TIMMIS, R.** (1972): The cold hardening of one-season Douglas-fir and lodgepole pine seedlings under artificial conditions. International Report BC-35, Pacific Forest Res. Gen. Can. For. Ser. Victoria, B. C.
- TIMMIS, R.** (1974): Effect of nutrient stress on growth, bud set, and hardiness in Douglas-fir seedlings. Proc. North Amer. Containerized Forest Tree Seedlings, Symposium, Great Plains Agric. Council Publications No. 68: 187-193
- TIMMIS, R. & WORRALL, J.** (1975): Environmental control of cold acclimation in Douglas fir during germination, active growth, and rest. *Can. J. For. Res.* 5: 464-477
- TINGLEY, M. A.; SMITH, W. W.; PHILLIPS, T. G.; POTTER, G. F.** (1938): Experimental production of winter injury to the trunks of apple trees by applying nitrogenous fertilizers in the autumn. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 36: 177-180
- TOIVONEN, A.; RIKALA, R.; REPO, T.; SMOLANDER, H.** (1991): Autumn colouration of first year *Pinus sylvestris* seedlings during frost hardening. *Scand. J. For. Res.* 6: 31-39

- TUKEY, H. B. & MEYER, M. M.** (1968): Nutrient applications during the dormant season. Comb. Proc. Int. Plant Prop. Soc. 16: 306-310
- VAN DEN DRIESCHE, R.** (1980): Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on Douglas-fir nursery growth and survival after outplanting. Can. J. For. Res. 10: 65-70
- VAN DEN DRIESCHE, R.** (1983): Growth, survival and physiology of Douglas-fir seedlings following root wrenching and fertilization. Can. J. For. Res. 13: 270-278
- VERMA, D. P. S. & ZHANG, C.-S.** (1999): Regulation of Proline and Arginine Biosynthesis in Plants. In: SINGH, B. (1999): 249-265
- VIART, M.** (1965): Fertilizing poplars. Bulletin du service de Culture et d'Etudes du Peuplier et du Saule, Paris: 1-37, For. Abstr. 27:5934
- WANG, Y. & ZWIAZEK, J. J.** (1999): Effects of storage temperature on physiological characteristics of fall-lifted white spruce (*Picea glauca*) bareroot seedlings. Can. J. For. Res. 29: 679-686
- WAY, R. D.** (1954): The effect of some cultural practices and of size of crop on the subsequent winter hardiness of apple trees. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 63: 163-166
- WEHRMANN, J.** (1963): Möglichkeiten und Grenzen der Blattanalyse in der Forstwirtschaft. Landwirtschaftl. Forschung 16: 130-145 (zit. in: ALT, D. (1990): 19)
- WEISER, C. J.** (1970): Cold Resistance and Injury to Woody Plants. Science 169: 1269-1278
- WHITCOMB, C. E.** (1978): Effect of spring versus fall fertilization on the growth and cold tolerance of woody plants in the landscape. Okla. Agric. Exp. Stn. Res. Rep. P-777: 11-12
- WHITE, D. P. & FINN, R. F.** (1964): Frost damage in a tulip poplar plantation as related to foliar potassium content. Papers of the Mic. Aca. of Sci., Arts and Letters 49: 75-80
- WIEMKEN, V.; KOSSATZ, L.; INEICHEN, K.** (1996): Frost Hardiness of Norway Spruce Grown under Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub> and Increased Nitrogen Fertilizing. Plant Physiol. 149: 433-438
- WIGNARAJAH, K.** (1995): Mineral Nutrition of Plants. In: PESSARAKLI, M. (1995): 193-221
- WILLEMOT, C.** (1975): Stimulation of Phospholipid Biosynthesis during Frost Hardening of Winter Wheat. Plant Physiol. 55: 356-359

- WILLIAMS, R. D.; FUNK, D. T.; PHARES, R. E.** (1974): Apparent freeze damage to black walnut seedlings related to seed source and fertilizer treatment. *Tree Planter's Notes* 25: 6-8
- WISNIEWSKI, M.; WEBB, R.; BALSAMO, R.; CLOSE, T. J.; YU, X.-M.; GRIFFITH, M.** (1999): Purification, immunolocalization, cryoprotective and antifreeze activity of PCA60: a dehydrin from peach (*Prunus persica*). *Physiol. Plant.*, 105: 600-608
- WISNIEWSKI, M.; FULLER, M.; PALTA, J.; CARTER, J.; ARORA, R.** (2004): Ice Nucleation, Propagation, and Deep Supercooling in Woody Plants. In: ARORA R. (2004): 5-16
- WITT, H.-H.** (1997): Düngung im Freilandquartier. In: KRÜSSMANN, G. (1997): 147-194
- YOSHIDA, S.** (1984): Chemical and Biophysical Changes in the Plasma Membrane during Cold Acclimation of Mulberry Bark Cells (*Morus bombycis* Koidz.cv Goroji). *Plant Physiol.* 76: 257-265
- YOSHIDA, S. & SAKAI, A.** (1973): Phospholipid changes associated with the cold hardiness of cortical cells from poplar stem. *Plant Cell Physiol.* 14: 353-359
- ZECH, W.** (1969): Beitrag zur Kenntnis des Nährelementegehaltes in Latschen-nadeln (*Pinus montana*). *Forstwiss. Centralbl.* 88: 178-186 (zit. in: ALT, D. (1990): 19)









**Tabelle 11.3:** Literaturschlüssel zu den Tabellen 11.1 und 11.2

Lit. Nr.	Quelle	Lit. Nr.	Quelle
01	Cape et al., 1991	61	Timmis, 1972,
02	Fowler et al., 1989	62	Tukey & Meyer, 1968
03	Beattie & Flint, 1973	63	Thomas & Ahlers, 1999
04	Caporn et al., 1994	64	Taulavuori et al., 2001
05	Correia et al., 1997	65	Bergan, 1958
06	Jokela et al., 1998	66	Faulkner, 1959
07	Jönsson et al., 2001	67	Havis et al., 1972
08	Kelley, 1972	68	Joiner & Ellis, 1964
09	Pellet & White, 1969a	69	Williams et al., 1974
10	Akca et al., 2000	70	Charlon, 1958
11	DeHayes et al., 1989	71	Burgdorf, 1968
12	Larsen, 1976a	72	Sato & Muto, 1964
13	Hawkins et al., 1996	73	White & Finn, 1964
14	Hawkins et al., 1995	74	Atterson, 1966
15	Sarjala et al., 1997	75	Beltram, 1958
16	Bigras et al., 2001	76	Cooling, 1967
17	Martem'yanov & Pshina, 1973	77	Horvat, 1959
18	Kawana et al., 1964	78	Andre & Weerts, 1973
19	Pellet & White, 1969	79	Pellett, 1973
20	Coultas, 1965	80	Dalen & Johnson, 2004
21	Bigras et al., 1989 a und b	81	Saebo et al., 2001
22	Hansen, 1992	82	Pellett & Carter, 1981
23	Koskela, 1970	83	Benzian, 1966
24	Aldhous, 1972	84	Rawlings & Potter, 1937
25	Kopitke, 1941	85	Havis & Lewis, 1938
26	O'Carrol, 1972	86	Tingley et al., 1938
27	Pümpel et al., 1975	87	Smith & Tingley, 1940
28	Wiemken et al., 1996	88	Sudds & Marsh, 1943
29	Miller et al., 1995	89	Way, 1954
30	Colombo & Smith, 1987	90	Edgerton, 1957
31	Bigras et al., 1996	91	Viart, 1965
32	Klein et al., 1989	92	Kennard, 1949
33	L'Hirondelle et al., 1992	93	Green & Ballou, 1904
34	Benzian & Freemann, 1967	94	Chandler, 1913
35	Benzian et al., 1974	95	Crane, 1924
36	Malcolm & Freezaillah, 1975	96	Cooper & Wiggans, 1929
37	South et al., 1993	97	Cullinan, 1931
38	Alazard, 1985	98	McMunn & Dorsey, 1935
39	Gleason et al., 1990	99	Higgins et al., 1943
41	Christersson, 1973	100	Edgerton & Harris, 1950
42	Christersson, 1975	101	Proebsting, 1961
43	Aronsson, 1980	102	Faustov, 1965
44	Hellergren, 1981	103	Carrier, 1943
45	Toivonen et al., 1991	104	Witt, 1997
46	Rikala & Repo, 1997	105	Matzner, 1974
47	Edwards et al., 1990		
48	Whitcomb, 1978	DSC	Differential Scanning Calorimetry
49	Timmis, 1974	EL	Elektrische Leitfähigkeit
50	Tanaka, 1974	TTC	Triphenyl-Tetrazolium-Chlorid
52	Larsen, 1976	vB	visuelle Bonitur
53	Larsen et al., 1978		
54	Van den Driesche, 1980	+	positiver Effekt der Düngung
55	Van den Driesche, 1983	-	negativer Effekt der Düngung
56	Edwards, 1989	0	kein Effekt der Düngung
57	Jalkanen et al., 1998	0+	kein / gering positiver Effekt
58	Alden & Hermann, 1971	0-	kein / gering negativer Effekt
59	Pümpel, 1973	+-	positiver und negativer Effekt
60	Sato & Muto, 1951	?	Keine Angabe über Frostzeitpunkt vorhanden

## Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Spethmann für die Überlassung des Themas sowie für die hervorragende Betreuung dieser Arbeit. Für das mir entgegen gebrachte Vertrauen bezüglich der Fertigstellung dieser Dissertation trotz zweimaligem Mutterschutz möchte ich mich besonders bedanken. Herrn Huhn gebührt Dank für die Betreuung der Versuchspflanzen in Ruthe sowie Herrn Geyer für den Betrieb der Klimakammern und die Betreuung der Pflanzen in Herrenhausen. Im Labor wurde ich zu allen Zeiten äußerst zuverlässig und tatkräftig von Frau Friederike Schröder, Frau Johanna Buse, Frau Dorit Röhm und Frau Karin Lein unterstützt. Für die studentischen Hilfskräfte sei an dieser Stelle stellvertretend Herr Heinz Huhnfeld erwähnt. Für die Hilfe bei der statistischen Auswertung möchte ich mich bei Herrn Mario Hasler bedanken. Frau Prof. Dr. Bohne danke ich für anregende Diskussionen sowie für die Durchsicht des Manuskriptes. Bei Herrn Dr. Czaplinsky, Geschäftsführer der Norcontrol – Gesellschaft für angewandte Mittelstandsberatung mbH, bedanke ich mich für die Bereitstellung des Laptops und den Druck dieser Arbeit.

Mein herzlichster Dank gilt jedoch meiner Familie, die mich in jeder Beziehung uneingeschränkt unterstützt hat. Besonderer Dank gilt meinem Mann Olaf, der mich auch in schwierigen Phasen immer wieder aufgebaut und ermutigt hat. Meinen Eltern Lieselotte und Friedrich Alschner sowie meinen Schwiegereltern Elisabeth und Horst Mensing danke ich für die zuverlässige und liebevolle Betreuung von Johann und Jana.

**Lebenslauf**  
**von**  
**Petra Mensing**

Geb. 06.01.1974 in Hannover

Familienstand: Verheiratet, zwei Kinder

1980 – 1986 Grundschule und Orientierungsstufe Bissendorf

1986 – 1990 Realschule Wedemark

1990 – 1993 Gymnasium Helene-Lange-Schule, Hannover

1993 – 1995 Ausbildung zur Chemisch-technischen Assistentin  
(Fachrichtung Umweltanalytik)

1995 – 1996 Pflichtpraktikum vor Studienbeginn

10/1996 – 11/2000 Studium Fachrichtung Gartenbau an der Universität Hannover,  
Abschluss: Dipl.-Ing. agr.

02/2001 – 08/2001 Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Firma Mycotec Biotechnik  
von Alten, Massholder und Poehling GbR

09/2001 – 03/2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin im  
Institut für Zierpflanzen- und Gehölzwissenschaften,  
Abt. Baumschule, Universität Hannover

## Curriculum vitae

of

### Petra Mensing

Born 06.01.1974 in Hanover, Germany

Family status: married, two children

- |                   |  |
|-------------------|--|
| 1980 – 1986       | Elementary school Bissendorf   |
| 1986 – 1990       | Secondary School (Realschule) Wedemark   |
| 1990 – 1993       | Grammar School Helene-Lange-Schule, Hanover  |
| 1993 – 1995       | Apprentice ship as chemical-technical assistant  |
| 1995 – 1996       | compulsory practical work before studies   |
| 10/1996 – 11/2000 | university education in horticultural science,<br>University of Hanover  |
| 02/2001 – 08/2001 | Scientific assistant with Mycotec Biotechnik<br>von Alten, Massholder und Poehling GbR   |
| 09/2001 – 03/2005 | Scientific assistant and PhD student with the<br>Institute for Ornamental and Tree Science,<br>Nursery Department, University of Hanover |

## **Eidstattliche Erklärung**

Ich erkläre eidesstattlich, dass die vorliegende Dissertationsschrift von mir selbständig angefertigt wurde, dass ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe, und dass die Arbeit noch nicht als Dissertation oder andere Prüfungsarbeit vorgelegt wurde.

Hannover, den 24. April 2006