Untersuchung der Bruchflächen sich öffnender verholzter Früchte der Gattung *Hakea* zum Verständnis von Sollbruchstellen

Phil Martens, Heike Beismann
Westfälisches Institut für Bionik, Westfälische Hochschule

Abstract

Hakea sericea and *H. salicifolia* are shrubby to arboreal species of the family Proteaceae. Originally from Australia, they are increasingly spreading invasively in New Zealand, Portugal, southern Spain, and South Africa. In Portugal, both species of this plant genus were introduced as ornamental, windbreak, and hedge plants and are now displacing native species. The successful establishment of both species is related to dispersal biology. The bellows fruits show a distinct serotiny and often remain on the parent plant for years. Only by forest fires or severe desiccation do the fruits open, releasing two winged seeds. During opening, the two halves of the fruit deform strongly, rupturing first across the ventral suture and then across the dorsal side. This opening behavior is described within the Proteaceae only for the genus *Hakea* and is unusual for bellows fruits, to which they are nevertheless counted. The fracture surfaces of the different tissues show different roughness. The tissues of the abaxial side (dorsal side) rupture with a smoother fracture surface than the tissues of the adaxial side (ventral side). In this work, different roughness parameters of the fracture surfaces are determined on random profile lines using a confocal microscope for the different tissues of the surfaces. Propagation of the fracture through the different tissues is explained based on the orientation and location of the cells in the two sides of the fruit halves. The extent to which the different rough fracture surfaces affect the opening and the forces required for it is discussed. First approaches for the optimization of technical predetermined breaking points are proposed.

Zusammenfassung

Hakea sericea und *H. salicifolia* sind strauch- bis baumförmige Arten der Familie Proteaceae. Ursprünglich aus Australien stammend, breiten sie sich zunehmend in Neuseeland, Portugal, Südspanien und Südafrika invasiv aus. In Portugal wurden beide Arten als Ziergewächs, Windschutz und Heckenpflanze eingeführt und verdrängen nun heimische Arten. Die erfolgreiche Etablierung der beiden Arten hängt mit der Ausbreitungsbiologie zusammen. Die Balgfrüchte zeigen eine ausgeprägte Serotinie und verbleiben oft über Jahre an der Mutterpflanze. Erst durch Waldbrände oder starke Austrocknung öffnen sich die Früchte und geben dabei zwei geflügelte Samen frei. Während der Öffnung deformieren sich die beiden Fruchthälften stark und reißen dabei zunächst über die Bauchnaht und anschließend über die Rückenseite auf. Dieses Öffnungsverhalten ist innerhalb der Proteaceae nur für die Gattung *Hakea* beschrieben und für Balgfrüchte, zu denen sie dennoch gezählt werden, ungewöhnlich. Die Bruchoberflächen der verschiedenen Gewebe zeigen dabei unterschiedliche Rauigkeiten. Die Gewebe der abaxialen Seite (Rückenseite) reißen dabei mit einer glatteren Bruchfläche als die Gewebe der adaxialen Seite (Bauchseite). In dieser Arbeit werden Rauheitsparameter der Bruchoberflächen auf zufälligen Profillinien mit einem Konfokalmikroskop für die verschiedene Gewebe der Oberflächen ermittelt. Das Propagieren des Risses durch die verschiedenen Gewebe wird anhand der Ausrichtung und Lage der Zellen in den beiden Seiten der Fruchthälften erläutert. Es wird diskutiert, inwieweit sich die unterschiedlich rauen Bruchoberflächen auf die Öffnung und die dafür nötigen Kräfte auswirken. Erste Ansätze zur Optimierung von technischen Sollbruchstellen werden vorgeschlagen.

Einleitung

Die Rauheit der Bruchflächen der verholzten Früchte von *H. sericea* und *H. salicifolia* werden untersucht, um das Funktionsprinzip des Öffnungsmechanismus zu verstehen und dieses für technische Sollbruchstellen nutzbar zu machen. Die Früchte können für mehrere Jahre an der Mutterpflanze verbleiben (Serotinie) [1] und öffnen sich i.d.R. erst bei Buschbränden, um die geflügelten Samen freizugeben. Der Öffnungsprozess wird anhand der Rauheit der Bruchflächen und Beobachtungen der Morphologie beschrieben und abstrahiert dargestellt.

Material und Methode

Es werden die Bruchflächen der beiden Arten *H. salicifolia* und *H. sericea* untersucht. Von zwei verschiedenen Individuen von *H. sericea* wird jeweils eine mehrjährig an der Mutterpflanze verbliebene Frucht und eine einjährige Frucht untersucht. Von *H. salicifolia* werden von drei unterschiedlichen Individuen eine mehrjährige Frucht untersucht und von zwei dieser Individuen jeweils zusätzlich eine einjährige Frucht.

Zur Messung der Rauigkeiten wird ein Konfokalmikroskop des Typs *µsurfbasic* der Marke *NanoFocus* verwendet. Die Messsoftware *µSoft* sowie die Analysesoftware *µAnalysis* sind ebenfalls von NanoFocus. Über µAnalysis werden in die zu untersuchenden Flächen 25 Profilschnitte gelegt. Diese werden zufällig verteilt, um repräsentative und unvoreingenommene Ergebnisse zu erzielen. Die Profilschnitte werde genutzt, um verschiedene Rauheitsparameter zu berechnen. Im Folgenden werden nur die gemittelten Rautiefen (Rz-Werte) weiter berücksichtigt [2].

Ergebnisse und Diskussion

Die Bruchflächen beider Arten sind im Bereich der Bauchnaht (Abb. 1 A) nach dem Mann-Whitney-U-Test auf einem Singnifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ rauer als auf dem dunklen Mesokarp (Abb. 1 B, Abb. 2). Der Rz-Wert der Bruchoberfläche der Bauchnaht (Abb. 1 A) bei *H. salicifolia* ist nach dem Mann-Whitney-U-Test auf einem Singnifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ um den Faktor 2 größer als der Rz-Wert der Bauchnaht bei *H. sericea* (Abb. 2). Bei *H. sericea* ist das helle Mesokarp (Abb. 1 C) mit größerer Varianz nach dem Mann-Whitney-U-Test auf einem Singnifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ rauer als beim dunklen Mesokarp (Abb. 1 B, Abb. 2) [3].

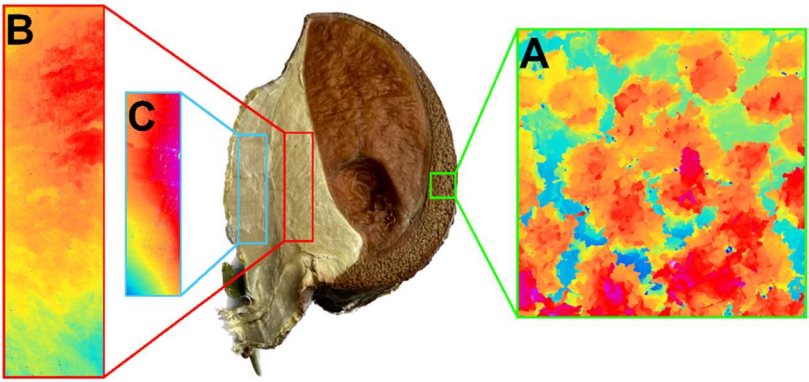

Abb. 1 Hakea sericea mit untersuchten Bereichen: A: lockeres Gewebe im Bereich der Bauchnaht, B: dunkles Mesokarp, C: helles Mesokarp. Originalabbildung farbig, von violett (hohe Elevationen) über rot, orange, gelb, grün bis blau (niedrige Elevationen).

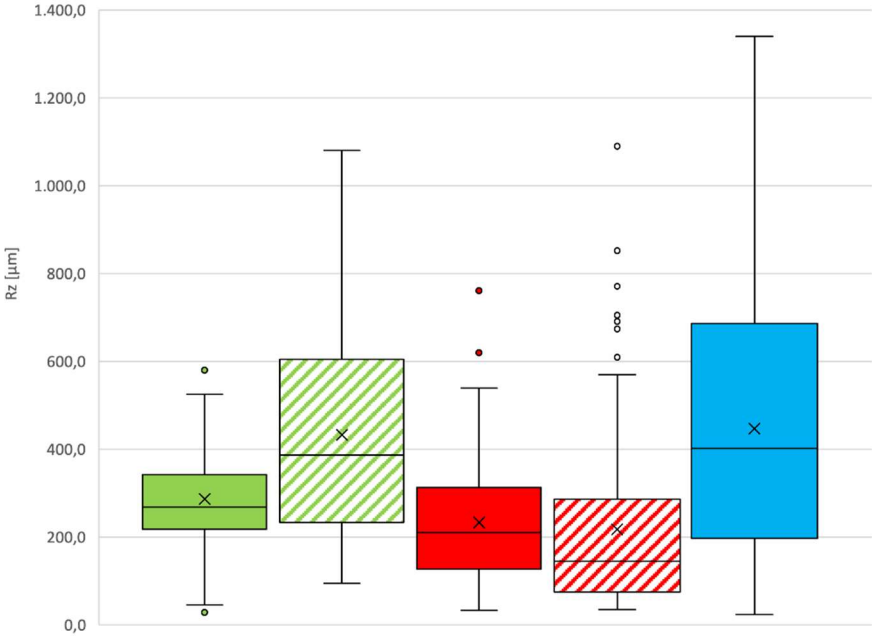

Abb. 2 Rauigkeit Rz in µm der untersuchten Bruchoberflächen; (v.l.n.r.) H. sericea Bauchnaht, H. salicifolia Bauchnaht, H. sericea dunkles Mesokarp, H. salicifolia dunkles Mesokarp, H. sericea helles Mesokarp. Statistische Auswertung siehe Text.

Durch das Austrocknen der Frucht beginnt die anisotrope Deformation und die Rissbildung startet. Hierbei entsteht eine zunehmend stärkere Zugkraft an der distalen Bauchnaht. Ein Riss propagiert zunächst durch das lockere Gewebe der Bauchnaht. Die durch die Deformation entstehende Scherspannung sorgt für das Entfernen der beiden bilateralsymmetrischen Fruchthälften voneinander. Die hinter der Bauchnaht liegende Samenhöhle führt während der Öffnung dazu, dass Spannungsspitzen an den Grenzen zum dunklen Mesokarp erzeugt werden, wodurch dieses Gewebe ebenfalls versagt. Der Riss breitet sich zwischen den Zellen entlang der Mittellamelle aus. Die Zellen sind hier so ausgerichtet, dass sie parallel zur Ausrichtung der Samenhöhle verlaufen, wodurch das Auftrennen des Gewebes begünstigt wird. Das helle Mesokarp der Rückennaht ist durch ein komplexeres Gewebe gekennzeichnet, dennoch kann der fortschreitende Riss nun auch dieses Gewebe durchtrennen [4].

Fazit und Ausblick

Der Öffnungsprozess der Früchte kann grob in vier abstrakte Komponenten unterteilt werden.

1. **Stark lockeres Material**

   Die Rissinitiation wird durch das lockere Gewebe der Bauchnaht begünstigt.

2. **Material mit größeren Hohlräumen**

   Die hinter der Bauchnaht liegende Samenhöhle erleichtert das Fortschreiten des Risses.

3. **Parallele Faserrichtung entlang der Rissebene**

   Die parallele Ausrichtung der Zellen sorgt für eine Richtungsweisung und Vereinfachung der Rissausbreitung entlang der Rissebene.

4. **Komplex strukturiertes Grundmaterial**

   Das helle Mesokarp versagt erst bei eintreffenden Spannungsspitzen des umliegenden Gewebes [4].

Durch diesen vierstufigen Aufbau ist eine systematische Erleichterung der Rissbildung gegeben. Spannungsspitzen an Grenzbereichen zweier Stufen sorgen für den Beginn des Versagens der stabileren Stufe. Diese Grenzbereiche können bei technischen Werkstoffen berechnet und

implementiert werden. Für eine Umsetzung sind mehrere Faktoren zu beachten. Rissinitiator muss ein Gewebe sein, das lockerer gepackt sein muss als das umliegende Material. In der Sollbruchstelle hinter dem Rissinitator müssen ein oder mehrere Hohlräume eingebracht werden, um die Rissebene kontrolliert zu bestimmen. Zur Rissebene parallele Fasern im weiter innen liegenden Bereich sorgen für gezieltes Propagieren des Risses. Der innere Teil der Sollbruchstelle, über welchen die Hauptlast geleitet wird, muss der stabilste Teil dieses Aufbaus sein. Nach Versagen der anderen Strukturen, muss die Spannungsspitze am innersten Element der Sollbruchstelle so groß sein, dass dieser Teil ebenfalls versagt.

Quellen

[1] B. Lamont (2021). „Evaluation of seven indices of on-plant seed storage (serotiny) shows that the linear slope is best“. Journal of Ecology 109, 4 – 18. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13436

[2] Deutsches Institut für Normung e. V. (2002), DIN EN ISO 1302. „Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation“. Berlin: Beuth Verlag

[3] M. Fischer, H. Beismann (2022). „3D characterization of the complex vascular bundle system of Hakea fruits based on X-ray microtomography (µCT) for a better understanding of the opening mechanism“. Flora 289, 152035. https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152035

[4] S. Vogel (2013). Comparative Biomechanics. Life’s Physical World. S. 329 - 345. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Phil Martens

Westfälische Hochschule Gelsenkirchen Bocholt Recklinghausen. Campus Bocholt

heike.beismann@w-hs.de

2017 - 2018	Freiwilliges Ökologisches Jahr, Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg
2022-2023	Studentische Hilfskraft, Westfälische Hochschule Bocholt
2023	Abschluss, Studium B. Sc. Bionik, Westfälische Hochschule