

Verklebung von Harthölzern: Eindringen von Flüssigkeiten in Buche

Falk K. Wittel

Dr.Ing., Dipl.Wirt.-Ing.

Oberassistent an der ETH Zürich

fwittel@ethz.ch

Philipp Hass

Dipl. Ing.

Doktorand an der ETH Zürich

Miller Mendoza

MS

Doktorand an der ETH Zürich

Peter Niemz

Dr.Ing.

Professor an der ETH Zürich

Hans J. Herrmann

Dr. rer.nat.

Professor an der ETH Zürich

Kleberverbindungen sind von grundlegender Bedeutung für die Herstellung moderner Holzbau-Produkte. Trotz der technologischen und wirtschaftlichen Bedeutung von Kleberverbindungen gründet sich unser Wissen über die Ausbildung der Klebfuge und das Versagen der Verklebung überwiegend auf Erfahrungswerten, da für eine Beschreibung der Prozesse detaillierte Kenntnisse der Holzanatomie, der härtenden Adhäsive, sowie ihrem Eindringverhalten in die Holzstruktur erforderlich sind. Am Beispiel von Buchenholz wird skizziert, wie Klebfugen entstehen, sinnvoll charakterisiert, und letztlich ihre Form vorhergesagt werden können.

Die Güte von Verklebungen hängt stark von der Verteilung des Klebstoffs innerhalb der Holzteile ab. Im Gegensatz zu Nadelholz ist bei Laubholz das zugängliche Volumen meist grösser als die aufgebrauchte Klebstoffmenge. Prinzipiell kann also die gesamte aufgebrauchte Klebstoffmenge in die, von der Klebfläche zugänglichen Hohlräume des Holzes wegschlagen, bzw. wird durch Kapillarkäfte vom Holz „aufgesaugt“. Der Transport in das poröse Holz wird dadurch erschwert, dass Adhäsive auf ihrem Weg ins Holz dickflüssiger werden, weil sie aushärten oder Lösungsmittel in die Zellwände diffundieren. Um diese Vorgänge zu beschreiben benötigt man also genaue Kenntnisse des anatomischen Aufbaus des Porenraums, sowie des Härtungsverhaltens der verwendeten Adhäsive.

Das Gefässnetzwerk von Buchenholz

Bei Buche ist der Flüssigkeitstransport stark von dem ringeigenen Gefässnetzwerk dominiert. Dieses besteht aus Bündeln von schlauchartigen Gefässen, die bis zu 1m lang werden können und um ausgeprägte, radial orientierte Holzstrahlen herum geführt sind. An Kontaktstellen von Gefässen ist

durch spezielle Poren (Tüpfel) ein Flüssigkeitstransport zwischen den Gefässen möglich. Über diese Verbindungsstellen entsteht ein grosses Netzwerk, das prinzipiell alle Gefässe eines Jahrrings umfasst. Für den kapillaren Transport von Flüssigkeiten ist der mittlere Durchmesser der Gefässe entscheidend, aber auch deren Anzahl. Aus diesen beiden Grössen ergibt sich die vom Gefässnetzwerk gebildete Porosität. Skaliert mit der Jahrringbreite, ergeben Messungen an unterschiedlich breiten Jahrringen sehr ähnliche Verläufe (Abb.1). Um jedoch die Durchlässigkeit des von den Gefässen gebildeten Porenraums zu ermitteln, also die Permeabilität, muss die Topologie des Netzwerkes bekannt sein. Dreidimensionale tomographische (μ -CT) Bilder ermöglichen es das Gefässsystem zu isolieren (s. Abb. 2) um Verbindungsstellen der einzelnen Gefässe zu identifizieren. Über eine stufenweise Projektion aller Poren auf die jeweils benachbarten Bildebenen (s. Abb. 3) werden Vereinigungen (Ebene 1 \rightarrow 2) und Gabelungen (Ebene 3 \rightarrow 4) von Gefässen gefunden. Die Entfernung zwischen zwei Verbindungen entlang eines Gefässes bezeichnen wir als Segmentlänge. Deren Längenverteilung ist eine charakteristische Eigenschaft von Netzwerken und weist interessanterweise bei den untersuchten Buchenholzproben keine charakteristische Segmentlänge auf. Vielmehr können Segmentlängenverteilungen über Potenzgesetze approximiert werden. Hierbei könne unterschiedliche Regime ausgemacht werden, die zum Einen die Abstände zwischen den Tüpfeln innerhalb einer Kontaktzone und zum Anderen die Abstände zwischen Kontaktzonen darstellen. Am Ende der Verteilung ist ein typisch exponentieller Abfall aufgrund der endlichen Grösse unserer Proben erkennbar (s. Abb. 3) [1]. Ein weiteres morphologisches Mass stellt die Welligkeit der Gefässe in der RL-Ebene dar, die durch die Geometrie der Holzstrahlen gegeben ist (s. Abb. 2).

Das Härungsverhalten typischer Adhäsive

Heute steht im Holzbau eine breite Palette spezialisierter Klebstoffe zur Verfügung, die sich in Zusammensetzung und Härungsverhalten stark unterscheiden. Mit Harnstoffharz (UF), Polyvinylacetat (PVAc) und Einkomponenten Polyurethan (1K-PUR, Präpolymer) wurden typische Systeme mit unterschiedlicher Härungsreaktion gewählt. UF härtet in einer Polykondensationsreaktion zu einem spröden Duroplast aus, wobei Wasser als Kondensat abgegeben wird. Über den Anfangswassergehalt der dem Klebstoffpulver beigegeben wird, lässt sich die Anfangsviskosität, wie auch die zeitliche Viskositätsentwicklung einstellen (s. Abb. 4). Bei Kontakt mit Holz führt die Diffusion von Wasser in die Zellwände zu einer Viskositätserhöhung, was wiederum zu einer schnelleren Aushärtung führt [2]. Die Verfestigung von PVAc geht auf den Wasserverlust der Klebstoffdispersion zurück, da Wasser sehr einfach in die Holzzellwände diffundieren kann. Bei der Aushärtung von 1K-PUR Klebstoffen reagieren die chemischen Bestandteile des Klebstoffes mit der Feuchtigkeit im Holz und aus der Umgebung, wobei CO₂ freigesetzt wird, was zu Schaumbildung führt.

Ein grundlegendes Eindringmodell

Um das Eindringverhalten zu berechnen, muss der kapillare Transport der Klebstoffe in das Gefässnetzwerk berechnet werden, bei gleichzeitiger Berücksichtigung seiner Aushärtung. Um ein analytisch lösbares Eindringmodell für Klebstoffe in Buchenholz formulieren zu können, sind drastische Vereinfachungen der Gefässnetzwerktopologie, der Transportprozesse, sowie der Härungsvorgänge erforderlich. In unserem Lösungsansatz wird zunächst ausgerechnet, wie weit der härtende Klebstoff in einer geraden Kapillare eindringen kann, durch deren Wände Wasser diffundieren kann (s. Abb.5). In einem zweiten Schritt wird diese Eindringlänge auf ein stark vereinfachtes Netzwerk projiziert, das einem Fischernetz nachempfunden ist. Da Gefässe jedoch nicht nur in radialer, sondern auch in tangentialer Richtung verbunden sind, bilden mehrere Ebenen in longitudinaler Richtung gesehen ebenfalls ein solches Netz. Die Maschenweite in der RL-Ebene ist über die mittlere Grösse der Holzstrahlen gegeben, die in RT Ebene ein frei wählbarer Parameter (s. Abb.5). Um die Eindringtiefe zu bestimmen muss noch das Volumen, welches maximal in die Holzstruktur eingebracht werden kann, bis die Aushärtung des Klebstoffs einen weiteren Transport unterbindet mit der maximal zur Verfügung stehenden Klebstoffmenge verglichen werden. Ist diese kleiner, so verhungert die Klebfuge und die Tiefe

wird lediglich über das Volumen des Gefässnetzwerks, das der Klebstoffmenge entspricht, bestimmt. Am Ende muss das Ergebnis noch transformiert werden, um der Ausrichtung der jeweiligen Holzteile zu entsprechen. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in [3].

Ergebnisse

Um den Einfluss des Jahrringwinkels auf die Klebstoffpenetration zu untersuchen, wurden aus Buchenholzplatten, die mit unterschiedlichen Jahrringwinkeln und den beschriebenen Adhäsiven verklebt wurden, Proben für die μ -CT Untersuchung präpariert. Durch die Segmentierung der tomographischen Daten konnte die räumliche Klebstoffverteilung bestimmt werden und ins Verhältnis zum zugänglichen Porenraum der Gefässe gesetzt werden, also die Sättigung bestimmt werden. Da durch die Pendelbewegung der Gefässe eindringender Klebstoff schnell von der Klebfuge wegtransportiert wird, ist eine Charakterisierung der Klebfuge über die maximale Eindringtiefe mechanisch bedeutungslos. Vielmehr muss der eingedrungene Klebstoff ins Verhältnis zum zugänglichen Raum gesetzt werden (s. Abb.6). In den resultierenden Sättigungskurven zeichnen sich Klebfugendefekte und einseitig weggeschlagene Klebstoffe sehr stark ab, wie in Abb.6 zu erkennen ist. Der Einfluss des Jahrringwinkels, der ja hauptsächlich über die höhere Welligkeit und Konnektivität in tangentialer Richtung zustande kommt, zeichnet sich klar über eine breitere Klebstoffverteilung für höhere Jahrringwinkel ab.

Unser Modell geht von einer regelmässigen Netzwerktopologie und ebenen Klebflächen aus. Ausgehend von üblichen Pressdrücken und Netzwerktopologien errechnen wir für die verwendeten Adhäsive die sich ergebenden Eindringtiefen (s. Abb. 7). Dies erfolgt unter Berücksichtigung der beiden Beschränkungen: (i) das gesamte Klebstoffvolumen ist penetriert oder (ii) ein Klebstofftransport ist durch das Aushärten der Klebstoffe blockiert. Für PUR gilt die Beschränkung (i), während UF und PVAc durch Lösungsmitteldiffusion in die Zellwand rasch aushärten. Der Vergleich mit Experimenten bestätigt die Gültigkeit unseres Modells im Rahmen der für diese Studie verwendeten Materialien. Da nun alle Parameter des Modells bekannt sind, können wir errechnen, wie sich Jahrringwinkel, Porosität und Härtpungsparameter der jeweiligen Klebstoffe auf die Eindringtiefe auswirken (s. Abb.8). Mechanisch wünschenswert ist ein kontinuierlicher Verlauf der mechanischen Eigenschaften, also eine moderate Penetration, die über die richtige Klebstoffwahl gewährleistet werden kann.

Fazit

Die maximale Eindringtiefe von Klebstoffen in die Holzstruktur ist als Beurteilungskriterium für die Klebfugengüte bei Laubholz ungeeignet, da sich Klebstoffe hauptsächlich in einzelnen Gefässen befinden, die aufgrund der Netzwerktopologie rasch grosse Entfernungen zur Oberfläche erreichen. Ein Kriterium auf Grundlage der Sättigung, also der Füllung des zur Verfügung stehenden Porenraums bildet auch Defekte in der Klebfuge ab, und ist somit besser für eine Beurteilung geeignet. Zudem können durch die Beschränkung auf die Untersuchung von Einzelschnitten die Ergebnisse stark verfälscht werden. Auf Grundlage der charakterisierten Topologie des Gefässnetzwerks von Buchenholz, konnte ein vereinfachendes Modell zur Bestimmung der Eindringtiefe aufgebaut werden. Dieses erlaubt wiederum das ideale Härtpungsverhalten von Adhäsiven für gewünschte Eindringtiefen zu bestimmen.

Literatur

- [1] Hass, P., Wittel, F.K., McDonald, S. A., Marone, F., Stampanoni, M., Herrmann, H.J., and Niemz, P.: Pore space analysis of beech wood: The vessel network, in *Holzforschung* 64 (2010), p. 639-644.
- [2] Hass, P., Wittel, F.K., Mendoza, M., Stampanoni, M., Herrmann, H., Niemz, P.: Adhesive penetration in Beech wood. Experiments, (2010) in Veröffentlichung in *Wood Science and Technology*; arXiv:1007.0762v1.
- [3] Mendoza, M., Hass, P., Wittel, F.K., Niemz, P., Herrmann H.J.: Adhesive Penetration of Hard Wood. A

Generic Penetration Model, (2010) in Veröffentlichung in Wood Science and Technology; arXiv:1007.0761.

[4] Hass, P., Wittel, F.K., Stampanoni, M., Kästner, A., Mannes, D., Niemz, P.: 3D Characterization of Adhesive Penetration into Wood by Means of Synchrotron Radiation, in Proceedings of International Conference on Wood Adhesives, Sept. 28-30.2009, Lake Tahoe, Nevada, USA (2010).

Dank

Wir danken dem Schweizer Nationalfond für die Unterstützung im Projekt „Mehrskalenmodellierung von Klebfugenversagen in Holz“, M. Stampanoni, S. MacDonald, F. Marone und A. Kästner für die Möglichkeit μ -CT Messungen an der SLS beam-line TOMCAT des PSI durchführen zu können, sowie der Purbond AG (Sempach Station) und Geistlich Ligamenta AG (Schlieren) für die Bereitstellung von Adhäsiven.

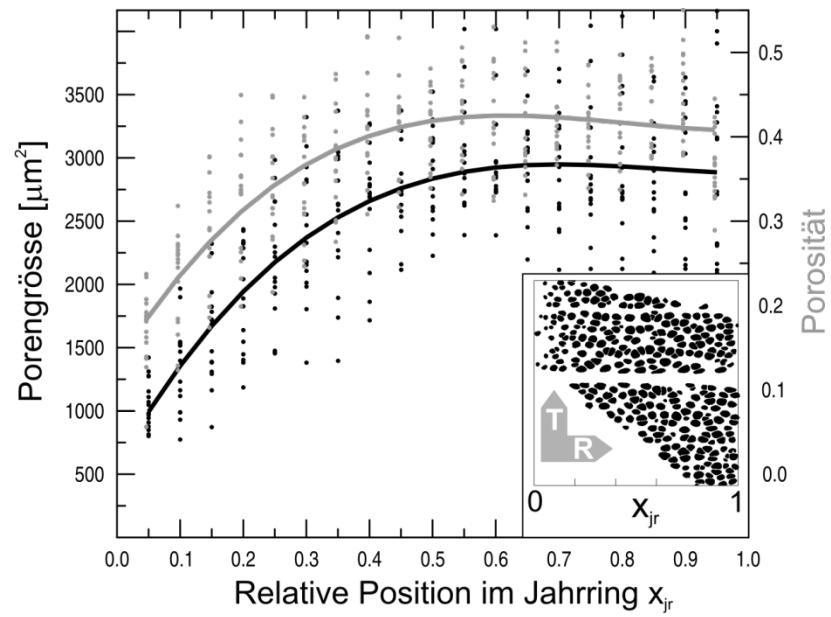


Abb.1: Gefässgrößen und Porosität über Jahrringe unterschiedlicher Breite. Der Bildausschnitt zeigt einen Hirnschnitt mit identifizierten Gefässen.

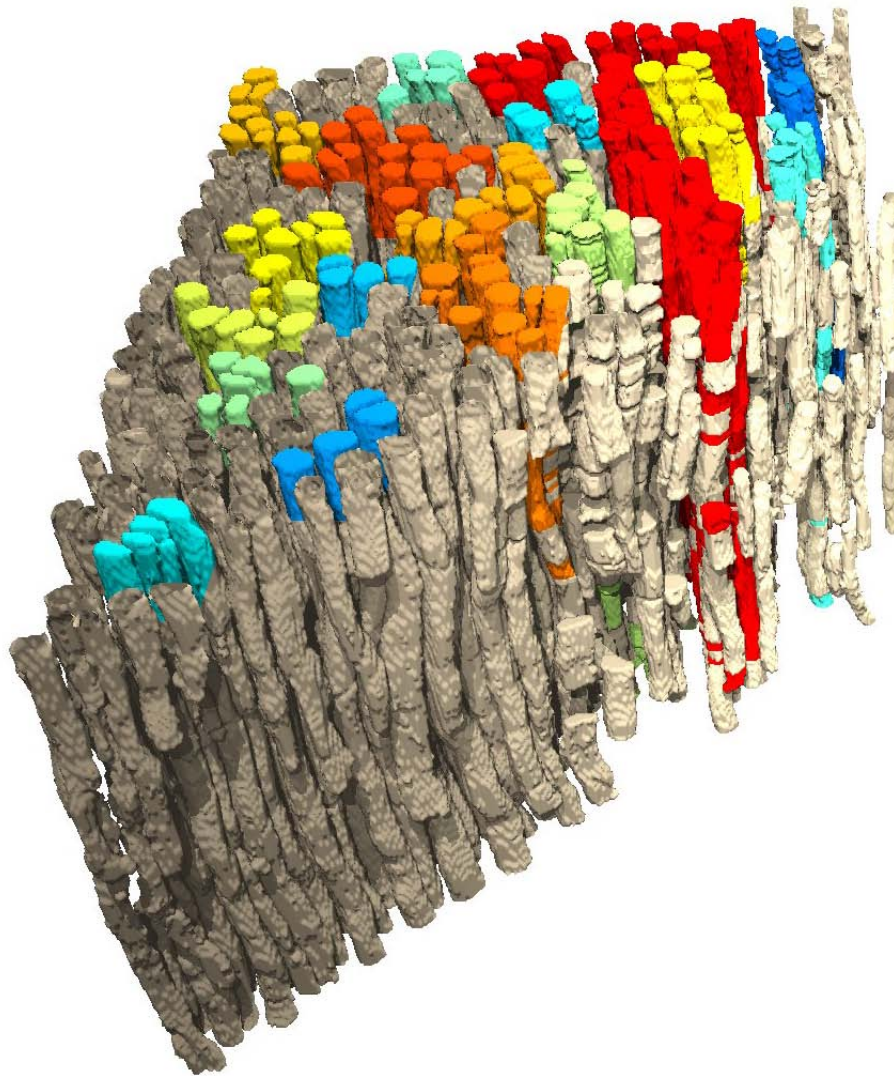


Abb2.: Ausschnitt des Gefäßnetzwerks in einem Jahring mit den 20 grössten, im Betrachtungsausschnitt zusammenhängenden Teilen des Netzwerkes.

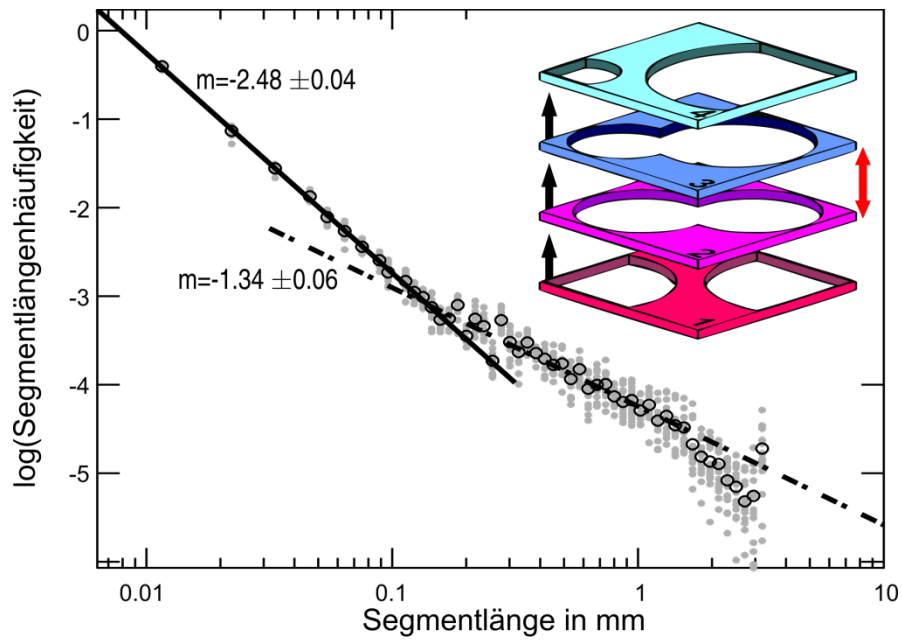


Abb3.: Verteilung der Segmentlängen der Gefäße. Bildausschnitt: Prinzip der Verbindungsanalyse.

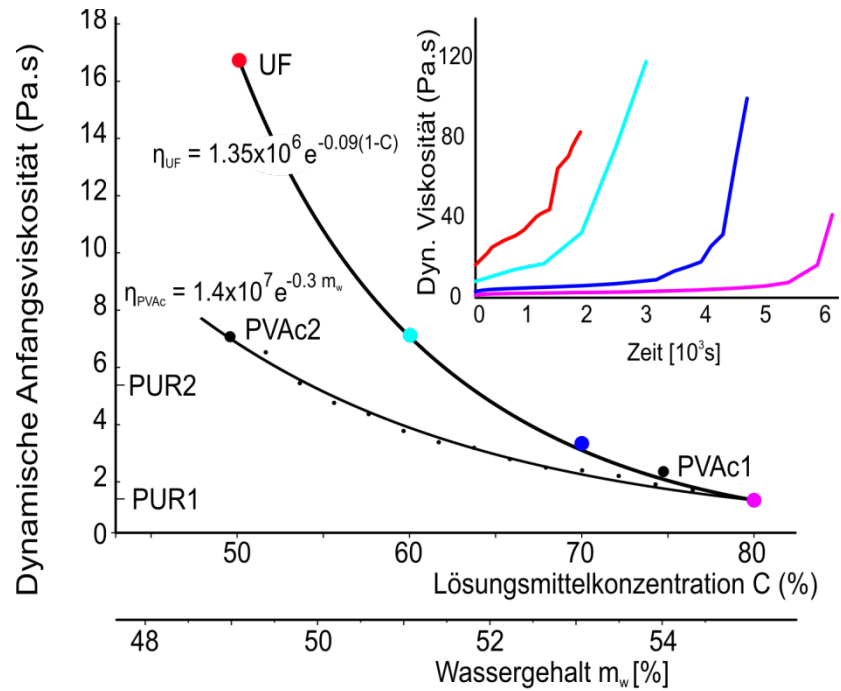


Abb.4: Anfangsviskosität verschiedener Klebstoffmischungen, sowie Härungsverhalten von UF gemessen mit einem Rotationsviskosimeter.

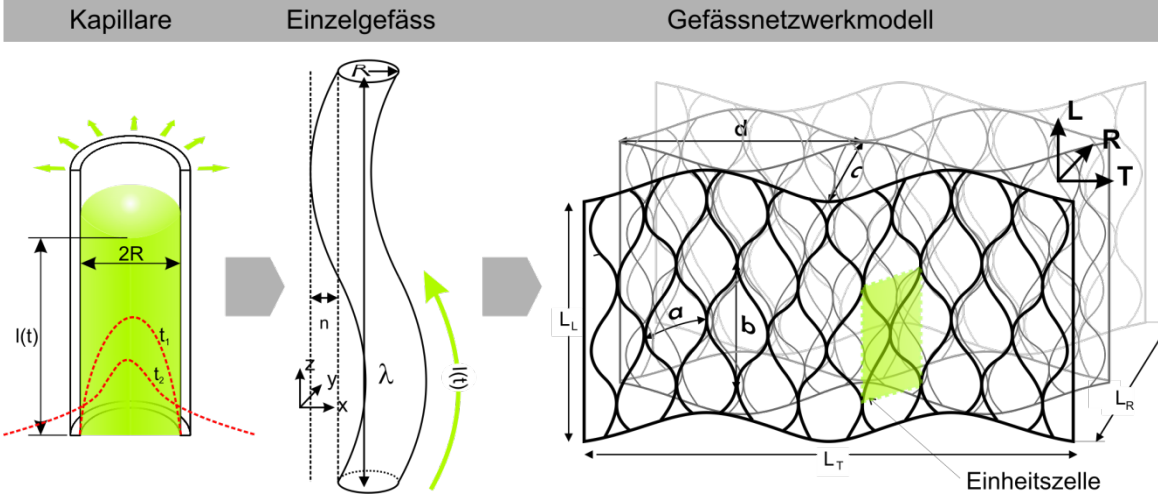
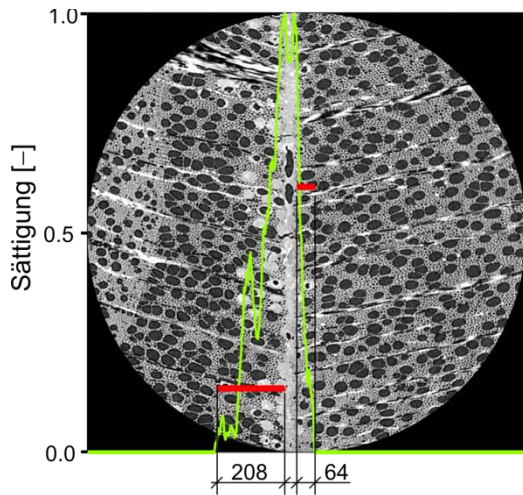
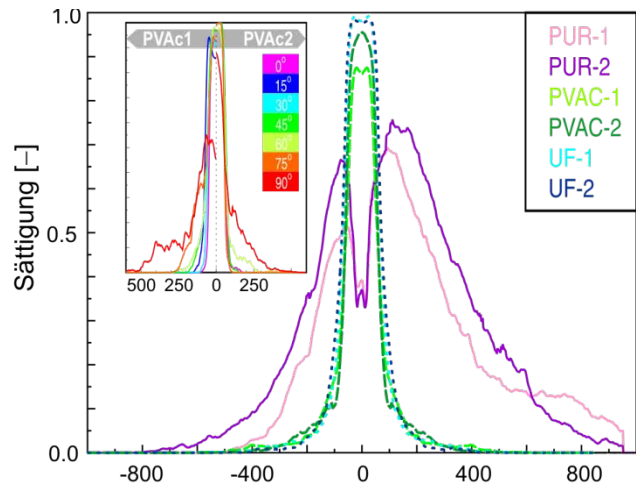


Abb.5: Geometrie des Eindringmodells mit Einzelkapillare und Netzwerk.



Maximale Eindringtiefe [μm]



Abstand von der Klebfugenmitte [μm]

Abb.6: Charakterisierung von Klebfugen und Mittelwertvergleiche der Klebstoffe und Orientierungen.

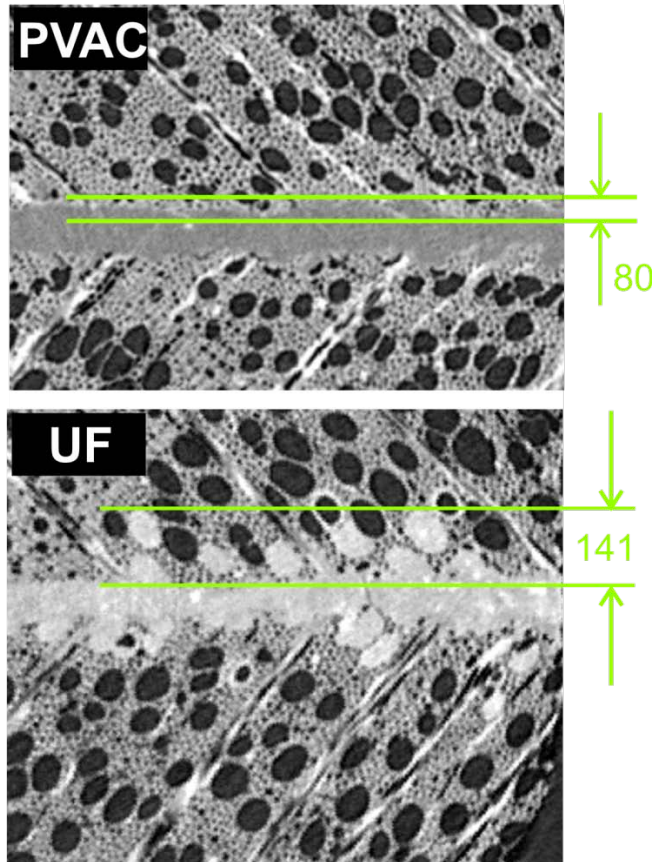
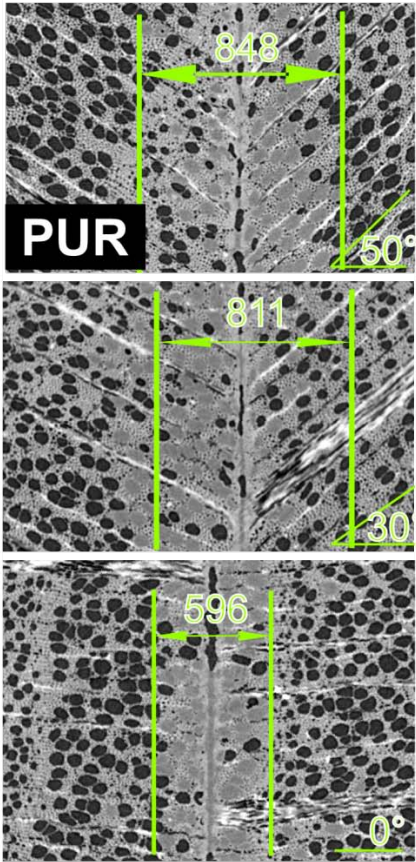


Abb.7: Klebfugen in repräsentativen Proben mit errechneten Eindringtiefen.

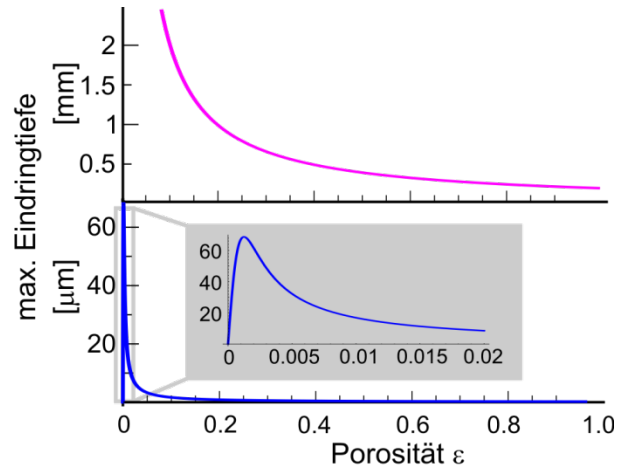
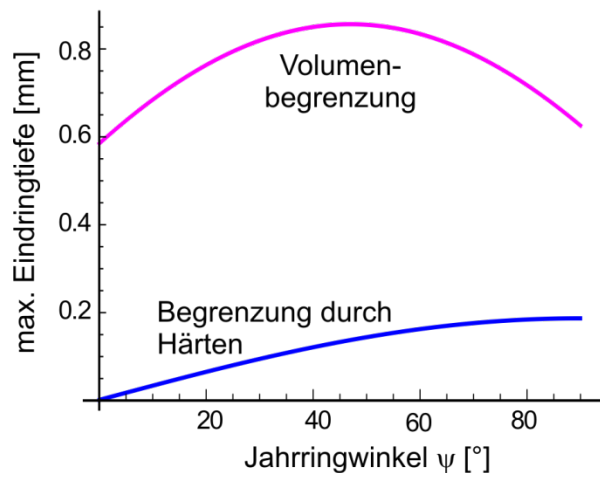


Abb.8: Modellvoraussagen für unterschiedliche Begrenzungen als Funktion des Jahringwinkels (links), sowie Eindringtiefe für UF bei variabler Porosität.