

Biomechanische Untersuchungen zum Öffnungsmechanismus von verholzten Früchten der Gattung *Hakea*

Artur Stachalski, Phil Martens, Heike Beismann

Westfälisches Institut für Bionik, Westfälische Hochschule, 46397 Bocholt, Germany

Summary

The species *H. sericea* and *H. salicifolia* (Proteaceae) are native to Australia. Their natural habitat is dry and nutrient-poor, and they are regularly exposed to bush fire. The loss of moisture causes the fruit to shrink and open, releasing two seeds. This paper compares the opening behaviour of the manipulated fruits, the shrinkage, opening force, Young's modulus and compressive strength of the two species, and discusses the influence of different tissues on opening. It is found that the mesocarp is mainly responsible for the anisotropic shrinkage behaviour.

Zusammenfassung

Die Arten *H. sericea* und *H. salicifolia* (Proteaceae) sind in Australien heimisch. Ihr natürlicher Lebensraum ist trocken und nährstoffarm, und sie sind regelmäßig Buschbränden ausgesetzt. Durch den Feuchtigkeitsverlust "schrumpft" die Frucht und öffnet sich, wobei zwei Samen freigesetzt werden. Diese Arbeit vergleicht das Öffnungsverhalten von manipulierten Früchten, das Schwindmaß, die Öffnungskraft, den Elastizitätsmodul und die Druckfestigkeit der beiden Arten und untersucht den Einfluss verschiedener Gewebe auf die Öffnung. Es wird festgestellt, dass das Mesokarp hauptsächlich für das anisotrope Schwindverhalten verantwortlich ist.

1. Einleitung

Die beiden Arten *H. sericea* und *H. salicifolia* kommen in trockenen und nährstoffarmen Gebieten vor. Sie bilden verholzte Balgfrüchte [1]. Sobald die Früchte von der Pflanze getrennt werden oder starker Austrocknung ausgesetzt sind, öffnen sie sich entlang ihrer Bauchnaht und Rückenseite, was innerhalb der Familie der Proteaceae einzigartig ist, und setzen dabei zwei geflügelte Samen frei. Öffnungsverhalten bei manipulierten Früchten,

Schwindverhalten, Öffnungskraft, E-Modul sowie Druckfestigkeit der Früchte werden in verschiedenen Projektarbeiten analysiert und in dieser Arbeit zusammengefasst. Die biomechanischen Eigenschaften von *H. sericea* und *H. salicifolia* werden gegenübergestellt, um den Struktur-Funktions-Zusammenhang beim Öffnen der Früchte besser zu verstehen, und damit eine Grundlage für bionische Innovationen z.B. für Sollbruchstellen oder faserverbundbasierte bewegliche Bauteile zu legen.

2. Material und Methoden

2.1 Manipulationsversuche

Bei Früchten von *H. sericea* werden verschiedene Anteile des Perikarps entfernt und das Öffnungsverhalten bei Trocknung (68°C und 20% Luftfeuchtigkeit), d.h. ob und wie weit sie sich noch öffnen, geprüft. Dabei wird das Exokarp gänzlich, das Mesokarp ganz, teilweise oder nur der abaxial bzw. lateral liegende Teil, entfernt [1].

2.2 Schwindverhalten

Für die Schwindversuche werden quaderförmige Proben aus den Früchten angefertigt. Nachdem die Proben in Wasser den fasergesättigten Zustand erreicht haben, werden Kantenlängen und Gewicht gemessen. Anschließend werden sie bei ca. 23°C und 65 % Luftfeuchtigkeit bzw. bei 103°C getrocknet [4,1]. Sobald Gewichtskonstanz erreicht ist, wird das prozentuale Schwindmaß berechnet [4].

2.3 Öffnungskraft

Für die Untersuchung der Öffnungskräfte werden geschälte und ungeschälte Früchte verwendet. Die blockierte Öffnungskraft wird in einer Prüfmaschine (Zwick und Roell) aufgenommen, es wird bei 50°C bzw. 80°C gemessen [5,2].

2.4 E-Modul und Druckfestigkeit

Für die Druckversuche werden würfelförmige Proben mit einer Kantenlänge von 5 mm aus dem Mesokarp der Früchte angefertigt [3]. Die Proben werden im fasergesättigten Zustand (Wassergehalt 43,6%) bei 22,5°C und im luftgetrockneten Zustand (Wassergehalt 3,4%) bei 19°C in einer Prüfmaschine (Zwick und Roell) analysiert [3]. Die Achsrichtungen für die Druckversuche entsprechen innerhalb der Frucht den Richtungen proximal-distal, lateral-lateral und abaxial-adaxial.

3. Ergebnisse

3.1 Manipulationsversuche

Die Früchte, denen das Mesokarp gänzlich oder nur in abaxial bzw. lateral liegender Richtung entfernt wurde, zeigen keine vollständige Öffnung. Eine Öffnung gilt als vollständig, sobald die Samen aus den beiden Fruchthälften freigesetzt werden können. Die Früchte, bei denen nur das Exokarp entfernt wurde und die Früchte, bei denen das Mesokarp nur teilweise entfernt wurde, zeigen eine vollständige Öffnung.

3.2 Schwindverhalten

Die Früchte beider Arten weisen ein anisotropes Schwindverhalten auf [4,1]. Dabei ist zu beobachten, dass bei beiden Arten das größte Schwindmaß in proximal-distaler Richtung liegt, wohingegen das kleinste Schwindmaß in medial-lateraler Richtung liegt. Das Schwindmaß von *H. sericea* ist ca. doppelt so hoch wie das von *H. salicifolia* (Abb. 1).

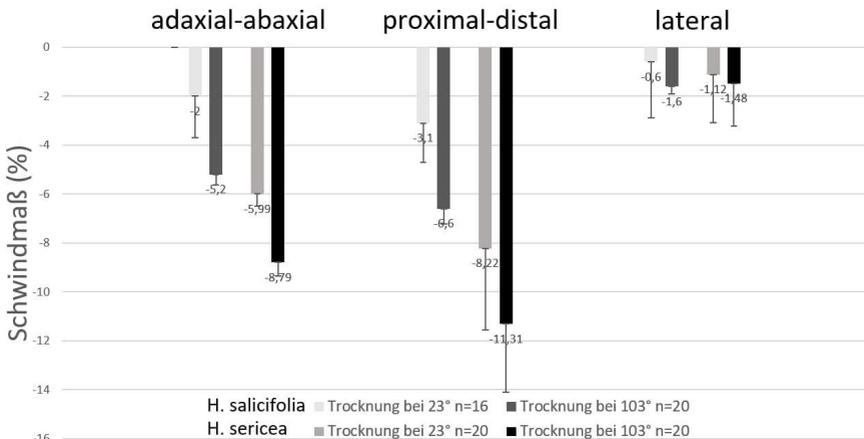


Abb. 1: Prozentuale Schwindmaße von *H. salicifolia* und *H. sericea* in den verschiedenen Raumrichtungen. [4,1] Die Stichproben der beiden Arten sind jeweils signifikant unterschiedlich laut T-Test auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.

3.3 Öffnungskraft

Die mittlere blockierte Öffnungskraft von *H. salicifolia* beträgt $11,1 \text{ N} \pm 5,4 \text{ N}$. [2]. Die blockierte Öffnungskraft von *H. sericea* beträgt im Mittel $40,0 \text{ N}$

$\pm 9,8$ N [5]. Die Öffnungskräfte von *H. sericea* sind bis zu 4x größer als die von *H. salicifolia* (Abb. 2).

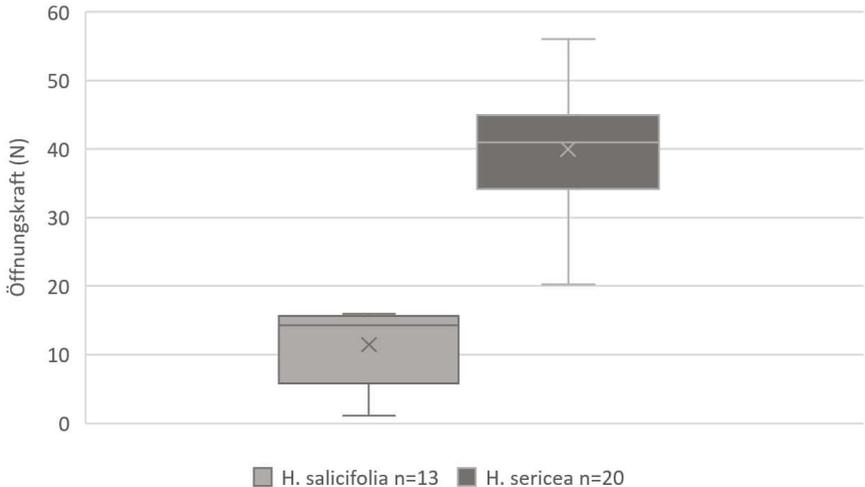


Abb. 2: Blockierte Öffnungskräfte von *H. salicifolia* und *H. sericea*, die Stichproben sind signifikant unterschiedlich laut Mann-Whitney-U-Test auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ [2,5].

3.4 E-Modul und Druckfestigkeit

Die Werte für E-Modul und Druckfestigkeit bei den Trockenproben sind bei beiden Arten höher als bei den Feuchtproben. E-Modul und Druckfestigkeit der Trocken- und Feuchtproben sind bei *H. salicifolia* höher als bei *H. sericea* (Abb. 3).

4. Diskussion

Da sowohl Schwindmaß als auch Öffnungskraft von *H. sericea* größer sind als bei *H. salicifolia*, kann angenommen werden, dass das anisotrope Schwindverhalten einen wesentlichen Anteil zur Öffnung der Früchte beiträgt. Die geschälten Proben der Manipulationsversuche zeigen, dass kein Zusammenhang zwischen auftretender Kraft und Exokarp existiert [5]. Die Anisotropie des Schwindmaßes und somit auch die Öffnungskraft lassen sich mit dem inneren Aufbau des Mesokarps, insbesondere dem Xylem, erklären (Abb. 4) [6]. Der Manipulationsversuch zeigt deutlich, dass

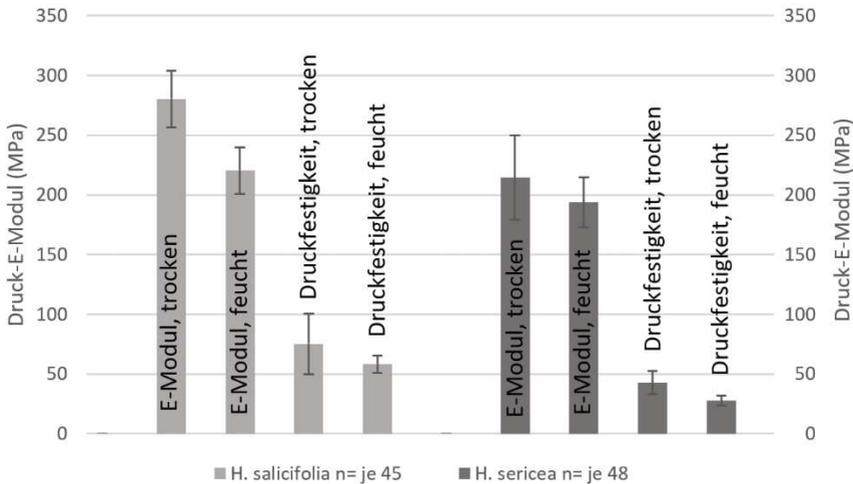


Abb. 3: E-Modul und Druckfestigkeit von *H. salicifolia* und *H. sericea* für Trocken- und Feuchtproben, die Stichproben für die beiden Arten sind jeweils signifikant unterschiedlich laut T-Test auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ [3].

das Mesokarp hauptverantwortlich für eine vollständige Öffnung ist. Die entstehenden Risse durch die Bauchnaht und Rückenseite können als Sollbruchstellen interpretiert werden. Die Risse und Abgleitungen bei den Trockenproben verlaufen entlang der Faserbündel, es reagiert quasi-spröde. Bei den Feuchtproben entstehen keine Risse entlang der Gewebegrenzen [3]. Die höheren Werte bei E-Modul und Druckfestigkeit von *H. salicifolia* gegenüber *H. sericea* können mit der unterschiedlichen Dichte des Materials erklärt werden. Proben aus dem Mesokarp von *H. salicifolia* weisen eine signifikant höhere Dichte auf als die Proben von *H. sericea*, wie erste Dichtemessungen zeigen.

Die innere Struktur des Mesokarps der Früchte beider *Hakea*-Arten ist demnach für die biomechanischen Werte entscheidend und beeinflusst das Öffnungsverhalten der Früchte.

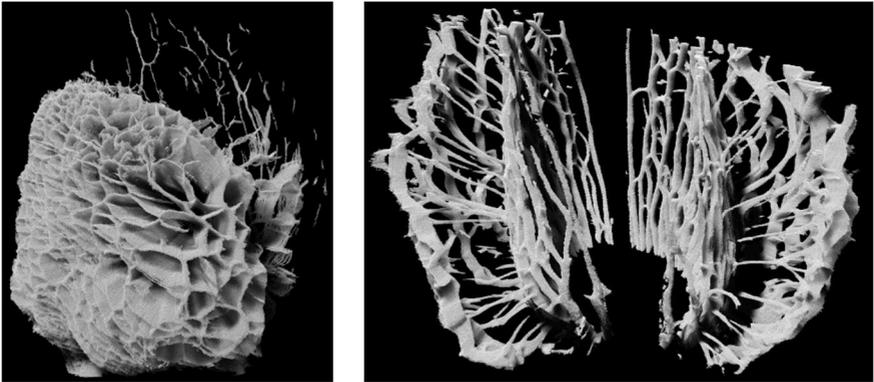


Abb. 4: Rekonstruierte und segmentierte Leitbündelstrukturen (Xylem) aus μ CT-Aufnahmen von *H. sericea* (links) und *H. salicifolia* (rechts) aus [6].

Quellen

- [1] Schmeing J (2018) Mechanische Untersuchungen zum Einfluss der unterschiedlichen Gewebe auf die Öffnung bei *Hakea sericea*. Projektarbeit WHS.
- [2] Gloxin L (2021) Untersuchung der mechanischen Kräfte des Öffnungsmechanismus von *Hakea salicifolia*. Projektarbeit WHS.
- [3] Frank R (2021) Bestimmung der Druckfestigkeit und des E-Moduls von Früchten der Art *Hakea salicifolia*. Projektarbeit WHS.
- [4] Herbers Igarza LM (2020) Projektbericht über die Bestimmung des Schwindverhaltens der Früchte von *Hakea salicifolia*. Projektarbeit WHS.
- [5] Ajuzie D (2020) Mechanische Untersuchung der Kräfte, welche während der Öffnung von den Früchten der *Hakea sericea* auftreten. Projektarbeit WHS.
- [6] Fischer M und Beismann H (2022) 3D characterization of the complex vascular bundle system of *Hakea* fruits based on X-ray microtomography (μ CT) for a better understanding of the opening mechanism. *Flora* 289, 152035. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152035>



Artur Stachalski

Westfälische Hochschule

heike.beismann@w-hs.de

2023

Bachelor of Science, Bionik, Westfälische Hochschule