

Institut für Gerichtliche Medizin der Universität Heidelberg
(Direktor: Prof. Dr. Georg Schmidt)

DIE BELASTBARKEIT DES HALSES UND DER
SCHÄDELBASIS BEI INDIREKTEM TRAUMA.

Georg Schmidt

Die Verletzungen des Halses und der Schädelbasis durch indirektes Trauma nehmen im gleichen Maße zu wie die schnelle Bewegung des Menschen und seine ungewollten Verzögerungen und Beschleunigungen. Verkehr und Sport stehen ursächlich an erster Stelle. Sehr häufig sind Aufprallunfälle mit Relativbewegungen zwischen Kopf und Rumpf, sei es beim Heckaufprall - Hyperextension des Halses - oder Frontalaufprall - Hyperflexion des Halses. Dazu kommen der gefährliche Seitenaufprall und der Schrägaufprall im Gurtsystem.

Rotationsbewegungen des Kopfes um die z-Achse sind bei indirektem Halstrauma selten. Ebenso wenig gibt es reine Translationsbewegungen in der Richtung der x-Achse, dagegen kommen sie in der Richtung der z-Achse vor.

Die vom Mediziner eingeführten Begriffe Flexion und Extension verwirren bei technischer Anwendung. Daher sollte das räumliche Koordinatensystem der Kristallographen Anwendung finden, wenn die Grundbewegungen des Halses und Kopfes beschrieben werden.

Translation = lineare Bewegung oder Beschleunigung
Rotation = Bewegung um eine Achse
Pfeilachse = faciale Achse = x-Achse
Querachse = Schulterachse = y-Achse
Hochachse = kraniale Achse = Körperlängsachse = z-Achse

Die anatomisch außerordentlich komplizierte Gliederkette der Halswirbel läßt eine grob schematisierende Vereinfachung zu, wenn die Grundbewegungen zu beschreiben sind: Man kann zwei Hauptdrehpunkte annehmen (Clemens und Burrow). Einen in Kopfmitte bei C₁ und einen am Halsansatz bei C₆. Für biomechanische Überlegungen hat sich diese Vereinfachung als brauchbar erwiesen.

Relativbewegungen zwischen Hals und Kopf führen angesichts der Massenverhältnisse zwischen Kopf und Rumpf zu Schleuderbewegungen des Kopfes, wenn die Stabilisierung der willkürlichen Kopfhaltung durch Muskelkräfte nicht mehr ausreicht. Robbins und Roberts geben die physiologischen Winkelbewegungen des Halses um die y-Achse nach vorn (aus der Ruhelage) mit 60 - 100°, nach hinten mit 60 - 90° an. Die Rotation um die x-Achse soll 40 - 57° nach jeder Seite betragen. Die Rotation um die z-Achse wird mit 70 - 87° nach jeder Seite angegeben. Aktive und passive Bewegungen innerhalb der genann-

ten Winkelbereiche sind für einen jungen und gesunden Menschen physiologisch, werden aber bei höheren Beschleunigungen nicht immer ohne Verletzungen ertragen. Muskelrisse und Nervenzerrungen sind die Folgen am Hals, Gehirnerschütterung und Hirnhautblutung diejenigen am Zentralnervensystem.

Die Grenze zum Pathologischen beginnt für einen gesunden und jungen Menschen bei linearen Beschleunigungen in der Körperachse über 20 g und über 10 msec Einwirkungsdauer. Bänder und Muskeln sind dabei besser belastungsfähig als die Knochen. Darum gibt es bei Überdehnung in der Längsachse Schädelbasisringbrüche. Sie treten auf, wenn etwa der Rumpf beim Aufprall auf ein starres Steuerrad oder Armaturenbrett festgehalten wird, aber der Kopf noch eine Bewegung durchführt und mehr oder weniger linear in Richtung der z-Achse beschleunigt wird.

Dabei reißt ein Loch in die Schädelbasis, das bis 10 cm Durchmesser haben kann und exzentrisch das foramen occipitale magnum umgibt. Man spricht von einer Traktionsfraktur. Die Bruchstücke sind um eine geringe Strecke (oft nur 1 mm) aus dem Verband der Schädelbasis nach außen verschoben. Im Moment der Zerreißung ist aber die Dislokation der Bruchstücke stärker und kann zu Teilabrissen der Nervenfasern im Bereich der Hirnschenkel oder der medulla oblongata aber auch an einzelnen Hirnnerven und Blutgefäßen führen. Wir haben solche Verletzungen im wesentlichen bei Aufprallgeschwindigkeiten über 100 km/h gesehen. Experimentell traten sie nicht auf bei Frontaufprallversuchen mit 5 Leichen im Dreipunktgurtsystem, wobei die Aufprallgeschwindigkeit 50 bzw. 80 km/h betrug. Der Verzögerungsweg lag zwischen 50 und 130 cm.

Bei Versuchen mit Leichentorsi haben Clemens und Burow bereits bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h und Bremswegen von 30 cm Abrisse der Schädelbasis in 8 % ihrer 53 Fälle festgestellt. Es handelte sich meistens um Muskel- und Bänderpräparate ohne Haut und Unterhautfettgewebe. Daher sind diese mit frischen Leichen durchgeführten Versuche nicht voll mit unseren vergleichbar. Die Torsi wurden in Richtung der x-Achse bewegt. Bereits in der ersten Beschleunigungsphase des Kopfes, Kopfneigung 45° , 70 - 80 msec nach Beginn, traten Spitzenwerte von 100 g und Schädelbasisabriss auf.

Die Tabelle zeigt berechnete Verzögerungswerte und Kopfkräfte, wenn 50 bzw. 100 km/h Aufprallgeschwindigkeit bei Bremswegen von 0,5 bzw. 1,5 m berücksichtigt werden. Ein angenommenes Kopfgewicht von 5 kp (mit einem Teil des Halses) führt erst bei 100 km/h zu Verzögerungen über 20 g und in gefährliche Kopfkraftbereiche. Für die Rekonstruktion von Verletzungsmechanismen sind derartige Berechnungen bedeutungsvoll.

T a b e l l e

Aufprallge- schwindigkeit	Bremsstrecke des Rumpfes	Verzögerung	Kopfkraft (Kopfgewicht 5 kp)
50 km/h	0,5 m	19,66 g	98,30 kp
50 km/h	1,5 m	6,55 g	32,75 kp
100 km/h	0,5 m	78,65 g	393,25 kp
100 km/h	1,5 m	26,22 g	131,10 kp

Diese Traktionsfrakturen der Schädelbasis wurden früher fälschlich als Stauchungseffekte zwischen Kopf, Hals und Rumpf bezeichnet. Patscheider und Reimann haben den Mechanismus weitgehend geklärt. Es gibt zwar auch diesen zweiten Mechanismus, wenn ein Stoß vom unteren Rumpfe her über die Wirbelsäule auf die Schädelbasis übertragen wird. Durch eine Art Stanzeffekt entsteht dann ein Ringbruch der Schädelbasis mit Dislokation der Bruchenden nach innen. Bänder- und Muskelrisse des Halses fehlen bei diesem Verletzungsmechanismus. Sturz in Richtung der z-Achse auf den Steiß ist eine der Hauptursachen für solche relativ seltenen Brüche. Versuchsergebnisse stehen uns hierzu nicht zur Verfügung.

Sowohl Traktions- als auch Pressions- oder Stauchungsfrakturen der Schädelbasis sind wegen der gleichzeitigen Schädigung des Zentralnervensystems meistens sofort tödlich. Anfangsstadien mit zarten Fissuren werden überlebt und können bereits schwere neurologische Ausfallerscheinungen machen: Commotio, Contusio cerebri, Contusio bulbi et spinae. Aus den Versuchen und aus der Unfallpraxis wissen wir, daß die rein translatorischen Bewegungen des Kopfes selten sind. Rotationsbewegungen treten regelmäßig zusätzlich auf. Wichtig ist sowohl für die Entstehung der Schleudertraumen wie auch für ihre Deutung und Rekonstruktion, ganz besonders aber für ihre ärztliche Behandlung, daß Überdehnungen im Halsbereich stets vorliegen. Sie führen zu Bandscheibenrisen (oft mehrfachen), Wirbelkörper-, -bogen- und -fortsatzbrüchen. Bei der Rotation um die y-Achse nach vorn (Hyperflexion) sind besonders die Dornfortsätze betroffen. Lange Hälse erreichen größere Rotationsbeschleunigungen als kurze. Wegen der anatomischen Besonderheiten (die oberen Dornfortsätze der Halswirbelsäule liegen verdeckt, die unteren, nämlich C₆ und C₇ ragen hervor) und wegen des Hauptdrehpunktes in Höhe von C₆ sind die unteren Halswirbelfortsätze und die oberen Brustwirbeldornfortsätze am häufigsten verletzt.

Die Begrenzung der Rotationsbewegungen nach vorn liegt bei etwa 130°, aber über 100° schon jenseits des physiologischen Bereichs. Rotationsbewegungen nach hinten sind bis

150° möglich und über 90° verletzend. Die dabei entstehenden Verletzungen: Bandscheiben- und Bänderrisse, Wirbelkörperbrüche, Gelenkfortsatzbrüche, Weichteilrisse im vorderen Halsbereich, Kehlkopfbrüche, werden durch geeignete Kopfstützen im Kraftfahrzeug verhindert. Die Nackenmuskulatur bildet hierbei zusammen mit dem Unterhautfestgewebe ein mächtiges und schützendes natürliches Polster. Seitliche Biegungen des Halses (Rotation um die x-Achse) sind bis 60° physiologisch. Die Schultern begrenzen diese Bewegungen bei etwa 100°. Hier sind die Vertebralarterien besonders rißgefährdet. Allerdings halten sie Dehnungen um 1 - 2 cm unter günstigen Umständen aus.

Zur Erforschung der Belastbarkeit des menschlichen Körpers führen wir Versuche mit frischen Leichen durch. Wegen der gegenwärtigen und zukünftigen Sicherheitsbestimmungen für Kraftfahrzeuge interessieren uns unter anderem die Relativbewegungen von Kopf und Hals am gurtgeschützten Körper beim Aufpralltest.

Unsere Versuchsanlage wurde Ende 1972 in Betrieb genommen. Ein Schienenfahrzeug von 500 kg Gewicht wird mittels eines Fallgewichtes von 13 t durch Flaschenzug (Übersetzung $i = 8$) auf die berechnete Geschwindigkeit gebracht. Bis 100 km/h können auf einer Beschleunigungsstrecke von 24 m Länge erreicht werden. Die Bremsung erfolgt durch Aufprall eines Schwertes an der vorderen Wagenunterkante auf einen verformbaren Blechstreifen. Je nach Geschwindigkeit, Fahrzeuggewicht und Auslegung des Bremsmaterials sind Verzögerungsstrecken möglich, die denen von Kraftfahrzeugen beim Aufprall auf eine starre Wand oder auf ein anderes Fahrzeug entsprechen. Die kinematographische Registrierung der Bewegungsabläufe erfolgt mit 1000 Bildern pro Sekunde.

Beschleunigungen am Kopf wurden in Richtung der z-Achse und der x-Achse gemessen. Bei 50 km/h Aufprallgeschwindigkeit lagen die Beschleunigungen in der z-Richtung im Bereich von 80 - 100 g, in der x-Richtung um 40 - 50 g. Die Spitzenwerte waren etwa 50 msec nach Beginn der Fahrzeugbremsung erreicht. Die Gurtkräfte am Rumpf erreichten 600 - 800 kp (gemessen an der Schulter), die Fahrzeugverzögerung weniger als 30 g in 70 msec. Erst 25 msec nach Beginn der Fahrzeugverzögerung beginnt die Beschleunigung in der z-Richtung des Kopfes und erreicht den Höhepunkt (100 g) nach 50 msec. Für Einzelheiten siehe Kallieris und Schmidt.

Bei der Verwendung von Schrägschultergurten wurden sehr unterschiedliche Verletzungen festgestellt, die mit dem Lebensalter erheblich zunahmten. Von der Darstellung der Rumpferletzungen wird hier abgesehen.

Am Hals traten Muskelrisse in den tiefen spino-costalen Muskeln im Bereich der unteren Hals- und oberen Brustwirbelsäule auf. Dornfortsatzabrisse lagen vorwiegend an

C₆, C₇, D₁, D₂, D₃, oder D₄. Clemens und Burow haben bei ihren Versuchen keine Dornfortsatzbrüche beschrieben, wohl aber Risse der Ligamenta interspinalia. Zum einen konnte die Präparationstechnik eine Zerreißung dieser Bänder fördern, zum andern war der Vorbeugewinkel durch Anschlag auf 100° beschränkt. Dies gibt einen Hinweis darauf, daß erst oberhalb einer Rotation um die y-Achse von 100° Dornfortsatzabriss vorkommen. Die von uns an Leichen gemessenen Vorbeugewinkel erreichten 130°. Ein "50%-Mann Dummy Sierra" machte in der gleichen Versuchssituation nur Flexionsbewegungen des Halses bis 90°.

Einzelne Bandscheibenrisse wurden vorwiegend an C_{4/5} und C_{5/6}, sowie C_{6/7} gesehen. Dazu kamen kleine Deckplattenabrissse der entsprechenden Wirbelkörper, mehr hinten als vorne. Die vorderen Bänder blieben in der Regel erhalten. Meriduralblutungen im Halsmarkbereich waren bereits seltener. Schließlich wurden Brückenvenenblutungen über den Großhirnhälften gesehen. Bei sehr alten Menschen kam es zu queren Abrissen der Halswirbelsäule mit mindestens 3 cm Dislokation. Hier waren auch Muskeln, Bänder, Nerven und Gefäße durchtrennt.

Die Osteoporose und der Muskelschwund des hohen Altersbedingen in erster Linie die großen Unterschiede in der Ausprägung der Schleuderverletzungen.

Die bisherigen Ergebnisse bedürfen der Erweiterung und Ergänzung durch größere Versuchsreihen. Es kann aber schon jetzt gesagt werden, daß sich das von G. Schmidt angegebene Verletzungsschema zur besseren Rekonstruktion von Halsunfällen auch in bezug auf Schleudertraumen bestätigt hat.

Zusammenfassung

- 1) Schädelbasisringbrüche entstehen bei Relativbewegungen in der z-Achse zwischen Hals und Kopf.
 - a. als Fraktionsfrakturen durch Abbremsung des Rumpfes aus hoher Geschwindigkeit (um 100 km/h) und auf kurzer Verzögerungsstrecke (weniger als 1,5 m),
 - b. als Pressions- oder Stauchungsfrakturen bei Stoß gegen das untere Wirbelsäulenende.
- 2) Schleuderverletzungen des Halses sind zusammengesetzt aus Dehnungsverletzungen in Richtung der z-Achse, sowie aus Biegungsverletzungen durch Rotation um die x-Achse oder y-Achse. Rotationsbewegungen um die z-Achse fehlen in der Regel.

- 3) Beim Abbremsen des gurtgeschützten Rumpfes entstehen Verzögerungen, deren Mehrfaches sich am Hals und Kopf auswirkt. Schon bei Relativgeschwindigkeiten über 20 km/h sind Schleuder- oder Verletzungen des Halses möglich. Junge Menschen können aber gurtgeschützt den Frontalaufprall auf eine harte Wand aus 80 km/h überleben.
- 4) Für die ärztliche Behandlung von Unfallverletzten und zur Rekonstruktion von Verletzungsmechanismen ist die Kenntnis der Schleudertraumen notwendig.

Literatur:

- 1) Clemens, H.J. und E. Burow
Experimentelle Untersuchungen zur Verletzungsmechanik der Halswirbelsäule beim Frontal- und Heckaufprall
Arch. orthop. Unfall-Chir. 74, 116-145 (1972)
- 2) Kallieris, D. und G. Schmidt
Biomechanik des Stoßes am menschlichen Körper bei simulierten Verkehrsunfällen
Zentralblatt für Unfall-Untersuchung (1973 im Druck)
- 3) Patscheider, H.
Zur Entstehung von Ringbrüchen des Schädelgrundes
Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med., 52, 13-21 (1961)
- 4) Reimann, W.
Zur Mechanik der Schädelbasisringbrüche
Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med., 51, 601-608 (1961)
- 5) Robbins, D.H. und V.L. Roberts
Michigan Injury Criteria Hypothesis and Restraint System Effectiveness Index
Proceedings of Fifteenth Stapp Car Crash Conference
Society of Automotive Engineers, Inc., New York
S. 686 (1972)
- 6) Schmidt, G. und D. Kallieris
Rekonstruktion des Unfallherganges bei Halsverletzungen
Z. Rechtsmedizin, 72, 1 (1973)
Hier ausführliche Literaturangaben

Anschrift: Prof. Dr. Georg Schmidt
D-6900 Heidelberg, Voßstraße 2