

Allgemeine Anatomie II

Knochen, Knorpel, Gelenke

David P. Wolfer

Institut für Bewegungswissenschaften und Sport, D-HEST, ETH Zürich
Anatomisches Institut, Medizinische Fakultät, Universität Zürich

376-0905-00 Funktionelle Anatomie, Di 27.02.2024 16:15

Funktionelle Anatomie

des menschlichen Bewegungsapparates

Vorlesung 376-0905-00
Frühjahrssemester 2024

Hörsaal Y15-G60, Universität Zürich-Irchel, Winterthurerstrasse 190
Zeit Dienstag 16:15-18:00
Dozierende I. Amrein (Am), D.P. Wolfer (Wo)

Datum/Woche	Dozent	Thema
20.02.24	1	Wo Allgemeine Anatomie I
→ 27.02.24	2	Wo Allgemeine Anatomie II
05.03.24	3	Wo Allgemeine Anatomie III
12.03.24	4	Wo Allgemeine Anatomie IV
19.03.24	5	Wo Untere Extremität I
26.03.24	6	Wo Untere Extremität II
02.04.24		keine Vorlesung (Osterferien)
09.04.24	7	Wo Untere Extremität III
16.04.24	8	Wo Untere Extremität IV
23.04.24	9	Wo Rumpf I
30.04.24	10	Wo Rumpf II
07.05.24	11	Am Obere Extremität I
14.05.24	12	Am Obere Extremität II
21.05.24	13	Am Obere Extremität III
28.05.24	14	keine Vorlesung (Reservetermin)

Mikroanatomie des Knochengewebes

- Bestandteile

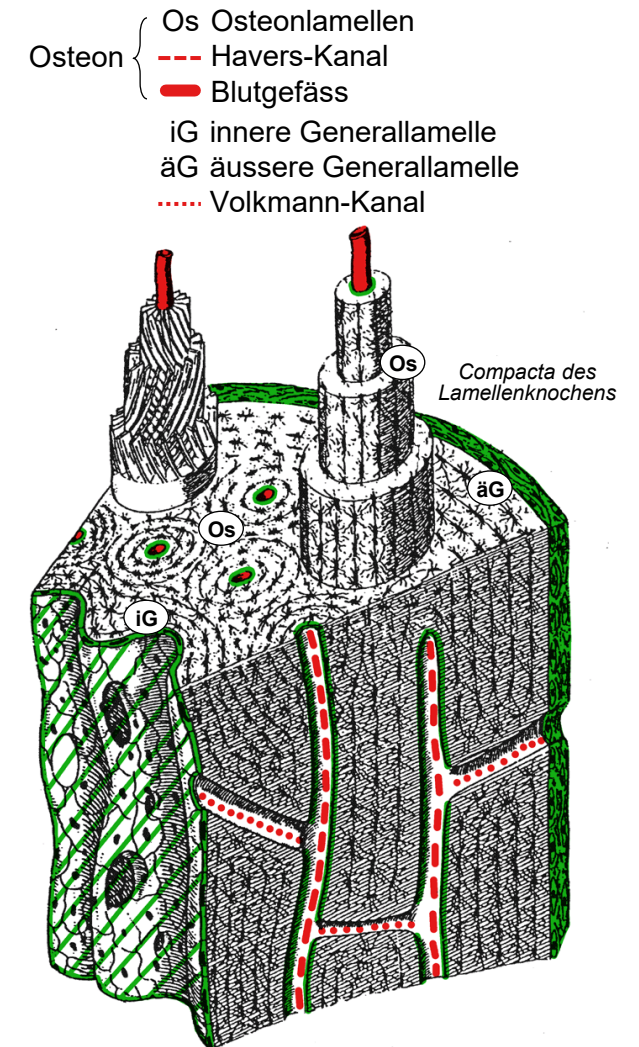
- >99% extrazelluläre Matrix: 10% Wasser, 70% anorganische Matrix (va. Hydroxyapatit), 19% organische Matrix: kollagene Fibrillen (va Typ I), Proteoglykane, Adhäsionsproteine
- längliche hexagonale Hydroxyapatitkristalle ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) parallel zu und in Fibrillen, Fibrillen → Zugfestigkeit, Kristalle → Druckfestigkeit, Verbund → gewisse Biegefestigkeit
- <1% Zellen. Osteozyten eingemauert in Lakunen, Fortsätze in Kanälchen, Gap Junctions → Netzwerk. Übrige Zellen = Minderheit, an Oberfläche bzw im Periost und Endost.

- Geflechtknochen

- Kollagenfibrillen in unregelmässiger Orientierung verflochten, relativ geringerer Mineralgehalt, Osteozyten zufällig verteilt, geringere Festigkeit
- Schnelle Bildung: unreifes Erstprodukt von Osteogenese und Frakturheilung (Kallus), nur Pars petrosa des Os temporale (Felsenbein) bleibt teilweise Geflechtknochen

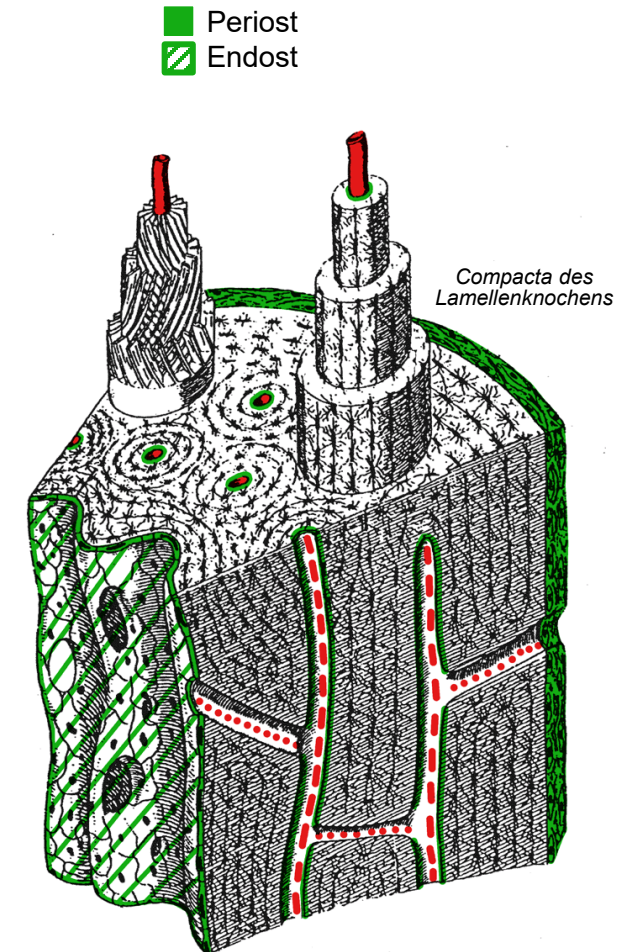
- Lamellenknochen

- Umbau («bone remodeling») Geflechtknochen → Lamellenknochen. Lamellen 3-8µm dick, Osteozyten in Grenzflächen, senden Fortsätze in Lamellen; Kollagenfibrillen parallel, Richtung wechselt von Lamelle zu Lamelle
- Spongiosa: flache Lamellen parallel zu Bälkchen-Oberfläche, keine Kanäle
- Compacta: zylindrische Osteone mit 5-20 Osteonlamellen konzentrisch um Havers-Kanal mit Blutgefässen. Unabhängig von Osteonen oberflächlich Innere und äussere Generallamellen. Volkmann-Kanäle quer zu Lamellen: führen Blutgefässe zu Havers-Kanal



Innere und äussere Oberfläche des Knochengewebes

- Periost = Knochenhaut
 - äussere Knochenoberfläche (äusserste Generallamellen), ausser apophysäre Sehnen/Bandansätze und wo Gelenkknorpel Knochen bedeckt
 - Faserschicht (Stratum fibrosum) aussen: kollagenes Bindegewebe, Blutgefässe, reichlich Nervenfasern (Schmerzempfindlichkeit)
 - osteogenetische Schicht innen (Kambium, Stratum osteogenicum = germinativum): kontinuierliche Zell-Lage aus vorwiegend ruhenden skelettalen Stammzellen, Osteoprogenitorzellen, Osteoblasten, sowie Osteoklasten
- Endost
 - innere Grenzschicht zwischen nicht im Umbau befindlichen Knochengewebe (Spongiosabälkchen, innerste Generallamelle) und Knochenmark, Auskleidung der Havers-Kanäle der Osteone
 - dünne Schicht nicht mineralisierter Kollagenfibrillen
 - Zellschicht mit gleicher Zusammensetzung wie osteogenetische Schicht des Periosts, heissen hier auch Endost-Zellen = «bone lining cells»
- Umbauzonen
 - Kein Endost
 - Endost-Zellen haben sich zu Osteoklasten (Abbauzonen) oder Osteoblasten (Aufbauzonen) differenziert



Knochenumbau

- Zelluläre Grundlage und Steuerung

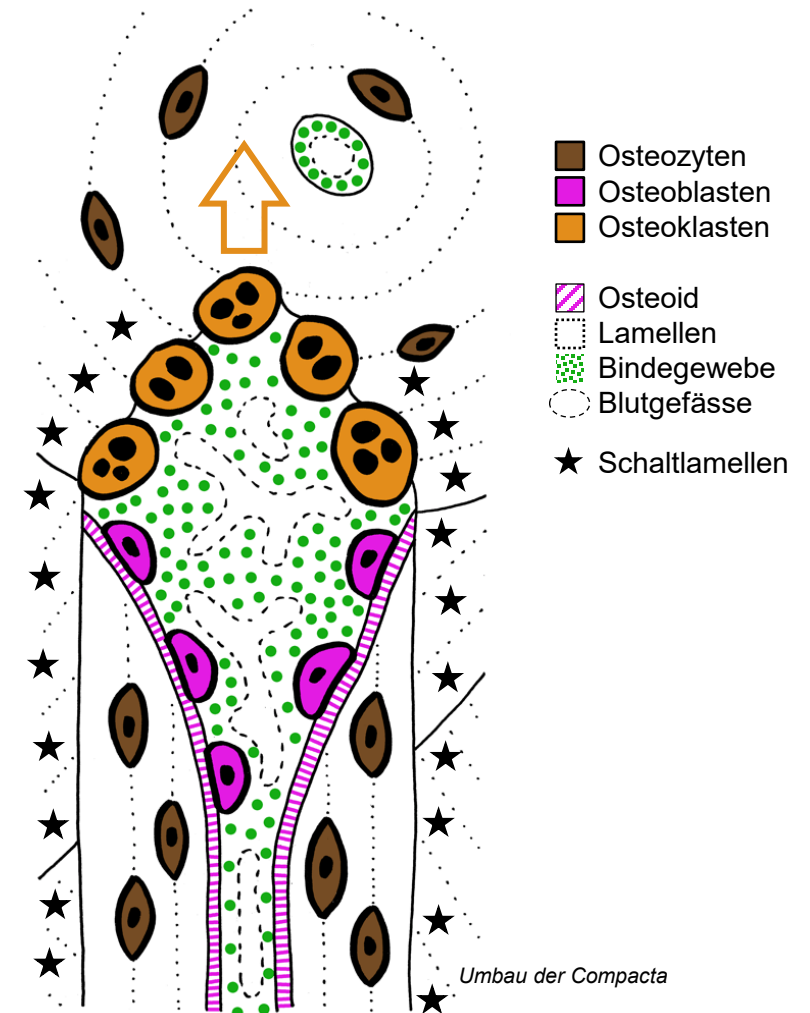
- Matrix-Abbau durch Osteoklasten mittels Na^+H^+ Exchanger NHA2
- Aufbau (Ossifikation): skelettale Stammzellen → Osteoprogenitorzellen → Osteoblasten → Osteozyten, bei Umbau direkt Lamellenknochen gebildet
- Osteozyten haben Mechanosensoren und Hormonrezeptoren, regulieren Knochenmasse: Reduktion via Freisetzung von RANKL und Sclerostin, Erhöhung via Abgabe von Osteoprotegerin
- RANK von Osteoklasten freigesetzt, stimuliert Osteoblasten durch Bindung an deren membranständiges RANKL → Koppelung von Auf- und Abbau

- Ablauf in Spongiosa und Compacta

- Spongiosa: 28% Austausch pro Jahr, Osteoklasten → oberflächliche Lakunen, in die durch Osteoblasten neue Lamellen abgelagert werden
- Compacta: 4% Austausch pro Jahr, Osteoklasten-Trupp → Tunnel und übrig bleibende Schaltlamellen, Osteoblasten füllen Tunnel mit neuem Osteon

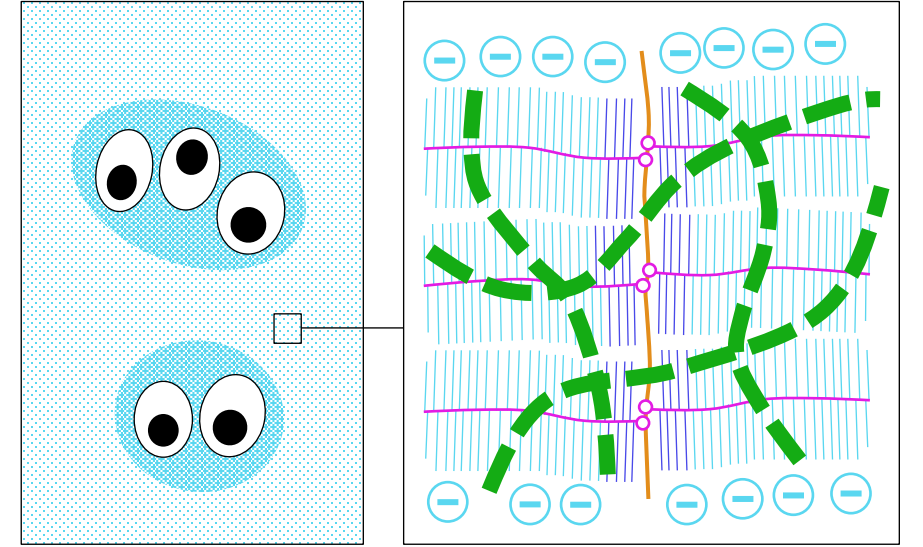
- Funktion und Störungen

- Anpassung von Masse & Struktur an Bedarf, Reparatur von Mikroschäden
- Abbau von Knochen = Kalziumspeicher → Ca^{2+} Mobilisation (Parathormon)
- Basis für Frakturheilung (Callus = Geflechtknochen → Lamellenknochen)
- Osteoporose = ungenügende Masse (Abbau > Aufbau)
- Osteomalazie = ungenügende Mineralisation, zB Vit. D-Mangel (Rachitis)



Knorpelgewebe

- Chondrozyten
 - oval, isoliert ohne lange Fortsätze, unterhalten Matrix
 - während Wachstum teilungsfähig, beim Erwachsenen nicht mehr
- Knorpelmatrix
 - Proteoglykane (PG): va. Aggrecan, bis 4 mm grosse Komplexe durch Bindung von Aggrecan-Monomeren an Hyaluronsäure
 - Kollagenfibrillen (Typ II + wenig IX & XI) bilden in territorialer Matrix (Knorpelhof) dichte Netze, interterritorial weniger dicht, und senkrecht zu freier Oberfläche ausgerichtet
 - Kollagenfibrillen (15-20 nm dick) nicht gebündelt, eng mit PG verbunden: maskiert, im LM ohne polarisiertes Licht unsichtbar
 - Elektrostatische Abstossung der polyanionischen PG, osmotischer Druck durch gefangene Kationen → H₂O-Speicherung (80% Feuchtgewicht), Vorspannung der Fibrillen. H₂O bei Kompression reversibel ausgepresst → Druckelastizität
- Perichondrium = Knorpelhaut
 - Faserschicht: Bindegewebe
 - chondrogenetische Schicht (beim Erwachsenen ruhend!): Stammzellen, Chondroprogenitorzellen, Chondroblasten
 - Gelenknorpel: kein Perichondrium, Kollagenfibrillen bis 100nm dick



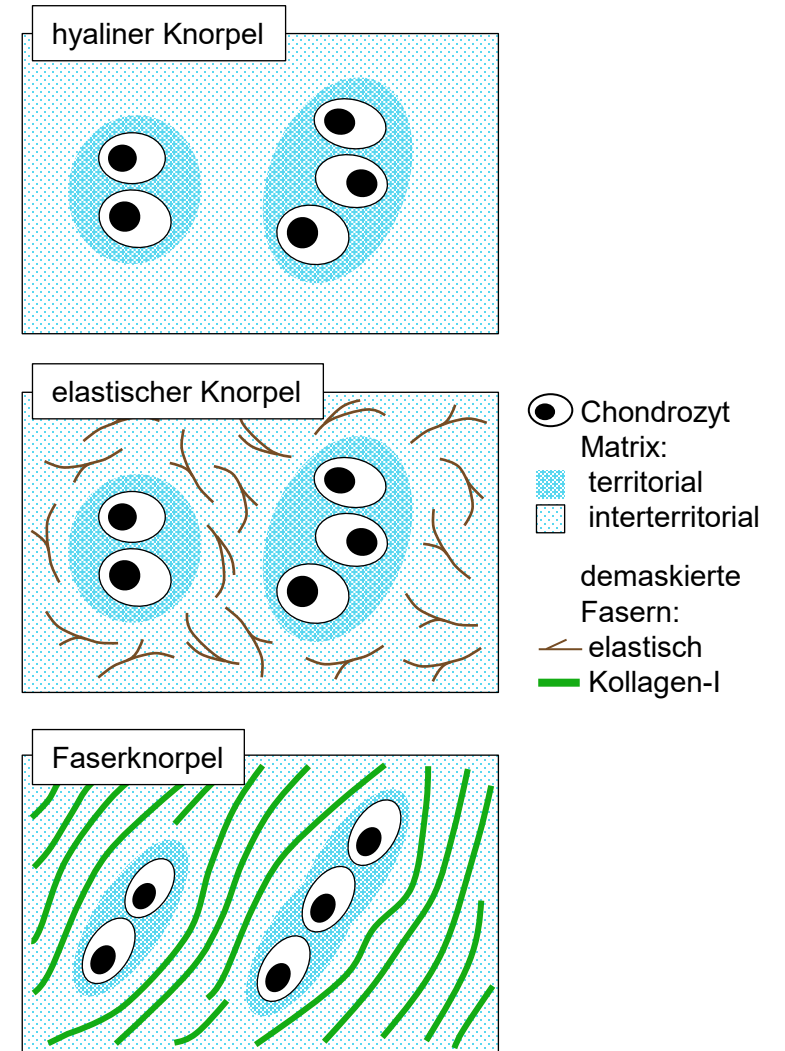
●	Chondrozyt	—	Hyaluronsäure
■	territoriale Matrix	○	Verbindungsprotein
● + ■	Territorium	—	Kernprotein
□	interterritoriale Matrix		Glykosaminoglykane, va:
		—	Chondroitin-Sulfat } Ca. 150
		—	Keratan-Sulfat } Disaccharide
		—	Kollagenfibrille

100x 30x

Aggrecan-Monomer,
bis zu 100 Monomere durch
Hyaluronsäure komplexiert

Knorpeltypen

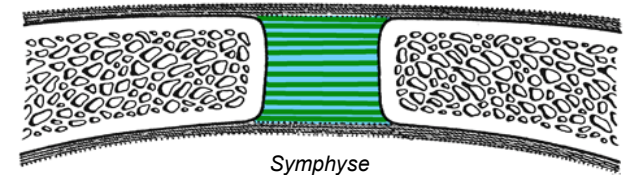
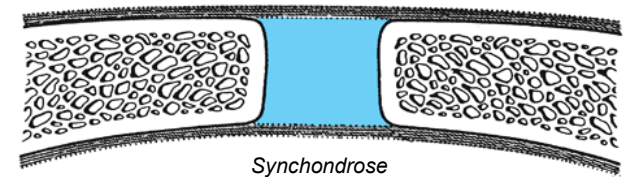
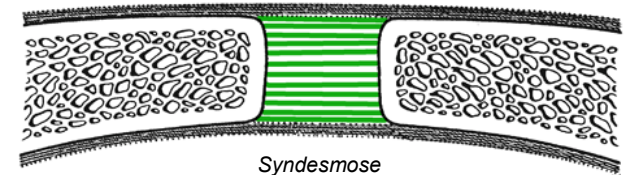
- **Hyaliner Knorpel**
 - chondrale Osteogenese, Gelenknorpel, Rippen, Nase - Kehlkopf - Trachea - grosse & mittlere Bronchien
 - druckelastisch, nicht zugfest, nicht biegeelastisch
- **Elastischer Knorpel**
 - Epiglottis, kleine Bronchien, äusseres Ohr, Ohrtrumpete
 - zusätzlich demaskierte elastische Fasernetze in interterritorialer Matrix
 - zusätzlich Biegeelastizität
- **Faserknorpel**
 - Discus intervertebralis = Zwischenwirbelscheibe, Menisken, Disci articulares = Gelenkscheiben (Sterno-Klavikular-Gelenk, Radio-Karpal-Gelenk, Kiefergelenk), Gelenklippen zur Vergrösserung knöcherner Gelenkpfanne (Hüft- und Schultergelenk)
 - zusätzlich viele dicke demaskierte Kollagenfasern (Typ-I) in interterritorialer Matrix → Chondrozyten in Gänsemarschformation
 - zusätzlich Zugfestigkeit
- **Keine Blutgefässe im Knorpel**
 - Versorgung durch Diffusion über lange Strecken, langsamer Stoffwechsel
 - Ausnahme: Bildung von Blutgefässen in enchondraler Ossifikationszonen



Gelenke

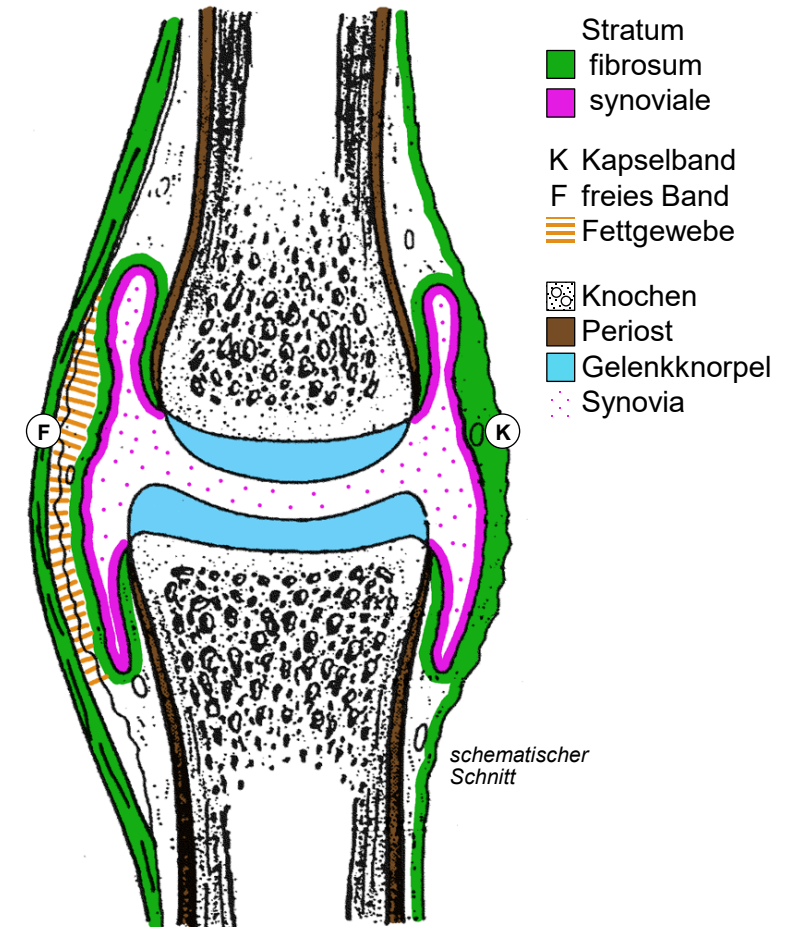
- Diarthrose
 - echtes Gelenk mit: 1. Gelenkhöhle, 2. Gelenksknorpel, 3. Synovialmembran
 - kann an Arthrose (Gelenksknorpel) und Arthritis (Synovialmembran) erkranken
- Synarthrose (Haft)
 - falsches Gelenk mit Gewebebrücke statt Elemente 1-3
 - Articulatio fibrosa = Bandhaft = Syndesmose
 - Gewebebrücke aus straffem Bindegewebe (Zugfestigkeit):
Malleolengabel, Schädelnähte bei Kindern, Zahnwurzel
 - Articulatio cartilaginea = Knorpelhaft
 - Synchondrose → Gewebebrücke aus hyalinem Knorpel (Druckfestigkeit):
Rippenknorpel, Brustbein, Schädelbasis; Symphyse → Gewebebrücke aus Faserknorpel (druck- & zugfest):
Symphysis pubica, Discus intervertebralis
 - Synostose → knöcherner Verbindung ehemals getrennter Knochen:
Schädelnähte des Erwachsenen, Beckenknochen, Kreuzbein
- Pathologie
 - pathologische Gelenke: Hemiarthrose (Halbgelenk) durch sekundäre Spaltbildung in degenerierender Symphyse (zB Halswirbelsäule, Symphysis pubica), Pseudoarthrose nach Fraktur (Dislokation, ungenügende Ruhigstellung)
 - Gelenkversteifung: Ankylose nach destruierender Arthritis, Arthrodesse = therapeutische Gelenkversteifung durch Operation

- straffes kollagenes Bindegewebe
- hyaliner Knorpel
- Faserknorpel



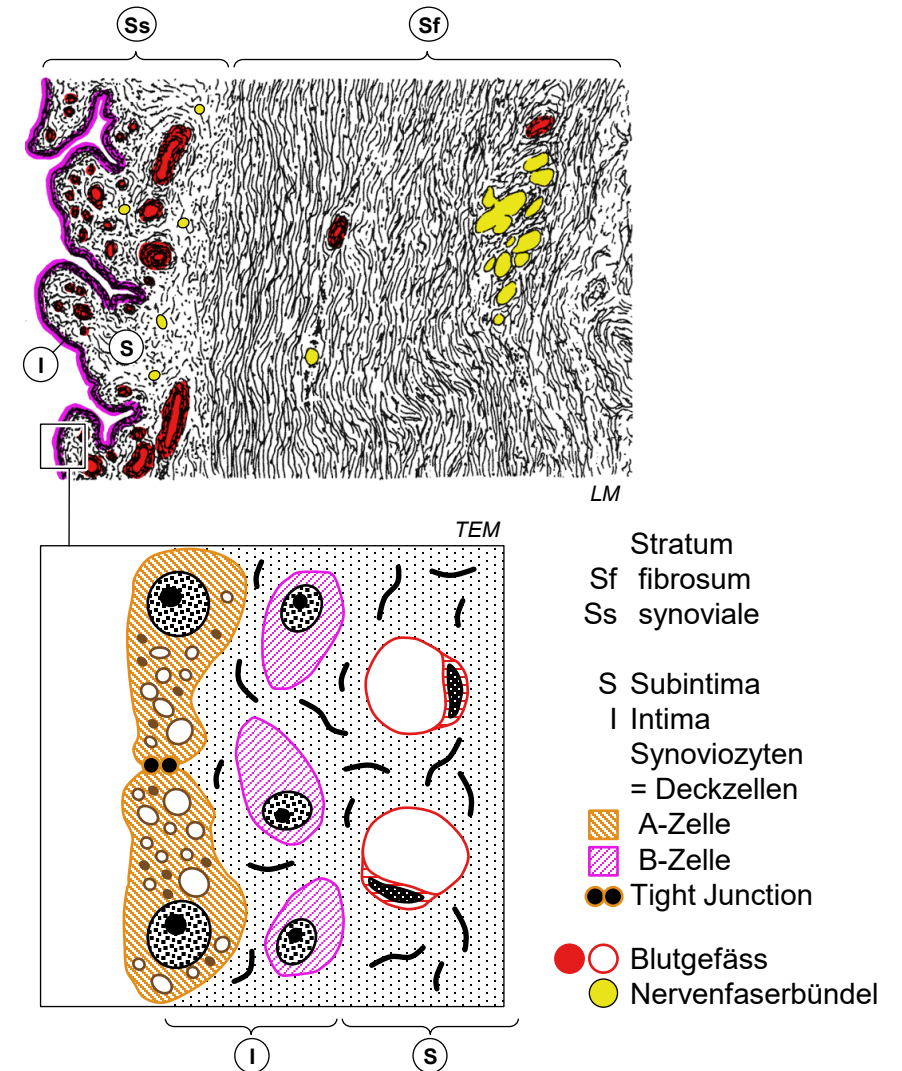
Diarthrosen

- Gelenkkapsel
 - * teilweise auch bei Synarthrosen vorhanden
 - Stratum fibrosum* (bindegewebige Aussenhaut) stabilisiert mechanisch; Stratum synoviale (Synovialmembran, synoviale Innenhaut) begrenzt mit Gelenkknorpel Gelenkhöhle, ernährt Knorpel und reinigt Gelenk
- Gelenksicherung und -führung
 - passiv: knöcherner Führung durch Form der Gelenkskörper, Bandführung (freies Band / Kapselband = Verstärkung des Stratum fibrosum)
 - aktiv: Muskelführung (durch Training kompensatorisch verstärkbar)
 - Amphiarthrose: echtes Gelenk, durch maximale passive Führung (va. durch Bänder) kaum beweglich (Bsp: Iliosakralgelenk, Fusswurzel)
- Pathologie
 - Arthrose: Degeneration des Gelenkknorpels, entzündliche Schübe, sekundär Knochendestruktion, kompensatorisch Bildung von Osteophyten
 - Arthritis: Gelenkentzündung ausgehend von Synovialmembran: rheumatisch (autoimmun), infektiös (eitrig, Borreliose nach Zeckenbiss) → Gelenkserguss, ev. Gelenksdestruktion bis zu Ankylose
 - Luxation = Auskugelung: traumatisch (va. Schulter), spontan bei angeboren oder posttraumatisch schwacher Gelenksicherung
 - Distorsion = Verstauchung, Überdehnung oder Ruptur von Kapsel und Bandapparat, Ruptur der Kapsel → Blutung in Gelenk.



Gelenkkapsel

- **Stratum fibrosum**
 - gefässarmes straffes kollagenes Bindegewebe
- **Stratum synoviale = Synovialmembran**
 - Subintima: gefässreiches feinfibrilläres Bindegewebe, Falten und Zotten → Oberflächenvergrößerung, kann Polster aus Fettgewebe enthalten → Füllmaterial, Formanpassung
 - Intima: 2 Lagen bindegewebiger Deckzellen = Synoviozyten = Synovialzellen, ohne Basallamina in extrazelluläre Matrix eingebettet:
 - ▨ A-Zellen = synoviale residente Makrophagen → Reinigung der Synovia, → Barriere mit Tight Junctions!, Adhärenskontakten, Desmosomen
 - ▨ B-Zellen = synoviale Fibroblasten mit viel rER, bilden Hyaluronsäure
- **Innervation (Stratum fibrosum & synoviale)**
 - Mechanorezeptoren: Dehnung, Vibration
 - Nozizeptoren: hohe Schmerzempfindlichkeit
- **Synovia**
 - = Gelenkschmiere: 1-3 ml, klar, bernsteinfarben, viskös
 - Plasmadialysat + Hyaluronsäure aus B-Zellen
 - Ernährung des Gelenkknorpels und mechanische Funktion: hocheffizientes Schmiermittel, Stossdämpfer



Gelenksknorpel und Hilfseinrichtungen

- Schichtung des Gelenksknorpels

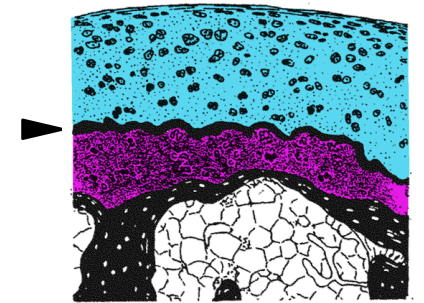
- oberflächliche Hauptschicht: hyaliner Knorpel, nicht mineralisiert und ohne Perichondrium
- basophile Grenzlinie («tidemark»)
- dünne mineralisierte Knorpelschicht: abgestufte Änderung der Materialeigenschaften
- gesamte Dicke 1-4 mm, Patella (Kniescheibe) bis 8 mm
- keine Blutgefäße: Ernährung durch Synovia (Gelenk muss bewegt werden!)

- Mechanik

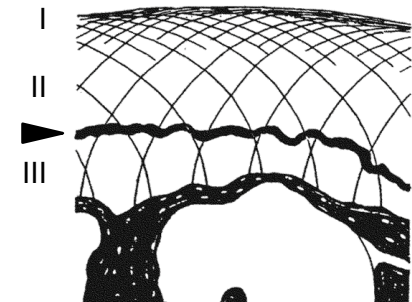
- druckelastisch verformbarer Stossdämpfer, Druckverteilung, extrem glatte Oberfläche
- bogenförmiger Verlauf der bis 50-100 nm dicken (statt 15-20 nm) Fibrillen, tangentielle Fibrillen bevorzugt trajektorieell entlang Zugkraftlinien ausgerichtet → Knorpelspaltlinien
- Verankerung: Knorpel mit Knochen verzahnt, periphere tangentielle Fibrillen strahlen in Synovialmembran ein, radiäre in den Knochen (Kortikalis der Epiphyse)

- Hilfseinrichtungen

- Gelenkklippe (Labrum), Stabilisierung durch Vergrößerung der Pfanne bei Kugelgelenken: Hüftgelenk, Schultergelenk (+25% Pfannenfläche)
- Gelenkscheiben (Disci articulares), Unterteilung der Gelenkhöhle, Ausgleich von Inkongruenzen, grössere Beweglichkeit: Sternoklavikulargelenk, Kiefergelenk, Radiokarpalgelenk, Kniegelenk: Meniskus (unvollständige Scheibe)
- Beide aus Faserknorpel, aussen mit Stratum fibrosum verwachsen, begrenzen innen als Fortsetzung des Gelenkknorpels statt Synovialmembran Gelenkhöhle



- hyaliner Knorpel
- ▶ Grenzlinie
- mineralisierter Knorpel
- Knochen



- I Tangentialzone
- II Übergangszone
- III Radiärzone