

Biologische Strukturen

Mechanische Charakteristika,
Belastungen und
Beanspruchungsgrenzen

Hermann Schwameder



Bewegung im Leben

Bewegung hat
zentrale Bedeutung
im und für das Leben

Menschlicher Körper
ist für Bewegung
gebaut



Prof. Hermann Schwameder
N 2

Bewegungsapparat – Gelenk als funkt. Einheit

Bewegungsapparat

Bewegung

Bewegliche Teile

Krafterzeugende Strukturen

Gelenke

Gelenk als funktionelle Einheit



Prof. Hermann Schwameder
N 3

Bewegungsapparat

Gelenk als funktionelle Einheit

Knochen

Kapseln

Knorpel

Muskel

Bänder

Nerven

Sehnen

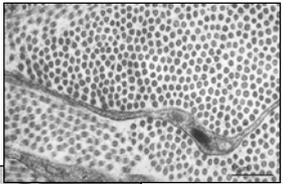
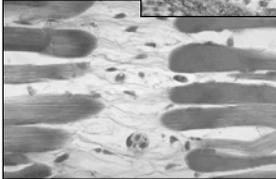


Prof. Hermann Schwameder
N 4

Bindegewebe

Bestandteile

- Zellen
- Matrix

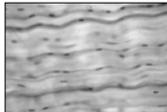
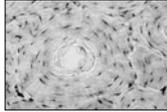
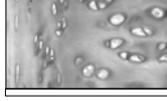



Prof. Hermann Schwameder
N 5

Bindegewebe

Zellen

- Fibroblasten, -zyten
- Osteoblasten, -zyten
- Chondroblasten, -zyten

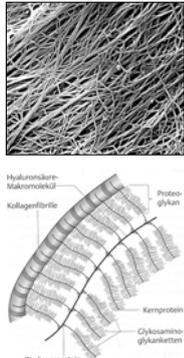




Prof. Hermann Schwameder
N 6

Bindegewebe

Matrix

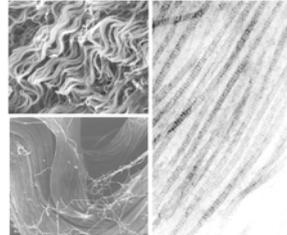
- Kollagene Fasern
- Elastische Fasern
- Grundsubstanz
 - Proteoglykane (PGs)
 - Glykosaminoglykane (GAGs)
- Nicht-kollagene Proteine (Vernetzung und Verbindung)
- Wasser



Prof. Hermann Schwameder
7

Kollagene

- Zweitgrößte Komponente des Bindegewebes (nach Wasser)
- 30% des Körpereiwisses
- 17 verschiedene Typen
- Typ I – IV (ca. 95%)

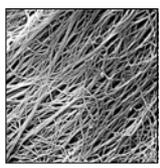


Prof. Hermann Schwameder
8

Kollagene

- Typ I (ca. 80%)
Zugbelastungen
- Typ II
Druckbelastungen
- Typ III
Dünn
- Typ IV
Trennschichten und Isolation

Knochen
Kapseln
Bänder
Aponeurosen
Sehnen



Knorpel

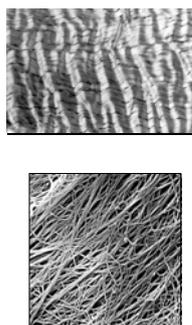
Haut
Wundheilung

Zellmembranen
Bindegewebe im Muskel
Nerven: Isolierschicht

Prof. Hermann Schwameder
9

Kollagene

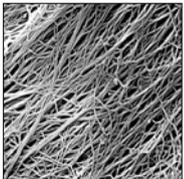
- Kollagensynthese in Fibro-, Myofibro-, Chondro- und Osteoblasten
- In Ruhe wellenförmiger Verlauf
- Bei verschiedenen Zugrichtungen: maschengitterartiges Geflecht ungeformtes, straffes BGW
- Vorgegebene Zugrichtungen: geformtes, straffes BGW Sehnen und einige Bänder



Prof. Hermann Schwameder
10

Kollagene

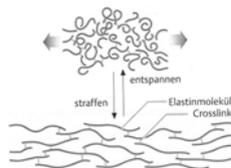
- Zugfestigkeit: 50 – 100 MPa
- Dehnbarkeit: ca. 5%
- Anpassung durch Training
 - Zunahme an Dicke und Stabilität (Strukturqualität)
- Turn over
 - 300 – 500 Tage
 - 60 – 100 Jahre (Bandscheiben)



Prof. Hermann Schwameder
11

Elastische Fasern

- Elastin: Strukturprotein
- Stark verzweigt
- viele Verbindungen zueinander (netzartiger Aufbau)
- Verlängerung um 100 – 150% möglich
- Zugfestigkeit: 3 MPa



Prof. Hermann Schwameder
12

Elastische Fasern

- Erhalten wellenförmigen Aufbau von Sehnen und Bändern
- Im lockeren Bindegewebe
- Elastischer Knorpel
- Haut (2-5%)
- Gefäßwände (ca. 50% elastische Fasern)
- Sehnen (2-5%)
- Bänder

Prof. Hermann Schwameder
13

Grundsubstanz

Proteoglykane (PG) und Glykosaminoglykane (GAG)

- Binden sich an kollagene und elastische Fasern
- Binden Wasser
- Absorbieren als erstes einwirkende Druck- und Zugkräfte
- Bei Belastung wird Wasser abgegeben
Veränderung der elektrischen Ladung (piezoelektrische Aktivitäten)

Prof. Hermann Schwameder
14

Grundsubstanz

Proteoglykane (PG) und Glykosaminoglykane (GAG)

- Bei zu wenig PG:
Weniger gebundenes Wasser und damit weniger Belastbarkeit
- Turn over
2 - 4 Tage (Hyaluronsäure)
7 - 10 Tage

Prof. Hermann Schwameder
15

Wasser

- ca. 72% der fettfreien Masse (bei Frauen und Männern)
- Transport- und Lösungsmittel
- Wärmepuffer
- Speicherung und Träger von Informationen
- Bestimmt zum Großteil das Volumen des Gewebes
- Großer Widerstand gegen Verformungen, insbesondere Kompression

Prof. Hermann Schwameder
16

Bindegewebsstrukturen

- Art und unterschiedliche Verteilung der Substanzen - Bindegewebsstruktur

Prof. Hermann Schwameder
17

Erhalt von Bindegewebe

- Gute Ernährung
- Physiologische Be- und Entlastungen
- Bei Mangel an physiologischen Reizen: Degeneration des Bindegewebes
- 'Unbelasteter' Stoffwechsel reicht häufig nicht aus
- Bewegungsapparat muss bewegt und belastet werden

Prof. Hermann Schwameder
18

Erhalt von Bindegewebe

Bewegung und Belastung

- Unterstützung von Diffusions- und Osmoseprozessen in der Zelle
- Stimulation der Synthese von Zellen durch
 - verstärkte Durchblutung
 - piezoelektrische Aktivität
 - mechanische Verformung
- Organisation und Ausrichtung kollagener Moleküle und Fibrillen



Prof. Hermann Schwameder
19

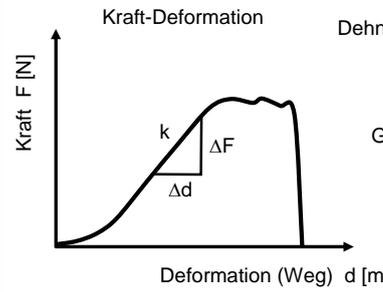
Kraft-Deformation

Kraft F [N]

Deformation (Weg) d [m]

Struktur setzt einer Dehnung (Kompression) Kraft entgegen

Steifigkeit k
Gegenkraft pro Weg

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta d}$$


Prof. Hermann Schwameder
20

Mechanische Kenngrößen

Spannung σ [Pa, MPa, GPa]

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

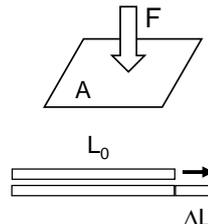
Dehnung ϵ [dimensionslos]

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Elastizitätsmodul E [Pa, MPa, GPa]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Materialsteifigkeit



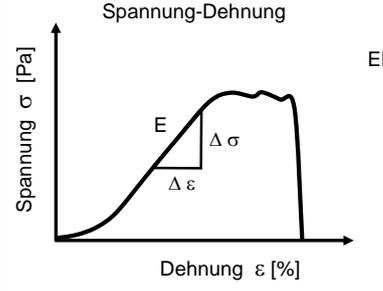
Prof. Hermann Schwameder
21

Spannung-Dehnung

Spannung σ [Pa]

Dehnung ϵ [%]

Elastizitätsmodul E

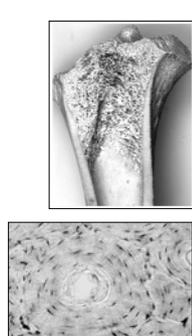
$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$$


Prof. Hermann Schwameder
22

Knochen

Aufbau

- Kalziumsalze: 60%
- Kollagene Fasern: 30%
- Wasser, Zellen und Gefäße: 10%



Prof. Hermann Schwameder
23

Knochen

Aufbau

- Eine der härtesten Strukturen des menschlichen Körpers
- Mineralien schränken Diffusion ein
- Austausch von Nähr- und Abfallstoffen eingeschränkt
- Stoffwechselprodukte über Gefäßsystem

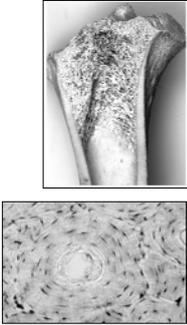


Prof. Hermann Schwameder
24

Knochen

Mechanische Funktionen

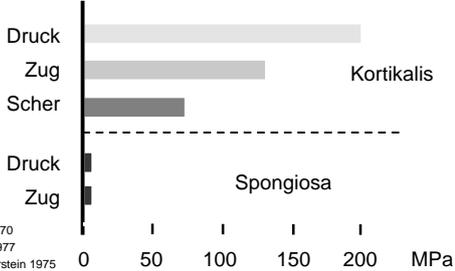
- Stützen und Tragen
- Kraftübertragung
Bewegung und Stabilisation
(Ansatzstellen für Sehnen und Bänder)
- Bewegen (Verbindung von Knochen durch Gelenke)
- Schützen



Prof. Hermann Schwameder
25

Knochen

Maximalspannungen im Knochen



Druck
Zug
Scher
Druck
Zug

Kortikalis
Spongiosa

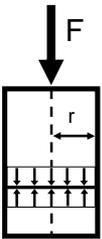
0 50 100 150 200 MPa

Yamada 1970
Steindler 1977
Reilly & Burstein 1975
Martin & Burr 1989

Prof. Hermann Schwameder
26

Knochen

▪ Spannung im vollen Knochen, axial



$F = 2000 \text{ N}$
 $r = 0.02 \text{ m}$

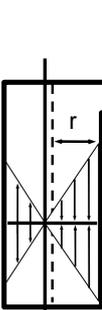
$$\sigma_{ax} = \frac{F}{A} = \frac{F}{r^2 \pi} = \frac{2000}{0.02^2 \pi}$$

$$\sigma_{ax} = 1591500 \text{ Pa} = 1.6 \text{ MPa}$$

Prof. Hermann Schwameder
27

Knochen

▪ Spannung im vollen Knochen, lateral



$F = 2000 \text{ N}$
 $r = 0.02 \text{ m}$

$$\sigma_{bi} = \frac{4 M_{bi}}{r^3 \pi} = \frac{4 F (2r)}{r^3 \pi} = \frac{8 F}{r^2 \pi} = 12.8 \text{ MPa}$$

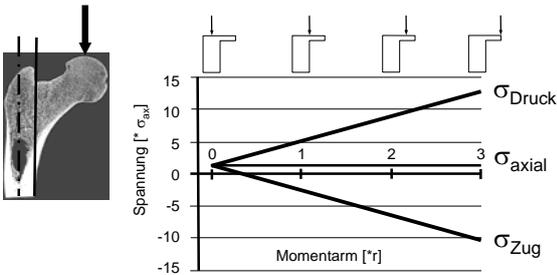
$$\sigma_{Dr} = \sigma_{ax} + \sigma_{bi} = \frac{9 F}{r^2 \pi} = 14.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Zu} = \sigma_{ax} - \sigma_{bi} = -\frac{7 F}{r^2 \pi} = -11.2 \text{ MPa}$$

Prof. Hermann Schwameder
28

Knochen

▪ Spannung im vollen Knochen, axial - lateral



Spannung [$^{\circ} \sigma_{ax}$]

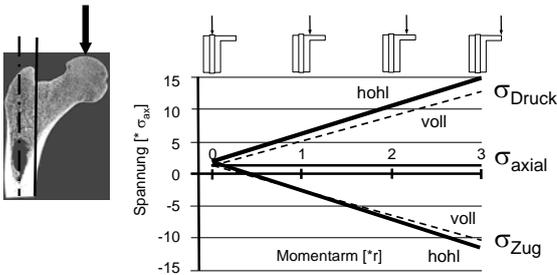
Momentarm [$^{\circ} r$]

σ_{Druck}
 σ_{axial}
 σ_{Zug}

Prof. Hermann Schwameder
29

Knochen

▪ Spannung im hohlen Knochen, axial - lateral



Spannung [$^{\circ} \sigma_{ax}$]

Momentarm [$^{\circ} r$]

σ_{Druck}
 σ_{axial}
 σ_{Zug}

hohl
voll
voll
hohl

Prof. Hermann Schwameder
30

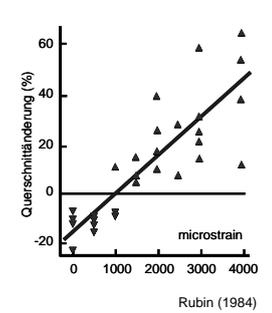
Knochen

- Zusammenfassung Belastungen
 - Biegespannungen >>> Axialspannungen
 - Skelettgeometrie ist sehr wichtig
 - Muskeln können ausgleichen
 - Möglichkeiten der Belastungsreduktion
 - Änderung der Geometrie
 - Reduktion der Kraft
 - Muskelkraft zum Ausgleich
 - Probleme, wenn Muskeln nicht ausgleichen (z.B. Verletzungen, Alter)

Prof. Hermann Schwameder
31

Knochen

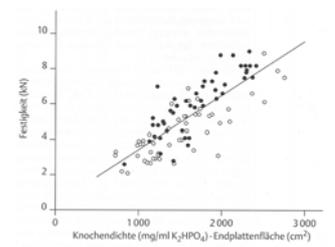
- Reaktion auf Kompression
 - Ohne Spannung Knochenabbau
 - Geringe Spannung notwendig für Erhalt des Knochens
 - Knochensubstanz nimmt mit Spannung zu



Prof. Hermann Schwameder
32

Knochen

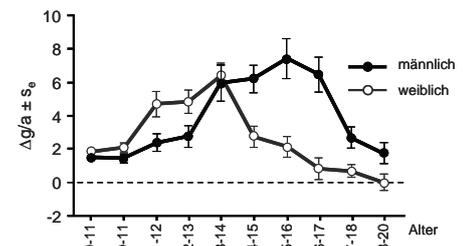
- Zusammenhang zwischen Knochendichte und Festigkeit



Prof. Hermann Schwameder
33

Knochen

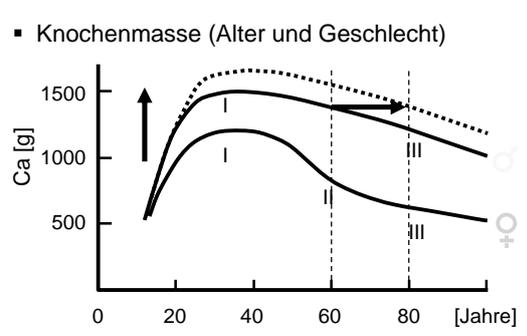
- Zunahme an Knochenmasse



Prof. Hermann Schwameder
34

Knochen

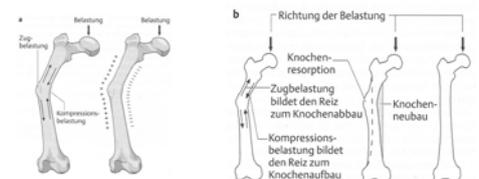
- Knochenmasse (Alter und Geschlecht)



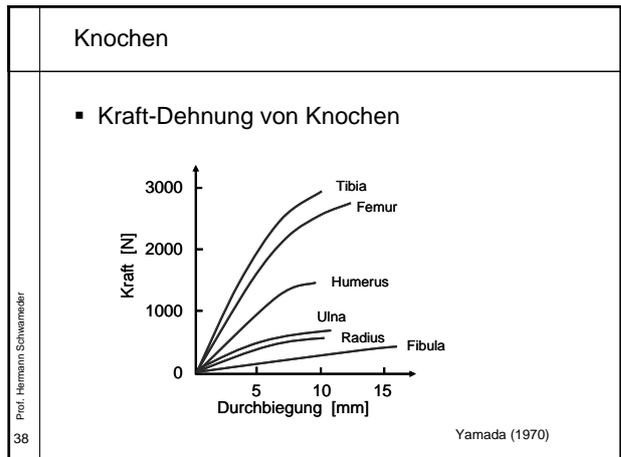
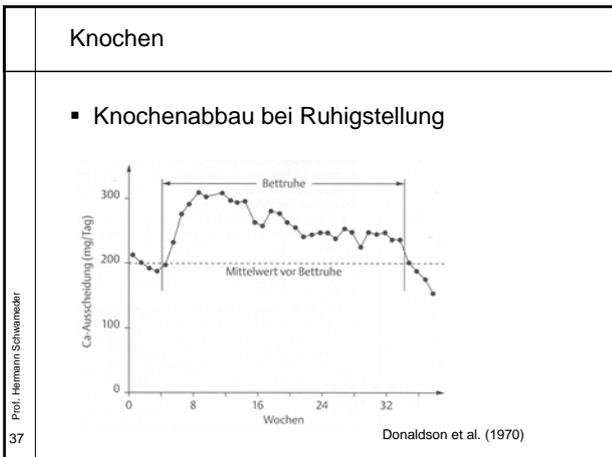
Prof. Hermann Schwameder
35

Knochen

- Knochenumbau
 - Bei Zugspannung: positive Ladung – Knochenabbau
 - Bei Druckspannung: negative Ladung - Knochenaufbau



Prof. Hermann Schwameder
36



- ### Knochen
- Positive Auswirkungen auf Knochenentwicklung
 - Kompression
 - Rubin (1984)
 - Dehnungsrate
 - O'Connor & Lanyon (1982)
 - Impakt-Belastungen
 - Woo et al. (1981)
 - McLeod (1989)
 - Grimston et al. (1993)
 - Heinonen et al. (1996)
 - Dook et al. (1997)
 - Brüggemann et al. (1999)
- Prof. Hermann Schwameder

- ### Knorpel
- #### Aufbau
- Oberflächliche Knorpelzone
 - 5 – 10 %
 - Dünne Kollagenfibrillen parallel zur Oberfläche
 - Aufnahme von Scherkräften
 - Reduktion von Reibungskräften
 - Übergangszone
 - 15 – 20 %
 - Schräg verlaufende Kollagenfibrillen
-
- Prof. Hermann Schwameder

- ### Knorpel
- #### Aufbau
- Tiefe (radiale) Knorpelzone
 - 40-60%
 - Dicke Kollagenfibrillen normal zur Oberfläche
 - Aufnahme von Kompressionskräften
 - Kalzifizierte Knorpelzone
 - ca. 30%
 - Verbindung mit dem Knochen
-
- Prof. Hermann Schwameder

- ### Knorpel
- Komponenten
 - Zellen
 - Synthetisieren die Bestandteile der Matrix
 - Chondroblasten (relativ aktiv)
 - Chondrozyten
sehr wenig aktiv bis inaktiv
 - Matrix
 - Kollagene Fasern (Typ II)
 - Grundsubstanz
 - Wasser (ca. 20-40% der Matrix)
 - Nicht-kollagene Proteine
-
- Prof. Hermann Schwameder

Knorpel

- Funktion des Knorpels
 - Kraftübertragung
 - Verteilung von Kräften
 - Bewegung ermöglichen
 - Reduktion von Reibungskräften
 - Schutz des Knochens



Prof. Hermann Schwameder
48

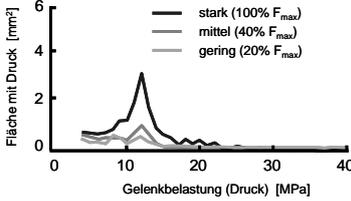
Knorpel

- Maximalspannung
 - In vitro (Yamada 1973) 5 MPa
 - Gehen, Hüfte (Hodge et al. 1989) 5 MPa
 - Bergabgehen, Knie (Schwameder 2004) 6 MPa
 - Drop jumps, Knie 10 MPa
 - Drop jumps, Sprunggelenk 20 MPa
 - Aufstehen vom Stuhl, Hüfte (Hodge et al. 1989) 18 MPa
 - In vitro, Kaninchenknie (Ronsky 1994) 40 MPa

Prof. Hermann Schwameder
49

Knorpel

- Günstiges Belastungsdesign

Ronsky (1994)

Prof. Hermann Schwameder
50

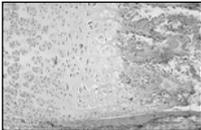
Knorpel

- Synthese
 - Zur Erhaltung des Knorpels ist Synthese von Fibrillen und Grundsubstanz notwendig
 - Reiz zur Synthese durch piezoelektrische Aktivität (unterstützt durch Be- und Entlastung)
 - Nur in der Pubertät hoch aktiv

Prof. Hermann Schwameder
51

Knorpel

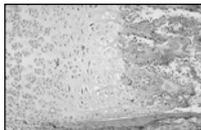
- Nährstoffe
 - Benötigt werden
 - Sauerstoff
 - Aminosäuren
 - Glukose
 - Transport durch Diffusion und Osmose von der Synovialflüssigkeit zu den Zellen
 - Bewegung (Be- und Entlastung des Knorpels) unterstützen diesen Stoffwechsel



Prof. Hermann Schwameder
52

Knorpel

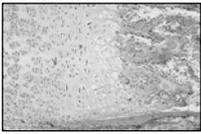
- Altersbedingte Degeneration
 - Im Alter verringerte Syntheseaktivität
- Unterbelastung
 - Diffusion ohne Belastung reicht für die Ernährung des Knorpels nicht aus
 - Zusätzlich sind Be- und Entlastungen
 - Verstärkung der Diffusionsvorgänge
 - Stimulation der Syntheseaktivität (insbesondere Grundsubstanz)



Prof. Hermann Schwameder
53

Knorpel

- Günstige Belastungen für den Knorpel
 - Große Schwingungsbreite der Gelenke
 - Langdauernde Belastungen
 - Zyklische Bewegungen
- Impakts bei Gesunden kein Problem

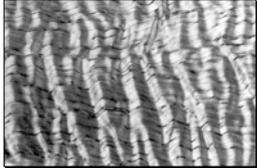


Prof. Hermann Schwameder
54

Bänder

Aufbau

- Zellen
 - Fibroblasten
 - Menge relativ gering
 - Zahl nimmt im Alter ab
- Matrix
 - Kollagene (70-80%, vorw. I (90%), III (10%))
 - Elastische Fasern (5%)
 - Grundsubstanz (20%)
 - Faserverlauf parallel in Hauptbelastungsrichtung
 - In Ruhe wellenförmig



Prof. Hermann Schwameder
55

Bänder

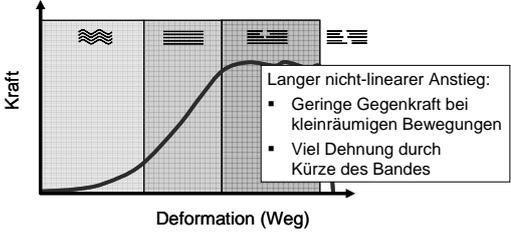
- Funktionen
 - Verbindung von Knochen
 - Bewegung führen
 - Gelenkkongruenz gewährleisten
 - Bewegungssensorik



Prof. Hermann Schwameder
56

Bänder

- Kraft-Weg-Diagramm



Langer nicht-linearer Anstieg:

- Geringe Gegenkraft bei kleinräumigen Bewegungen
- Viel Dehnung durch Kürze des Bandes

Prof. Hermann Schwameder
57

Bänder

- Mechanische Charakteristika
 - Maximalspannung: 40 – 80 MPa
 - E-Modul: 0.5 – 1 GPa
 - Maximale Dehnung: 10 %
 - Spannung und E-Modul nehmen mit Dehnungsrate zu



Prof. Hermann Schwameder
58

Bänder

Beispiel
Vorderes Kreuzband

$\sigma_{\max} = 50 \text{ MPa}$

$A = 60 \text{ mm}^2$

$F = \sigma \cdot A = 3.000 \text{ N (4 KG)}$

Abwärtsgehen steil: $F < 2 \text{ KG}$
(Schwameder 2004)



Prof. Hermann Schwameder
59

Bänder

- Anpassungen durch physiologische Reize
 - Quantitativ sehr gering
außer: während der Entwicklung – hier Längen- und Dickenwachstum
 - Vorwiegend qualitativ
 - bessere Ausrichtung der Kollagenfasern
 - Höherer Anteil lösbarer cross-links
 - Bei Fehlen der Reize: Belastbarkeit der Bänder nimmt ab

Prof. Hermann Schwameder
60

Bänder

- Entwicklung im Alter
 - Anzahl der Fibroblasten sinkt
 - Anzahl der Kollagenfasern verringert sich kaum
 - Kollagenfasern werden aber dünner
 - Anzahl der nicht-lösbaren Crosslinks nimmt zu
 - Reduktion der Grundsubstanz (GAGs und PGs)
 - Damit weniger Wasser bindbar
 - Dadurch wird die Belastbarkeit der Strukturen reduziert
 - Altersbedingte Veränderungen durch physiologische Belastungen deutlich reduzierbar

Prof. Hermann Schwameder
61

Bänder

- Dehnung mit und ohne Crosslinks

Prof. Hermann Schwameder
62

Bindegewebe

Maximale Zugkraft des vorderen Kreuzbandes

Alter (Jahre)	Zugkraft F (N)
20	~2800
40	~1800
60	~1300
80	~1000

Woo et al. (AJSM 1991)

Prof. Hermann Schwameder
63

Bänder

- Entwicklung bei Immobilisation
 - Ähnlich wie altersbedingte Entwicklung, nur stärker ausgeprägt
 - Reduktion der Faserdicke: Steifigkeit des Bandes nimmt ab (weniger Stabilität)
 - Regeneration möglich, vermutlich aber nicht mehr vollständig

Prof. Hermann Schwameder
64

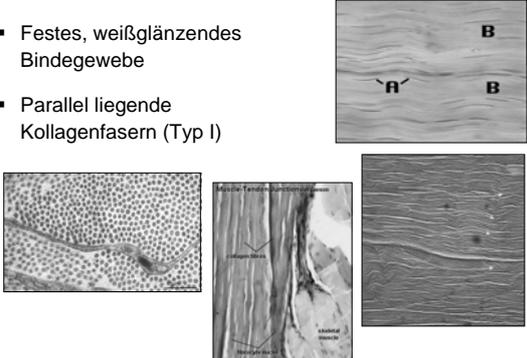
Bänder

- Wundheilung von Bändern

Prof. Hermann Schwameder
65

Sehnen

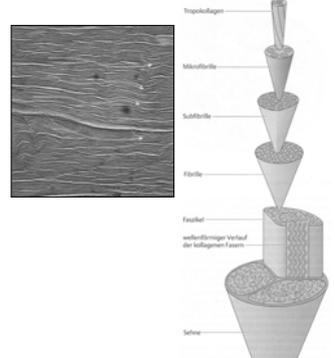
- Festes, weißglänzendes Bindegewebe
- Parallel liegende Kollagenfasern (Typ I)



Prof. Hermann Schwameder
66

Sehnen

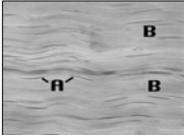
- Geringe Mengen elastische Fasern
- Entspannt: wellenförmig
- Peritonon Synovialflüssigkeit
- Sehnscheiden
- Knorpel



Prof. Hermann Schwameder
67

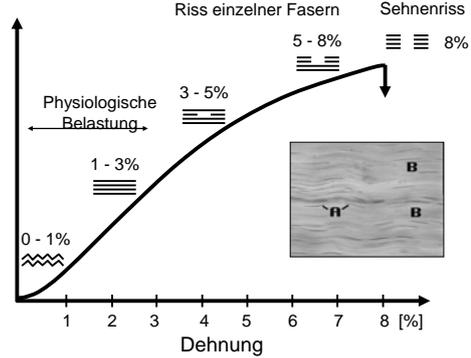
Sehnen

- Funktionen
 - Kraftübertragung zwischen Muskel und Knochen
 - Speicherung elastischer Energie



Prof. Hermann Schwameder
68

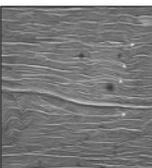
Sehnen



Prof. Hermann Schwameder
69

Sehnen

- Mechanische Charakteristika
 - Maximalspannung: 80 – 120 MPa
 - E-Modul: 1 – 2 GPa
 - Maximale Dehnung: 8 %
 - Spannung und E-Modul nehmen mit Dehnungsrate zu



Prof. Hermann Schwameder
70

Sehnen

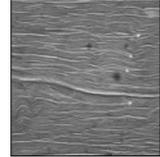
Beispiel Achillessehne

$\sigma_{\max} = 100 \text{ MPa}$

$A = 200 \text{ mm}^2$

$F = \sigma \cdot A = 20.000 \text{ N (25 * KG)}$

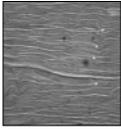
Drop jump: $F < 20 \text{ KG}$



Prof. Hermann Schwameder
71

Sehnen

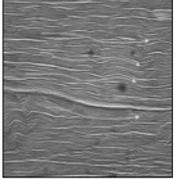
- Anpassungen
 - Krafttraining regt Kollagenproduktion an
 - Kollagen nimmt leicht zu
 - Elastische Fasern nehmen leicht ab



Prof. Hermann Schwameder
72

Sehnen

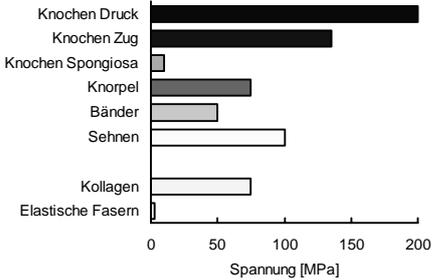
- Degeneration im Alter
 - Zellproduktion nimmt ab
 - Geringere Matrixsynthese
 - Geringere Belastbarkeit
- Immobilisation
 - Abnahme des Kollagens
 - Schlechtere Organisation und Ausrichtung des Gewebes
 - Geringere Elastizität und Belastbarkeit



Prof. Hermann Schwameder
73

Biologische Strukturen

Maximalspannung biologischer Strukturen



Struktur	Spannung [MPa]
Knochen Druck	~190
Knochen Zug	~140
Knochen Spongiosa	~10
Knorpel	~70
Bänder	~50
Sehnen	~100
Kollagen	~70
Elastische Fasern	~10

Prof. Hermann Schwameder
74

Biologische Strukturen

- Biologische Strukturen sind nicht nur für Bewegung gebaut
- Bewegung ist entscheidend zum Erhalt
 - Morphologie
 - Funktion



Prof. Hermann Schwameder
75

Hinführen
Motivieren
Erziehen
zu Sport und Bewegung



Prof. Hermann Schwameder
76