

Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.
Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société
Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 160 (1980)

Artikel: Die Steuerung der biologischen Prozesse bei der Knochenbruchheilung
durch physikalische Einflüsse

Autor: Perren, Stephan M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-90802>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Steuerung der biologischen Prozesse bei der Knochenbruchheilung durch physikalische Einflüsse

Stephan M. Perren

Es sollen vorerst die allgemeinen Aspekte der Knochenbruchheilung und der Osteosynthese dargestellt werden als Grundlage des Verständnisses der physikalischen Steuerung der Knochenbruchheilung. Der Knochenbruch stellt eine durch mechanische Überlast verursachte Diskontinuität der Knochenstruktur dar. Die Knochenbruchheilung kann als Gesamtheit jener biologischen Prozesse definiert werden, die der Wiederherstellung vorerst der mechanischen Funktion des Knochens, dann aber auch der ursprünglichen Struktur des Knochens dienen. Die spontane Knochenbruchheilung überwindet mechanische Diskontinuität im Frakturspalt durch eine Vielzahl sequenziell ablaufender Prozesse, an deren Ende erst die mechanisch solide Überbrückung durch Knochengewebe steht. Diesen Ablauf nennen wir sekundäre Knochenbruchheilung. Unter speziellen Voraus-

setzungen künstlich erzeugter Ruhe im Frakturspalt (aber auch unter der Voraussetzung der selteneren natürlich gegebenen Stabilität) erfolgt die Knochenbruchheilung durch primäre oder direkte Knochenbildung in der Fraktur. Es scheint von Interesse, die physikalische oder mechanische Steuerung der biologischen Prozesse der Knochenbruchheilung näher zu betrachten.

In Abbildung 1 ist der Bruch eines Röhrenknochens schematisch dargestellt.

Als Folge des Knochenbruchs ergibt sich bei geringer Belastung eine ausgeprägte Deformation der Reparaturgewebe im Bruchspalt. Die Umwegdifferenzierung der Reparaturgewebe, wie wir sie bei der spontanen Knochenbruchheilung beobachten, ergibt sich aus der Diskrepanz zwischen möglicher Bruchelongation des Knochengewebes (2%) und der Dehnung der Bruchgewebe im

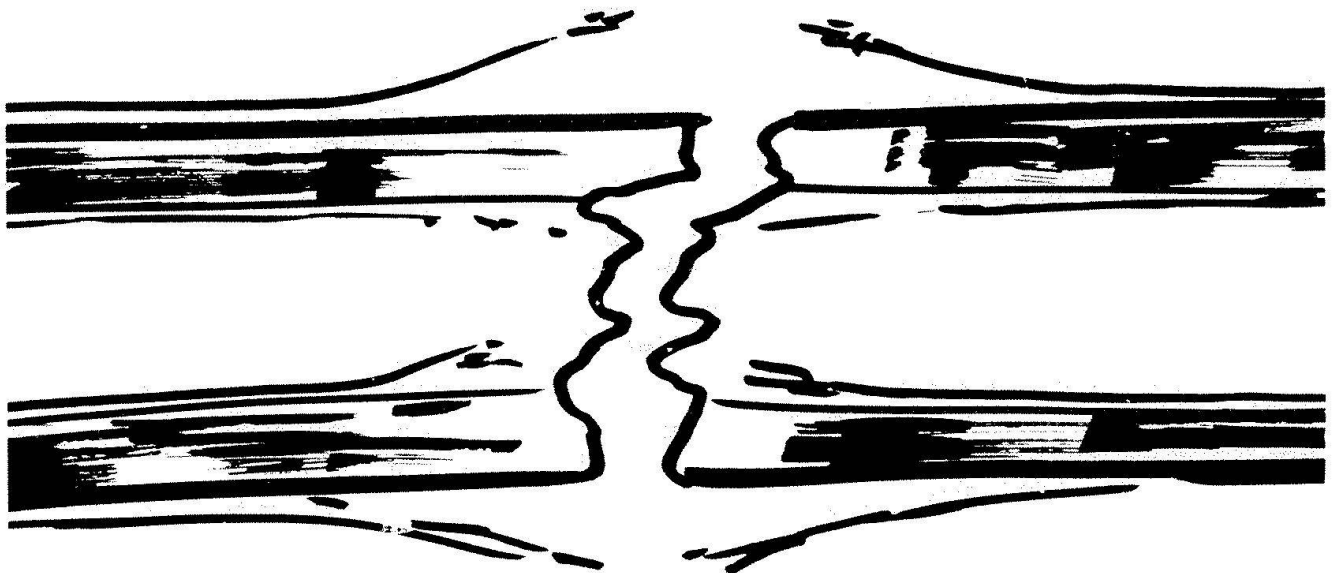


Abb. 1. Schematische Darstellung des Knochenbruchs und seiner mechanischen Folgen: Der Querbruch eines Röhrenknochens ist im Längsschnitt dargestellt. Die Diskontinuitätstrennung des Knochens bewirkt, dass selbst unter geringster Belastung vorher benachbarte solid verbundene Teile des Knochens sich gegenseitig bewegen. Damit ist die Kraftübertragung im Rahmen der Stützfunktion des Skelettes an der Frakturstelle gestört. Mechanisch kann der Knochenbruch als Diskontinuität der Steifigkeit des Knochens betrachtet werden, jener Steifigkeit, die Grundlage der Stützfunktion des Knochens ist.

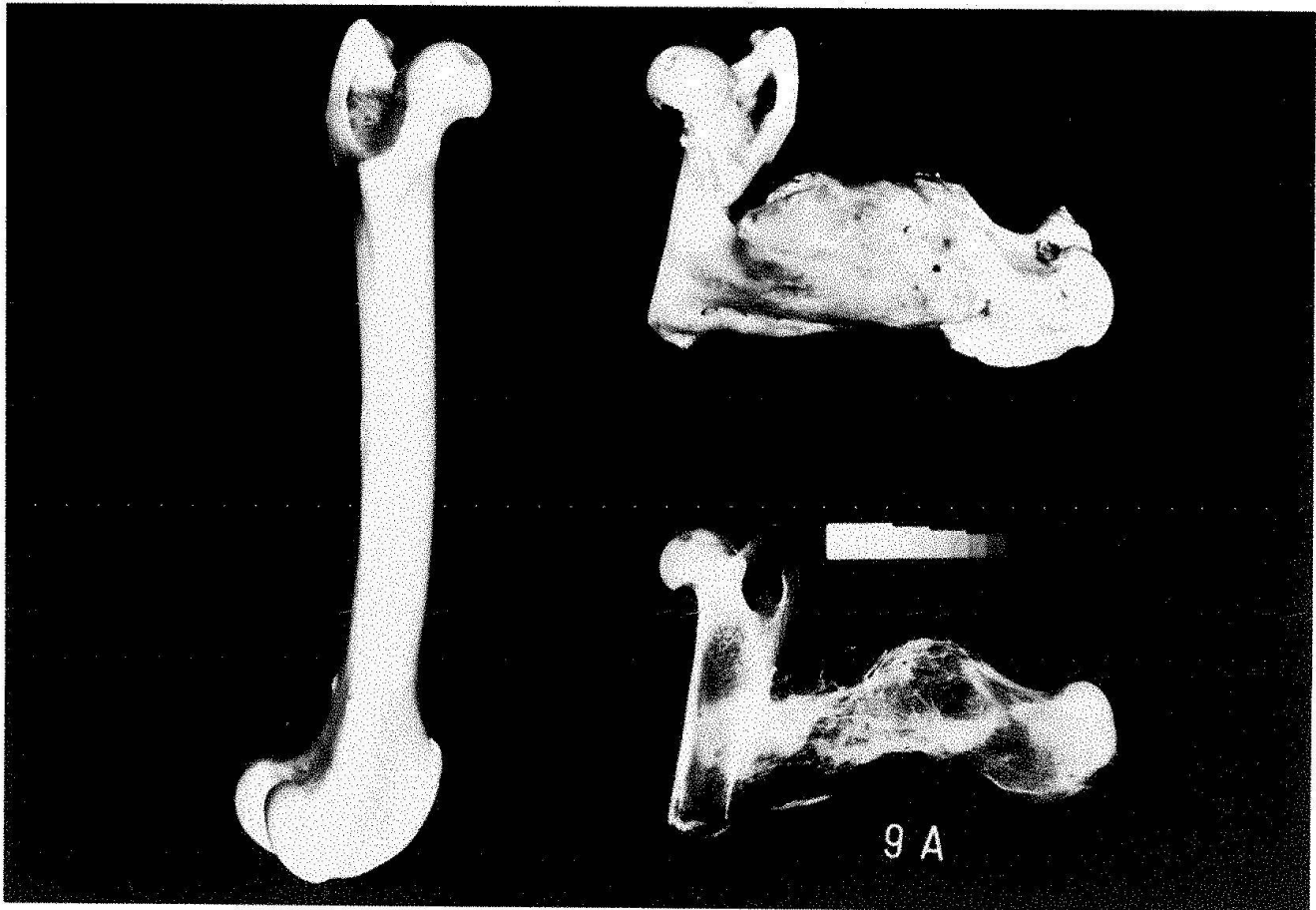


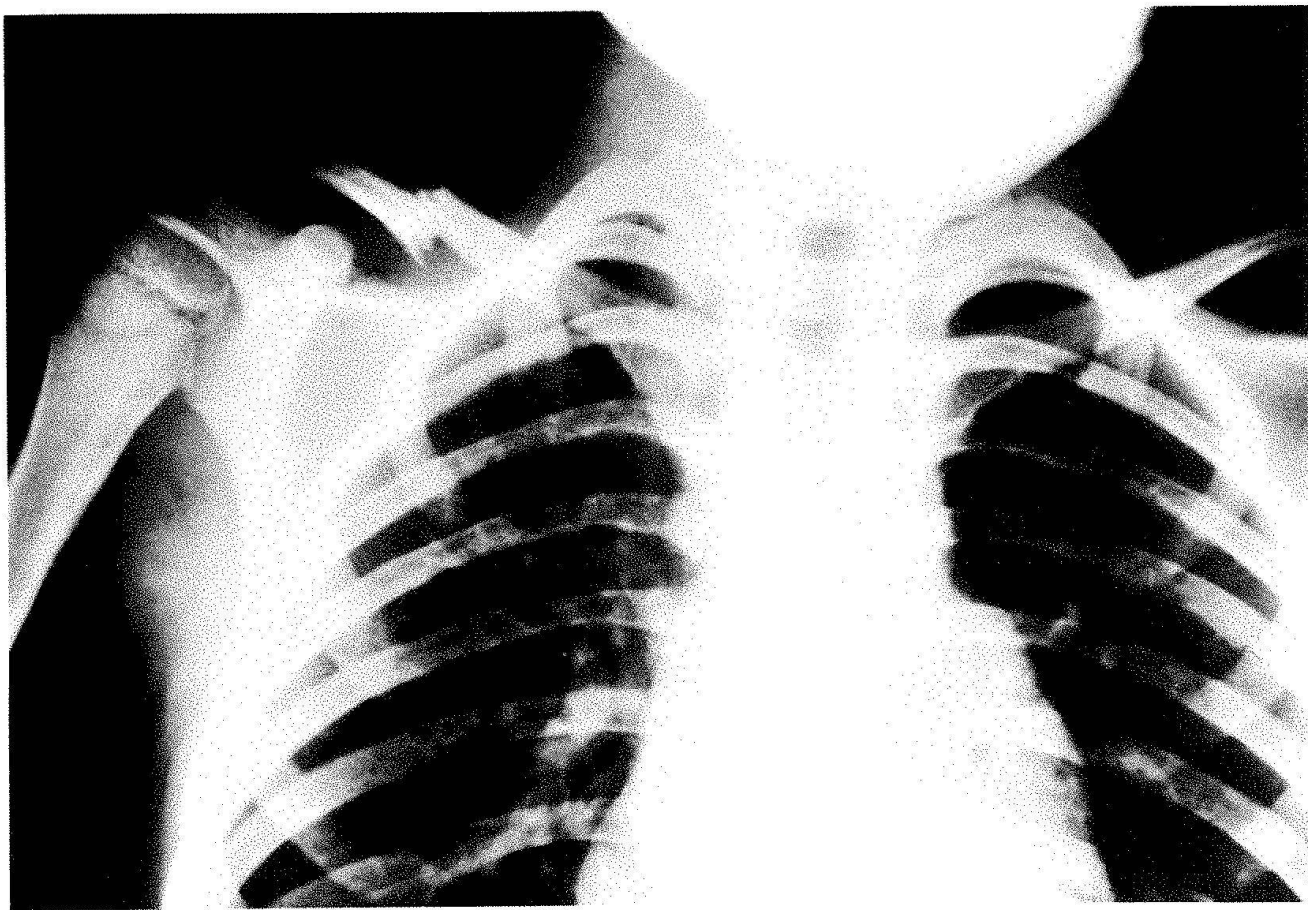
Abb. 2. a) Intaktes Femur der Gemse, dargestellt als Präparat und im Röntgenbild bei antero-posteriorem Strahlengang
 b) Spontan geheilter Knochenbruch des Oberschenkelknochens (Femur) der Gemse, der ohne Behandlung geheilt ist. Die Knochenbruchstücke sind zwar solide durch Knochen überbrückt, aber die Längsachse des Knochens weist einen fast rechtwinkligen Knick auf. Die nähere Betrachtung des Knochens zeigt auch, dass eine Rotationsfehlstellung in der Fraktur vorliegt. Hier ist der Knochen solide, aber in ungünstiger Stellung geheilt. (Präparat Dr. U. Geret).

Bruchspalt, die ein Vielfaches der tolerierten Dehnung des Knochens beträgt. Die spontane Knochenbruchheilung ist am Beispiel des Oberschenkelbruchs einer Gemse dargestellt (Abb. 2).

Diese spontane Knochenbruchheilung zeigt ein wesentliches Problem der Behandlung des Knochenbruchs auf. Die Priorität kommt bei der Knochenbruchbehandlung nicht der soliden Heilung allein, sondern auch der Heilung der funktionsgerechteren Stellung zu. Es ergibt sich von selbst, dass die Behandlung derart durchgeführt werden muss, dass Nachteile für die betroffene

Gliedmasse, wie z. B. Gelenksversteifung infolge äusserer Fixation vermieden werden. Die Behandlung des Knochenbruchs durch innere Stabilisierung mit verschiedenartigen Implantaten (Osteosynthese) bezweckt die möglichst frühe Wiederherstellung der Bewegungsfunktion und der Belastungsfunktion einer Gliedmasse in anatomisch richtiger, d.h. mechanisch idealer Stellung der Fragmente. Neben diesen zwei wichtigen Voraussetzungen kommt erst an dritter Stelle die Forderung nach möglichst zuverlässiger Knochenbruchheilung. Auch hier gilt es, Nachteile der Behandlung wie z.B. seltene, aber mögliche Infektionen im Vergleich zum

Abb. 3. Bruch des Schlüsselbeins eines Kindes, der unter minimaler Ruhigstellung heilt. Der Verband, in Form eines Rucksacks angelegt, zieht die Schultern nach hinten und führt zu einer geraden Ausrichtung der Fragmente des Schlüsselbeinbruchs. Mässige seitliche Verschiebungen sind bei diesem Knochen ohne Bedeutung.



Vorteil der Funktionsverbesserung gering zu halten.

Das Minimum der Knochenbruchbehandlung ist in Abbildung 3 dargestellt. Es ist bekannt, dass der Bruch des Schlüsselbeins vor allem beim Kinde unter geringer Ruhigstellung gut heilt. Die Behandlung zielt hier darauf, gröbere Fehlstellungen zu vermeiden. Die Behandlung des Knochenbruchs durch äussere Ruhigstellung (sog. konservative Behandlung) ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Spiralbruch heilt unter äusserer Ruhigstellung durch zirkulären Gipsverband in guter Stellung bei Überbrückung durch sogenannten Narbenknochen (Kallus) aus. Die durch Gipsverband notwendige Ruhigstellung der benachbarten Gelenke des Knochenbruchs am Schienbein (Kniegelenk und Sprunggelenk) ist beim Kind insofern unbedenklich,

Abb. 4. Spiralbruch des Schienbeins. Der 12 Jahre alte Knabe hat sich beim Skifahren einen Spiralbruch zugezogen. Der Spiralbruch ist nach Ausrichtung der Bruchfragmente mit Hilfe eines zirkulären Gipsverbandes ruhiggestellt worden. Es tritt rasch die Knochenbruchheilung in guter Stellung der Fragmente ein.

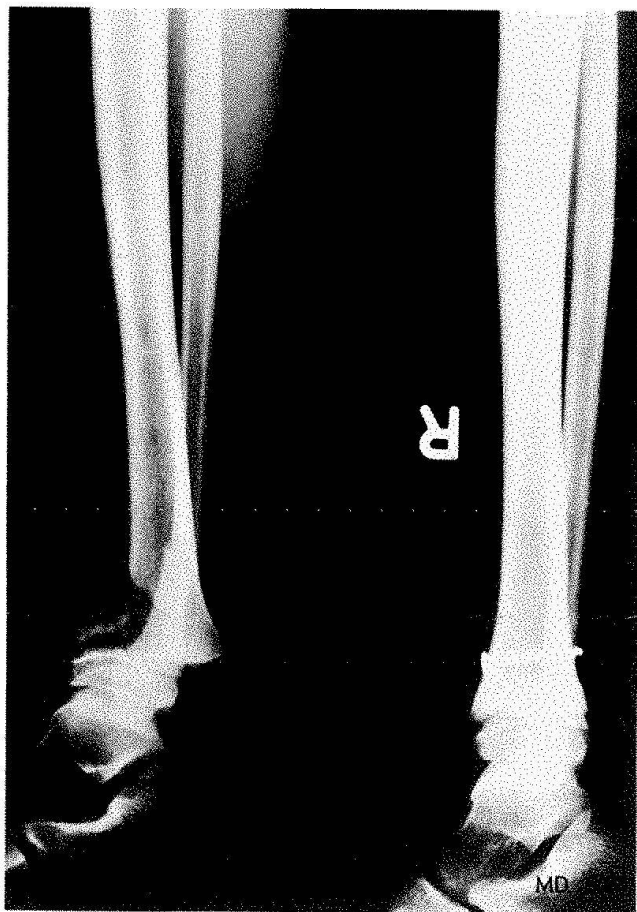


Abb. 5. Skiunfall eines 7jährigen Knaben, der zur Zerreißung einer noch offenen Wachstumsfuge geführt hat. Da dieses Kind noch mehrere Jahre des Knochenwachstums vor sich hat und bekannt ist, dass die nicht adaptierte Wachstumsfuge zu Knochenheilung mit starker Deformation führt, konnte bei der Behandlung eine nicht korrigierbare Fehlstellung nicht in Kauf genommen werden. Es ist daher trotz des kindlichen Alters des Patienten ein Minimaleingriff derart vorgenommen worden, dass die zwischen den Knochenbruchfragmenten liegenden Weichteile entfernt wurden und die Bruchfragmente nach genauer Reposition mit einer einzigen Schraube zusammengehalten wurden.

als hier eine nur geringe Tendenz zur Versteifung der Gelenke besteht, andererseits sind bei offenen Wachstumsfugen (aus der Abb. 4 sichtbar) operative Eingriffe nicht unbedenklich.

Die sogenannte Minimal-Osteosynthese, d. h. ein operativer Eingriff, bei dem eine geringe Menge Implantat zur Erzielung des Behandlungserfolges genügt, ist in Abbildung 5 dargestellt. Dieser Fall zeigt, dass die operative Behandlung des Knochenbruchs auch beim Kind notwendig werden kann, wenn die geschlossene Behandlung nicht zu einer be-

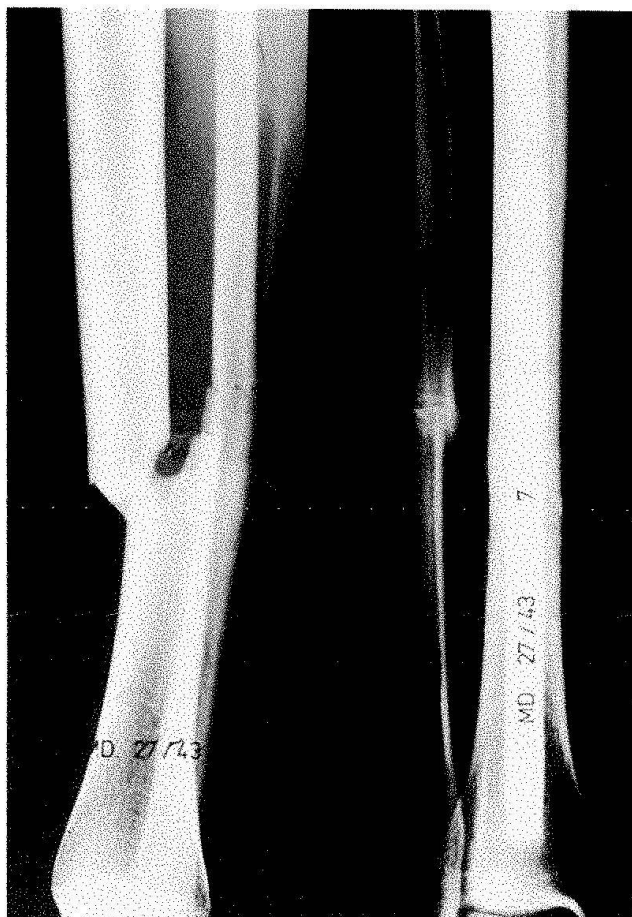


Abb. 6. Querer Bruch des Schienbeins bei geschlossener Wachstumsfuge als Folge eines Motorradunfalls. Hier erfolgte die Behandlung des wohl queren aber gut verzahnten Knochenbruchs durch Einführung einer elastischen inneren Schiene (Marknagel), nachdem das Knocheninnere auf zylindrischen Querschnitt aufgebohrt wurde. Diese Art der Fixation erlaubt beim gut verzahnten Querbruch eine sehr frühzeitige Bewegung und Gewichtsbelastung und vermeidet damit die Gefahr der Gelenkversteifung. Der Patient belastete nach 2 Wochen voll, das zweite Röntgenbild 7 Wochen nach Operation zeigt eine ungestörte Knochenbruchheilung.

friedigenden Stellung der Fragmente führt und damit ein operativer Eingriff praktisch nur Vorteile bietet. Eine klassische Indikation zur operativen Behandlung eines Knochenbruchs zeigt Abbildung 6. Die Stabilisierung eines queren Bruchs durch Marknagel, also eine innere Schienung, die eine Abstützung des Knochenbruchs voraussetzt, stellt eine operative Frakturbehandlung dar, deren Vorteil in der raschen Wiederaufnahme der Stützfunktion des Skelettes besteht. Voraussetzung ist aber, dass der Knochenbruch bei innerer Schienung sich selbst in axialer Richtung abstützt.

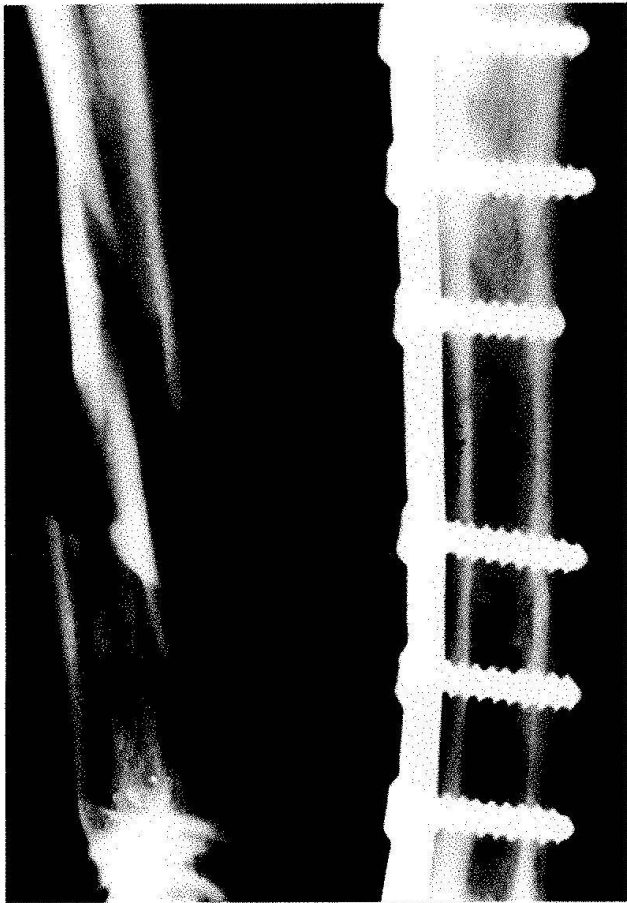
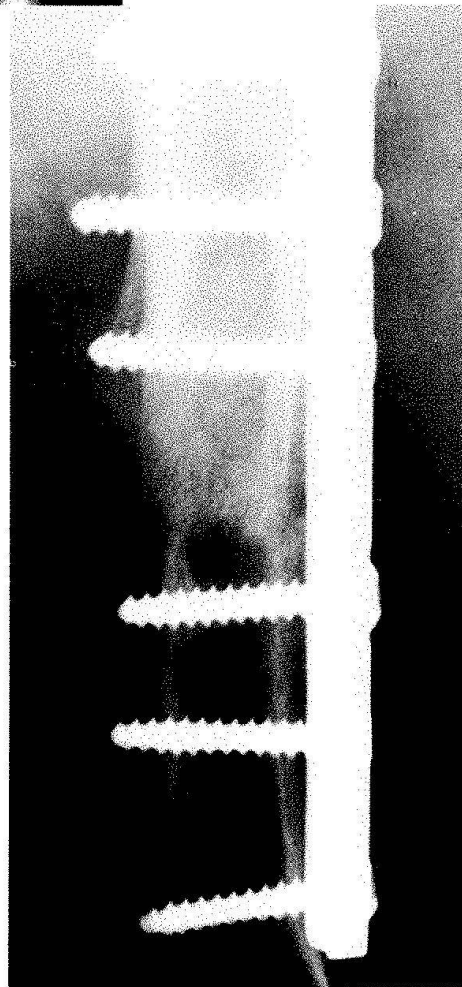


Abb. 7. Die Fraktur des Vorderlaufs des Schäferhundes ist mit Hilfe einer Laschenverbindung stabilisiert worden. Bei uneingeschränkter Belastungs- und Bewegungsmöglichkeit hat der Hund sofort seine Gliedmasse zu belasten begonnen und konnte schon nach 3 Wochen grössere Hindernisse wieder überspringen. (Die Röntgenbilder zeigen den längsverlaufenden Bruch, der durch eine selbstspannende Kompressionsplatte (dynamische Kompressionsplatte DCP) mit Hilfe von Schrauben am Knochen fixiert wurde.) Alle jene Schrauben, die die Bruchfläche durchqueren, sind als Zugschrauben ausgebildet, derart, dass der Knochen nahe des Schraubenkopfes zum Gleitbruch aufgebohrt ist und das Gewinde der Schraube nur im gegenüberliegenden Knochenbruchstück greift und damit die Fraktur zusammendrückt. Dieser Hund zeigt trotz früher uneingeschränkter Belastung eine Knochenbruchheilung vom primären oder direkten Typ, d.h. der inneren Verschweissung der Fragmente, ohne dass zeitweilig Narbenknochen (Kallus) die Bruchstücke vereinigt hätte.



a



b

Abb. 8. a + b. Störung der Knochenbruchheilung. In diesem Falle ist eine Schienbeinfraktur durch fehlerhafte Anwendung einer Platte innerhalb von 8 Monaten nicht geheilt. Sie steht in ungünstiger Achsknickung. Eine korrekt angewandte Platte hat hierauf die Heilung in 3 Monaten bewirkt.

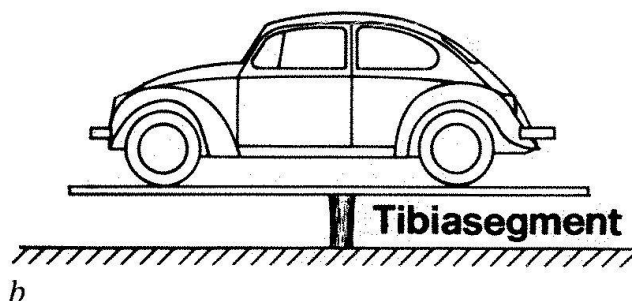
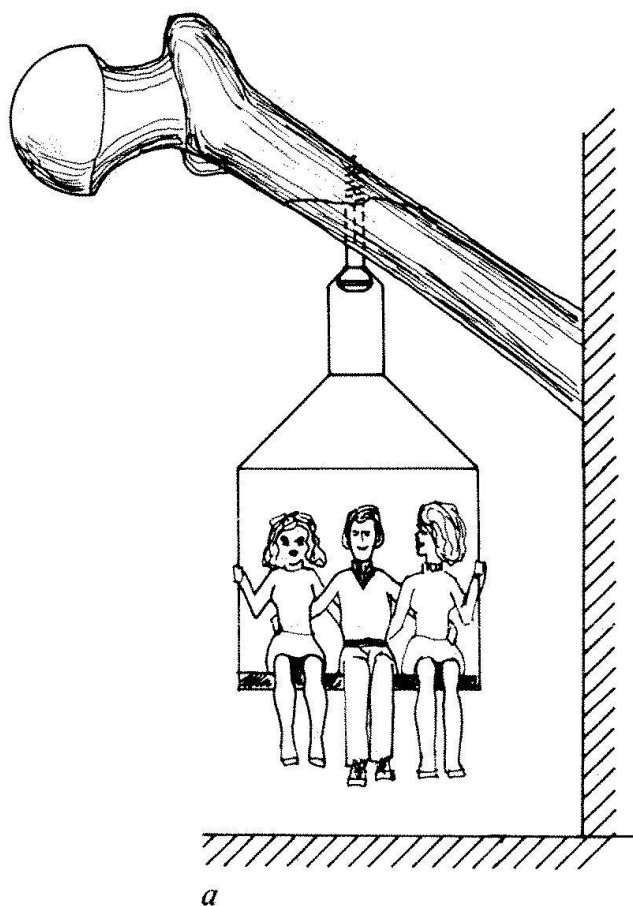


Abb. 9. Mechanische Belastbarkeit des Knochengewebes.

a) Diese Figur zeigt, dass an einer dem Oberschenkel in nur einer Kortikalis haftenden Zugschraube 200-300 kg Zug ausgeübt werden kann, ohne dass das Knochengewebe ausreißt.

b) Die Kompressionsfestigkeit des Schienbeins ist derart, dass ein kleines Segment der Tibia leicht einen mittleren Personenkraftwagen tragen kann.

Die Behandlung des Knochenbruchs durch äussere Ruhigstellung (sog. konservative Behandlung des Knochenbruchs durch Schrauben und Platten stellt eine weitere Form der Osteosynthese (d. h. des operativen Zusammenfügens der Knochenbruchstücke und deren inneren Stabilisation) dar. Abbildung 7 zeigt einen Spiralbruch am Vorderlauf eines Schäferhundes nach Unfall.

Dieser Fall der Plattenfixation am Vorderlauf eines vierbeinigen Tieres zeigt alle Zeichen der Primärheilung, nämlich das Fehlen der Überbrückung durch Narbenknochen (Kallus), das temporäre Aufweiten des Bruchspaltes durch Oberflächenresorption der Fragmente und, im Röntgenbild nicht sichtbar, das Fehlen der sekundären Knochenbildung über bindegewebige und knorpelige Zwischenstufen.

Es ist möglich, dass die Knochenbruchheilung weder primär noch sekundär zu einer

soliden Verbindung der Fragmente führt. Dies kann spontan, d. h. ohne Behandlung eintreten, nach fehlerhafter Behandlung oder aber als Folge besonders schwieriger Umstände (z. B. des offenen Knochenbruchs, bei dem die Weichteile über dem Knochenbruch durch direkte Gewalteinwirkung beim Unfall zerrissen wurden). Hier kann eine Infektion die Knochenbruchheilung stören oder gar aufheben. Wir nennen das Fehlen einer knöchernen Verbindung nach Fraktur Falschgelenk oder Pseudarthrose (Abb. 8a).

Die Falschgelenke können bei ungünstiger Balance zwischen stabilisierenden biologischen Prozessen und destabilisierenden Belastungseinwirkungen, sei es durch indirekte Wirkung der Trägheitskraft, sei es durch direkte Muskeleinwirkung oder sogar durch Gewichtsbelastung erfolgen. In diesem häufigeren Falle tritt die Pseudarthrose bei über-

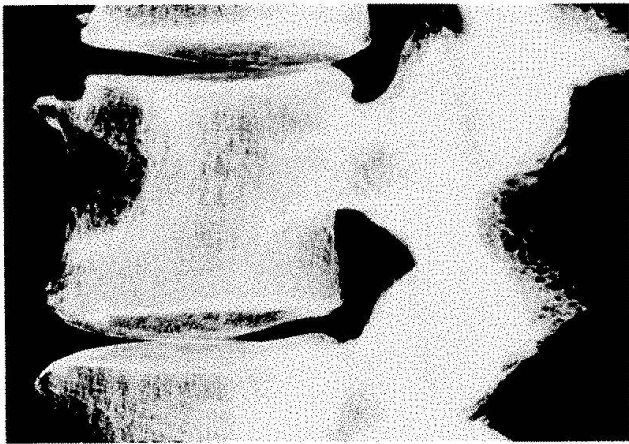


Abb. 10. Beispiel einer Knochenauflösung in der Nähe einer pulsierenden Aufweitung der Körperschlagader (an Aorten Aneurysma). Der Knochen der Wirbelsäule hat sich in der Umgebung des pulsierenden Tumors aufgelöst. Dies wurde früher fälschlicherweise als Drucknekrose (Absterben und Auflösen des Knochens unter Druckeinwirkung) interpretiert. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie reagiert der lebende Knochen auf Druckeinwirkungen, wie sie durch Osteosyntheseverfahren bewirkt werden?

mässiger Beweglichkeit des Frakturspaltes bei sonst genügender biologischer Reaktion des Knochens und der Weichteile auf. Wir sprechen von einer reaktiven Pseudarthrose. In diesen Fällen genügt die einfache Reduktion der Beweglichkeit durch periostale Schiene (Neutralisationsplatte) (Abb. 8b)

oder endostale Schiene (Marknagel). In selteneren Fällen steht im Vordergrund der Heilungsstörung eine verminderte Reaktion des Reparaturgewebes z. B. in Folge eines Infektes nach offenem Bruch und/oder Osteosynthese. In diesen Fällen steht bei der Behandlung die Ruhigstellung durch Implantate und die Anregung der Knochenbildung am besten durch Übertragung eigenen Knochengewebes (autologes Spongiosatransplantat) im Vordergrund.

Der Knochenbruch kann durch operativ eingebrachte Metall- oder Kunststoffteile stabilisiert werden. Dabei muss das eingebrachte Implantat genügend Steifigkeit aufweisen, um den Bruch ruhig zu stellen und genügend Festigkeit, um unter der gegebenen Belastung nicht selbst zu brechen. Über diese zwei Forderungen hinaus bedingt das Erzielen einer anatomisch korrekten Position der Bruchfragmente, dass der eingebrachte Fremdkörper sich der unterschiedlichen Oberflächenform des Knochens an der Frakturstelle anpassen lässt. Aus diesem Grunde haben bis heute praktisch nur duktile (plastisch verformbare) Metallimplantate eine grössere Verbreitung bei der operativen Frakturbehandlung (Osteosynthese) gefunden. Den hohen Anforderungen an die Festigkeit und Resistenz gegen Korrosion, sowie gute Gewebsverträglichkeit entsprechen

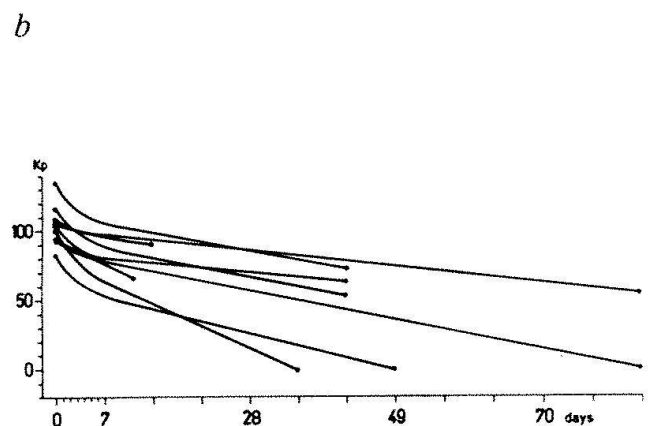
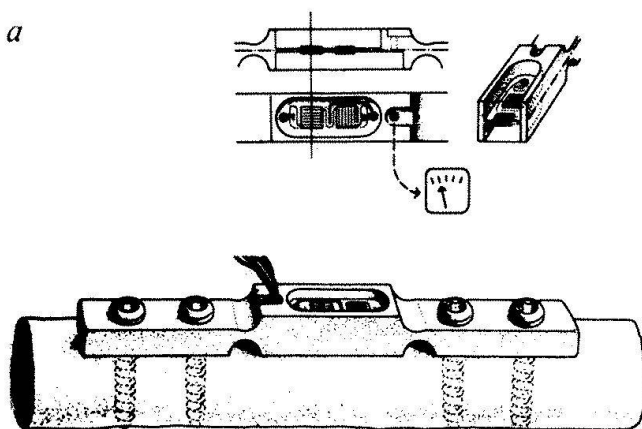


Abb. 11. Die Messung des Druckverlaufes am heilenden Knochenbruch.

a) Durch Modifikation einer sogenannten Kompressionsplatte mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen ist es möglich geworden, den an der Frakturstelle wirkenden Druck während des Heilvorganges über mehrere Wochen und Monate hinweg zu messen.

b) Der Druckverlauf zeigt, dass vom initial angelegten Druck zwischen 130 kg und 180 kg Kraft der grössere Teil noch nach 8 Wochen wirksam geblieben ist.

hoch gereinigte Chrom-Nickel-Stähle, neuerdings auch in zunehmendem Masse Titan und Titanlegierungen, während Chrom-Kobalt-Verbindungen in der Osteosynthese im Gegensatz zur Prothesenchirurgie eine nur geringe Verbreitung gefunden haben.

Grundlage der Stabilisierung durch Implantate ist in jedem Fall die lokale Druckwirkung zur Übertragung der Kräfte zwischen Implantat und Knochen, wie Abbildung 9a + b zeigen.

Die hohe Belastbarkeit des Knochengewebes lässt sich aber nur dann ausnützen, wenn der Druck, der am lebenden Gewebe ausgeübt wird, nicht zur Auflösung des Knochens führt. Seit vielen Jahrzehnten ist aber bekannt, dass Druck am Knochen die sogenannte Drucknekrose bedinge (Abb. 9).

Das Beispiel des Aorten Aneurysmas (Abb. 10) erklärt die heute als falsch erkannte Ansicht, dass der Knochen sich unter Druckeinwirkung auflöst.

In Versuchen am lebenden Knochen des Tieres sind Knochenbrüche mit Hilfe von sogenannten Kompressionsplatten stabilisiert worden. Diese Kompressionsplatten waren

mit Druckmesselementen versehen, die mit Hilfe einer transkutanen Drahtverbindung erlaubten, die Druckwerte während des Heilvorganges zu messen (Abb. 11).

Der mechanisch zur Stabilisierung verwendete Druck wird also biologisch gut toleriert. Die hohe Steifigkeit des Systems Knochen/Platte lässt auch die Schlussfolgerung zu, dass der Druck nicht zur Knochenauflösung im Bereiche von nur Hundertstel Millimetern geführt hat.

Die weiteren Versuche haben dann gezeigt, dass die Interpretation der Druckwirkung als Drucknekrose am Knochen nicht auf Grund hoher Druckwerte, sondern auf Grund der niedrigen Druckwerte, die Bewegung zulassen, entsteht.

Prof. Dr. med. Stephan M. Perren
Laboratorium für experimentelle Chirurgie
Davos und
Müller Institut für Biomechanik
Universität Bern