

Selektion auf Frosttoleranz von Winterackerbohnen (*Vicia faba* L.): Methodenoptimierung und Ergebnisse

Selection on freezing-tolerance of faba bean (*Vicia faba* L.): Improvement of methods and results

Franziska Roth^{1*} und Wolfgang Link¹

Abstract

Freezing-tolerance of winter faba bean is a component of winter-hardiness. The unpredictability of winter conditions hampers any field-based assessment of winter freezing-tolerance. Thus, at Göttingen we employ artificial freezing-tests. These experiments are conducted in a plant growth chamber. The well-established freezing methods were improved (e.g. optimization of vertical air flow, analysis of horizontal temperature distribution, modified temperature profile of the freezing-tests) ARBAOUI et al. 2008. Furthermore, new traits to assess freezing-tolerance were added. Based on these optimized artificial freezing-tests and on field trials from the seasons 2006/07 to 2008/09, the most frost and disease resistant winter faba bean lines were selected. This selection was based on a selection index, (composed of disposition to survive and regrowth after frost) and on susceptibility of the plants for *Ascochyta* and *Botrytis*. The best of 36 homozygous inbred lines were S4_122, S5_69, S4_151. Their survival rates were about 90%. These lines were developed from the „Göttinger Winter Faba Bean Population“.

Keywords

Artificial frost test, frost tolerance, *Vicia faba*, winter faba bean, winter hardiness

Einleitung

Die Anbauflächen der in Europa einheimischen Körnerleguminosen und ihre Bedeutung in der Landwirtschaft ist seit Jahren rückläufig (SPECHT 2009). Im Gegensatz dazu ist die Anbaufläche von Sommerackerbohnen in den letzten zehn Jahren in ihren Hauptanbauregionen (Vereinigtes Königreich und Frankreich) leicht angestiegen und die der Winterackerbohnen blieb relativ stabil (SASS 2009). Winterackerbohnen zeichnen sich im Vergleich zu Sommerackerbohnen durch höhere Erträge bei früherer Reife aus (GHAOUTI 2007, LINK 2009). Weitere Vorzüge sind geringere Saatstärke, gute Unkrautunterdrückung - die vor allem im Ökologischen Landbau eine wichtige Rolle spielt - sowie höhere Ertragsstabilität durch Ertragsbildung vor Blattlaus- und Pilzbefall. Eine durch den fortschreitenden

Klimawandel zunehmend häufiger zu erwartende Wasserknappheit am Sommeranfang führt bei Winterackerbohnen zu geringeren Ertragsverlusten als bei Sommerackerbohnen. Trotz dieser Vorteile werden in kontinentaleren Regionen Europas wie Deutschland, Österreich oder Polen fast keine Winterackerbohnen angebaut. Der Grund hierfür ist eine für diese Regionen bislang noch nicht ausreichende Winterhärte (LINK und ARBAOUI 2006). Frosttoleranz kann als ein Bestandteil der Winterhärte in Feldversuchen wegen der Unvorhersagbarkeit der jeweiligen Winterbedingungen nur unzureichend untersucht werden. Deshalb werden in Göttingen seit 2003 unter anderem Frostversuche mit Winterackerbohnen in einer Frostkammer durchgeführt. Die bisher erfolgreich etablierte Methode wurde technisch und hinsichtlich des Temperaturprofils verändert; neue Merkmale zur Evaluierung der frostresistentesten Winterackerbohnenlinien wurden entwickelt. Dadurch kann unter anderem mehr Pflanzenmaterial pro Saison getestet werden. Aus 36 Winterackerbohnenlinien wurden hier mit Hilfe dieser optimierten Frostkammermethode und mit Feldversuchen frost- und krankheitsresistente Winterackerbohnenlinien selektiert.

Material und Methoden

Pflanzenmaterial

Das untersuchte Material umfasste 35 Inzuchtlinien aus der genetisch breiten Göttinger Winterackerbohnenpopulation sowie eine Kontrolllinie. Die Inzuchtlinien der Göttinger Winterackerbohnenpopulation setzten sich wie folgt zusammen: (1) Linien aus der Kreuzung von Côte d'Or/1 × BPL4628. Côte d'Or/1 ist eine Linie aus einer französischen Landsorte, BPL4628 eine chinesische Inzuchtlinie (ICARDA). Beide sind mit hoher Frosttoleranz ausgestattet (OLSZEWSKI und HERZOG 1994, DUC und PETITJEAN 1995); (2) Vertreter der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (WAB, S4, S5). Als Kontrolle wurde eine Inzuchtlinie aus der französischen Sorte Diva (2002/Agri-Obtentions) verwendet (*Tabelle 1*). Das Material wurde in einer Frostkammer (Vötsch VB 4018 extra) sowie in Feldversuchen untersucht.

¹ Georg-August-Universität Göttingen, Department für Pflanzenbauwissenschaften (DNPW), Abteilung Pflanzenzüchtung, von Siebold-Straße 8, D-37075 GÖTTINGEN

* Ansprechpartner: Franziska ROTH, franziska.roth@agr.uni-goettingen.de

Tabelle 1: Prüfgliedliste der Winterackerbohnenlinien, die in Frostkammerversuchen getestet wurden**Table 1: List of faba bean lines analyzed in artificial freezing tests**

PG	Inzuchtlinie	PG	Inzuchtlinie	PG	Inzuchtlinie
4	(Cote d'Or/1-1 × BPL4628/1521.1)-5-4	25	S4_028	1	S4_230
5	(Cote d'Or/1-1 × BPL4628/1521.1)-18-3	6	S4_038	31	S4_232
23	(Cote d'Or/1-1 × BPL4628/1521.2)-20-3	7	S4_050	11	S4_244
3	(Cote d'Or/1-1 × BPL4628/1521.3)-40-3	19	S4_054	20	S4_253
12	(Cote d'Or/1-1 × BPL4628/1521.3)-41-3	27	S4_101	29	S4_268
28	(Cote d'Or/1-1 × BPL4628/1521.4)-52-3	17	S4_122	9	S5_29
10	(Cote d'Or/1-1 × BPL4628/1521.6)-95-3	15	S4_151	35	S5_69
33	WAB98_21 IL`04	26	S4_184	34	S5_151
22	WAB-EP02-Fam/S1_157-1-2-4-3	2	S4_191	16	S5_213
32	WAB-EP02-Fam/S1_159-1-2-4-1	13	S4_196	8	S5_252
14	WAB-EP02-Fam/S1_159-1-2-4-3	21	S4_221	36	S5_326
24	WAB-EP02-Fam/S1_159-1-2-4-3	30	S4_228	18	Diva-3

Frostkammerversuche

Die Untersuchungen in der Frostkammer erfolgten analog der in Göttingen etablierten Methode (ARBAOUI et al. 2008). Diese Methode wurde technisch optimiert, indem eine bessere vertikale Durchlüftung ermöglicht, die horizontale Temperaturverteilung analysiert, die Versuchsanlage und Anordnung der Pflanzen in den Töpfen verändert (*Abbildung 1*), die Samenablage exakter definiert, Töpfe isoliert und das Temperaturprofil des Tests verändert wurden. Bisherige Merkmale der Frosttoleranz wurden um neue ergänzt.

Bei jedem der insgesamt drei Durchgänge in der Frostkammer wurden zwei Dreisatzgitter (9 × 4 Rechteckgitter) angelegt. Jeder Topf entsprach einem Teilblock und enthielt somit vier Prüfglieder, die mit je zwei Einzelpflanzen vertreten waren (*Abbildung 1*). Die Saat erfolgte in exakt standardisierter Ablage und Anordnung der Prüfglieder im Topf. Pro Durchgang wurden 54 Töpfe verwendet. Jeder war mit einer 5 kg Sand-Kompost-Mischung im Verhältnis 1:3 gefüllt. Die Töpfe wurden auf 70-80% der Wasserhaltekapazität eingestellt, die Luftfeucht in der Frostkammer betrug 80-90%. Die Töpfe wurden mit einer ca. 1 cm dicken Styroporisolierung versehen, um den in vorigen Versuchen beobachteten untypischen Erfrierungsverlauf der Wurzeln zu vermeiden (ROTH und RODE 2009, unveröffentlicht).

Die Anzucht der Prüfglieder erfolgte im Gewächshaus bei einer Temperatur von 15-20°C. Die anschließende Härtung der Pflanzen erfolgte in der Frostkammer zwei Tage bei 6°C tagsüber und 5°C nachts und neun Tage mit einer 1°C niedrigerer Temperatur (5°C/4°C). Der Tag-Nacht-Rhythmus war 10 zu 14 Stunden (Kurztag). Im Anschluss an die Härtung erfolgten die Frosttests, deren Temperaturprofil aus zwei Froststufen in zwei aufeinanderfolgenden Nächten bestand. Der Tag-Nacht-Rhythmus blieb identisch zur Härtungsphase. Der Frost erfolgte in der Nachtphase. Diese bestand aus einer sechsständigen Abkühlungsphase mit darauffolgender Frostphase (Frost I oder II), die vier Stunden konstant gehalten wurde. Es schloss sich eine Erwärmungsphase von vier Stunden auf die Tagtemperatur von 5°C an. In Tagphasen wurde immer eine Lichtintensität auf 200µmol/sm² programmiert. Die Pflanzen wurden einen Tag nach der zweiten Frostnacht aus der Kammer genommen und in ein Gewächshaus bei 10-15°C gestellt. Drei Tage nach Frost II wurden sie oberhalb des zweiten Nodiums abgeschnitten, um einheitliche Wiederaufwuchsbedingungen zu schaffen.



Abbildung 1: Anordnung von vier Prüfgliedern (mit je zwei Einzelpflanzen) als Teilblock in einem isolierten Topf

Figure 1: Four faba bean lines (two plants per line) as a partial block in an insulated pot

Während der insgesamt 60-tägigen Versuchsdauer wurden folgende Merkmale erfasst bzw. bonitiert: Laubblattanzahl und Pflanzhöhe am Tag vor Frost I, Turgeszenzverlust und Blattverfärbung am Ende der Tagphase nach Frost I und II sowie drei Tage nach Frost II, Frischmasseertrag nach dem Schnitt der Winterackerbohnen oberhalb des zweiten Nodiums, Überlebensrate der Pflanzen und die Frischmasse ihres Wiederaufwuchses (Versuchsende am Tag 60), Überlebenszeit (täglich).

Bei frostunabhängigen Merkmalen (Laubblattanzahl, Pflanzhöhe, Frischmasseertrag) wurden nach den Gitteranalysen die gitteradjustierten Mittelwerte verwendet, um eine weitere Varianzanalyse und eine Kovarianzanalyse durchzuführen. Bei Betrachtung der frostabhängigen Merkmale Wiederaufwuchs, Überlebensrate und Überlebensneigung bestätigte sich die vorliegende Erfahrung, dass die horizontale Temperaturverteilung in der Kältekammer nicht homogen ist. Die äußeren Topfreihen erfahren mehr Frost als die inneren. Die Ausprägung der Frostschäden der Pflanzen zeigen einen Zusammenhang mit den logarithmierten (ln) Topfkoordinaten (Position in der Kammer, X1 und X2). Deshalb wurden diese drei Merkmale (statt eine Adjustierung

mittels Gitteranalyse durchzuführen) mittels eines anhand der Topfkoordinaten (von aussen nach innen) errechneten Korrekturwertes adjustiert. An jeder Topfposition wurde ein Merkmalsmittel über alle Durchgänge errechnet. Dann wurde die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Position als Abhängigkeit von den logarithmierten Topfkoordinaten (Reihe X1, Spalte X2) mittels einer Regression beschrieben:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(X1) + \beta_2 \times \ln(X2)$$

Diese Regressionen führten zu R²-Werten der drei Merkmale von 0,49 < R² < 0,63 (Tabelle 2). Der R-prozentuale Anteil der Differenz des Prüfgliedwertes zum (aufgrund Topfposition mittels Regression vorhergesagten) Positionswert wurde für die Adjustierung verwendet.

Die frostabhängigen Merkmale Verfärbung und Turgeszenzverlust wurden analog der frostunabhängigen Merkmale verrechnet, da sich für diese Merkmale keine deutlichen Positionseffekte in der Kammer ergaben. Alle statistischen Analysen erfolgten mit PLABSTAT (UTZ 2004, 2007) bzw. mit PLABCOV (UTZ 1994). Die Berechnung der Korrelationen erfolgte ebenfalls mit PLABSTAT. Um nicht auf die Normalverteilung der Daten angewiesen zu sein (was bei den bonitierten Merkmalen nicht zutrifft) wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman verwendet, wie er in der BASIC-Routine in PLABSTAT implementiert ist. Für die Selektion der kältetolerantesten Winterackerbohnenlinien wurde aus den Ergebnissen der Kovarianzanalyse ein Optimums-Index gebildet, der aus dem Hauptmerkmal der Überlebensneigung (s.u.) und dem Hilfsmerkmal des Wiederaufwuchses besteht. Die Berechnung der Indekskoeffizienten erfolgte nach BAKER (1986); das Hilfsmerkmal erhielt ein ökonomisches Gewicht von Null. Der resultierende Index lautete:

$$Index_{Frostkammer} = 0,5611 \times \text{Überlebensneigung} + 1,1436 \times \text{Wiederaufwuchs}$$

Feldversuche

Die 36 in der Frostkammer getesteten Winterackerbohnenlinien wurden 2006-2009 im Beobachtungsanbau mit weiteren Winterackerbohnenlinien am Versuchsstandort Göttingen, Reinshof untersucht. Im Versuchsjahr 2006/07 wurden sie mit weiteren 364 Prüfgliedern einfach wiederholt (r=1) angebaut. 2007/08 standen sie mit r=4 Wiederholungen und 2008/09 mit r=2 Wiederholungen jeweils in einer 12x16 Gitteranlage. Es erfolgten in jedem Jahr Bonituren zur Überwinterung (Feldaufgang, Pflanzenanzahl, Bestand), Blühbeginn, Krankheiten (Ascochyta, Botrytis, Mehltau), Biomasse, Wuchshöhe, Lager und Reife. Desweiteren wurde der Kornertrag erhoben. Auswinterung gab in diesen drei Jahren kaum. Die statistische Verrechnung erfolgte für alle drei Versuchsjahre mit PLABSTAT. Daten des einfach

Tabelle 2: Regressionskoeffizienten dreier frostabhängiger Merkmale nach multipler Regression auf die logarithmierten Topfkoordinaten

Table 2: Coefficient of regression between three frost-affected traits after multiple regression on the logarithm of pot coordinates

Merkmal	Regressionskoeffizienten ¹			R ² (%)
	β_0	β_1	β_2	
Wiederaufwuchs (g)	3,112	2,665	1,573	62,72
Überlebensrate (%)	31,44	22,01	13,79	49,02
Überlebensneigung (°)	58,05	10,78	6,498	51,21

¹ der unabhängigen Variablen: Topfkoordinaten ln(X1) und ln(X2)

wiederholten Versuchs 2006/07 wurde mit Hilfe des gleitenden Mittelwertverfahrens adjustiert. Die Daten der beiden mehrfach wiederholten Versuche 2007/08 und 2008/09 wurden gitteradjustiert. Nach den Adjustierungen erfolgte eine Varianzanalyse über die drei Versuchsjahre und alle gemeinsamen Prüfglieder.

Ergebnisse und Diskussion

Frostkammerversuche

Die mittlere Überlebensrate der Winterackerbohnen nach 60 Tagen im Durchgang A betrug 72,9% nach den beiden Frostnächten mit -13°C und -15,5°C (Tabelle 3). In den folgenden Durchgängen wurde die Temperatur der zweiten Frostnacht auf -17,5°C erniedrigt, um eine bessere Differenzierung der Linien zu erhalten. Über alle Durchgänge hinweg konnte so eine mittlere Überlebensrate von 68,9% und eine mittlere Überlebensneigung (s.u.) von 76° erreicht werden.

Die frostunabhängigen Merkmale Wuchshöhe sowie Laubblattanzahl zeigten, dass das verwendete Pflanzenmaterial sehr homogen war: die Laubblattanzahl bei Testbeginn (Abbildung 1) der Winterackerbohnen variiert kaum. Die Wuchshöhe der Winterackerbohnen weist etwas größere Unterschiede auf. Es gibt keine Korrelation dieser Merkmale zur Überlebensrate (Tabelle 4). Obwohl es möglich ist Sommer- und Winterackerbohnen anhand des Wuchstypes voneinander zu unterscheiden, ist es nicht möglich Winterackerbohnenlinien allein mit Hilfe des Wuchstypes auf Kältetoleranz zu selektieren, da die Variation innerhalb der Winterackerbohnen zu gering ist. Es muss somit auf Merkmale der Frostkammerversuche oder andere Merkmale zurückgegriffen werden, um die kältetolerantesten Linien zu identifizieren.

Die frostabhängigen Merkmale Turgeszenzverlust und Verfärbung korrelieren erst nach dem zweiten Frost signifikant mit der Überlebensrate und Überlebensneigung (Tabelle 4).

Tabelle 3: Minimumtemperaturen, Mittlere Überlebensrate nach 60 Tagen und Mittlere Überlebensneigung über alle 36 Winterackerbohnenlinien und Durchgänge der Frostkammerversuche

Table 3: Minimum temperatures, mean survival rate after 60 days and mean disposition to survive over all 36 winter faba bean lines and over the chamber loads of the artificial freezing tests

Durchgang	Minimum-Temperatur Frost I (°C)	Minimum-Temperatur Frost II (°C)	Überlebensrate (%)	Überlebensneigung (°)
A	-13	-15,5	72,9	77,3
B	-13	-17,5	70,7	79,4
C	-13	-17,5	63,0	71,3

Tabelle 4: Spearman Rangkorrelationen zwischen allen erhobenen Merkmalen der Frostkammerversuche (WHOE, Wuchshöhe; LBL, Laubblätter; TURGI-3, Turgor I-III; FARBI-3, Farbe I-III; FMERT, FM Ertrag; ULNEIG, Überlebensneigung; ULRATE, Überlebensrate; WAUF, Wiederaufwuchs)

Table 4: Spearman's rank correlation coefficient of the traits of the artificial freezing tests (WHOE, plant height; LBL, leaves; TURGI-3, turgor I-III; FARBI-3, colour I-III; FMERT, FM yield; ULNEIG, disposition to survive; ULRATE, survival rate; WAUF, regrowth after frost)

	WHOE ¹	LBL ¹	TURGI	FARBI	TURGI	FARBII	TURG	FARBIII	FMERT ¹	ULNEIG	ULRATE
LBL	-0,088										
TURGI	0,178	0,091									
FARBI	-0,060	-0,070	0,418 *								
TURGI	0,490 **	0,188	0,595 **	0,096							
FARBII	0,084	0,066	-0,090	-0,068	0,037						
TURGI	0,628 **	0,067	0,160	-0,090	0,744 **	0,242					
FARBIII	0,351 *	0,082	-0,107	-0,152	0,266	0,561 **	0,624 **				
FMERT	0,433 **	0,121	0,731 **	0,181	0,596 **	-0,240	0,276	0,002			
ULNEIG	-0,356 *	-0,010	-0,093	0,016	-0,442 **	-0,414 *	-0,646 **	-0,637 **	-0,161		
ULRATE	-0,325	-0,060	-0,056	0,059	-0,394 *	-0,446 **	-0,598 **	-0,622 **	-0,138	0,971 **	
WAUF	-0,034	-0,020	-0,024	-0,015	-0,100	-0,443 **	-0,287	-0,484 **	0,159	0,763 **	0,793 **

¹ Frost unabhängige Merkmale (frost independent traits)

*, ** Signifikanzniveau 0,05 bzw. 0,01 (significance 0.05 and 0.01, respectively)

Im Gegensatz zu früheren Versuchen (ARBAOUI et al. 2008) wurde vor allem bei dem Merkmal Verfärbung die Boniturskala nach oben nicht voll ausgeschöpft. Es gab keine Pflanzen, die alle Blätter und den Stängel verfärbt hatten (Boniturnote 4). Auch das Umkippen der Pflanzen durch zu niedrigen Turgor konnte nicht beobachtet werden. Diese Merkmale ermöglichen im Zusammenhang mit dem hier verwendeten Temperaturprofil nur begrenzt Aussagen über die Kältetoleranz der Winterackerbohnenlinien. Folglich sollte das Augenmerk zur Selektion der frosttolerantesten Winterackerbohnenlinien auf die Überlebenszeit der Pflanzen und die Überlebensrate nach 60 Tagen gerichtet werden.

Die Merkmale Überlebenszeit und Überlebensrate, die Aussagen über die Frosttoleranz der Winterackerbohnen ermöglichen, weisen folgende Stärken und Schwächen auf

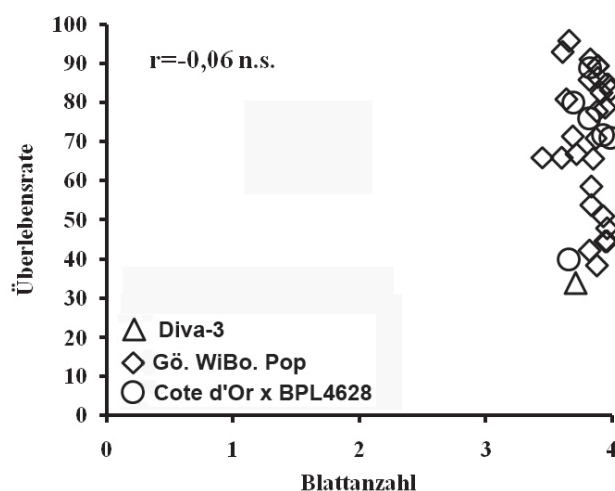


Abbildung 2: Überlebensrate (%) (GD5%=27,46) und bonitierter Anzahl der Laubblätter (GD5%=0,37) von 36 Winterackerbohnenlinien der Frostkammerversuche vor Frost I

Figure 2: Survival rate (%) (LSD5%=27.46) and scored number of leaves (LSD5%=0.37) of 36 winter faba bean lines analyzed during artificial freezing tests, before freezing step I.

(Tabelle 5): Durch Erfassen des Tages, an welchem eine Einzelpflanze als tot erkannt wurde, kann jeder toten Pflanze eine *Überlebenszeit* (Tage ab der zweiten Frostnacht) zugewiesen werden. Pflanzen, die zu Versuchsende als lebend betrachtet werden haben keinen bekannten Todestag, also keine Überlebenszeit. Dies gilt sowohl für Pflanzen, die nach mehr als 60 Tagen noch an Frostfolgen sterben würden, als auch für diejenigen, die den Frost dauerhaft überleben würden. Eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Pflanzengruppen (Linien) hinsichtlich ihres Überlebens ist nicht gegeben. Das Merkmal Überlebenszeit liefert in beiden Fällen keinen Wert. Dadurch liegt kein vollständiger

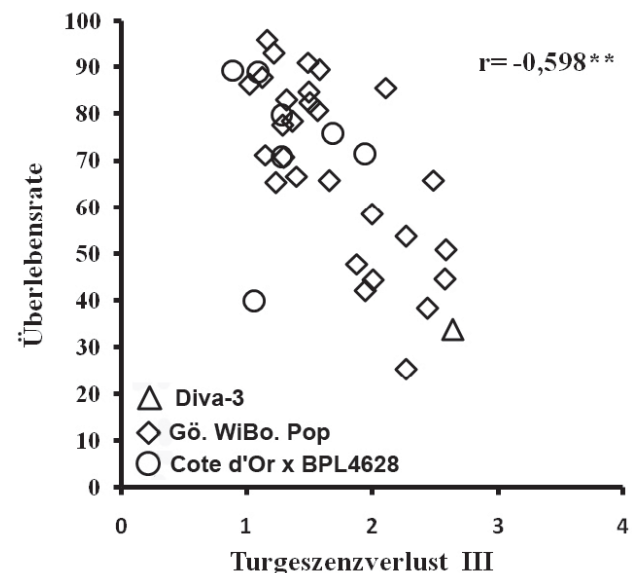


Abbildung 3: Überlebensrate (%) (GD5%=27,46) und bonitierter Turgeszenzverlust (GD5%=0,57) von 36 Winterackerbohnenlinien der Frostkammerversuche drei Tage nach Frost I (, Signifikanzniveau 0,01)**

Figure 3: Survival rate (%) (LSD5%=27.46) and loss of turgidity (LSD5%=0.57) of 36 winter faba bean lines analyzed during artificial freezing tests, three days after freezing step I (, significance level 0.01)**

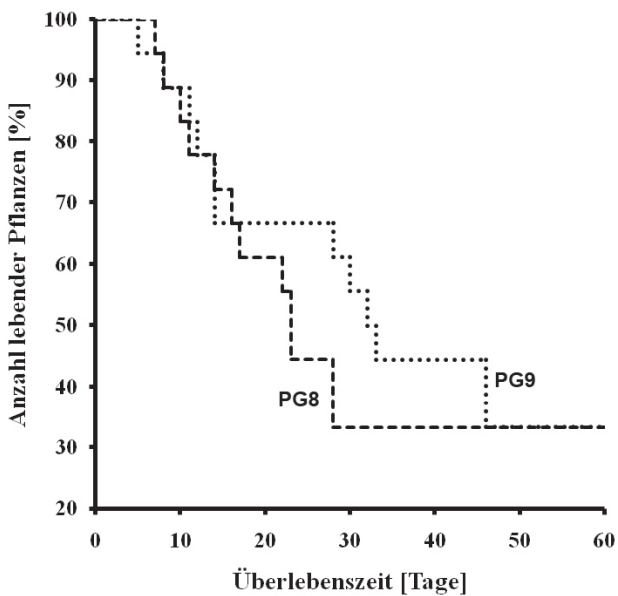


Abbildung 4: Sterbeverlauf der beiden Winterackerbohnenlinien S5_252 (PG 8) und S5_29 (PG 9) nach Frostkammerbehandlung bis zum 60. Tage (Versuchsende) in Form von Überlebenskurven

Figure 4: Survival curve of two winter faba bean lines, S5_252 (PG 8) and S5_29 (PG 9), after artificial freezing tests until day 60 (end of test)

Datensatz vor; dieses Merkmal ist mit der klassischen Methode der Varianzanalyse nicht verrechenbar. Der für eine Winterackerbohnenlinie typische Sterbeverlauf kann z.B. mit Hilfe einer Kaplan-Meier Kurve für Überlebenszeiten dargestellt werden. Unterschiedliche Sterbeverläufe in Abhängigkeit der jeweiligen Linie (Pflanzengruppe) sind beim Vergleichen der Kurven erkennbar (Abbildung 4).

Das Merkmal *Überlebensrate* ergibt im Gegensatz dazu Werte für tote und lebende Pflanzen (tote Pflanzen = 0%; lebende Pflanzen = 100%). Damit hat jede Pflanzengruppe einen Wert für die Überlebensrate, der sich als Mittelwert der Einzelpflanzenwerte errechnet. Im Gegensatz zur Überlebenszeit ermöglicht die Überlebensrate keine Aussagen über mögliche Unterschiede der Sterbeverläufe der Gruppen (Tabelle 5).

Da die beiden primären Merkmale Überlebenszeit und Überlebensrate einzeln betrachtet nicht ausreichen, um Aussagen über überlebende Pflanzen und den für eine Linie typischen Sterbeverlauf zu erhalten, wurde das sekundäre Merkmal Überlebensneigung zur Versuchsauswertung verwendet. Die *Überlebensneigung* $\alpha_{xi} = \arctan(x_i / x_m)$ wird aus der Überlebenszeit x_i sowie der Mittleren Überlebenszeit x_m aller zu Versuchsende als gestorbenen bonitierten Pflanzen im rechtwinkligen, gleichschenkligen Dreieck errechnet (Abbildung 5, A). Es gilt im Dreieck: $\alpha_{xm} = 45^\circ = \text{Höhe } h$ (Abbildung 5, B). Pflanzen, die zum Zeitpunkt des Versuchsendes (x_{60}) nicht als tot bonitiert wurden, erhalten den Wert $\alpha_{60} = 90^\circ$ (Abbildung 5, C, D).

Pflanzen, die nicht an Frostfolgen sterben und solche die erst nach mehr als 60 Tagen an Frostfolgen sterben würden, werden identisch behandelt. Es entsteht mittels dieser Transformation ein vollständiger Datensatz. Da die Überlebensneigung ein Winkel ist wird sie in Grad ($^\circ$) angegeben.

Der Vorteil des neuen Merkmales Überlebensneigung liegt darin, dass im Gegensatz zur Überlebenszeit ein vollständiger Datensatz zur statistischen Verrechnung vorliegt. Informationen über überlebende und tote Einzelpflanzen sowie den Sterbeverlauf sind im Merkmal Überlebensneigung ebenfalls enthalten. Die Korrelation der Überlebensneigung und der Überlebensrate ist mit $r=0,971$ sehr hoch (Abbildung 6). Dennoch sollte beachtet werden, dass sie von $r=1$ verschieden ist, da sie eine Transformation der Überlebenszeit und nicht der Überlebensrate ist. Die Überlebensneigung aller als lebend bonitierten Pflanzen ist 90° . Das Merkmal Wiederaufwuchs erlaubt nun innerhalb dieser Gruppe eine Differenzierung. Es wird angenommen, dass Pflanzen, die die geringsten Frostschäden aufweisen den höchsten Wiederaufwuchs zeigen.

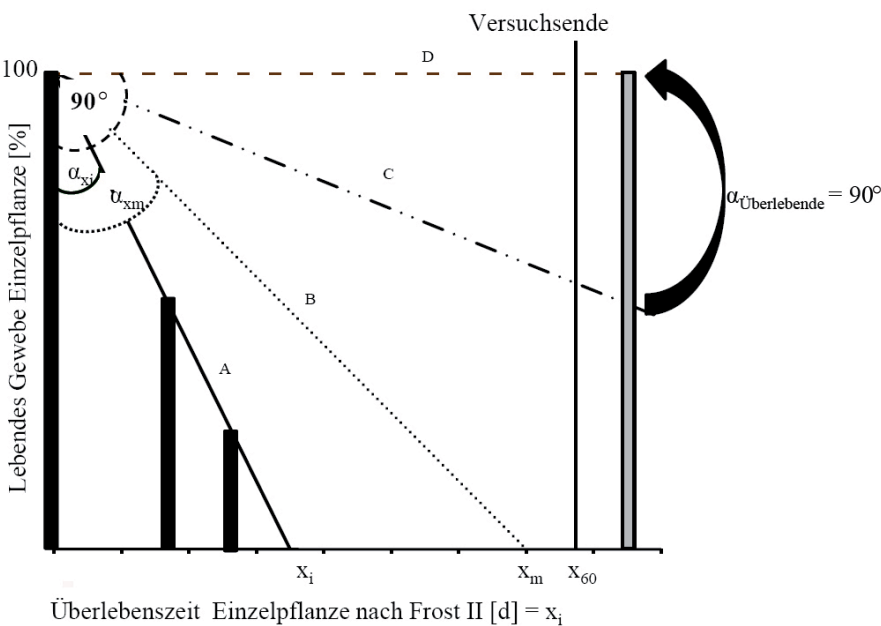


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Sterbeverlaufs von Einzelpflanzen und daraus abgeleiteter Überlebensneigung α_{xi} . A: Pflanze, die zum Zeitpunkt x_i als tot bonitiert wird. B: Pflanze, die am Mittleren Überlebenstag aller Toten Pflanzen als tot bonitiert wird. C: Pflanze, die erst nach Versuchsende an Folgen des Frostes sterben würde. D: Pflanze, die den Frost dauerhaft überlebt. Die Angabe „Lebendes Gewebe Einzelpflanze“ (%) ist als Denkhilfe zu verstehen. Tatsächlich bonitiert wurde nur „lebt“ oder „tot“

Figure 5: Sketch of dying gradient of single plants, resulting in the disposition to survive α_{xi} . A: Plant at time x_i scored as dead. B: Plant scored as dead at the mean surviving date of all dead plants. C: Plant that will die after end of the test. D: plant surviving the freezing test. The specification ‘living tissue of single plant’ (%) is given as comprehension assist; actually scoring was only ‘dead’ or ‘alive’

Tabelle 5: Eigenschaften der während des Versuchs erhobenen Merkmale Überlebenszeit, Überlebensrate und Wiederaufwuchs und dem aus der Überlebenszeit transformierten Merkmal der Überlebensneigung

Table 5: Features of the traits survival time, survival rate, transformed trait disposition to survive and regrowth as assessed during the artificial freezing tests

Merkmal	Einzelpflanzen		Pflanzengruppe	
	Wert für Gestorbene	Wert für Überlebende	Sterbeverlauf	Differenzierung der Überlebenden
Todeszeitpunkt/Überlebenszeit	+	-	+	-
Überlebensrate	+	+	-	-
Überlebensneigung	+	+	+	-
Wiederaufwuchs	+	+	-	+

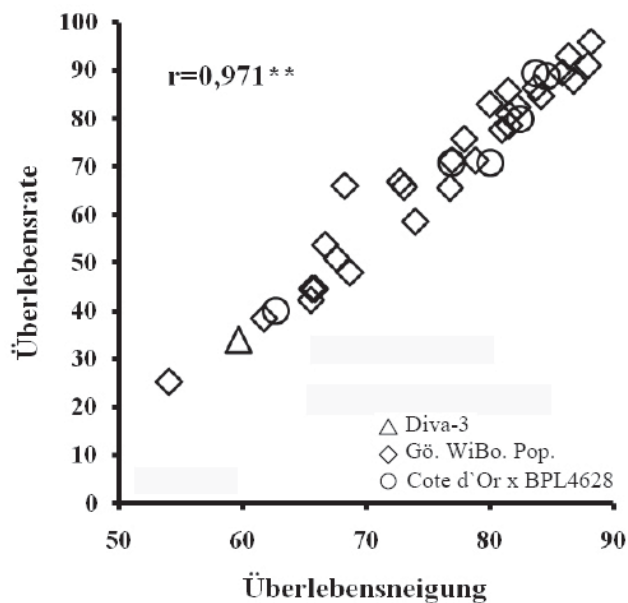


Abbildung 6: Überlebensrate (%) (GD=28,46) und Überlebensneigung (°) (GD=14,57) der 36 Winterackerbohnenlinien der Frostkammerversuche

Figure 6: Survival rate (%) (LSD5%=28,46) and disposition to survive of 36 winter faba bean lines analyzed in the artificial freezing tests.

Nur bei fünf der 36 untersuchten Winterackerbohnenlinien starben bis zum sechzigsten Tag mehr als die Hälfte der Pflanzen. Auch die für das milde französische Klima gezüchtete Kontrolllinie Diva-3 befindet sich darunter. Das Genmaterial der Göttinger Winterackerbohnen-Population scheint hinsichtlich Kältetoleranz recht viel versprechend zu sein, da Nächte bis $-17,5^{\circ}\text{C}$ von den meisten Linien gut überlebt wurden. Eine Differenzierung hinsichtlich der Überlebensrate und der Überlebensneigung ist deutlich erkennbar und die Prüfglieder unterscheiden sich signi-

fikant voneinander (Tabelle 6). Eine Gruppierung nach Materialgruppe (Tabelle 1) kann nicht beobachtet werden. Die Durchgänge der Frostkammer unterscheiden sich ebenfalls signifikant voneinander. Dies war zu erwarten, da die Temperaturen der Froststufe II nicht identisch war (Tabelle). Ein weiterer Grund für Unterschiede zwischen Durchgängen ist, dass sich die für die einzelnen Durchgänge angezogenen Winterackerbohnen - bedingt durch unvermeidliche Licht- und Klimaunterschiede bei ihrer Aufzucht - sich hinsichtlich ihres Wachses etwas voneinander unterschieden. Dies beeinflusst vermutlich auch die Heritabilität, die trotz genormter Frostkammerversuche nur den Wert $h^2=0,674$ erreicht. Der Frostkammerindex ($= 0,5611 \times \text{Überlebensneigung} + 1,1436 \times \text{Wiederaufwuchs}$) führte zu einer Heritabilität von $h^2=0,711$ bei einem Mittelwert des Materials von 46,92 und einer Grenzdifferenz (5%) von 9,42.

Selektion

Da das Befallsrisiko von Winterformen im Vergleich zu Sommerformen erhöht ist (POETSCH 2006), spielen pilzliche Schaderreger wie *Botrytis* und *Ascochyta* bei Winterackerbohnen eine noch bedeutendere Rolle als bei Sommerackerbohnen. Deshalb wurde für die Selektion der 36 in der Frostkammer untersuchten Winterackerbohnenlinien neben dem Frostkammerindex (bestehend aus Überlebensneigung und Wiederaufwuchs, s.o.) noch zusätzlich die gemeinsame Feldbonitur für die Krankheiten *Ascochyta* und *Botrytis* hinzugezogen (Abbildung 7). Die Krankheitsbonituren der Linien aus den Feldversuchen schwanken zwischen 2,8 und 5,6 Punkten auf einer Boniturskala von null bis neun. Neun ist die höchste Ausprägungsstufe der Krankheiten. Es gab keine Gruppierung der Linien. Die beiden krankheitsanfälligsten Prüfglieder stammen aus der Göttingen Winterackerbohnenpopulation, gefolgt von zwei Linien aus der Kreuzung von Côte d'Or/1 \times BPL4628 (Ab-

Tabelle 6: Varianzanalyse der Überlebensneigung α_{xi} über die drei Durchgänge der Frostkammer

Table 6: Analysis of variance of disposition to survive α_x over three loads in the freezing chamber

Varianzursache	FG	MQ	Varianzkomponente	F	GD5%
Durchgänge	2	3888,4	-	10,36 **	3,97
Wiederholungen I in D.	15	375,4	-	1,23	8,08
Prüfglieder	35	1474,2	55,20	3,07 **	14,57
PD	70	480,6	29,39	1,58 **	19,78
PWD	525	304,2	304,21		

¹ 6 Wiederholungen pro Durchgang entsprechend der beiden Dreisatzsatzgitter pro Durchgang

** Signifikanzniveau 0,01

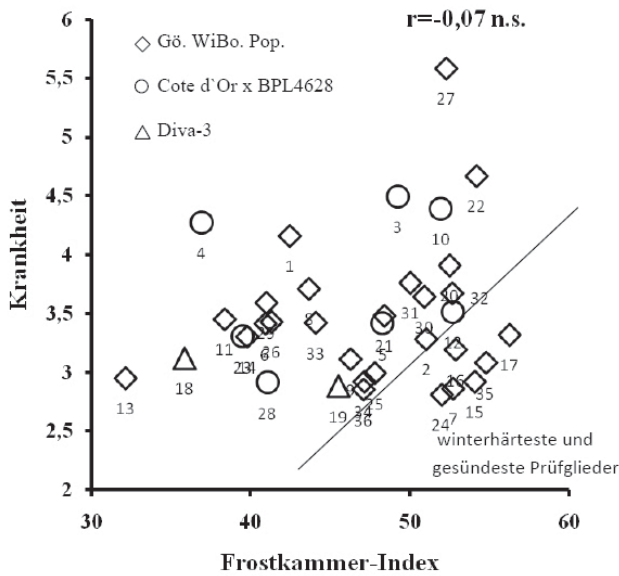


Abbildung 7: Selektion der winterhärtesten und am wenigsten krankheitsanfälligen Winterackerbohnen genotypen aus Frostkammer- und Feldversuchen (2006/07-2008/09) mit Hilfe des Frostkammerindex (GD=9,42) und Krankheitsbonitur (GD=1,02). Prüfgliednummern siehe Tabelle 1

Figure 7: Selection of most frost-hardy faba bean lines with least susceptibility to diseases. Plants were analysed in freezing tests and field trials (2006/07-2008/09). Selection index of freezing chamber: LDS5%=9.42; field-based disease score: GD5%=1.02. Identity of entries cf. Table 1

Abbildung 7). Die Grenzdifferenz über alle im Feld angebaute Prüfglieder beträgt 1,02, der Mittelwert 3,36. Auch der Frostkammerindex zeigt eine signifikante Differenzierung zwischen den Linien. Die frosttolerantesten Genotypen stammen aus der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (Prüfglieder 17, 35, 22, 15; Tabelle 1). Die kälteanfällige Linie ist ebenfalls aus der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (Prüfglied 13) gefolgt von der Kontrolle Diva-3 und Prüfglied 4 aus der Kreuzung von Côte d'Or/1 x BPL4628. Unter den untersuchten Linien aus der Kreuzung der „exotischen“ Winterackerbohnen (Côte d'Or/1 x BPL4628) konnte keine auffallend gute gefunden werden, die einen sehr guten Frostkammerindex mit einer niedrigen Krankheitsbonitur vereint hätte. Die Linien, die diese Anforderung am besten erfüllen stammen aus der Göttinger Winterackerbohnenpopulation (Abbildung 7).

Danksagung

Unser Dank geht an die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. in Gülzow bzw. an das BMELV für die

Finanzierung des Projektes, zu dem diese Versuche gehören. Ebenso möchten wir gegenüber dem Züchterhaus NPZ Lembke für die überaus kollegiale und erfolgreiche Zusammenarbeit und Unterstützung unseren Dank ausdrücken.

Literatur

ARBAOUI M, BALKO C, LINK W, 2008: Study of faba bean (*Vicia faba* L.) winter hardiness and development of screening methods. *Field Crops Res* 106, 60-67.

BAKER RJ, 1986: Selection indices in plant breeding. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida.

DUC G, PETITJEAN F, 1995: Study on the inheritance of freezing tolerance in *Vicia faba* L. In: 2nd European Conference on Grain Legumes, Copenhagen, 130-131.

GHAOUTI L, 2007: Comparison of pure line cultivars with synthetic cultivars in local breeding of faba bean (*Vicia faba* L.) for organic farming. PhD thesis, Georg-August-Universität, Göttingen.

LINK, W., 2009: Züchtungsforschung bei der Ackerbohne: Fakten und Potentiale. *Journal für Kulturpflanzen* 61, 341-347.

LINK W, ARBOUI M, 2006: Neues von der Göttinger Winter-Ackerbohne. Bericht über die 56. Tagung 2005 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, 31-38. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irnding.

OLSZEWSKI A, HERZOG H, 1994: Frost-Resistenz-Verbreitung bei *Vicia faba* L. *Mitt Ges Pflanzenbauwiss* 7, 411-413.

POETSCH J, 2006: Pflanzenbauliche Untersuchungen zum ökologischen Anbau von Körnerleguminosen an sommertrockenen Standorten Südwestdeutschlands. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart.

SASS O, 2009: Marktsituation und züchterische Aktivitäten bei Ackerbohnen und Körnererbsen in der EU. *Journal für Kulturpflanzen* 61, 306-308.

SPECHT M, 2009: Anbau von Körnerleguminosen in Deutschland - Situation, limitierende Faktoren und Chancen. *Journal für Kulturpflanzen* 61, 302-305.

UTZ HF, 1994: PLABCOV (Version 1B(L)), A computer program for statistical covariance analysis of plant breeding experiments. Institute of Plant Breeding, Seed Science, and Population Genetics, University of Hohenheim, Stuttgart.

UTZ HF, 2004: PLABSTAT. Ein Computerprogramm zur statistischen Analyse von pflanzenzüchterischen Experimenten, Vers. 3. Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik, Universität Hohenheim, Stuttgart.

UTZ HF, 2007: PLABSTAT (Version 2N), A computer program for the computation of variances and covariances. Institute of Plant Breeding, Seed Science, and Population Genetics, University of Hohenheim, Stuttgart.