

ESRF Newsletter



**Nature
inspires
technology**

Editorial

3 Nature inspires science at the ESRF

Feature news: bioinspiration

4 Scary monster or amazing silk factory?

5–6 Future offers robots with bone and muscle

7–8 Powered by the Sun: plants can show us how

8–9 What gives wood its excellent mechanical performance?



2.5 Knochen

- Ausgangspunkt **Collagen** = auf **Zug**belastung optimiertes Protein
- **Mineralisierung**: Einlagerung harter anorganischer Kristalle \Rightarrow Komposit
- Sehne \Rightarrow mineralisierte Sehne \Rightarrow Knochen:
 - § Anstieg des Elastizitätsmoduls
 - § Erniedrigung der maximalen Dehnung ϵ_{\max}
(Dehnung 0,78 %, Kompression 0,84 %)
 - § Erhöhung der maximalen Spannung σ_{\max}
- Knochen: auf **Zug-** und **Druck**belastung optimiert !

2.5.1 Hierarchische Strukturierung

Wiederholung: hierarchische Struktur von **Collagen**

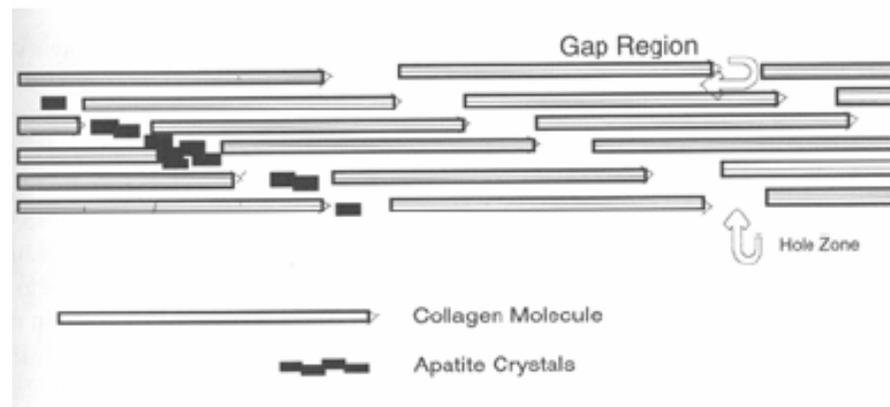


Mineralisierung: Einbau von *Hydroxyapatit* in Zwischenräume (Gaps):

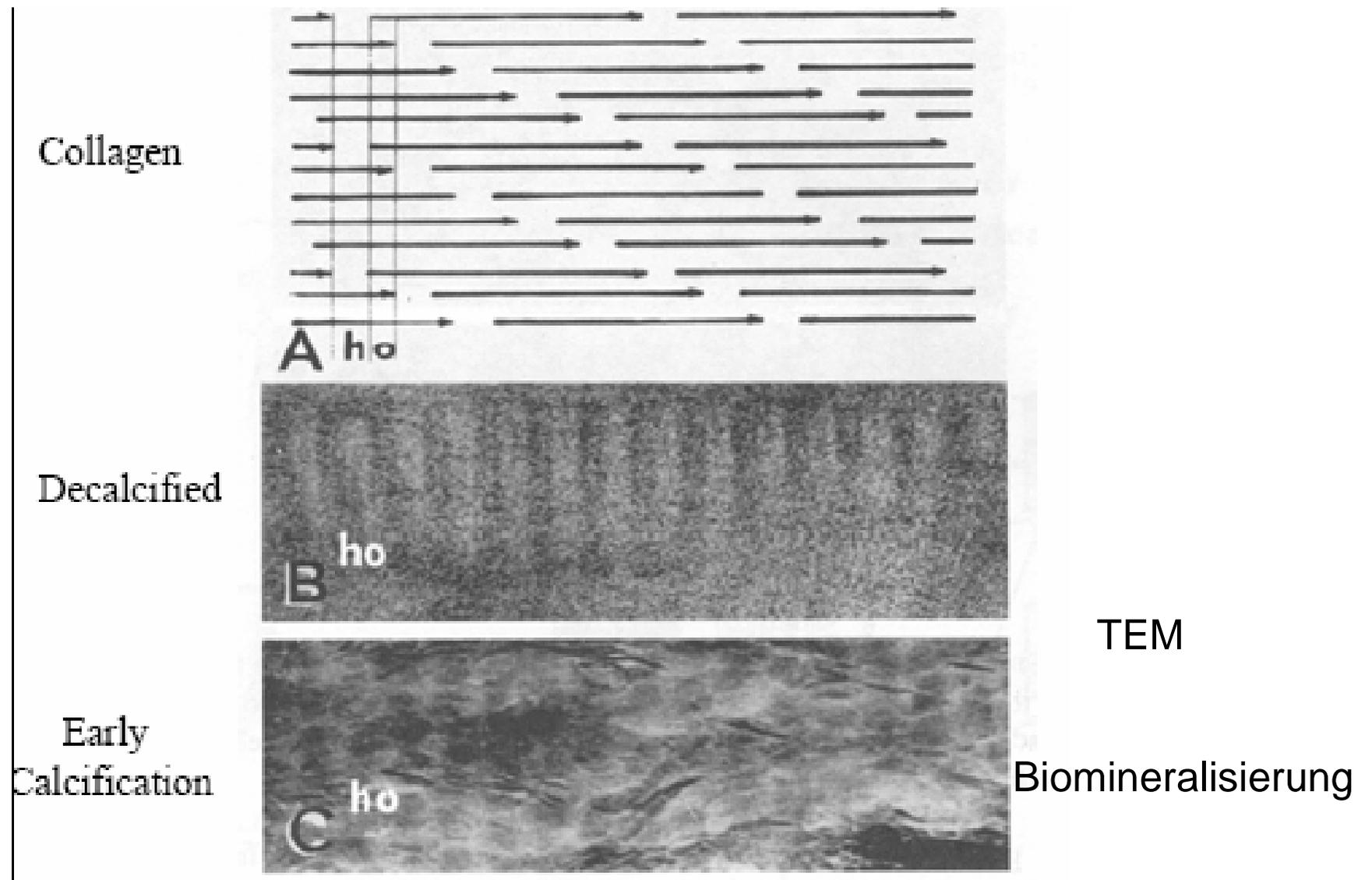
Dahllit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3\text{OH}$, 3 nm Durchmesser, < 40 nm Länge

Bone mineralization

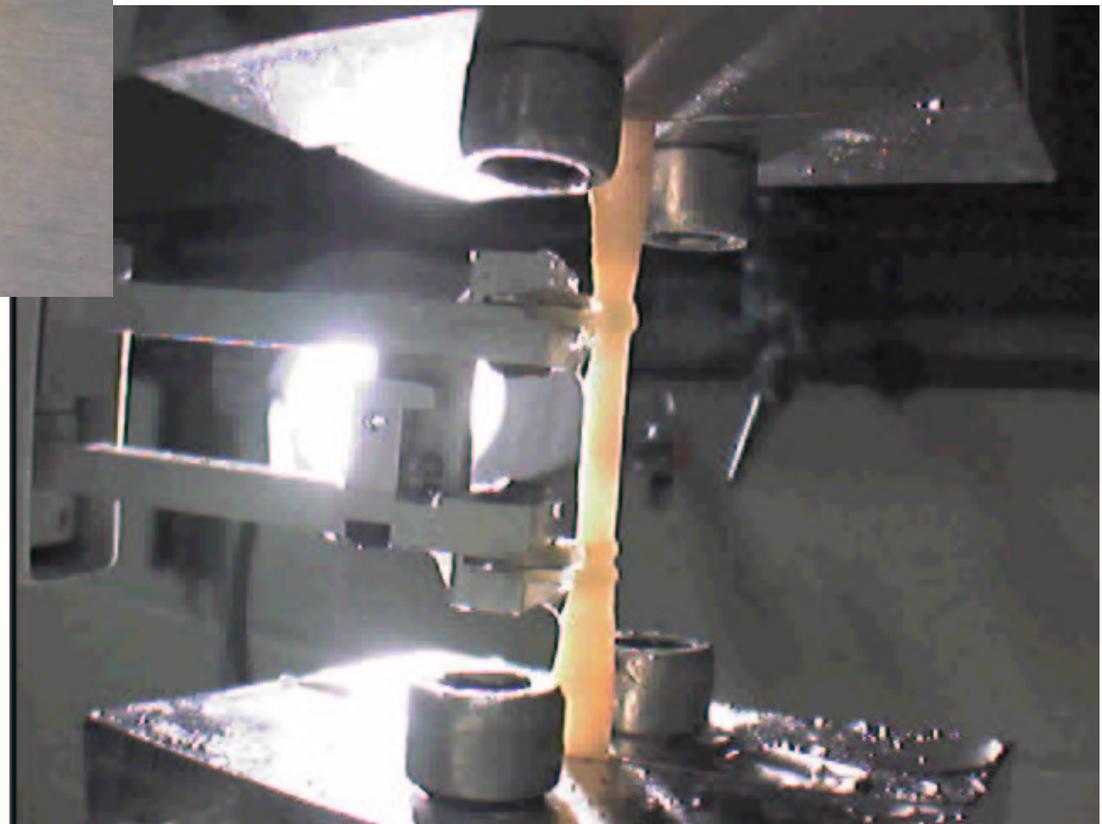
■ Collagen may act to aid nucleation



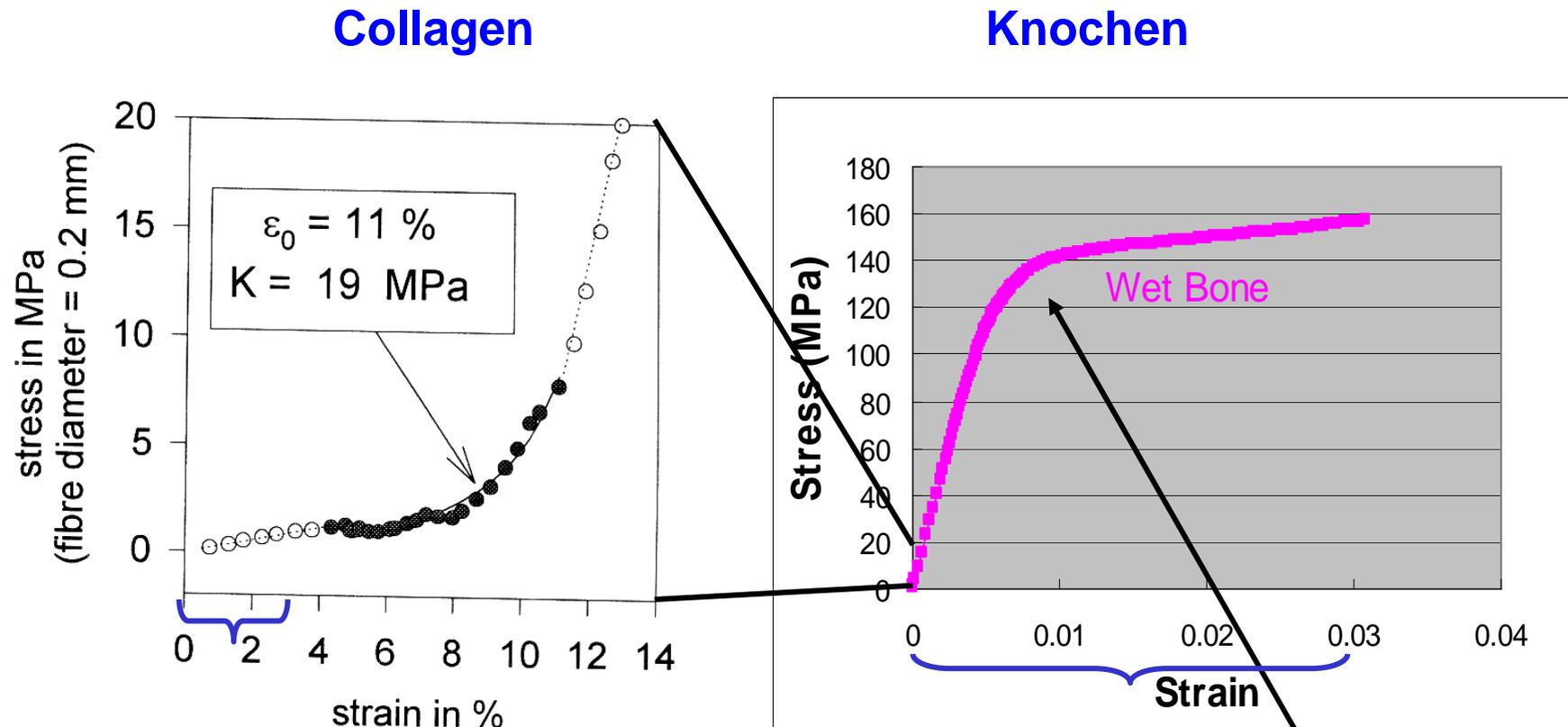
Packung der Mineralkristalle in Collagen-Fibrillen:



Messung der **mechanischen Eigenschaften** von Knochen



Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Collagen durch Biomineralisation



- Anstieg des **Elastizitätsmoduls**
- Erniedrigung der **maximalen Dehnung** ϵ_{\max}
(größer in Kompression!)
- Erhöhung der **maximalen Spannung** σ_{\max}

• **Streckgrenze!**

Vashishth, Deepak. "Fracture of cortical bone under controlled crack propagation and combined axial-torsional loadings." PhD Thesis, University of London, UK.

Loading	E (GPa)	G (GPa)	Ystrain (%) Streckgrenze	Ystress (MPa)	U.Strain (%)	U.Stress (MPa)
Tension	22.9 (2.2)		0.80 (0.03)	131 (5)	3.89 (0.79)	159 (8)
Compression	22.4 (2.5)		1.19 (0.11)	207 (23)	1.22 (0.16)	210 (22)
Torsion		5.6 (0.8)	1.39 (0.24)	68 (7)	2.0 (0.15)	84 (11)

2 Knochenarten:

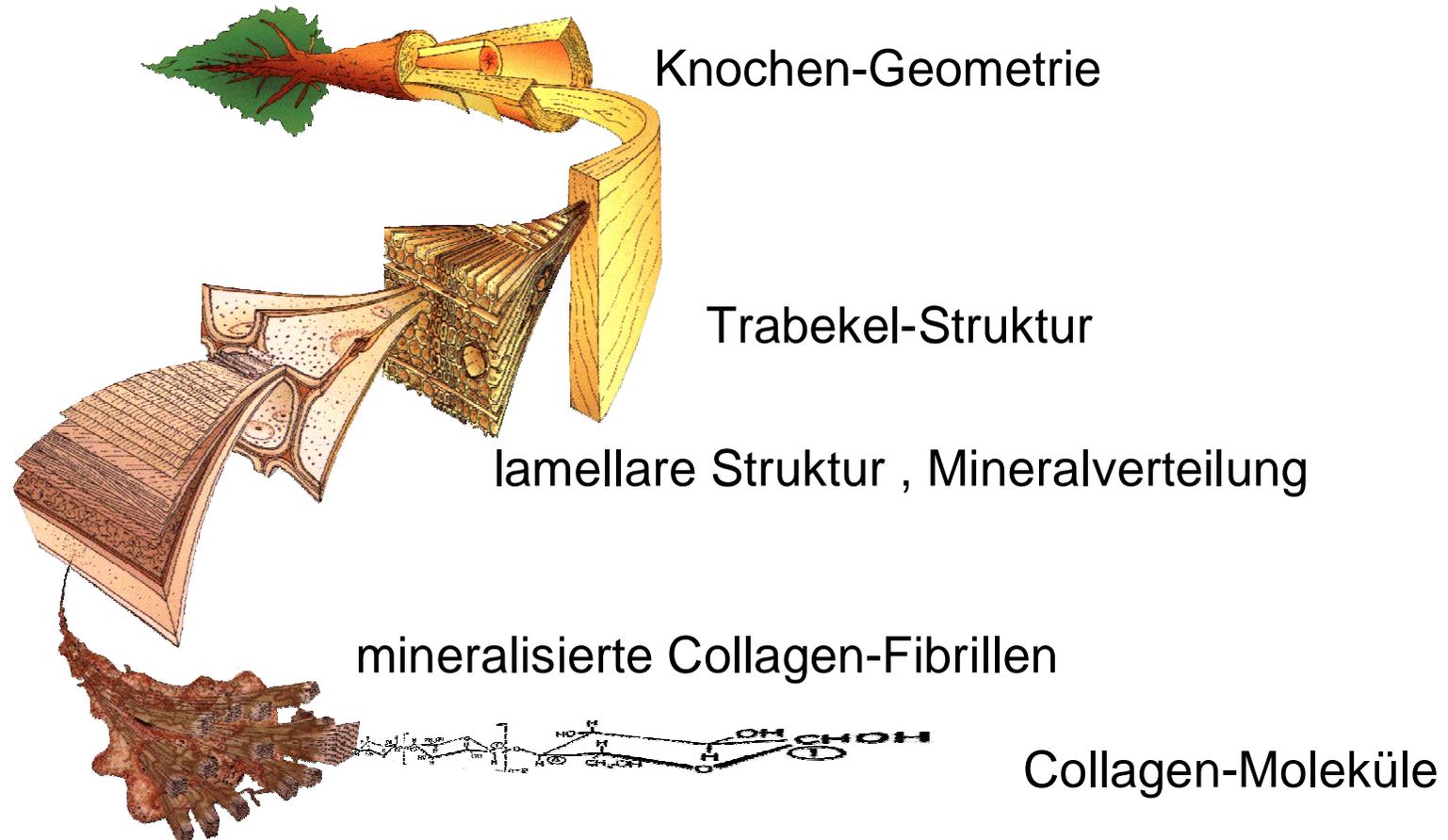
(1) **kompakter Knochen (Osteon; cortical)**

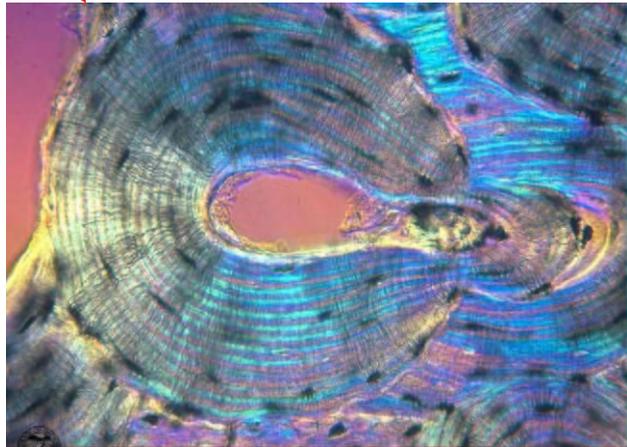
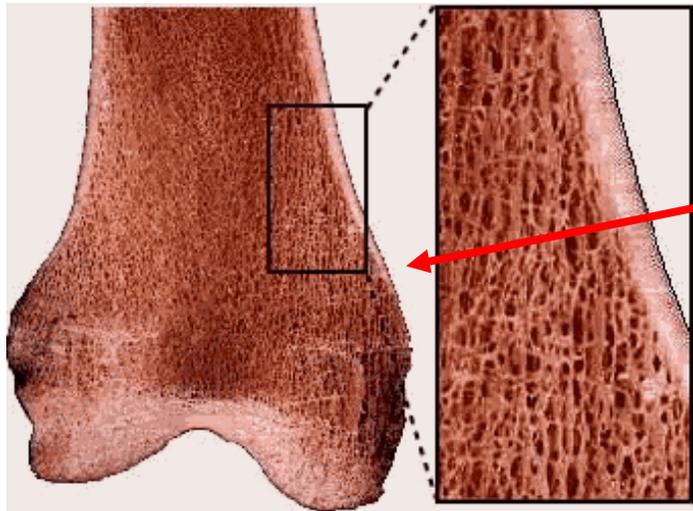
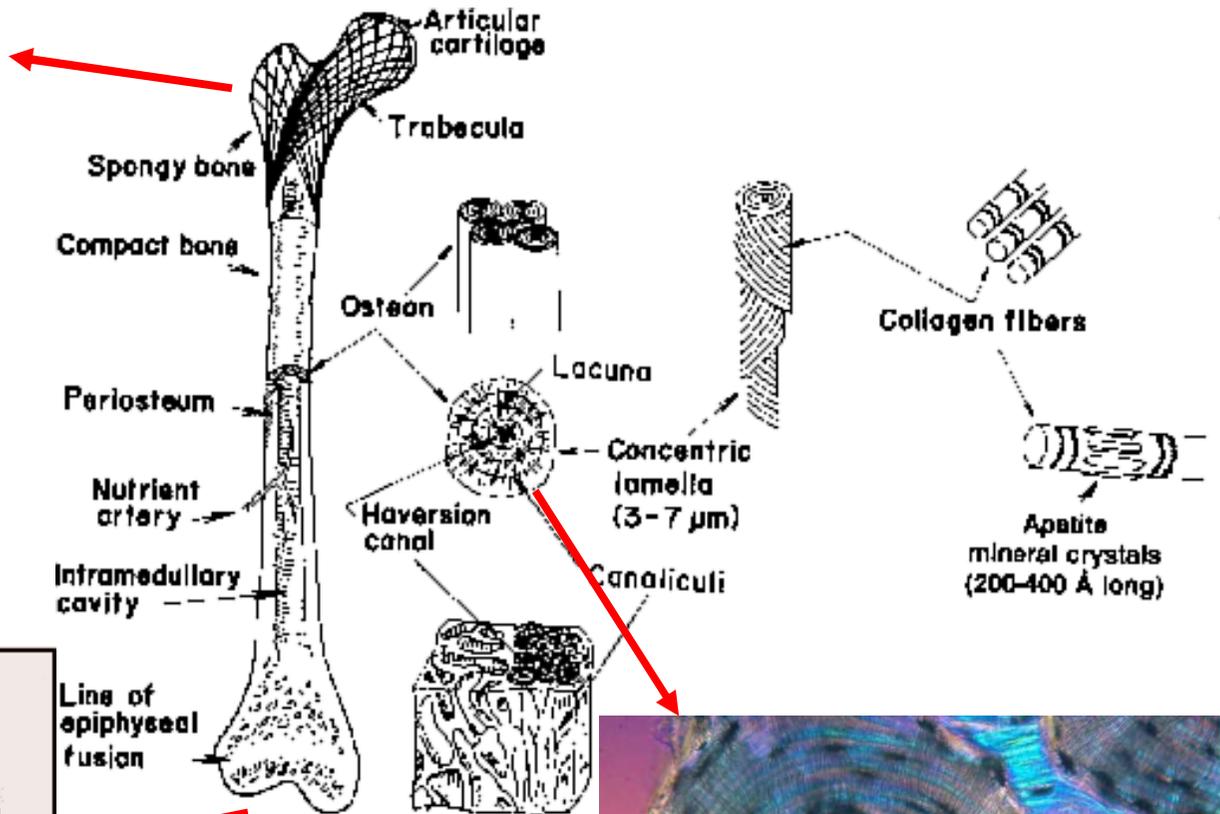
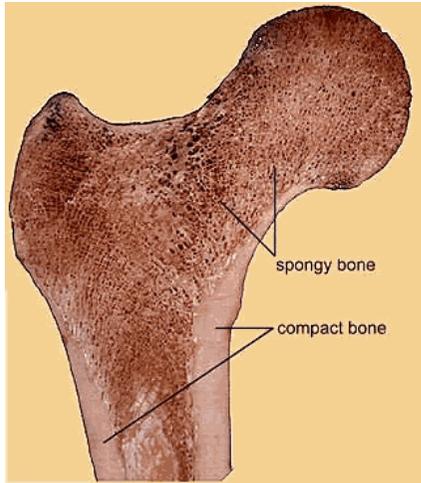
außen am Knochen: feste Wand von Röhrenknochen, Gelenkköpfe

(2) **schwammartiger Knochen (Trabeculae; cancellous)**

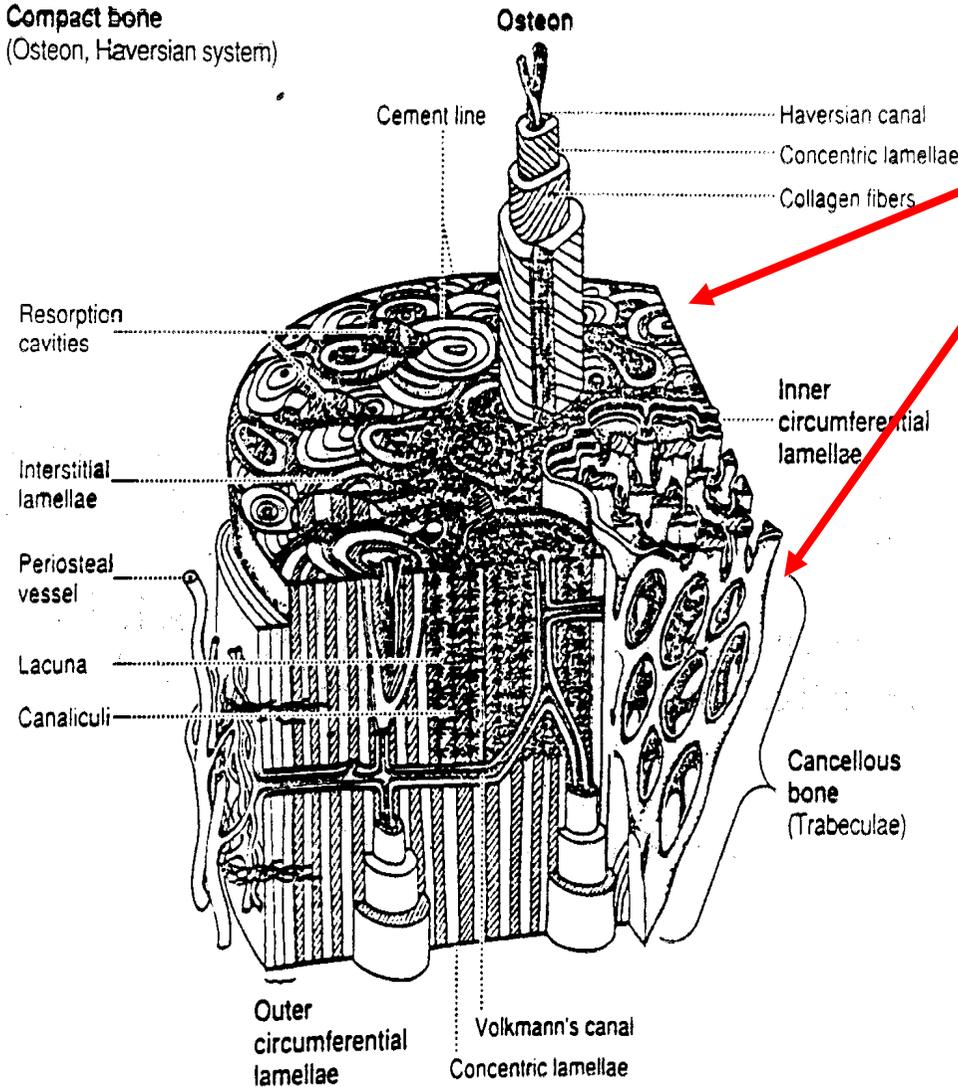
Gewichtseinsparung durch lockere Struktur

Erinnerung: so ähnlich alles schon mal gesehen...



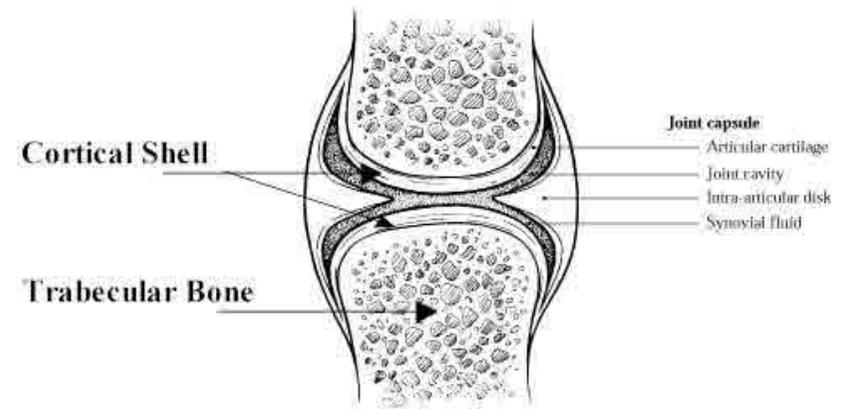


Compact bone
(Osteon, Haversian system)



2 Arten von Knochen:

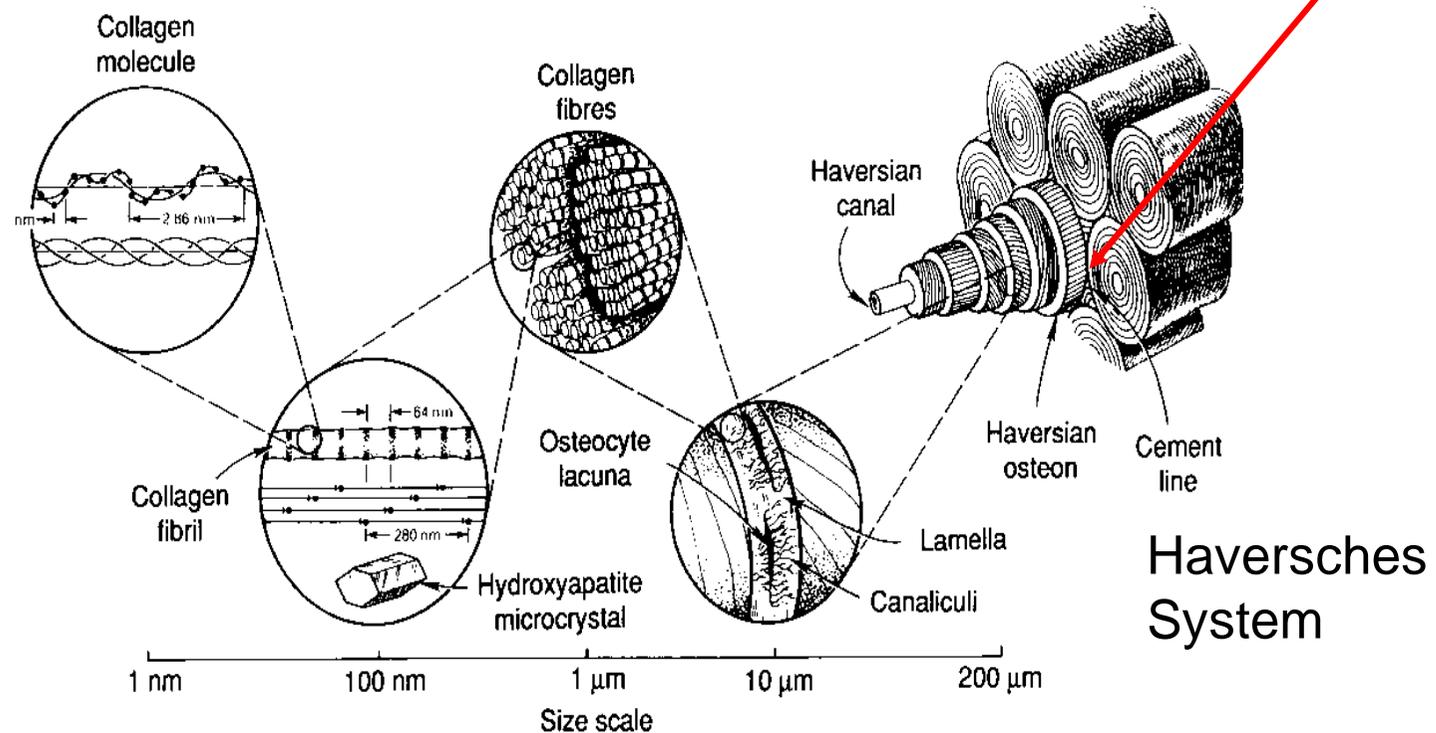
- kompakt: Osteon
- porös: Trabeculae



Knochen ist ein **lebendes Organ** mit erheblichem Stoffwechsel!

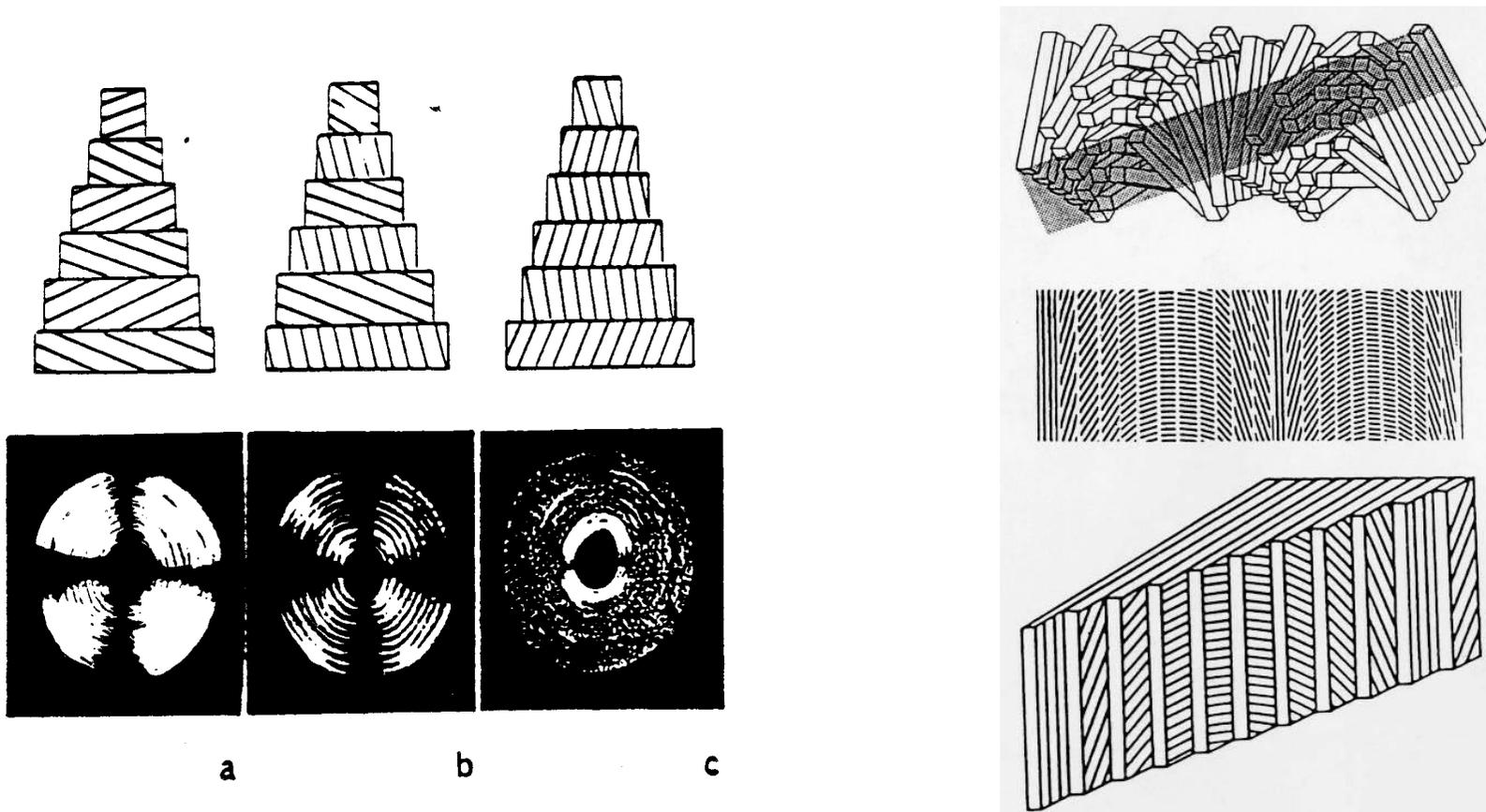
- Osteon hat **Blutgefäße** im Zentrum, konzentrische Neubildung von Knochenmaterial
- primär: neu gebildet; sekundär: „Ersatz“ für bestehenden Knochen, Remodellierung
- Osteoklasten bauen Knochen ab (Tunnel)
- Osteoblasten füllen wieder auf (bis auf Haverschen Kanal)

Grenze: Zementlinien



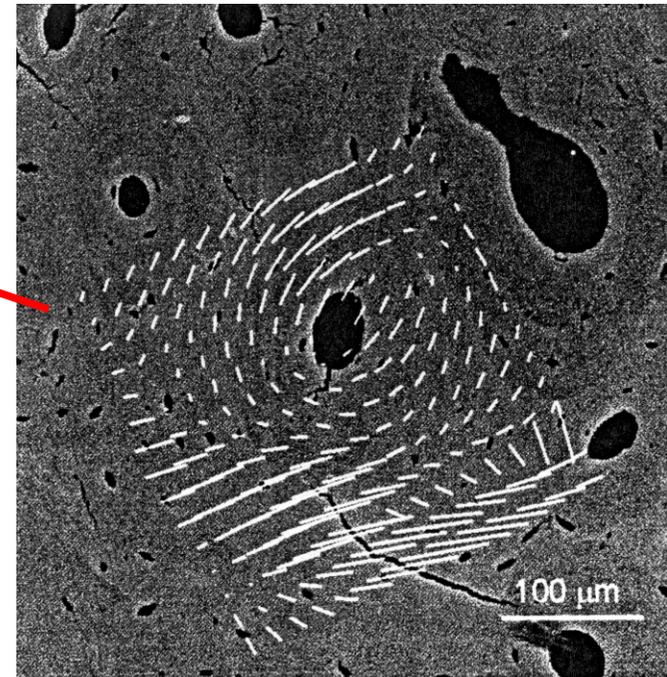
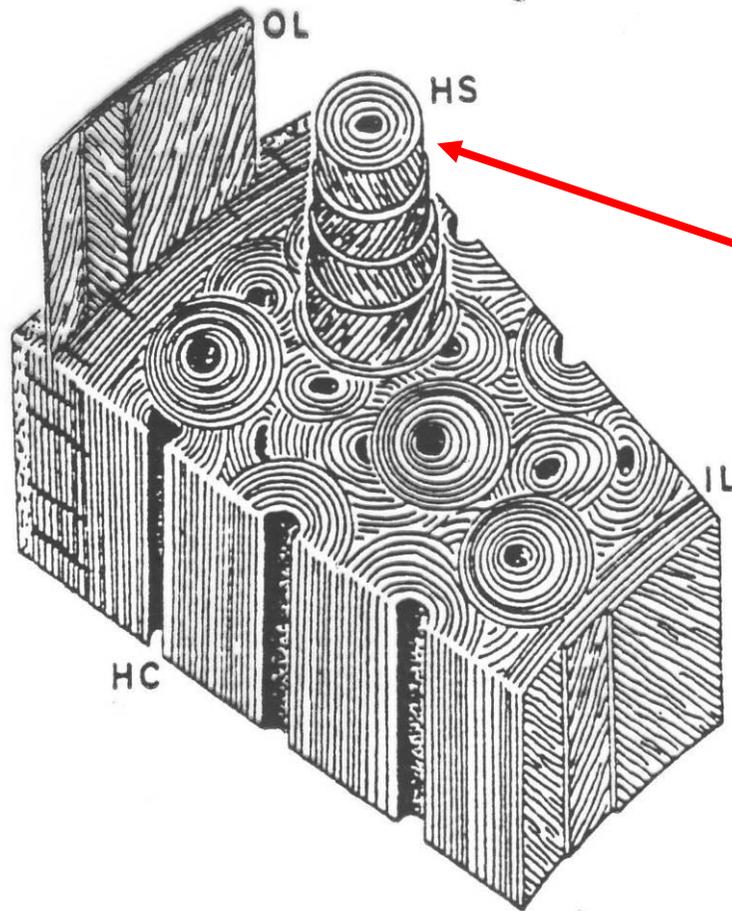
2.5.2 Beispiele mechanischer Optimierung

(1) lamellare Osteon-Struktur



verschiedene Modelle zur Lamellen-Struktur (basierend auf Mikroskopie)

ortsauflösende Röntgen-Kleinwinkelstreuung:
Orientierung der Mineralpartikel (SAXS)



Osteon

(2) Orientierung und Größenverteilung der Hydroxyapatit-Kristalle

SAXS-Experiment mit Ortsauflösung, da

- ideale Größe (1 ... 100 nm)
- Dichtekontrast Hydroxyapatit - Collagen

2D-Streubild von **Plättchen**

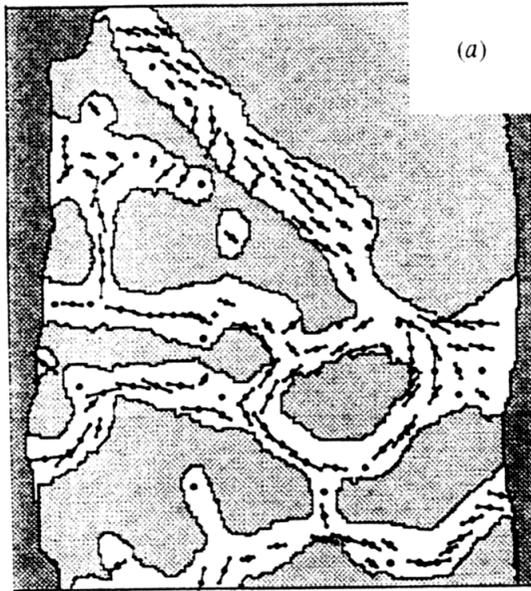
Streukurve: (spez.) Oberfläche σ der Mineralpartikel

mittlere Dicke: $T = 4\Phi(1 - \Phi) / \sigma$ (mit Φ : spez. Volumen der Partikel)

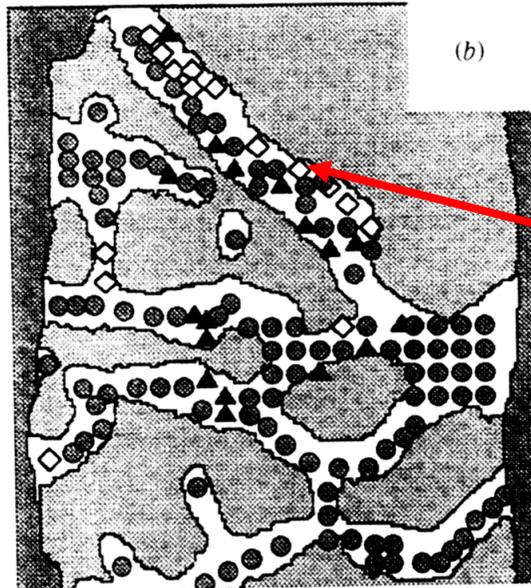
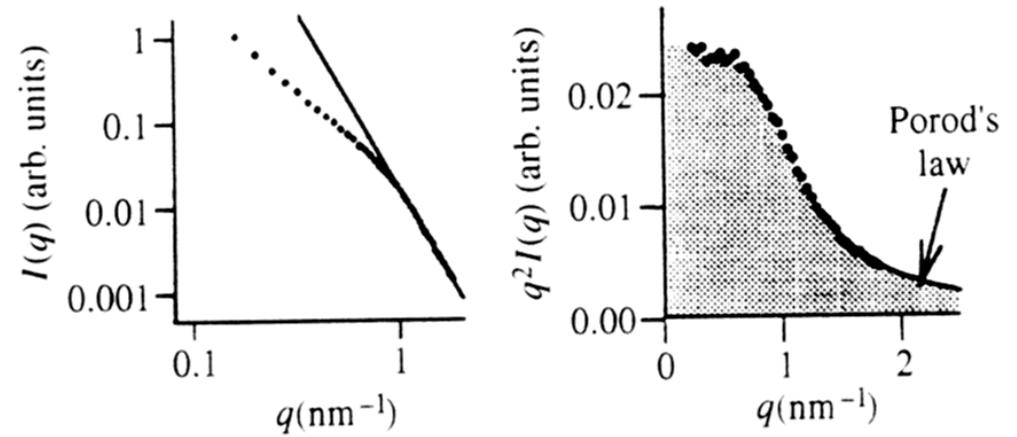
Variation: 2 – 4 nm; größer mit zunehmendem Alter

Optimierung an Gelenkköpfen

Orientierung



Streukurve: gemittelte Intensitätsverteilung

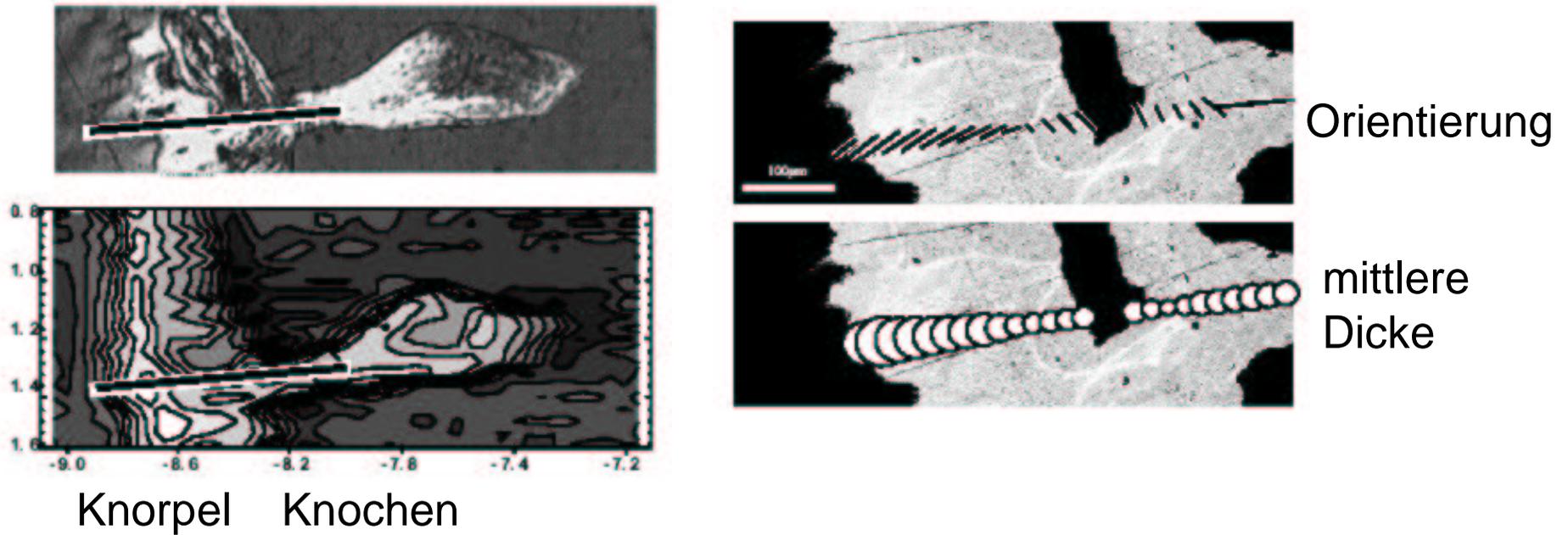


außen: kleinere Kristalle (jüngerer Knochen?)

Größe

Trabeculae

SAXS / WAXS an Knorpel-Knochen-Grenze



Belastung

