

Quasistatische und dynamische Biegebelastung des kindlichen Oberschenkels zur Erzeugung einer Femurfraktur*

E. Miltner und D. Kallieris

Institut für Rechtsmedizin der Universität Heidelberg, Voßstrasse 2, D-6900 Heidelberg,
Bundesrepublik Deutschland

Quasi-static and dynamic bending tests of the infantile thigh in order to produce a femur fracture

Summary. At the Institute of Forensic Medicine of the University of Heidelberg, in the years 1986–1988 thigh loading tests were conducted in order to produce fractures in a total of 28 cadavers of babies and children who had died at ages ranging from 1 day to 6 years. In 18 tests a universal strength testing machine was used and each thigh was loaded quasi-statically from the outside with a blunt edge applied to the middle of the femur, bending it to the point of fracture. The loading velocity amounted 50 mm/min with a defined support distance. The breakage load amounted to 470 N in a 6-day-old baby and increased about evenly up to 2920 N in a 6-year-old child; however, in a newborn 2720 N was needed and in a 15-month-old child, 5700 N. The total deformation way ranged from 16 to 60 mm. The main types of fracture that occurred were: complete and incomplete transverse fractures, oblique fractures, Messerer fractures, and spongiosa fractures. Ten children ranging in age from 2 months up to 27 months were submitted to dynamical thigh loading by means of a falling weight impactor and a horizontal impactor. Only in one case did a transverse fracture occur, when the lateral thigh impacted on an edge at a falling height of 70–93 cm. The forces set up amounted to 320–600 N with the falling weight impactor and to 2370 N with the horizontal impactor. These results suggest that fracture of the femur does not occur if a baby or small child falls from a changing table or from an adult's arm.

Key words: Cruelty to children, femur fracture – dynamical bending test to produce a femur fracture

* Herrn Professor Dr. Adebahr zum 65. Geburtstag gewidmet

Sonderdruckanfragen an: E. Miltner

Zusammenfassung. Am Institut für Rechtsmedizin in Heidelberg wurden in den Jahren 1986 bis 1988 an insgesamt 28 Leichen von Kindern im Alter von einem Tag bis 6 Jahren Oberschenkelbelastungen zur Brucherzeugung durchgeführt. In 18 Versuchen wurden die Oberschenkel mit einer Universalprüfmaschine jeweils von der Außenseite her mit einer stumpfen Kante auf die Femurmitte quasistatisch auf Biegung bis zum Bruch belastet. Bei definierter Abstützweite betrug die Geschwindigkeit 50 mm/min. Der Kraftaufwand stieg von 470 N beim 6 Tage alten Säugling bis 2920 N beim 6-jährigen Kind in etwa gleichmäßig an, allerdings benötigte ein Neugeborenes 2720 N, ein 15 Monate altes Kind 5700 N. Der Deformationsweg reichte von 16 bis 60 mm. An Bruchformen kamen im wesentlichen vor: Vollständige und unvollständige Querbrüche, Schrägbrüche, Messererbrüche und Spongiosabrüche. 10 Kinder im Alter von 2 Monaten bis 27 Monaten wurden einer dynamischen Oberschenkelbelastung mit einem Fallgewichtsimpaktor und einem Horizontalimpaktor unterzogen. Beim Auftreffen des seitlichen Oberschenkels auf eine Kante bei einer Fallhöhe von 70 bis 93 cm entstand nur in einem Fall ein Querbruch. Die auftretenden Kräfte reichten beim Fallgewichtsimpaktor von 320 bis 600 N, beim Horizontalimpaktor bis 2370 N. Nach diesen Ergebnissen ist zu erwarten, daß beim Sturz eines Säuglings oder Kleinkindes vom Wickeltisch oder vom Arm eines Erwachsenen Oberschenkelbrüche nicht entstehen.

Schlüsselwörter: Femurfunktions-Biegebelastung zur Erzeugung einer Femurfraktur – Kindesmißhandlung, Femurfraktur

Einleitung

Femurfrakturen gelten im Kindesalter als verhältnismäßig häufig. Hauptursachen sind nach den gängigen kinderchirurgischen Lehrbüchern Verkehrsunfälle, Spielunfälle und Stürze [7]. Bei Kleinkindern soll bereits ein Stolpern über den Teppichrand zur Femurfraktur führen können.

Bevorzugt brechen die Femora im mittleren Drittel. In erster Linie entstehen Schräg-, Quer- oder Spiralbrüche, und die nur im Kindesalter vorkommenden Wulstbrüche durch Stauchung und Grünholzfrakturen durch Biegung [4].

Nach neueren Untersuchungen muß auch bei isolierten Femurfrakturen an Mißhandlung gedacht werden. Gross und Stranger [2] fanden in einer retrospektiven Untersuchung über 5 Jahre in ihrer Klinik 74 Kinder mit Femurbrüchen. 26 Kinder waren unter 1 Jahr alt. Bei diesen 26 Säuglingen handelte es sich neben Verkehrsunfällen und pathologischen Frakturen zu 70% um Mißhandlungen. Merten et al. [6] fanden bei 261 Säuglingsmißhandlungen in 11% Schäden an den Röhrenknochen.

Charakteristische radiologische Befunde sind neben den genannten Frakturen subperiostale Blutungen an den Diaphysen mit Verkalkungen, Aussprengungen eines spickelartigen metaphysären Knochenfragments und Verletzungen der Epiphysenfuge [4] als Folgen hauptsächlich von Schütteltraumen.

Die Erklärungen, die die Eltern für die Verletzungen der Kinder angeben, sind meist die gleichen: Sturz vom Wickeltisch oder vom Arm, Stolpern am Teppichrand mit Sturz, und Unfall beim Spiel mit anderen Kindern oder den Eltern.

Helfer et al. [3] befragten 161 Eltern über Stürze ihrer Kinder. Bei 176 Stürzen aus Höhen von 90 bis 150 cm entstanden in 97% keine oder geringe Verletzungen wie Schürfungen und Beulen, 6 mal gab es schwere Verletzungen: 3 Schlüsselbeinbrüche bei Säuglingen unter 6 Monaten, 2 mal einen Schädelbruch und einen Humerusbruch. In keinem Fall war der Zustand lebensbedrohend. Bei der Aufarbeitung von 85 Stürzen in der Kinderklinik war nur einmal bei einem Sturz aus etwa 90 cm Höhe ein – folgenloser – Schädelbruch entstanden [3].

Unsere eigenen Untersuchungen sollten zur Beantwortung der Frage beitragen, welche Kraft zur Erzeugung eines kindlichen Femurbruches erforderlich ist, und ob beim Sturz vom Wickeltisch Femurbrüche entstehen können.

Material und Methode

Bisherige Untersuchungen zur Knochenfestigkeit des Femurs erstrecken sich meist auf die isolierten (Erwachsenen-) Oberschenkelknochen [1, 5, 8]. Um für die Praxis brauchbare Ergebnisse zu erhalten, wählten wir die Versuchsanordnung so, daß jeweils der gesamte Oberschenkel belastet wurde.

Am Institut für Rechtsmedizin in Heidelberg führten wir in den Jahren 1986 bis 1988 an insgesamt 27 Kinderleichen im Alter von 1 Tag bis 6 Jahren Oberschenkelbelastungen zur Brucherzeugung durch. Bei keinem Kind lagen Knochenerkrankungen vor.

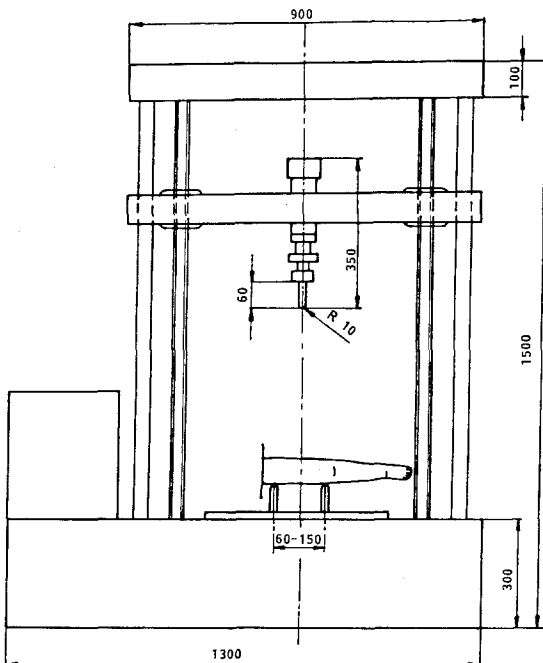


Abb. 1. Universalprüfmaschine, Maße in Millimeter

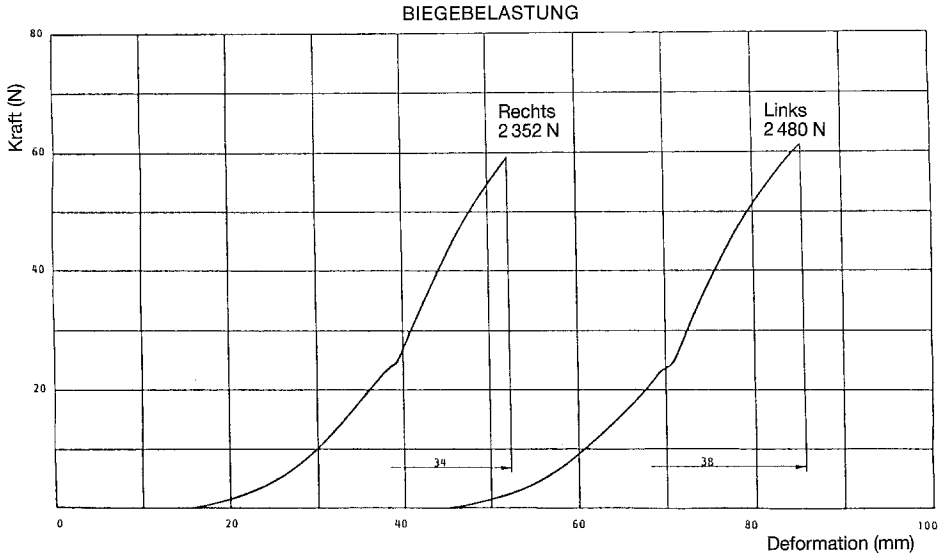


Abb. 2. Kraft-Weg-Diagramm bei einem 27 Monate alten weiblichen Kind (Vers.-Nr. 15 in Tabelle 1) bei quasistatischer Belastung der Oberschenkelaußenseite bis zum Bruch

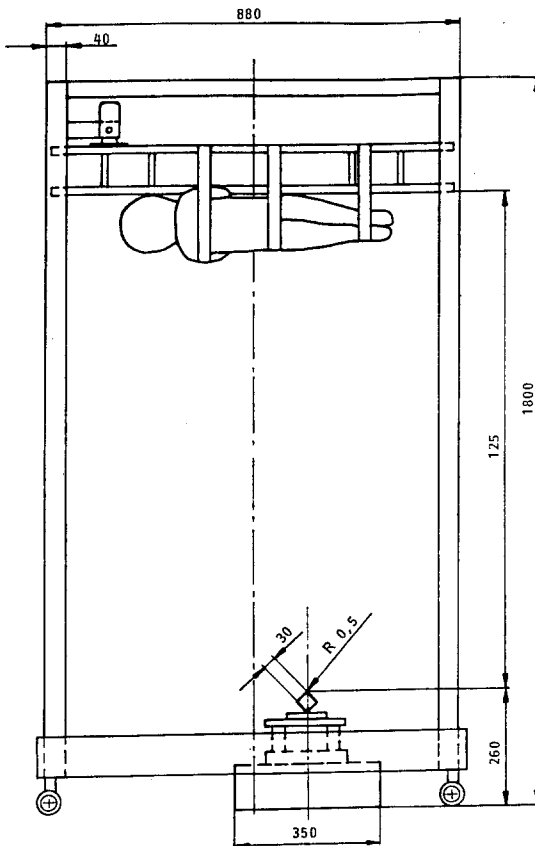


Abb. 3. Fallgewichtsimpaktor, Maße in Millimeter. Kraftmessung an der Auftreffstelle, Geschwindigkeitsmessung mit Lichtschranke

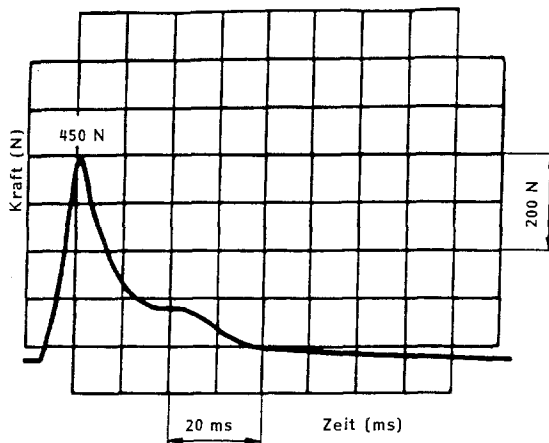


Abb. 4. Kraft-Zeit-Diagramm eines Fallversuches mit dem Fallgewichtsimpaktor. Linker Oberschenkel eines 2,5 Monate alten Säuglings (Vers.-Nr. 3 in Tabelle 2)

In 18 Versuchen wurden die Oberschenkel mit einer Universalprüfmaschine jeweils von der Außenseite her mit einer stumpfen Kante auf die Femurmitte quasistatisch auf Biegung bis zum Bruch belastet (Abb. 1). Bei Abstützweiten zwischen 6 und 15 cm betrug die Geschwindigkeit 50 mm/min. Die Versuche wurden in einem Kraft-Weg-Diagramm registriert. Abb. 2 zeigt eine typische Kurve bei einem 27 Monate alt gewordenen weiblichen Kind.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden 10 Kinderleichen im Alter von 2–27 Monaten einer dynamischen Oberschenkelbelastung mit einem Fallgewichts- und einem Horizontalimpaktor unterzogen (Abb. 3). Die Fallhöhe betrug 70–90 cm. Um möglichst günstige Voraussetzungen für eine Fraktur zu schaffen, trafen die Oberschenkel jeweils mit der Außenseite auf eine Kante auf. Die Versuche wurden z. T. in einem Kraft-Zeit-Diagramm (Abb. 4) und auf Video dokumentiert. Die Abbildung zeigt eine typische Kurve bei einem 2,5 Monate alten männlichen Säugling.

Alle Kinder wurden vor und nach dem Versuch geröntgt.

Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt Daten und Ergebnisse der 18 quasistatischen Versuche. In den ersten 8 Monaten steigt die Kraft, um einen Bruch zu erzeugen, von etwa 500 N auf etwa 2500 N bis 3000 N steil an und bleibt bis zum 6. Lebensjahr etwa gleich (Abb. 5). Allerdings benötigte ein Neugeborenes 2720 N, ein 15 Monate altes Kind 5700 N. Der Kraftanstieg ist in den ersten 8 Monaten annähernd linear (Abb. 6).

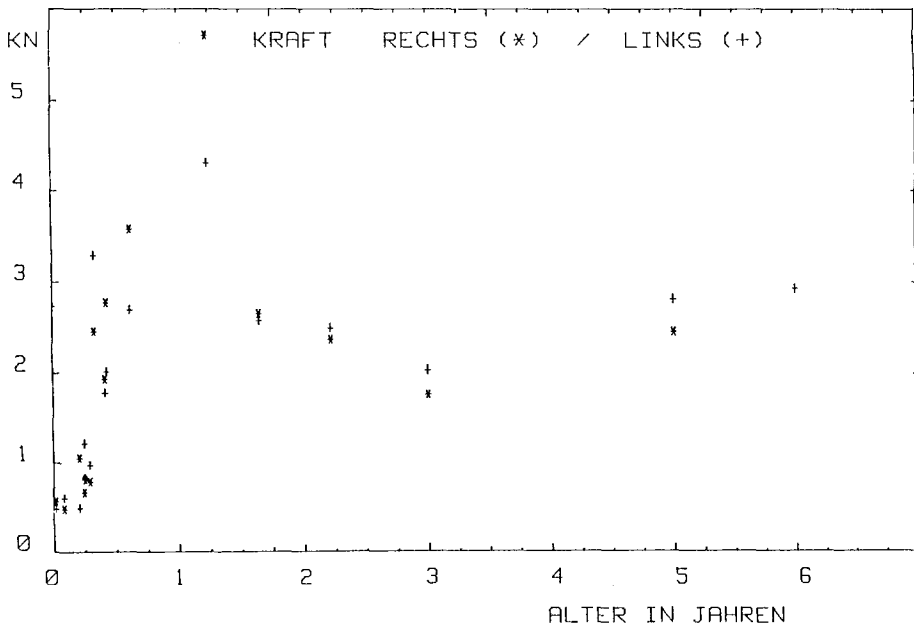
Die Kurve des Deformationsweges verläuft ähnlich (Abb. 7): Steiler Anstieg in den ersten 8 Monaten von etwa 20 auf 45 mm und bis zum 6. Lebensjahr etwa gleichbleibend.

Die verschiedensten Bruchformen kamen vor: Vollständige und unvollständige Querbrüche, Schrägbrüche, Messerer-Brüche und Spongiosabrüche.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der 9 dynamischen Fallversuche. Das Alter der Säuglinge lag zwischen 2 und 12 Monaten, die Fallhöhe betrug 70 bis 93 cm, die Auftreffgeschwindigkeit lag zwischen 13,3 und 15,4 km/h. Die Kräfte reichten von 320 bis 600 N. In einem Fall entstand bei einem 2 Monate alten Kind ein Querbruch, bei einem 9 Monate alten Kind eine Knochenfissur.

Tabelle 1. Daten und Ergebnisse der 18 quasistatischen Versuche (STW = Stützweite)

| Vers.- Nr. | Ge- schlecht | Alter | STW | | Körper- länge (cm) | Gewicht (kg) | OS- Umfang (cm) | Kraft | |
|---------------|-----------------|--------|-------------|-------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|------------|------------|
| | | | re. (cm) | li. (cm) | | | | re. (N) | li. (N) |
| 1 | M | 1 Std. | 6 | 6 | | | | | 2720 |
| 2 | M | 6,0 T | 6 | 6 | 51 | 2,83 | 17 | 560 | 470 |
| 3 | M | 1,0 M | 6 | 6 | 53 | 3,70 | 17 | 470 | 595 |
| 4 | W | 2,5 M | 8 | 8 | | | | 1040 | 480 |
| 5 | W | 3,0 M | 6 | 6 | 63 | 5,30 | 17 | 800 | 816 |
| 6 | M | 3,0 M | 8 | 8 | 58 | 4,90 | | 660 | 1198 |
| 7 | W | 3,5 M | 6 | 6 | 62 | 5,10 | | 780 | 960 |
| 8 | M | 4,0 M | 6 | 6 | 67 | 7,00 | 21 | 2440 | 3280 |
| 9 | M | 5,0 M | 6 | 6 | 65 | 6,50 | 19 | 1920 | 1760 |
| 10 | W | 5,2 M | 6 | 6 | 64 | 6,60 | | 2760 | 2000 |
| 11 | W | 7,5 M | 6 | 6 | 69 | 7,00 | 21 | 3560 | 2680 |
| 12 | M | 15,0 M | 6 | 6 | 78 | 11,70 | 28 | 5700 | 4300 |
| 13 | M | 20,0 M | 12 | 12 | 92 | 15,00 | | 2640 | 2560 |
| 14 | M | 27,0 M | | | 92 | 14,00 | | 1300 | 2370 |
| 15 | W | 27,0 M | 10 | 10 | 95 | 24,00 | | 2352 | 2480 |
| 16 | W | 3,0 J | 10 | 10 | 93 | 13,50 | | 1744 | 2016 |
| 17 | M | 5,0 J | 15 | 13 | 109 | 18,00 | | 2440 | 2800 |
| 18 | W | 6,0 J | 15 | 15 | 117 | 26,00 | | | 2920 |

**Abb. 5.** Erforderliche Kraft, um einen Oberschenkelbruch zu erzeugen, in Abhängigkeit vom Alter

| Weg | | Mbmax | | Knochenbreite | | Bruch | |
|----------|----------|----------|----------|---------------|----------|---------------------|--------------------|
| re. (mm) | li. (mm) | re. (Nm) | li. (Nm) | re. (mm) | li. (mm) | rechts | links |
| | 16 | | 81,60 | | 7 | | Querbruch |
| 22 | 22 | 16,80 | 14,10 | 5 | 5 | Querbruch | Querbruch |
| 20 | 21 | 14,10 | 17,85 | 7 | 7 | Querbruch | Spongiosabr. dist. |
| 46 | 21 | 41,60 | 19,20 | 8 | 8 | Spongiosabr. dist. | Messerer Bruch |
| 24 | 23 | 24,00 | 24,48 | 8 | 8 | Spongiosabr. dist. | Spongiosabr. dist. |
| 22 | 40 | 26,40 | 47,92 | 8 | 8 | Fissur | Spongiosabr. dist. |
| 21 | 24 | 23,40 | 28,80 | 8 | 8 | Spongiosabr. dist. | Querbruch |
| 39 | 45 | 73,20 | 98,40 | 8 | 8 | Spongiosabr. dist. | Spongiosabr. dist. |
| 35 | 42 | 57,60 | 52,80 | 9 | 9 | Querbruch | Spongiosabr. dist. |
| 32 | 31 | 82,90 | 60,00 | 9 | 9 | Fissur | Fissur |
| 45 | 37 | 106,80 | 80,40 | 8 | 8 | Spongiosabr. dist. | Querbruch |
| 45 | 40 | 171,00 | 129,00 | 11 | 11 | Querbruch | Spongiosabr. dist. |
| 60 | 60 | 158,40 | 153,60 | 14 | 15 | Fissur | Fissur |
| 31 | 35 | 117,60 | 124,00 | 13 | 13 | Fissur | Querbruch |
| 38 | 38 | 87,20 | 100,80 | 15 | 15 | Umgek. Messerer Br. | Querbruch |
| 45 | 45 | 183,00 | 182,00 | 17 | 18 | Schrägbruch | Querbruch |
| | 60 | | 219,00 | | 16 | | Schrägbruch |

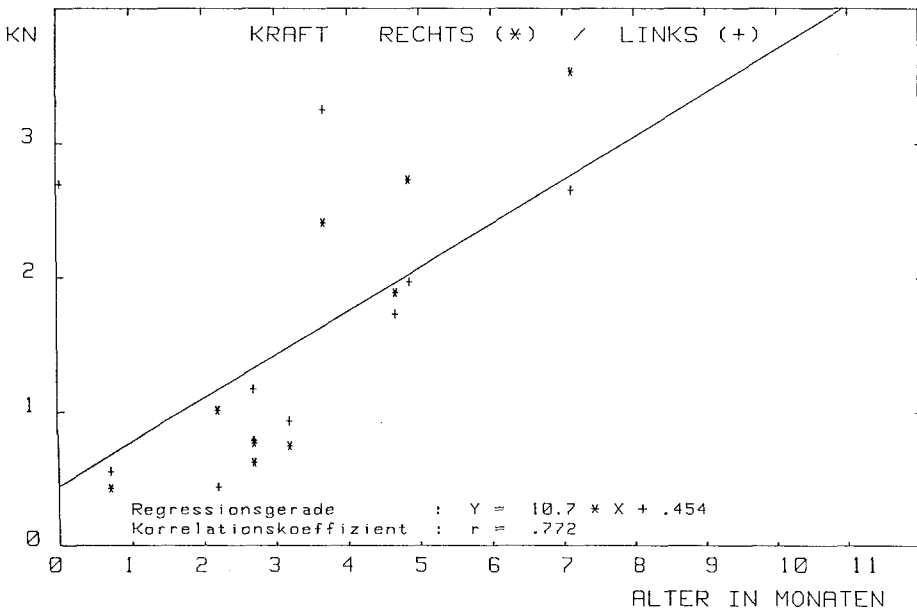


Abb. 6. Erforderliche Kraft, um einen Oberschenkelbruch zu erzeugen, in Abhängigkeit vom Alter

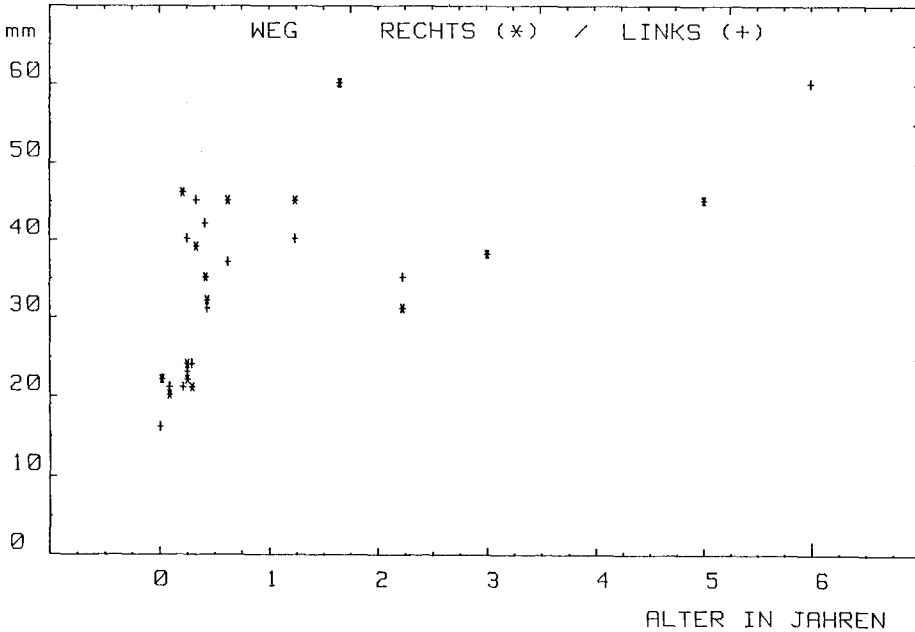


Abb. 7. Deformationsweg des Oberschenkels bis zum Bruch

Beim freien Fall mit den Beinen voran traten Kräfte von 250 N auf (Vers.-Nr. 5), beim Fall auf die Knie Kräfte von 750 N (Vers.-Nr. 9).

In einem 10. dynamischen Versuch wurden die Oberschenkel eines 27 Monate alten Kindes mit einem Horizontalimpaktor belastet. Die Außenseiten der Oberschenkel wurden mit einer Kante angestoßen. Bei einer Anstoßgeschwindigkeit von 13,8 bzw. 16,8 km/h und einer Kraft von 1300 bzw. 2370 N entstand keine Fraktur.

Diskussion

Die quasistatischen Versuche haben gezeigt, daß schon beim Säugling im ersten Monat mindestens etwa 500 N erforderlich sind, um einen Femurbruch zu erzeugen. Bereits beim halbjährigen Kind benötigt man Kräfte um etwa 2000 N. Die Entstehung einer accidentellen isolierten Femurfraktur beim Spielen mit dem Kind oder bei der Pflege des Kindes scheint beim gesunden Säugling, insbesondere auch in Anbetracht des Deformationsweges, ausgeschlossen. Zur Erzeugung einer Femurschaftfraktur ist vielmehr ein hoher und gezielter Kräfteinsatz erforderlich.

Bei den Fallversuchen hatten bereits Vorversuche mit Video-Kontrolle gezeigt, daß beim senkrechten Fall mit den Füßen voran die Beine stets auswichen, bzw. im Knie einknickten und damit die Entstehung eines Schaftbruches bei diesem Mechanismus nicht vorstellbar war. Der seitliche Fall auf eine Kante erschien uns als die aussichtsreichste Konstellation, um einen Bruch zu

erzeugen. Lediglich in einem Fall war es zu einem Schaftbruch gekommen. Leider waren bei diesem Versuch keine Kraftmessungen möglich. Bei unserer Versuchsanordnung ist jedoch zu berücksichtigen, daß im Gegensatz zum freien Fall die Beine am „Fallwagen“ fixiert waren und nicht nach oben ausweichen konnten.

Im Ergebnis halten wir es für äußerst unwahrscheinlich, daß bei einem Sturz eines Säuglings aus 90 cm Höhe auf ebene Fläche eine Femurschaftfraktur entstehen kann.

Literatur

1. Ehler E, Lösche H (1970) Biegeversuche am menschlichen Femur. Beitr Orthop Traumatol 17:304–314
2. Gross RH, Stranger M (1983) Causative factors for femoral fractures in infants and young children. J Pediatr Orthop 3:341–343
3. Helfer RE, Slovis TL, Black M (1977) Injuries resulting when small children fall out of bed. Pediatrics 60:533–535
4. Kehrer B (1982) Frakturen im Kindesalter. In: Kinderchirurgie Bettex McGenton N Stakmann M (Hrsg.) Thieme, Stuttgart New York
5. Knese KH, Hahne OH, Biermann H (1956) Festigkeitsuntersuchungen an menschlichen Extremitätenknochen. Gegenbaur Morphol Jb 96–2/3:141–209
6. Merten DF, Radkowski MA, Leonidas JC (1983) The abused child: A radiological reappraisal, Radiology 146:377–381
7. Saxer U (1979) Femurschaftfrakturen. In: Weber BS (Hrsg.) Springer, Berlin Heidelberg New York. Frakturbehandlung bei Kindern und Jugendlichen
8. Sherwood Mather B (1968) Variation with age and sex in strength of the femur. Med Biol Eng Comput 6:1129–132

Eingegangen am 1. März 1989