

Lebensdauer von Saatgut im Lager

Modell, Rechenweg und Grenzen

Kennung	SAMEN-PROV0001-P02
Verfasser	Thomas Schüller, Syntagma Forschung Wien · ORCID 0009-0003-9799-6747
Kontakt	forschung@tschueller.com
Fassung und Stand	3.0 · 2026-09-28
Rechte	Text alle Rechte vorbehalten; Werkzeuge und Datenschichten MIT

Kurzfassung

Die verbesserte Lebensfähigkeitsgleichung nach Ellis und Roberts beschreibt das Absterben eines Saatgutpostens als normalverteilten Vorgang, dessen Streuung von Samenfeuchte und Lagertemperatur abhängt. Aus ihr lassen sich Halbwertszeit, Regenerationszeitpunkt und Prüfintervall ableiten. Dieses Papier legt den Rechenweg offen, führt ein Beispiel durch und benennt die drei Stellen, an denen das Modell in der Praxis der Genbanken am ehesten trägt oder eben nicht trägt: bei sehr tiefen Temperaturen, bei sehr niedriger Samenfeuchte und bei Arten, für die keine belegten Konstanten vorliegen.

1. Das Modell

Die Gleichung hat zwei Teile. Der erste beschreibt den Verlauf über die Zeit:

$$v = K_i - p / \sigma$$

Dabei ist v die Lebensfähigkeit nach p Tagen, ausgedrückt als Probit, also als Normalabweichung; K_i die Ausgangslebensfähigkeit im selben Maß; σ die Standardabweichung der Absterbeverteilung in Tagen. Der Verlauf ist im Probitmaß eine Gerade, im Prozentmaß eine Sigmoide.

Der zweite Teil beschreibt, wovon σ abhängt:

$$\log_{10} \sigma = K_E - C_W \cdot \log_{10} m - C_H \cdot t - C_Q \cdot t^2$$

m ist die Samenfeuchte in Prozent der Frischmasse, t die Lagertemperatur in Grad Celsius. K_E , C_W , C_H und C_Q sind artspezifische Konstanten. K_E setzt die Grundlebensdauer, C_W gewichtet die Feuchte, C_H und C_Q bilden den Temperatureinfluss linear und quadratisch ab. Als universelle Temperaturkonstanten gelten meist $C_H = 0,0329$ und $C_Q = 0,000478$ (Dickie u. a. 1990, acht Arten); Ellis und Hong fanden über zwölf Kulturarten ähnliche gemeinsame Werte (0,0322 und 0,000454), während K_E und C_W artspezifisch bleiben. Die Datenschicht führt den Satz nach Ellis und Hong als Ersatz; das Rechenbeispiel unten verwendet den artspezifischen Gerstensatz. C_W ist bei stärkereichen Samen tendenziell höher als bei ölhaltigen; Ellis und Hong fanden Werte zwischen 4,2 (Reis) und 6,0 (Mais). Ölhaltige Samen binden bei gleicher Luftfeuchte weniger Wasser; bei Trocknung auf dieselbe relative Luftfeuchte erreichen sie von selbst einen niedrigeren Wassergehalt.

2. Der Rechenweg

Der Weg von der Fragestellung zur Antwort hat vier Schritte.

Schritt 1 — Ausgangswert in Probit. Eine Ausgangskeimfähigkeit von 95 Prozent entspricht einer Normalabweichung von 1,645.

Schritt 2 — σ berechnen. Für Gerste (KE = 9,983; CW = 5,896; CH = 0,040; CQ = 0,000428) bei 5 Prozent Samenfeuchte und minus 18 Grad:

$$\begin{aligned}\log_{10} \sigma &= 9,983 - 5,896 \cdot \log_{10}(5) - 0,040 \cdot (-18) - 0,000428 \cdot 324 \\ &= 9,983 - 4,121 + 0,720 - 0,139 \\ &= 6,443 \\ \sigma &= 10^{6,443} \approx 2,77 \cdot 10^6 \text{ Tage} \approx 7596 \text{ Jahre}\end{aligned}$$

Schritt 3 — Zielwert einsetzen. Die Regenerationsschwelle der FAO-Standards liegt bei 85 Prozent des Ausgangswerts, hier also bei 80,75 Prozent Keimfähigkeit, entsprechend einer Normalabweichung von 0,869. Die Zeit bis dorthin:

$$p = (1,645 - 0,869) \cdot \sigma \approx 0,776 \cdot 7596 \text{ Jahre} \approx 5896 \text{ Jahre}$$

Schritt 4 — Prüfintervall. Die Standards setzen das Prüfintervall auf ein Drittel dieser Zeit oder kürzer an, höchstens jedoch auf 40 Jahre (Standard 4.3.3). Das rechnerische Drittel von rund 1965 Jahren wird damit durch die Obergrenze von 40 Jahren ersetzt. Daneben kennen die Standards Ersatzintervalle von zehn Jahren bei als langlebig und fünf Jahren oder weniger bei als kurzlebig erwarteten Arten; sie gelten nur, wenn sich keine Vorhersage treffen lässt und die Akzessionen bei -18°C in hermetisch verschlossenen Behältern lagern.

Auch 40 Jahre sind hier nicht ohne Weiteres als Prüfplan zu lesen. Der Rechenwert liegt weit außerhalb des Bereichs, in dem das Modell experimentell abgesichert ist (Abschnitt 4), und das Modell überschätzt die Lebensdauer im Tiefkühlbereich eher. Dieser Strang empfiehlt deshalb, die erste Wiederholungsprüfung nicht später als nach zehn Jahren anzusetzen und das Intervall danach aus den gemessenen Werten festzulegen. Das ist eine Vorsichtsregel des Strangs, keine Vorgabe der Standards.

3. Zahlen zur Größenordnung

Die folgende Tafel gibt für Gerste bei 95 Prozent Ausgangskeimfähigkeit die Zeit bis zur Regenerationsschwelle in Jahren. Sie zeigt, wie stark die beiden Stellgrößen wirken.

Samenfeuchte	20 °C	10 °C	5 °C	0 °C	-18 °C
12 %	0,9	3,2	5,5	8,9	33,8
10 %	2,8	9,4	16,0	26,0	99,0
8 %	10,3	34,9	59,6	96,8	369
6 %	56,4	190	325	528	2012
5 %	165	558	952	1546	5896
4 %	616	2079	3547	5762	21 975

Zwei Ablesungen sind wesentlich. Erstens wirkt die Feuchte stärker als die Temperatur: Von 12 auf 4 Prozent Samenfeuchte gewinnt man bei gleicher Temperatur den Faktor 600 bis 700, von 20 auf minus 18 Grad bei gleicher Feuchte den Faktor 35. Zweitens sind die Werte in der linken unteren Ecke so groß, dass sie als Vorhersage nicht ernst zu nehmen sind — genau darauf zielt der nächste Abschnitt.

4. Die drei Grenzen

4.1 Die Temperaturgrenze

Der experimentell abgesicherte Bereich der Gleichung reicht von minus 13 bis 90 Grad Celsius. Die Normbedingung der Basissammlung, minus 18 Grad, liegt darunter. Jede Rechnung für die Standardlagerung ist damit eine Hochrechnung über den geprüften Bereich hinaus. Langzeitversuche in Genbanken deuten darauf hin, dass die Lebensdauer dabei eher überschätzt wird (Abschnitt 4.2). Das Werkzeug des Pakets weist diesen Umstand bei jeder Rechnung im Tiefkühlbereich aus.

4.2 Die Überschätzung im Tiefkühlbereich

Walters, Wheeler und Stanwood (2004) fanden im Arrhenius-Diagramm einen Knick bei etwa -15°C . Unterhalb davon verlief die Alterung schneller, als die Hochrechnung der bei höheren Temperaturen gemessenen Kinetik erwarten ließ („faster deterioration than anticipated from extrapolation of kinetics measured at higher temperatures“). Der Vorteil der Lagerung bei -18°C ging zudem zunehmend verloren, wenn das Saatgut zuvor bei 5°C gelagert worden war.

Walters, Wheeler und Grotenhuis (2005) werteten rund 42 000 Akzessionen von 276 Arten des US-amerikanischen National Plant Germplasm System (NPGS) aus, geerntet zwischen 1934 und 1975. Die Keimfähigkeit nahm sowohl bei 5°C als auch bei -18°C ab, und zwar mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Kurzlebig waren etwa Doldenblütler (Apiaceae) und Kreuzblütler (Brassicaceae), langlebig etwa Malvengewächse (Malvaceae) und Gänsefußgewächse (Chenopodiaceae).

Solberg u. a. (2020) fassen die Befunde in einer systematischen Übersicht zusammen. Der Median von P50, der Zeit bis zum Absinken auf 50 Prozent Keimfähigkeit, lag im Datensatz von Walters u. a. (2005) bei 42 Jahren — das Saatgut lagerte dort bis 1977 bei $+5^{\circ}\text{C}$, danach bei -18°C —, in zwei weiteren Studien bei 47 und 56 Jahren. Vorhersagen aus der Seed Information Database lagen drei- bis zehnmal, in einzelnen Fällen mehr als 40-mal über den beobachteten Werten. Dieser Vergleich ist mit Vorbehalt zu lesen: Die Vorhersagen wurden in diesen Gegenüberstellungen für $+5^{\circ}\text{C}$ berechnet, und die Verfasser führen die Abweichung zum Teil auf den Umgang mit dem Saatgut in den Genbanken zurück.

Es gibt auch Gegenbefunde. In der niederländischen Genbank CGN lagen nach van Treuren, de Groot und van Hintum (2013) von fast 40 000 Keimprüfungen nach bis zu 25 Jahren Lagerung bei -20°C (3 bis 7 Prozent Samenfeuchte, Folienbeutel) nur 3,3 Prozent der Überwachungsprüfungen unter der Schwelle. Li und Pritchard (2009) sehen dagegen „relatively widespread evidence of less than expected longevity at conventional seed bank temperatures“ und begründen damit die Lagerung bei sehr tiefen Temperaturen.

Für die Rechnung folgt daraus: Werte der Gleichung unterhalb von etwa -15°C sind als Obergrenze zu lesen, nicht als Erwartungswert. Die Überwachung der Keimfähigkeit bleibt in jedem Fall Pflicht.

4.3 Die Feuchtgrenze

Unterhalb einer Samenfeuchte von etwa 2 bis 6 Prozent bringt weitere Trocknung keinen Zugewinn an Lebensdauer mehr. Die Gleichung kennt diese Untergrenze nicht: Sie rechnet weiter und liefert für 2 Prozent Feuchte Werte, die physikalisch nicht gedeckt sind. Wer die Tafel oben nach links extrapoliert, verlässt das Modell.

4.4 Die Artengrenze

Belegte Konstantensätze gibt es für eine überschaubare Zahl von Arten. Für die große Mehrheit der Akzessionen einer Genbank, und erst recht für Wildarten, liegen keine vor. Drei Auswege sind üblich, und alle drei sind mit Vorbehalt zu verwenden:

- Übertragung von einer verwandten Art mit ähnlichem Ölgehalt,
- Verwendung der gemeinsamen Temperaturkonstanten nach Ellis und Hong mit geschätztem KE und CW,
- eigene Ableitung über beschleunigte Alterung, was einen Versuchsaufbau und Zeit verlangt.

Das Werkzeug nimmt frei eingegebene Konstantensätze entgegen und kennzeichnet das Ergebnis als ungeprüft. Fremde Konstanten ohne Quellenangabe werden in die Datenschicht des Strangs nicht aufgenommen.

Die Datenschicht führt die folgenden belegten Sätze. Wesentlich ist: KE und CW sind stets zusammen mit den CH- und CQ-Werten zu verwenden, mit denen sie angepasst wurden. Sätze verschiedener Herkunft dürfen nicht gemischt werden.

Art	KE	CW	CH	CQ	Quelle	Status
Gerste (<i>Hordeum vulgare</i>)	9,983	5,896	0,040	0,000428	Ellis und Roberts 1980	geprüft
Rosen-Eukalyptus (<i>Eucalyptus grandis</i>)	9,661	6,467	0,03498	0,000233	Fantinatti und Usberti 2007	geprüft
Kichererbse (<i>Cicer arietinum</i>)	8,901	4,847	0,0329	0,000478	Dickie u. a. 1990, Tab. 1	geprüft
Sojabohne (<i>Glycine max</i>)	7,525	4,086	0,0329	0,000478	Dickie u. a. 1990, Tab. 1	geprüft
Augenbohne (<i>Vigna unguiculata</i>)	9,401	5,118	0,0329	0,000478	Dickie u. a. 1990, Tab. 1	geprüft
Salat (<i>Lactuca sativa</i>)	8,218	4,797	0,0489	0,000365	Kraak und Vos 1987	geprüft
Erbse (<i>Pisum sativum</i>)	9,858	5,390	0,0329	0,000478	Ellis, Hong und Roberts 1989, nach Pritchard und Dickie 2003	teilgeprüft
Erdnuss (<i>Arachis hypogaea</i>)	6,177	3,426	0,0304	0,000453	Usberti und Gomes 1998	geprüft
Sammelsatz Temperatur	–	–	0,0322	0,000454	Ellis und Hong 2007	teilgeprüft

Kichererbse, Sojabohne und Augenbohne sind nach Dickie u. a. (1990, Tabelle 1) mit den gemeinsamen Temperaturkonstanten CH = 0,0329 und CQ = 0,000478 angepasst; der Datenbereich reicht von –13 bis 90 °C und von 1,8 bis 25 Prozent Samenfeuchte. Der Salatsatz nach Kraak und Vos (1987) hat eigene Temperaturkonstanten und gilt für 5 bis 75 °C und 3,6 bis 13,6 Prozent Samenfeuchte; bei –20 °C treten oberhalb von etwa 12 Prozent Samenfeuchte Frostschäden auf. Dickie u. a. (1990) geben für Salat mit den gemeinsamen Temperaturkonstanten KE = 6,985 und CW = 4,200 an; dieser Satz ist mit dem von Kraak und Vos nicht mischbar. Der Erbsensatz nach Ellis, Hong und Roberts (1989), wiedergegeben bei Pritchard und Dickie (2003), beruht auf einem Versuch bei einer einzigen Temperatur (65 °C) und ist deshalb nur teilgeprüft. Der Erdnusssatz nach Usberti und Gomes (1998) hat eigene Temperaturkonstanten.

Die artspezifischen Sätze nach Ellis und Hong (2007) für Weizen, Reis, Mais und Sorghum lagen nur in einer Sekundärzusammenstellung vor und wurden nicht übernommen.

5. Verhältnis zu den Genbankstandards

Die Standards der FAO übersetzen das Modell in Betriebsvorgaben:

Vorgabe	Wert
Basissammlung	-18 ± 3 °C, 15 ± 3 % relative Feuchte, hermetisch verschlossen
Aktivsammlung	5 bis 10 °C, 15 ± 3 % relative Feuchte
Trocknung vor der Einlagerung	5 bis 20 °C bei 10 bis 25 % relativer Feuchte
Ausgangskeimfähigkeit	über 85 % für die meisten Kulturarten
Prüfintervall	ein Drittel der Zeit bis 85 % des Ausgangswerts oder kürzer, höchstens 40 Jahre (4.3.3)
Ersatzintervall, nur ohne Vorhersage und bei -18 °C hermetisch	10 Jahre langlebig, höchstens 5 Jahre kurzlebig
Regeneration	unter 85 % des Ausgangswerts oder Restmenge unter dem Bedarf für drei Aussaaten
Mindestmenge	rund 1500 Samen selbstbefruchtend, 3000 fremdbefruchtend

Bemerkenswert ist die Verknüpfung der Regeneration mit zwei Bedingungen: Keimfähigkeit **oder** Restmenge. Die zweite Bedingung ist in der Praxis oft die bindende. Eine viel angefragte Akzession muss vermehrt werden, lange bevor sie ein Alterungsproblem hat.

Abbildungen

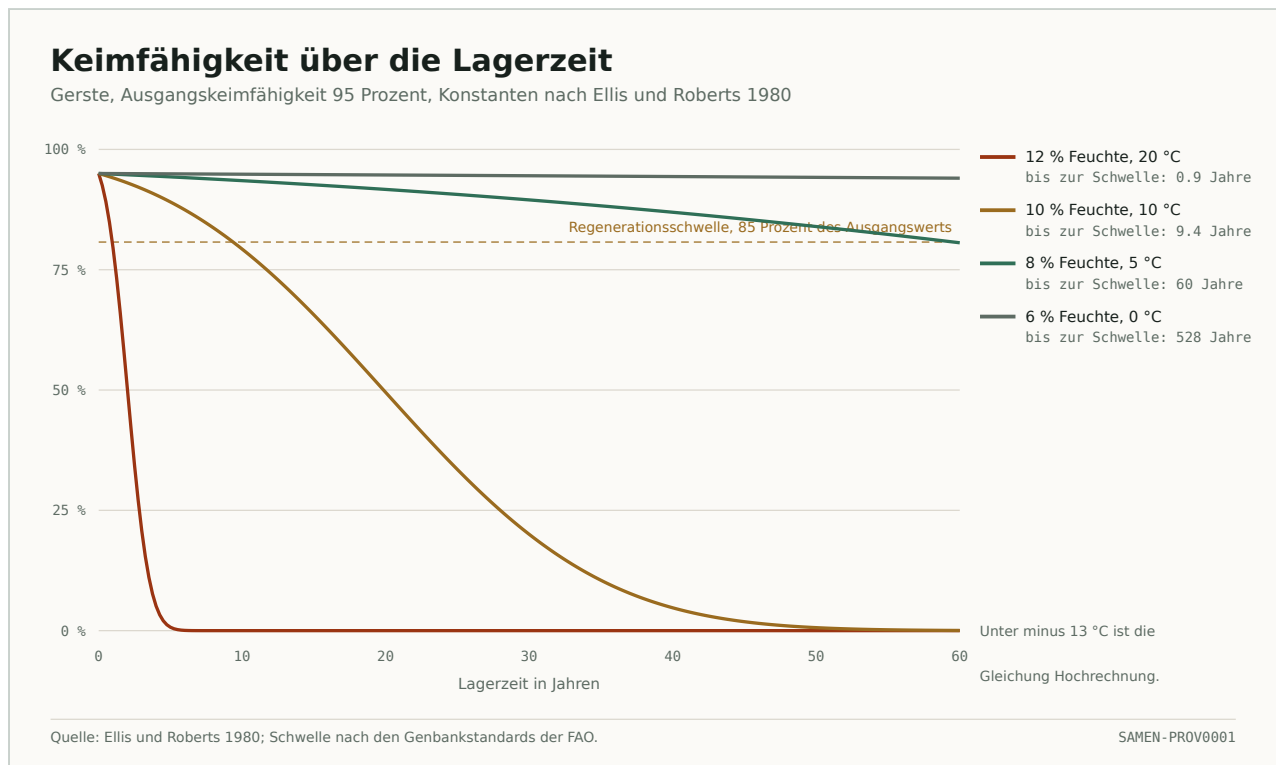


Abbildung 1. Verlauf der Keimfähigkeit bei Gerste. Quelle: Datenschicht des Strangs, siehe Fußzeile der Abbildung.

Grenzen dieses Papiers

Das Papier behandelt orthodoxes Saatgut. Rekalzitranze und intermediäre Arten folgen anderen Gesetzmäßigkeiten und sind hier nicht abgedeckt. Die Konstantensätze der Datenschicht umfassen acht belegte Arten und einen Sammelsatz für die Temperaturglieder (Abschnitt 4.4); weitere in der Literatur verstreute Sätze, darunter die Sätze nach Ellis und Hong (2007) für Weizen, Reis, Mais und Sorghum, wurden bewusst nicht ungeprüft übernommen. Die Überschätzung im Tiefkühlbereich ist in Abschnitt 4.2 anhand der Literatur dargestellt; eine eigene Quantifizierung auf Grundlage von Genbankdaten wurde nicht vorgenommen.

Literatur

1. Ellis, R. H.; Roberts, E. H. (1980): Improved equations for the prediction of seed longevity. *Annals of Botany* 45, 13–30.
2. Ellis, R. H. (2022): Seed ageing, survival and the improved seed viability equation; forty years on. *Seed Science and Technology* 50 (1, Suppl.), 1–20. <https://www.ingentaconnect.com/contentone/ista/sst/2022/00000050/a00102s1/art00001>
3. Ellis, R. H.; Hong, T. D. (2007): Quantitative response of the longevity of seed of twelve crops to temperature and moisture in hermetic storage. *Seed Science and Technology* 35, 432–444. <https://centaur.reading.ac.uk/8496/>
4. Dickie, J. B.; Ellis, R. H.; Kraak, H. L.; Ryder, K.; Tompsett, P. B. (1990): Temperature and seed storage longevity. *Annals of Botany* 65, 197–204.

5. Fantinatti, J. B.; Usberti, R. (2007): Seed viability constants for *Eucalyptus grandis*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42 (1), 111–117. <https://www.scielo.br/j/pab/a/dtJRqVqdYbrXRhhDmxjH3KS/>
6. FAO (2014): *Genebank Standards for Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*. Überarbeitete Ausgabe. Rom: FAO. <https://www.fao.org/4/i3704e/i3704e.pdf>
7. Nagel, M.; Börner, A. (2010): The longevity of crop seeds stored under ambient conditions. *Seed Science Research*. https://www.ecpgr.org/fileadmin/templates/ecpgr.org/upload/NW_and_WG_UPLOADS/Wheat_Misc/SSR_NAGEL_2010.pdf
8. Royal Botanic Gardens Kew: *Seed Information Database (SID)*.
9. Kraak, H. L.; Vos, J. (1987): Seed viability constants for lettuce. *Annals of Botany* 59, 343–349. <https://academic.oup.com/aob/article-abstract/59/3/343/249466>
10. Ellis, R. H.; Hong, T. D.; Roberts, E. H. (1989): *Annals of Botany* 63, 601–611 (Erbse). <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087788>
11. Pritchard, H. W.; Dickie, J. B. (2003): Predicting seed longevity: the use and abuse of seed viability equations. In: *Seed Conservation. Turning Science into Practice*. Kew: Royal Botanic Gardens, 655–687.
12. Usberti, R.; Gomes, R. B. R. (1998): Seed viability constants for groundnut. *Annals of Botany* 82, 691–694. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0736>
13. Walters, C.; Wheeler, L.; Stanwood, P. C. (2004): Longevity of cryogenically stored seeds. *Cryobiology* 48, 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2004.01.007>
14. Walters, C.; Wheeler, L. M.; Grotenhuis, J. M. (2005): Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics. *Seed Science Research* 15, 1–20. <https://doi.org/10.1079/SSR2004195>
15. Solberg, S. Ø. u. a. (2020): Long-term storage and longevity of orthodox seeds: a systematic review. *Frontiers in Plant Science* 11, 1007. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01007>
16. van Treuren, R.; de Groot, E. C.; van Hintum, T. J. L. (2013): Preservation of seed viability during 25 years of storage under standard genebank conditions. *Genetic Resources and Crop Evolution* 60, 1407–1421. <https://doi.org/10.1007/s10722-012-9929-0>
17. Li, D.-Z.; Pritchard, H. W. (2009): The science and economics of ex situ plant conservation. *Trends in Plant Science* 14, 614–621. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.09.005>