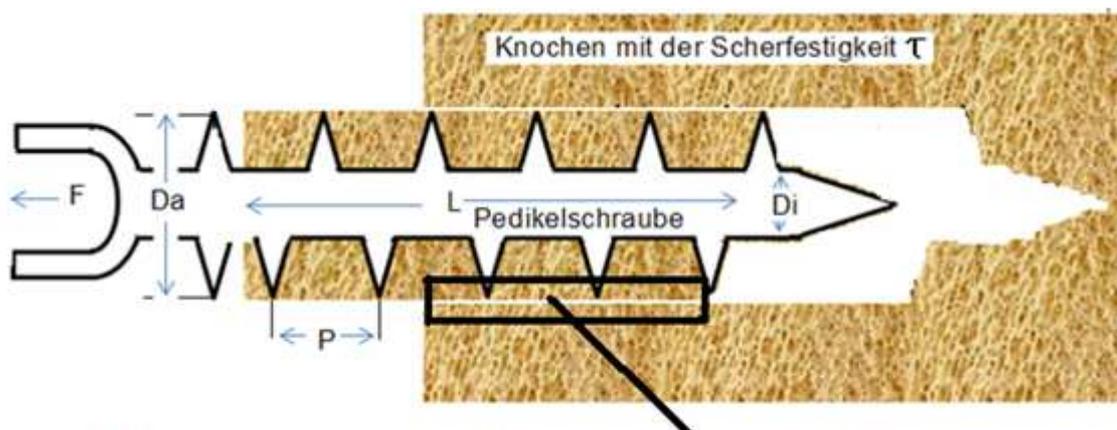


Die präoperative, nichtinvasive Bestimmung der Auszugsfestigkeit einer Schraube aus vitalem Knochen

Um sich zur beabsichtigten Implantation einer Schraube in den Knochen für oder gegen die Zementierung dieser Schraube entscheiden zu können, muß dem Chirurgen die Verankerungsfestigkeit dieser Schraube im dafür vorgesehenen Knochen bekannt sein, speziell wenn die Knochenqualität dieses Knochens durch pathologische Vorgänge reduziert ist. Die Vorgehensweise zur Erlangung dieser Information wird hier beispielhaft anhand einer in den Wirbelknochen eingedrehten Pedikelschraube beschrieben, gilt aber sinngemäß für jede Schraube in anderen Skelettlokalisationen.

Die folgenden Ausführungen basieren auf dem durch die Literatur gestützten Zusammenhang zwischen der Verankerungsfestigkeit der Schraube im Knochen und der Knochenmineraldichte als radiologischem Korrelat, die sich in Gestalt der Scherfestigkeit des Knochens als berechenbares werkstofftechnisches Äquivalent konstituiert.

Beim Auszug einer Schraube aus dem Knochen oder durch das Überdrehen einer Schraube im Knochen wird der Knochen am Außendurchmesser der Schraube abgeschert. Das Knochenmaterial wird durch das Schraubengewinde auf Scherung beansprucht, die Festigkeit des knöchernen Schraubenlagers wird also durch die Scherfestigkeit des Knochens an dieser Stelle (Bild) bestimmt und begrenzt.



**Knochenabschnitt, in dem die Knochenmineraldichte mit QCT zu bestimmen ist
(Knochenzone, in der der Außendurchmesser der Schraube liegt)**

Die Scherfestigkeit τ eines Materials (Werkstoffs) ist der Quotient aus der an diesem Material tangential angreifenden maximalen Auszugskraft (Azugsfestigkeit, Verankerungsfestigkeit) F und der mit dieser Kraft beaufschlagten Fläche A des Materials. Scherfestigkeit bedeutet, daß die tangential angreifende Auszugskraft flächenbezogen so groß ist, daß sie zum Bruch des Materials führt und damit zahlenmäßig die Höhe der Belastungsgrenze des Materials angibt. Dargestellt wird dieser allgemeine Zusammenhang durch die Formel:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Die Auszugsfestigkeit **F** einer Pedikelschraube im Wirbelknochen beträgt damit:

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{A}$$

Die Zylinderfläche **A** des abgesicherten Knochenzylinders errechnet sich aus der Länge **L** des Schraubengewindes und des Außendurchmessers **D_a** der Schraube durch:

$$\mathbf{A} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{D}_a \cdot \boldsymbol{\pi}$$

Damit beträgt die Auszugsfestigkeit: **F** = **τ** · **L** · **D_a** · **π**

Asnis [1] et al. erfassen in ihrer Studie noch die Einflüsse der Gewindetiefe **d** und der Ganghöhe **p** des Schraubengewindes auf die Berechnung der Auszugsfestigkeit über den Thread Shape Factor **TSF**. Der Korrekturfaktor **TSF** von Asnis [1] bezieht sich allerdings auf Schrauben mit symmetrischem Spitzgewinde, für Schrauben mit anderen Gewindetypen wäre die unten stehende Berechnungsformel für den **TSF** neu zu bestimmen. Für Schrauben mit symmetrischem Spitzgewinde wurde der Korrekturfaktor **TSF** von Asnis [1] mit

$$\mathbf{TSF} = \left(0,5 + 0,57735 \cdot \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{p}} \right)$$

angegeben.

Damit berechnet sich die Auszugsfestigkeit **F** der Schraube zu:

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{D}_a \cdot \boldsymbol{\pi} \cdot \left(0,5 + 0,57735 \cdot \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{p}} \right) \quad (1)$$

Die Gewindetiefe **d** errechnet sich aus:
$$\mathbf{d} = \frac{(\mathbf{D}_a - \mathbf{D}_i)}{2} \quad (2)$$

mit **D_i** = Innendurchmesser der Schraube

Dieses Berechnungsschema gilt für spongiösen Knochen mit geringer oder mäßiger Dichte und deckt damit die Verhältnisse (Knochenstruktur, Knochendichte) im Pedikel und Wirbelkörper ab.

Bis auf die Scherfestigkeit **τ** sind somit alle Variablen in Form von Schraubenabmessungen bekannt, diese werden entweder vom Hersteller mitgeliefert oder können ganz einfach mit Hilfe einer Schieblehre festgestellt werden.

Nach meinen Literaturkenntnissen hat bisher niemand die Vorgehensweise zur nicht-invasiven, präoperativen Ermittlung der Scherfestigkeit eines zur Schraubenimplantation vorgesehenen Wirbels oder beliebigen Skelettknochens beschrieben.

Da die Scherfestigkeit des zu instrumentierenden Wirbels (Knochens) vor der OP durch die geschlossene Haut und des damit unberührten Wirbels nicht ermittelt werden kann, schlage ich folgenden Weg zu ihrer Ermittlung über In-vitro-Versuche an Wirbeln aus Leichenpräparaten vor:

Die Scherfestigkeit τ wird durch Scherversuche bestimmt, Stone et al. [2] haben eine spezielle Vorrichtung diesbezüglich schon vorgestellt.

Da die unterschiedlichen Knochenqualitäten der beiden Pedikel desselben Wirbels vernachlässigbar sind, werden beide Pedikel zur gegenseitigen Kontrolle verwendet. Der eine Pedikel wird zur Bestimmung der Knochenmineraldichte mit QCT und anschließender Bestimmung der Scherfestigkeit verwendet. Die Knochenmineraldichte wird in dem Knochensektor bestimmt, in dem sich nach dem Eindrehen der Schraube das Gewinde der Schraube befindet. Danach wird genau dieser Knochensektor zur maschinellen Bestimmung der Scherfestigkeit (Werkstoffprüfung) aus dem Pedikel bzw. Wirbelkörper entnommen. Auf diese Weise entsteht, bei möglichst zahlreichen Messungen, eine Liste von Wertepaaren, deren Knochenmineraldichtewerte und Scherfestigkeitswerte einander zugeordnet sind.

In den gegenüberliegenden, noch unberührten Pedikel des Wirbels wird eine Schraube zur Durchführung eines axialen Auszugstests eingeschraubt. Die bei dem Auszugstest erhaltene Auszugskraft muß dann die mittels gemessener Scherfestigkeit errechnete Auszugskraft des anderen Pedikels widerspiegeln.

Um die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Wirbel möglichst gering zu halten, sollten möglichst frische Leichenpräparate für die In-vitro-Versuche verwendet werden. Je zahlreicher die Meßergebnisse aus den durchgeführten Versuchen sind, desto feiner und differenzierter ist die Aufteilung der Meßwerte.

Ist nun die Implantation einer Schraube in den Pedikel eines Patientenwirbels geplant, so kann dort die Knochenmineraldichte in der dafür vorgesehenen Pedikelzone nichtinvasiv mittels QCT bestimmt werden. Mit der zugeordneten Scherfestigkeit der gleichen Knochenmineraldichte aus der durch die Versuche gewonnenen Liste und den Schraubenabmessungen kann nun die zu erwartende Auszugsfestigkeit der zur Implantation vorgesehenen Schraube errechnet werden.

Die verschiedenen Knochenmineraldichten von Pedikel und Wirbelkörper (die Schraube liegt meistens im Pedikel und im Wirbelkörper) können durch die Berechnung der Kräfte separat für den Pedikel und den Wirbelkörper berücksichtigt werden. Dieses Berechnungskonzept gilt sinngemäß auch für alle anderen Knochenlokalisationen im Skelett, in die Schrauben implantiert werden sollen.

Einige Kraftwerte, die aus der Alltagsbelastung auf die Schrauben bzw. Instrumentationen resultieren, werden durch [3,4] angegeben. In Folge bezeichnen von Stempel et al. [3] eine Primärstabilität von 900N als ausreichend für implantierte Schrauben, Kueny et al. [4] geben einen Belastungsumfang von ca. 100N-300N an. Die Datenlage über die Größe dieser Kräfte (Mindestverankerungsfestigkeit) aus den täglichen

Belastungen, denen die implantierten Schrauben standhalten müssen, ist noch dürftig. Damit sind in dieser Richtung weitere Untersuchungen notwendig.

Die Größe der Differenz zwischen errechneter Auszugskraft und maximaler Alltagsbelastung entscheidet über den Zementeinsatz bei der Schraubenimplantation.

Durch die Möglichkeit, über den Zementeinsatz vor der OP entscheiden zu können, wird die OP besser planbar und die geplante OP-Zeit besser abgrenzbar, was sich vor allem bei einer größeren Anzahl einzusetzender Schrauben positiv auf das Endergebnis auswirkt.

Kurzbeschreibung des Verfahrens: Nachdem die In-vitro-Versuche zur Bestimmung der Wertepaare Scherfestigkeit-Knochenmineraldichte (QCT) und die durch die tägliche Bewegung des Patienten auftretenden Kräfte an den implantierten Schrauben ermittelt wurden:

Es wird der Knochenmineraldichtewert mittels QCT von der beabsichtigten Implantatstelle im Patientenknochen ermittelt. Zu diesem Wert wird aus der erstellten Wertepaarliste derjenige QCT-Wert herausgesucht, bei dem die Differenz zwischen den beiden Werten am kleinsten ist. Mit der dazugehörigen Scherfestigkeit τ zu diesem QCT-Wert aus der Wertepaarliste und den Schraubenabmessungen L , D_a , D_i und p wird mit Hilfe der oben genannten Berechnungsformeln (1) und (2) die Auszugsfestigkeit F der Schraube errechnet.

Literaturliste:

[1] Asnis, SE, Ernberg, JJ, Bostrom, MP, Wright, TM, Harrington, RM, Tencer, A, Peterson, M, Cancellous bone screw thread design and holding power. J Orthop Trauma. 1996;10(7):462-9.

[2] Stone, JL, Beaupre, GS, Hayes, WC, Multiaxial strength characteristics of trabecular bone. J Biomech. 1983;16(9):743-52.

[3] von Stempel, A, Kühle, J, Plitz, W, Stability of pedicle screws. 2: Maximum pullout force with reference to bone density. Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1994 Jan-Feb;132(1):82-6.

[4] Kueny, RA, Kolb, JP, Lehmann, W, Püschel, K, Morlock, MM, Huber, G, Influence of the screw augmentation technique and a diameter increase on pedicle screw fixation in the osteoporotic spine: pullout versus fatigue testing. Eur Spine J. 2014 Oct;23(10):2196-202. doi: 10.1007/s00586-014-3476-7. Epub 2014 Aug 1.