

Zur mechanischen Belastbarkeit des Tentorium cerebelli

Ergänzende Untersuchungen zur Frage von Tentoriumverletzungen und primär traumatischen Hirnstammschäden

R. Dirnhofer¹, F. Walz² und Th. Sigrist¹

¹ Institut für gerichtliche Medizin des Kantonsspitals, Rorschacherstraße 95, CH-9007 St. Gallen/Schweiz

² Gerichtlich-Medizinisches Institut der Universität Zürich, CH-8000 Zürich

Mechanical Tolerance of Tentorium Cerebelli

Summary. In some cases of accidents primary traumatic brain stem hemorrhages are seen in conjunction with lesions of the tentorium cerebelli. In order to decide, whether accelerations of the infra- or supratentorial brain tissue are actually capable of causing tentorium lesions, burst and tear tests of tentorium tissue were conducted. The mean dynamic biaxial tearing force was found to be about 4 bar. This value supports the hypothesis that a main injury causing factor of the tentorium in cases without skull fracture could be the relative motion between the tentorium and the brain hemispheres. The mass of the cerebellum however seems to be insufficient to cause such injury producing deceleration forces on the tentorium.

Key words: Brain stem injury, primary – Tentorium injury – Cranial trauma, mechanical tolerance – Rotation injury

Zusammenfassung. In einer früheren Untersuchung wurde das gelegentlich gemeinsame Vorliegen von primär traumatischen Hirnstammlungen zusammen mit Verletzungen des Tentorium cerebelli beobachtet. Um nun zu klären, ob die beim Schädel-Hirntrauma sich bewegenden Massen des infra- bzw. supratentoriellen Raumes überhaupt ausreichen, derartige Verletzungen am Kleinhirnzelt zu setzen, wurde dessen mechanische Belastbarkeit durch Berstdruck- und Zugversuche geprüft. Als mittlerer Grenzwert, bei dem es zur Zerreißung des Kleinhirnzelttes kommt, konnte ein dynamischer Berstdruck von etwa 4 bar ermittelt werden. Die Größenordnung dieses Druckwertes spricht dafür, daß der entscheidende verletzungsbedingende Vorgang in Fällen ohne Schädelfraktur in einer Relativbewegung zwischen dem Großhirn und dem Tentorium zu sehen ist. Hingegen scheint die Masse des Kleinhirns nicht auszureichen, Tentoriumverletzungen zu setzen.

Schlüsselwörter: Hirnstammlungen, primäre – Tentoriumverletzungen – Schadelf-Hirntrauma, mechanische Belastbarkeit – Rotationsverletzungen

Anlässlich früherer Untersuchungen zur Frage der Entstehung und Überlebenszeit primär traumatischer Hirnstammblutungen [2] ist uns das gelegentlich gemeinsame Vorliegen solcher Verletzungen zusammen mit kleinen Rupturen bzw. intraduralen Blutungen in unmittelbarer Nachbarschaft des Tentoriumschlitzes aufgefallen. Diese Befunde veranlaßten uns damals, die Frage nach der Art und Weise der Scher- bzw. Zugbeanspruchungen des Hirnstammes – die ja bekanntlich die Ursache von traumatischen Stammhirnblutungen sein sollen [1, 9, 11, 19, 20, 23, 24] – zu stellen.

Wir konnten in unserer früheren Mitteilung [2] anhand der morphologischen Befunde allein und da im Schrifttum keine Meßdaten über die mechanische Belastbarkeit des Tentorium cerebelli bekannt waren, lediglich hypothetische Vorstellungen über die den Zug- und Scherkräften zugrunde liegenden biomechanischen Vorgänge entwickeln. Wir haben uns dabei, wie schon Lindenberg [10] als auch Krauland [9] und Wojahn [23] überlegt, inwiefern die durch das eingespannte Tentorium bedingte Kammerung des Schädelinnenraumes in einen supra- und infratentoriellen Abschnitt nicht nur eine Rolle bei der Entstehung von sekundären [3, 7, 10, 15] sondern auch von primären traumatischen Stammhirnblutungen spielen könnte. Wir sind dabei von der Vorstellung ausgegangen, daß infolge der festen Verbindung des Tentoriums mit dem Schädel und seiner gleichzeitig engen topischen Beziehung zum Klein- und Großhirn und dem Hirnstamm bei Kräfteinwirkungen auf die Kopf-Halsregion Relativbewegungen auftreten können, die zu Verletzungen dieser Gebilde führen. Als wesentlichste Komponente haben wir dabei auch eine Rotationsbewegung des Kopfes [5, 6, 12, 13, 14, 15, 20, 22] um die bitemporale Achse angenommen, wobei das Tentorium entweder von dem noch in Ruhe befindlichen oder beschleunigten Klein- bzw. Großhirn gedehnt wird, wodurch es zu Rissen des Bindegewebes und der Gefäßwände und damit auch zu Blutaustritten im Kleinhirnzelt kommt. Ihre Lokalisation in unmittelbarer Nähe des Tentoriumschlitzes findet in dem nicht so dichten Verlauf der Bindegewebsfaserung jener Stellen [16] – eine Art *Locus minoris resistentiae* – gegenüber den übrigen Abschnitten des Kleinhirnzeltes ihre Erklärung.

Um größere Gesamtdeformationen des Kopfes als Ursache der Tentoriumverletzungen auszuschließen, wurden damals nur Fälle ohne Schädelbrüche untersucht. Trotzdem mußten mehrere Fragen offen bleiben; unter anderem die Möglichkeit, ob nicht auch geringere Deformationen des Schädelinnenraumes die Verletzung bedingen könnten. Vor allem aber konnten wir wegen des Fehlens von mechanischen Meßdaten des Tentoriums nicht entscheiden, ob die Massenverhältnisse der supra- bzw. infratentoriellen Hirnabschnitte tatsächlich ausreichen könnten, um im Rahmen von Relativbewegungen derartige Läsionen am Kleinhirnzelt zu setzen. Aus diesem Grunde haben wir anhand experimenteller Untersuchungen die mechanische Belastbarkeit und damit die Zerreißfestigkeit des Tentoriums geprüft.

Material und Methodik

Die Versuche wurden zusammen mit der EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs-Anstalt) St. Gallen durchgeführt.¹

1. Bestimmung der Berstfestigkeit

Apparat: Berstdruckprüfer Schopper-Berstapparat

Art der Prüfung: Mehrere Tentorien wurden entlang des Sinus transversus und der Felsenbeinpyramiden abgetrennt und bis zu max. 48 Stunden in physiologischer Kochsalzlösung aufbewahrt.

1 An dieser Stelle sei Herrn Markus Rüedi herzlich gedankt

Tabelle 1. Ergebnisse

Probe (v. 1.12.77)	Druckver- such gemessener Berstdruck in bar	Berechnete		Probe (v. 15.12.77)	Zugversuch (uniaxial)	
		Reiß- kraft in N/cm	Reiß- dehnung in %		quasistatisch	dynamisch
		Reiß- kraft in N	Reiß- dehnung in %		Reiß- kraft in N	Reiß- dehnung in %
1 links	2,23	20,0	31	1	28,4	24
2 rechts	2,45	22,0	31	2	17,3	16
3 rechts	2,00	18,5	28	3	12,3	19
4 links	3,70	33,2	31	4	30,3	27
5 rechts	2,60	24,1	28	5	35,0	18
6 links	2,50	23,2	28	6	10,5	30
				7	45,6	24
Mittelwert	2,58	23,5	29,5	Mittelwert	25,6	23
95 % Vertrauens- Intervall	0,62	5,4	1,7	95 % Vertrauens- Intervall	11,9	5
					39,7	3
					14,2	

Vor der Prüfung wurden dann annähernd runde Proben entnommen und flach liegend sowie spannungslos über die Membrane gelegt, mit einem Anpressring festgeklemmt und bis zum Bersten mittels Lufteinlaß aufgewölbt (biaxial).

Prüfbedingungen:

Prüfklima : 20°C und 65% rel. Luftfeuchtigkeit
 Prüffläche : 7,3 cm² (30,5 mm ϕ)
 Anzahl Proben : 6

Membrane : 0,5 mm dick
 Prüfungsgeschwindigkeit : 0,1 kp/cm² pro Sekunde

Ergebnisse: siehe Tabelle 1

2. Bestimmung der Reißkraft und Reißdehnung nach SNV 198461

Prüfprinzip: quasistatischer Zugversuch

Prüfbedingungen:

Prüfklima : 20°C und 65% rel. Luftfeuchtigkeit
 Einspannlänge : 2 cm
 Probenbreite : 1 cm
 Belastungsprinzip : konstante Dehnungsgeschwindigkeit ($7 \cdot 10^{-5}$ m/s)
 Reißzeit : ca. 60 Sekunden bis zum Reiß
 Probenzahl : 7

Ergebnisse: siehe Tabelle 1

3. Bestimmung der Reißkraft und Reißdehnung (dynamisch)

Prüfprinzip: Die Proben werden zwischen zwei Klemmen eingespannt, von denen eine an einer Kraftmeßdose befestigt und die andere auf einem Beschleunigungsschlitten montiert ist. Während des Reißvorganges wird gleichzeitig die Kraft auf die Probe und die Geschwindigkeit des Schlittens registriert und in einem Transientenrecorder gespeichert. Die gespeicherten Kurven werden mit einem Schreiber aufgezeichnet.

Prüfbedingungen:

Prüfklima : 20°C und 65% rel. Luftfeuchtigkeit
 Einspannlänge : 3 cm
 Probenbreite : 1 cm
 Belastungsprinzip : konstante Dehnungsgeschwindigkeit (0,38 m/s)
 Reißzeit : ca. 15 msec. bis zum Reiß
 Probenzahl : 14

Ergebnisse: siehe Tabelle 1

Besprechung der Ergebnisse

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, wurde der Berstdruck des Tentoriums lediglich durch einen quasistatischen Versuch, die Reißkraft hingegen durch einen quasistatischen und dynamischen uniaxialen Zugversuch ermittelt. Da sich nun aber die Bewegungsabläufe während des Unfallgeschehens im Bereiche von Millisekunden abspielen können und somit durch den quasistatischen Versuch mit 26 Sek. Berstzeit die tatsächlichen Verhältnisse nicht genügend genau reproduziert wurden, war es notwendig, den Wert für einen dynamischen Berstdruck abzuschätzen. Es wurde deshalb das Verhältnis der quasistatischen zu den dynamischen Reißwerten der uniaxialen Zugversuche geprüft. So ergaben die Zugtests eines jeweils 1 cm breiten Tentoriumstreifens im Mittel von 7 Versuchen eine mittlere quasistatische Reißkraft von 25,6 Newton und bei weiteren 7 Versuchen eine mittlere dynamische Reißkraft von 39,7 Newton (ca. 4 Kp). Somit läßt sich für das menschliche Tentorium im dynamischen Versuch mit sehr kurzfristig einwirkenden Zugkräften (0,38 m/s, Reißzeit 15 ms) eine um ca. 50% größere Reißfestigkeit als im quasistatischen Test (7×10^{-5} m/s, Reißzeit 60 s) nachweisen, ein Wert, der in guter Übereinstimmung mit den Angaben in der Literatur steht [17, 18]. Legt man nun dieses Verhältnis der im Zugversuch gewonnenen Werte auch dem biaxialen Berstdruckversuch zugrunde und nimmt damit an, daß ähnliche Reißvorgänge vorliegen und

somit die dynamischen Werte im gleichen oben genannten Verhältnis (50% Zunahme) zu den gemessenen quasistatischen stehen, so läßt sich ein dynamischer Berstdruck einer kreisförmigen Tentoriumfläche von ca. 4 bar bzw. 4 atm. oder $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ abschätzen.

Wir sind uns natürlich bewußt, daß es sich bei diesen Daten nur um überschlägige Näherungswerte handeln kann, da einerseits durch die Anordnung des Versuches die Abhängigkeit des Berstdruckes von der Druckanstiegsgeschwindigkeit nicht erfaßt werden konnte und andererseits das Tentorium im Schädelinnenraum keine kreisförmige Geometrie wie im Versuch aufweist, ein Umstand, der die Größe des Berstdruckes stark beeinflußt. Immerhin darf man annehmen, daß bei nicht kreisförmiger Fläche aufgrund des Auftretens von Spannungskonzentrationen die Berstdrucke im allgemeinen niedriger sind. Außerdem muß man bei Festigkeitsprüfungen von biologischem Material wegen der Beschaffenheit und Struktur biologischen Gewebes auch mit einer relativ großen Streubreite der experimentellen Ergebnisse rechnen. Da aber eine recht gute Übereinstimmung in der Größenordnung der Reißkräfte der uniaxialen Zugversuche mit den durch die quasistatischen Berstdruckversuche errechneten besteht, halten wir es für berechtigt, die gewonnenen Ergebnisse der Frage zugrunde zu legen, ob sie mit dem Ausmaß der im realen Unfallgeschehen auftretenden Beanspruchungen vereinbar sind.

Wie wir anhand unserer früheren Untersuchungen [2] gesehen haben, ist der Unfall mit Tentoriumverletzung sicher immer schwerer Art. So konnten wir diese Läsionen ausschließlich bei heftigen traumatischen Ereignissen wie Sturz aus großer Höhe, Anfahren von Fußgängern von rückwärts her, Eisenbahn- und Autoinsassenunfällen mit relativ hoher Aufprallgeschwindigkeit beobachten. Retrospektiv haben wir nun anhand unseres damaligen Untersuchungsmaterials versucht, die im Gehirn aufgetretenen Verzögerungskräfte während des Unfalls zu berechnen. Dies scheiterte jedoch daran, daß weder die stattgehabten Geschwindigkeiten noch die für die Berechnung notwendigen Deformationswege genügend bekannt waren. Hingegen wissen wir von Schlittenversuchen [4, 8, 21], daß bei Aufprallgeschwindigkeiten zwischen 40–80 km/h und Schlittenverzögerungen von etwa 18–30 g beim Angegurteten Verzögerungswerte im Kopfbereich von über 100 g auftreten können, also Beschleunigungen in einer Größenordnung, die weit über denen der Schlittenverzögerung liegen. Man darf daher annehmen, daß beim Nichtangegurteten, bzw. Fußgänger noch höhere Beschleunigungswerte auftreten können. Legt man daher für die Berechnung der auf das Tentorium einwirkenden Kräfte Gesamtverzögerungswerte (a_{res}) zwischen 100–200 g im Kopfbereich zugrunde, so ergeben sich folgende Belastungswerte für das Tentorium:

$$p = \frac{K}{K} = \frac{M \cdot a}{F} = \frac{0,5 \cdot 1000 \text{ bzw. } 2000}{25 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^5 \text{ bzw. } 4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

wobei p = Druck, K = Kraft, F = Fläche, M = Masse einer Großhirnhälfte, a = Beschleunigung, N = Newton und m = Meter entspricht. Da das Tentorium in situ weniger in der Normalrichtung (senkrecht zur Fläche) belastet wird, kommt der Berechnung nur eine größenordnungsmäßige Bedeutung zu.

Unter Zugrundelegung der Masse einer Großhirnhälfte errechnet sich somit im obigen Beispiel ein Druck zwischen 2 und 4 bar, der also in jenem Bereich liegt, der der experimentell ermittelten Grenzbelastung entspricht, wodurch die Möglichkeit einer Tentoriumzerreiung gegeben ist. Stellt man hingegen die gleiche Berechnung mit der

Masse einer Kleinhirnhälfte von ca. 0,07 kg an, so werden Druckwerte erreicht, die für eine Tentoriumruptur nicht ausreichen; es sei denn, daß Beschleunigungen im Kopfbereich von 600–700 g zugrunde gelegt werden, die aber in der realen Unfallsituation kaum auftreten. Wir müssen daher die in unserer früheren Mitteilung u.a. vertretene Meinung, wonach das Tentorium am Kleinhirn aufprallt und es dadurch zu Rissen kommen kann, korrigieren. Hinsichtlich der Richtung der Relativbewegungen sind einerseits die Fälle mit bzw. ohne Kopfaufprall, andererseits die Initial- bzw. die für die Verletzungsmechanik weniger bedeutsame Reboundphase zu unterscheiden. Wird beispielsweise ein sich nach vorne bewegender Körper im Thoraxbereich abgebremst, wird der Schädel und das Tentorium aufgrund der Fixation an der HWS in eine Rotation gezwungen, während das Gehirn dabei infolge seiner nur geringen mechanischen Kopplung mit dem Schädel etwas länger in der reinen Translation verharret. Dies führt in der ersten Phase zu einer Verschiebung des Großhirns nach occipital und somit zum Druck auf das Tentorium. Nach Ende der Rotationsbewegung des Schädels schwingt das Gehirn in der zweiten Phase nach frontal und das Kleinhirn prallt auf dem Tentorium auf. Eine ähnliche Relativbewegung findet beim Schlag gegen das Occiput statt, vor allem in der jeweils ersten Phase. Die bei den betrachteten Verzögerungen des Kopfes zu erwartenden Schädeldeformationen dürften sich zusätzlich als erschwerender Faktor auswirken. Welche Bedeutung dabei die Änderung der Winkelgeschwindigkeit im Rahmen der Rotationsbewegung des Kopfes – auf die übrigens auch G. Heess [4] in ihrer Dissertation aufmerksam gemacht hat – spielt, muß vorläufig noch offen bleiben. Ebenso wird späteren Untersuchungen vorbehalten bleiben müssen, welche Rolle die geschilderten intracerebralen Bewegungsvorgänge – wegen der unmittelbaren Nachbarschaft des Tentoriums zum Hirnstamm und der Hippocampusregion – bei der Entstehung der *Comotio cerebri* spielen.

Danksagung. Für die Beratung in physikalischen Belangen möchten wir Herrn Dr. P. Niederer, Institut für biomedizinische Technik der Universität und ETH Zürich herzlich danken

Literatur

1. Breig, A.: Biomechanics of the central nervous system. Some basic normal and pathologic phenomena. Stockholm: Almquist and Wiksell 1960
2. Dirnhofer, R., Patscheider, H.: Zur Entstehung von Hirnstammverletzungen. *Z. Rechtsmed.* 79, 25–45 (1977)
3. Gerstenbrand, F., Lücking, C. H.: Die akuten traumatischen Hirnstammschäden. *Arch. Psychiat. Nervenkr.* 213, 264–281 (1970)
4. Heess, G.: Wirbelsäulenverletzungen menschlicher Leichen bei simulierten Frontalaufprallen. Diss. Heidelberg 1977
5. Holbourn, H. A. S.: Mechanics of head injury. *Lancet* II, 438–441 (1943)
6. Holbourn, H. A. S.: Mechanics of brain injuries. *Brit.med.Bull.* 3, 147–149 (1945)
7. Jellinger, K.: Häufigkeit und Pathogenese zentraler Hirnläsionen nach stumpfer Gewalteinwirkung auf den Schädel. *Wien Z. Nervenheilk.* 25, 223–294 (1967)
8. Kallieris, D., Schmidt, G.: Belastbarkeit gurtengeschützter menschlicher Körper bei simulierten Frontalaufprallen. *Z. Rechtsmed.* 74, 31–42 (1974)
9. Krauland, W.: Über Hirnschäden durch stumpfe Gewalt. *Dtsch. Z. Nervenheilk.* 163, 265–328 (1949)
10. Lindenberg, R.: Significance of the tentorium in head injuries from blunt forces. *Clin. Neurosurg.* 12, 129–142 (1966)

11. Lindenberg, R., Freytag, E.: Brainstem lesions characteristic of traumatic hyperextension of head. *Arch. Pathol.* **90**, 505–515 (1970)
12. Ljung, C. B. A.: Studies of the motion of the brain at a suddenly applied rotation of the skull. *IRCOBI Conference Proceedings*, S. 303–310. Amsterdam: 1973
13. Ljung, C. B. A.: A model for brain deformation due to rotation of the skull. *J. Biomechanics* **8**, 263–274 (1975)
14. Löwenhielm, P.: Strain tolerance of the Vv. cerebri sup. (bridging veins) calculated from head-on collision tests with cadavers. *Z. Rechtsmed.* **75**, 131–144 (1974)
15. Mayer, E. Th.: Zentrale Hirnschäden nach Einwirkung stumpfer Gewalt auf den Schädel. *Arch. Psychiatr.* **210**, 238–262 (1967)
16. Melnikow, N.: Histologische Untersuchungen über den normalen Bau der Dura mater und über Pachymeningitis interna. *Beitr. Pathol. Anat.* **28**, 217–254 (1900)
17. Melvin, J. W., Mohan, D., Wineman, A. S.: Mechanical characteristics of soft tissues at high strain rates, University of Michigan. Michigan: Ann Arbor 1976
18. Sonoda, T., Yoshikawa, K., Ibuki, S.: Examination on the shearing and punching strength of human cerebral and spinal dura mater. *J. Kyoto Pref. Med. Univ.* **71**, 703–709 (1962)
19. Unterharnscheidt, F., Higgins, L. S.: Pathomorphology of experimental head injury due to rotational acceleration. *Acta Neuropathol.* **12**, 200–240 (1969)
20. Vogt, G. E., Saldeen, T.: Über den Abriß zahlreicher oder sämtlicher Vv. cerebri sup. mit geringem Subduralhämatom und Hirnstammläsion. *Dtsch. Z. Ges. Gerichtl. Med.* **64**, 9–20 (1968)
21. Voigt, G. E., Lange, W., Dotzauer, G.: Efficacy of air bags – a pilot study on cadavers. *Z. Rechtsmed.* **72**, 22–31 (1973)
22. Voigt, G. E., Löwenhielm, P., Ljung, C. B. A.: Rotational cerebral injuries near the superior margin of the brain. *Acta Neuropathol.* **39**, 201–209 (1977)
23. Wojahn, H.: Traumatische Hirnstammschäden. *Dtsch. Z. Ges. Gerichtl. Med.* **54**, 49–52 (1963/64)
24. Wuermeling, H. B., Struck, F.: Hirnstammrisse bei Verkehrsunfällen. *Beitr. Gerichtl. Med.* **23**, 297–302 (1965)

Eingegangen am 22. September 1978