

ÜBER DIE ERNÄHRUNG DES GELENKKNORPELS UND  
DIE BILDUNG DER GELENKFLÜSSIGKEIT UNTER  
VERSCHIEDENEN FUNKTIONELLEN VERHÄLTNISSEN<sup>1</sup>

*Eine experimentelle Untersuchung an Kaninchen  
unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Kompressibilität des  
Gelenknorpels bei bzw. ohne Flüssigkeitszufuhr*

VON

BO E. INGELMARK und JOSEF SÄÄF

EINLEITUNG

Der Versuch, die Ernährung des Gelenknorpels und die Bildung der Gelenkflüssigkeit unter verschiedenen funktionellen Verhältnissen aufzuklären, dürfte von grösster Bedeutung sein. Soweit man die Sache gegenwärtig beurteilen kann, sind nämlich Störungen in den Ernährungsverhältnissen des Gelenknorpels für unsere gewöhnlichsten Gelenkkrankheiten bedeutsam. Deshalb muss es besonders wichtig erscheinen, dass diese Verhältnisse so weit wie möglich klargelegt werden.

LITERATURÜBERSICHT

Die Ernährung des Gelenknorpels und die Bildung der Gelenkflüssigkeit sind während der letzten zwei Jahrhunderte Gegenstand einer grossen Zahl von Untersuchungen und Diskussionen gewesen. Manche von den Auffassungen, die dabei geltend gemacht werden, müssen als Vermutungen rubriziert werden, während anderem auf objektiven Untersuchungsergebnissen basiert sind. In der vorliegenden Arbeit wird kein erschöpfender Bericht über die einschlägige Literatur erstattet, sondern es werden lediglich die wichtigsten Anschauungsrichtungen erwähnt.

---

<sup>1</sup> Vortrag bei der Sitzung des nordischen ortopedischen Vereins, Stockholm 27/6-1947.

Hinsichtlich der *Ernährungswege innerhalb des Gelenkknorpels* sind verschiedene Ansichten vorgebracht worden. Während der letzten Hälfte des 19. Jahrhunderts und zu Beginn des 20. wurde geltend gemacht, dass in der Kittsubstanz oder in den Fibrillenbündeln präformierte Kanäle vorlägen (Arnold 1878, Lubosch 1910). Diese Kanäle haben sich später bei kritischer Nachprüfung als histotechnische Artefakte erwiesen. Eine umfassende Zusammenstellung dieser Pseudostrukturen hat Schaffer (1930) geliefert. Bald nachdem die soeben erwähnte Auffassung vorgebracht worden war, erhob sich der Gedanke, dass die Passage der Ernährungsflüssigkeit im Knorpel als eine Diffusion anzusprechen sei. Diese Vorstellung hat später viele Anhänger gefunden (Gerlach 1875, 1876, Ishido 1923, Müller 1929).

Ferner hat man sich vorgestellt, dass die Strömung der Ernährungsflüssigkeit innerhalb des Gelenkknorpels durch intermittente Belastungen des Gelenkes gefördert werde (Bär 1926, Müller 1929).

Die Ansichten betreffs der verschiedenen *Wege der Ernährungszufuhr zum Knorpel* lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

1. Der Knorpel wird von den Gefässen in der darunter gelegenen Markhöhle bzw. dem Knochen sowie von den Gefässen ernährt, die aus dem Gebiet des Kapselansatzes am Knochen in die peripheren Teile des Knorpels einstrahlen.

2. Der Knorpel bezieht seine Nahrung aus der Synovia, die, wie man hierbei annimmt, von der Synovialmembran und deren Gefässen gebildet wird.

3. Der Knorpel wird auf die beiden angeführten Arten ernährt.

Die *erste Anschauung*, dass der Knorpel von den Gefässen der darunter gelegenen Markhöhle bzw. des Knochens sowie von den Gefässen ernährt wird, die von der Kapsel her in die peripheren Knorpelteile eindringen, ist die älteste. Hunter (1742) kam dadurch zu dieser Auffassung, dass er bei Injektionsversuchen ein Gefässnetz, Circulus articuli vasculosus, in der Kapsel nachwies, das sich rund um den Knorpelrand erstreckte. Er meinte auch, wahrnehmen zu können, wie kleinere Zweige von diesem Netzwerk in den Gelenkknorpel eintraten. Spätere Forscher (Toynbee 1841, Wollenberg 1909) haben eine ähnliche Ansicht geltend gemacht, aber besonders unterstrichen, dass der Knorpel von den Gefässen in der darunter gelegenen Markhöhle bzw. dem Knochen ernährt werde.

Die *zweite Anschauung*, dass der Gelenkknorpel seine Nahrung von der Synovia erhält, die, wie man hierbei annimmt, von der Synovialmembran und deren Gefässen gebildet wird, gründet sich auf unterschiedliche experimentelle Untersuchungen. In diesem Zusammenhang hat das Studium freier Knorpel- und Knochenkörper in den Gelenken eine grosse Rolle gespielt. Dabei hat sich gezeigt, dass solche Knorpelstücke weiterleben und sogar Zeichen einer Proliferation aufweisen können, wogegen

Knochenfragmente nekrotisch werden. Dies Verhalten soll dafür sprechen, dass die Synovia den Gelenkknorpel ernähren kann (*Schmieden* 1900, *Bier* 1919, *Strangeways* 1920). Wird die Beobachtungszeit genügend verlängert, so scheinen die freien Knorpelkörper jedoch nicht im Gelenk weiterleben zu können. Hierfür sprechen die experimentellen Untersuchungen *Hildebrands* (1896). Er brachte nämlich bei Ziegen freie Gelenkkörper dadurch zustande, dass er den Gelenkknorpel schädigte. Nach einer Beobachtungsdauer von 2,5 bis zu 8 Monaten konnte er keine freien Körper in den Gelenken nachweisen. Dagegen fand er vier derartige Gelenkkörper, die an der Gelenkkapsel festgewachsen waren. Hieraus zog er den Schluss, dass die betreffenden freien Körper nicht auf die Dauer bestehen können, wenn sie nicht an der Kapsel festwachsen und von dieser Gefässe erhalten.

Einen weiteren Beweis für die nutritive Bedeutung der Synovia meinte *Nussbaum* (1923) zu finden, wenn er beim Hunde die Gefässe vom Femurkopf abschnitt. Hierbei wurde die Spongiosa des Gelenkkopfes nekrotisch, während der Gelenkknorpel anscheinend ungeschädigt blieb.

Die dritte Anschauung, die besagt, dass der Knorpel sowohl von benachbarten und darunter gelegenen Gefässen als auch von der Synovia ernährt wird, wurde schon von *Leidy* (1849) zum Ausdruck gebracht. Diese Ansicht haben ich später von mehreren Forschern zu eigen gemacht (*Fisher* 1922, *Ishido* 1923, *Ito* 1924, *Axhausen* 1924).

Hinsichtlich der Bildung der Gelenkflüssigkeit verweisen wir auf die verdienstvolle Zusammenstellung von *Bauer, Ropes* und *Waine* (1940). Wir führen hier in Kürze die verschiedenen Theorien über die Synovialbildung an, die in jener Arbeit erwähnt werden:

1. Die Synovia ist ein Produkt von Drüsenzellen in der Synovialmembran.
2. Die Synovia ist aus Auflösungsprodukten der Synovialmembran und einem Transsudat von Kapillaren und Lymphgefässen zusammengesetzt.
3. Die Synovia ist ein Abnutzungsprodukt des Gelenkknorpels.
4. Die Synovia besteht aus Produkten von Zellen der Synovialmembran und einem Transsudat von Kapillaren und Lymphgefässen.
5. Fasst man die Gelenkhöhle als einen vergrösserten Gewebespalt auf, so kann die Synovia als »the liquid matrix of the connective tissues«, das die Gelenkhöhle umgibt, betrachtet werden.
6. Die Synovia ist ein Dialysat der Blutkapillaren.

Die letztgenannte Theorie sollte nach *Bauer, Ropes* und *Waine* (1940) die z. Z. verbreitetste sein.

## UNTERSUCHUNGSAUFGABEN

Die hier publizierte Untersuchung ist nur als das erste Glied einer grösseren Forschungsaufgabe aufzufassen.

Die Fragen, die bei dieser Gelegenheit behandelt werden sollen, sind folgende:

1. Wird der Gelenkknorpel vorwiegend von der darunter liegenden Markhöhle bzw. vom Knochen oder von der Gelenkflüssigkeit ernährt?
2. Welche Veränderungen erleidet die Knorpelernährung im Zusammenhang mit einer Vermehrung der funktionellen Beanspruchung des Gelenkes?
3. Wird die Synovia teilweise dadurch gebildet, dass von der Oberfläche des Gelenkknorpels Flüssigkeit in die Gelenkhöhle dringt?
4. Übt die Funktion des Gelenkes einen Einfluss auf die Synoviabildung aus?

## UNTERSUCHUNGSMATERIAL

Das Untersuchungsmaterial besteht aus Schultergelenken von 40 ca. 9 Monate alten Kaninchen. Es wurden beide Schultergelenke von jedem Kaninchen ausgenutzt. Die Gelenke wurden, je nach der Behandlung, der sie ausgesetzt waren, in 4 Hauptgruppen eingeteilt. Hierbei wurde gewöhnlich so verfahren, dass jedes Tier Material für zwei dieser Gruppen liefern musste. Dies geschah deshalb, damit die Differenzen, die zwischen den 4 Materialgruppen bestehen, so wenig wie möglich durch individuelle Unterschiede zwischen den Tieren beeinflusst wurden. Ferner wurde darauf geachtet, dass jede Gruppe ungefähr gleich viele Gelenke der rechten und der linken Seite enthielt, um einer Verschiebung der Ergebnisse durch eventuelle Asymmetrien womöglich vorzubeugen. Eine geringere Anzahl Gelenke haben als Kontrollgelenke für verschiedene technische Einzelheiten der Methode gedient.

Eine Ausnahme hiervon bildeten die Gelenke, welche zu Gruppe IV gehörten. Diese stammten nämlich von Tieren, die kein Material an andere Materialgruppen geliefert hatten. Der

Grund für dies Verfahren war der, dass sich die Versuchsanordnung für Gruppe IV mit keiner der anderen Gruppen kombinieren liess. Im übrigen nahm dieser Teil des Materials keine Sonderstellung ein.

*Die 4 Hauptgruppen der Schultergelenke von Kaninchen sind folgende:*

*Gruppe I.* Diese Gruppe enthält 16 Schultergelenke, die dem frisch getöteten Tier entnommen waren. Der craniale Teil des Tierkörpers war unter Narkose unmittelbar vor der Tötung mit physiologischer Kochsalzlösung und danach mit Dextran oder mit einer Aufschwemmung von Reisstärke in Dextran durchgespült worden.

*Gruppe II.* Die Gruppe besteht aus 16 Schultergelenken, die in gleicher Weise wie die Gelenke in Gruppe I behandelt wurden, jedoch mit dem Unterschied, dass ihnen die erwähnte Stärkelösung nach dem Herauspräparieren im Verlauf einer Stunde unter physiologischem Druck in die Markhöhle der Scapula und des Humerus eingespritzt wurde.

*Gruppe III.* Die Gruppe umfasst 16 Schultergelenke, welche die gleiche Behandlung wie die Gelenke in Gruppe II erfahren haben. Während der Einspritzung der Flüssigkeit in die Markhöhlen der Knochen sind die Gelenkflächen nach einem speziellen Schema (s. unten) periodisch aneinandergedrückt worden.

*Gruppe IV.* Die Gruppe besteht aus 12 Schultergelenken, die in gleicher Weise wie Gruppe III behandelt wurden. Die in die Markhöhlen injizierte Flüssigkeit hat aber in Gruppe IV bloss aus Dextran bestanden. Vor Beginn des Versuches wurden 0.25 ccm einer Aufschwemmung von Reisstärke via Gelenkkapsel in die Gelenkhöhle injiziert.

In diese Untersuchung gehen also als das eigentliche Untersuchungsmaterial 60 Schultergelenke von Kaninchen ein.

## UNTERSUCHUNGSMETHODE

### 1. *Injektionsflüssigkeit.*

Von der Injektionsflüssigkeit must zunächst verlangt werden, dass ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften nicht so stark von denen des Serums abweichen, dass unnormale Flüssigkeitsströmungen in dem

Gelenknorpel entstehen. Ausserdem muss die Flüssigkeit kleine, möglichst gleichgrosse, platte Körner enthalten, deren kleinste Diagonale den Durchmesser der roten Blutkörperchen unterschreiten soll. Diese Körnchen dürften die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Aufschwemmung nicht nennenswert verändern. Ausserdem müssen sie entweder selbst sehr farbenstark sein oder sich stark mit einer innerhalb der Histotechnik anwendbaren Farbe färben. Erst hierdurch können nämlich die Körnchen leicht in den histologischen Schnitten wiederge-

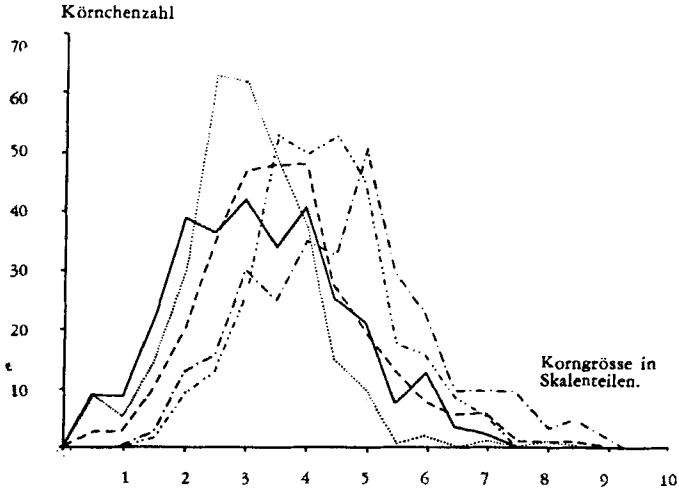


Abb. 1.

Frequenzkurven über die Grösse der Stärkekörnchen in den verschiedenen Etappen der Herstellung der Stärkeaufschwemmung.

- · — · — · — = Vor dem Mahlen in der Kolloidmühle.
- — — — — = Vor der Ultraschallwellenbehandlung.
- · · · · = Vor dem Filtrieren.
- - - - - = Vor der Injektion.
- · - · - · - = Nach dem Eindecken in Glycerin-Gelatine.

funden und dort mit Sicherheit von den eigenen Gewebebestandteilen des Knorpels unterschieden werden.

Die Flüssigkeit, die hier zur Anwendung gekommen ist, besteht aus einer Aufschwemmung von Reisstärke in Dextran. Das Dextran erfüllt in jeder Hinsicht die Anforderungen, die an eine Aufschwemmungsflüssigkeit gestellt werden können. Seine Herstellung, Bau und Eigenschaften sind von A. Grönvall und B. Ingelman (1944, 1945) eingehend beschrieben worden. An dieser Stelle soll deshalb nicht näher über die Eigenschaften

TABELLE 1

Mittlere Grösse der Stärkekörnchen und prozentuale Anzahl »kleine« und »grosse« Körnchen in den verschiedenen Etappen der Herstellung der Stärkeaufschwemmung.

	Mittlere Grösse des kleinsten Körnchenquer- schnitts in $\mu$ $M \pm \varepsilon (M)$	Prozentuale Anzahl Körnchen mit dem kleinsten Querschnitt	
		$\leq 1,5^1$	$> 5,5^1$
Vor dem Mahlen in der Kolloidmühle .....	$6,08 \pm 0,08$	$0,7 \pm 0,5$	$16,3 \pm 2,1$
Vor der Ultraschallwel- lenbehandlung .....	$5,29 \pm 0,11$	$5,3 \pm 1,3$	$12,0 \pm 1,9$
Vor dem Filtrieren .....	$4,78 \pm 0,11$	$13,0 \pm 1,9$	$9,3 \pm 1,7$
Vor der Injektion .....	$4,50 \pm 0,08$	$9,7 \pm 1,7$	$1,7 \pm 0,8$
Nach dem Eindecken in Glycerin-Gelatine .....	$6,59 \pm 0,12$	$1,0 \pm 0,6$	$21,3 \pm 2,4$

des Dextrans berichtet, sondern auf die erwähnte Arbeit<sup>2</sup> verwiesen werden.

Pulverisierte Reisstärke wird in reichlicher Menge zunächst in Dextran aufgeschwemmt. Die so erhaltene Flüssigkeit ist nicht stabil und enthält zahlreiche Stärkekörnchen von wechselnder Grösse. Zwecks genauere Registrierung dieser Verhältnisse wurden 300 Körnchen untersucht. Diese wurden zufällig ausgewählt und erwiesen sich als dünne Plättchen von unregelmässig vier-, fünf- und sechseckiger Form. Der kleinste Plattenquerschnitt wurde mit dem Okularmikrometer gemessen. Die so erhaltenen Ergebnisse sind in Abb. 1 und Tab. 1 zusammengestellt.

Es wäre natürlich wünschenswert, alle gröberen Stärkekörnchen abfiltrieren zu können. Wir haben dies Problem mit Hilfe vieler verschiedener Filter und unterschiedlicher Verfahren zu lösen versucht. Alle unsere Bestrebungen sind aber total misslungen, weil sämtliche Filter fast unmittelbar verschlammten und danach lediglich das Dextran durchlassen. Nicht einmal den kleinsten Stärkekörnchen gelingt die Passage.

Um die Zahl der »kleinen« Körnchen in der Stärkeaufschwemmung womöglich zu vermehren, wurde diese dreimal durch eine dem Physika-

<sup>1</sup> Diese Werte sind in Skalenteilen des Okularmikrometers angegeben, wobei ein Skalenteil =  $1,35 \mu$  beträgt.

<sup>2</sup> Dextran für die vorliegende Untersuchung ist uns von Herrn Laborator A. Grönvall freundlicherweise gratis zur Verfügung gestellt worden. Wir möchten ihm hierfür unsern herzlichen Dank aussprechen.

lisch-Chemischen Institut in Uppsala gehörige Kolloidmühle gedreht. Die hierbei erhaltene Aufschwemmung wurde in gleicher Weise untersucht, wie es oben für die unbehandelte Aufschwemmung beschrieben ist. Die mittlere Korngrösse ist bei diesem Verfahren derart gesunken, dass zwischen den beiden Proben ein statistisch sicherer Unterschied besteht (Abb. 1 und Tab. 1). Ferner hat die Zahl der »kleinen« Körner (hierunter werden solche Körner verstanden, deren kleinster Querschnitt  $< 1.5$  Skalenteile des Okularmikrometers betrug) zugenommen und die Zahl der »grossen« Körner mit einem kleinsten Querschnitt von  $\geq 5.5$  Skalenteilen abgenommen.

Um die Grösse der Stärkekörnchen, wenn möglich, noch weiter herabzubringen und eine Konglomeratbildung zu verhindern, wurde die Aufschwemmung nach dem Mahlen 15 Min. lang in einem dem Physikalisch-Chemischen Institut in Uppsala gehörigen Ultraschallwellenaggregat geschüttelt. Diese von Philips hergestellte Anlage liefert eine Frequenz von ca 20 kHz und ungefähr 75 Watt. Durch die Behandlung mit Ultraschallwellen verschwindet, praktisch betrachtet, die Konglomeratbildung der Stärkekörnchen. Ferner nimmt die prozentuale Anzahl der »kleinen« Körner zu. Der Prozentgehalt an »grossen« Stärkekörnchen ist in dieser Flüssigkeit geringer als in der ursprünglichen Aufschwemmung. Der Unterschied ist statistisch sichergestellt. Die mittlere Korngrösse sinkt infolge der Ultraschallwellenbehandlung ebenfalls.

Man kann sich vorstellen, dass diese Resultate entweder dadurch erreicht wurden, dass grosse Körnchen in kleinere zerschlagen oder dass Konglomerate in isolierte Körnchen aufgeteilt wurden.

In dem Bestreben, die zurückbleibenden gröberen Stärkekörnchen sowie evtl. vorhandene Konglomerate von Stärkekörnchen zu entfernen, ist die Aufschwemmung nach der Ultraschallwellenbehandlung einmal durch einfaches, grobes Filtrierpapier filtriert worden. Hierbei erhält man eine weissgelbe, ziemlich stark opaleszierende Flüssigkeit. Diese ist insofern stabil bei der Aufbewahrung, als sie keine nennenswerte Sedimentierungsneigung aufweist. Aus Tab. 1 und Abb. 1 geht hervor, dass das Filtrieren eine statistisch sichergestellte Verminderung in der prozentualen Anzahl der »grossen« Körner bewirkt. Nach der beschriebenen Behandlung enthält die Aufschwemmung ca. 1.000 Körnchen pro mm.

Diese schliesslich erhaltene Aufschwemmung ist es, die als Injektionsflüssigkeit für das Gefässsystem der Tiere und die Markhöhle der Scapula und des Humerus zur Anwendung kam.

Ein Beweis dafür, dass die gebrauchte Stärkeaufschwemmung nicht sonderlich giftig für Kaninchen ist, wurde dadurch erbracht, dass wir dieselbe einem Kontrolltier intravenös injizierten. Dies Tier wies nach der Injektion keinerlei Krankheitszeichen auf und war völlig gesund, als es nach 8 Wochen getötet wurde.

## 2. Operationstechnik.

Chloräthyl-Äther-Narkose. Danach ein grosser Schnitt in der Mittellinie. Injektion von 1 mg Histamin »Roche« in die V. cava caud. Nach Verlauf von ca. 2 Min. wird der Thorax durch Abschneiden der Rippen II—VII ca. 3 cm zu beiden Seiten der Mittellinie rasch eröffnet. Unmittelbar cranial vom Diaphragma wird eine Ligatur um die Aorta gelegt. In die Aortenwand wird ein kleines Loch geschnitten und in dies eine Silberkanüle eingeführt. Die Kanüle wird mittels einer um das Gefäss gelegten Ligatur fixiert. Die Kanüle steht mit einem Niveaugefäss in Verbindung, das physiologische Kochsalzlösung von 38° C unter gleichem Druck wie der systolische Blutdruck des Kaninchens enthält.

Unmittelbar nachdem die Kanüle in der Aorta fixiert ist, wird ein grosses Loch in die rechte Herzkammer geschnitten. Auf diese Weise verblutet das Kaninchen, während gleichzeitig die Gefässe des Kopfes, Halses, der oberen Extremitäten und des cranialen Teils der Rumpfwand von physiologischer Kochsalzlösung durchspült werden.

Darauf werden alle wichtigeren Gefässverbindungen zwischen Kopf und Rumpf mit Hilfe von Péans abgesperrt.

Wenn die Flüssigkeit, die aus dem Loch in der rechten Kammerwand herausfließt, praktisch betrachtet, farblos geworden ist, wird die Kochsalzzufuhr abgebrochen. Statt dessen werden unter ungefähr gleichem Druck 30 ccm der oben beschriebenen Aufschwemmung von 38° C injiziert.

## 3. Seziertechnik.

Nach dem Injizieren der Stärkeaufschwemmung werden die Scapula und der Arm vom Thorax losgelöst. Das Schultergelenk wird herauspräpariert, wobei grosse Vorsicht beobachtet werden muss, um eine Läsion der Gelenkkapsel zu vermeiden. Da, wo die Muskeln nicht mit Leichtigkeit von der Kapsel abgetrennt werden können, z. B. da, wo der M. subscapularis der Kapsel anliegt, wurde eine dünne Schicht Muskulatur zurückgelassen. Zwischen diesem Muskel und der Kapsel findet man beinahe konstant einen Schleimbeutel, der mit der Gelenkhöhle kommuniziert. In der Nähe der Vagina synovialis intertubercularis kommt man beim Präparieren leicht in die Lage, die Gelenkhöhle zu eröffnen. Um dies zu vermeiden, hat man eine Partie der Bicepssehne geschont, die dann durch Anlegen einer Stahldrahtschlinge rund um den Humerushals fixiert wird. Das fertige Präparat besteht also aus Scapula und Humerus, die zu passender Länge abgesägt werden, sowie dem dazwischenliegenden Gelenk mit der intakten Gelenkkapsel. Die beiden Knochenenden werden alsdann in Woodmetall eingegossen. Vor der Beschreibung der Eingiesungstechnik soll über die Injektionsapparatur berichtet werden.

#### 4. Injektionsapparatur.

Die oben beschriebene Stärkeaufschwemmung wird im Laufe des Versuches mittels einer Injektionsapparatur in die Markhöhlen der beiden Knochenenden eingeleitet. Die Flüssigkeit wird in einer Druckflasche von der Konstruktion Pyrex-Fenval (1 in Abb. 3) aufbewahrt. Die Druckflasche wird mit dem Hals nach unten in ein Stativ gestellt. Durch einen Gummistopfen im Hals der Flasche führen Glasrohre, von denen das eine mit einem Quecksilbermanometer in Verbindung steht. Durch das andere Rohr wird die Flüssigkeit aus der Druckflasche mit Hilfe von

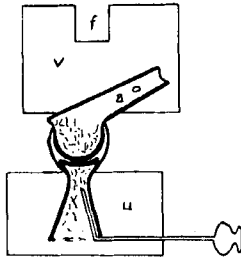


Abb. 2.

Schematische Abbildung eines Schnittes durch die Woodmetallklötze mit den eingegossenen Knochenenden und der zur Scapula führenden Kanüle. Bezeichnungen siehe Text.

Kanülen nach den Markhöhlen der Scapula und des Humerus geleitet. Die beiden Kanülen haben einen inneren Durchmesser von 0,8 mm und sind relativ quergeschliffen. Nach dem Oberarmknochen führt eine gerade Kanüle. Diese ist in einen Bohrkanal a (in Abb. 2) eingesteckt, der senkrecht zur Längsrichtung des Schaftes in ca. 1 cm Abstand vom Caput humeri verläuft. Der Durchmesser des Kanals und der äussere Durchmesser der Kanüle sind gleich gross. Das abgesägte Humerusende wird mit Lack verschlossen. Ebenso wird die Eintrittsstelle der Kanüle in den Humerus mit Lack abgedichtet. Die Kanüle, die in die Scapula eingeführt wird, ist winklig gebogen. Wenn man die Scapula zu passender Länge, ca. 2 cm, absägt, wird die Markhöhle eröffnet, die am Scapularand (Margo axillaris), wie die Abbildung zeigt, genügend weit ist, um die Kanüle aufzunehmen. Die Kanüle reicht bis an das Collum scapulae, wo die Markhöhle geräumiger ist.

Während des Versuches wird der Druck in der Druckflasche zwischen 110 und 120 mm Hg gehalten. Beim Durchlaufen der Gummischläuche und Kanülen sinkt der Druck bis auf ca 35 mm Hg.

5. *Eingiessungsverfahren.*

Für die Durchführung des Versuches ist es notwendig, die beiden Knochen im Verhältnis zueinander in natürlicher Stellung zu fixieren. Deshalb werden die Knochen in Woodmetall eingegossen. Das Giessen erfolgt in kleinen Blechrahmen (u und v in Abb. 2 und 3). Der Blechrahmen, welcher die Scapula umfasst, wird auf einen plangeschliffenen

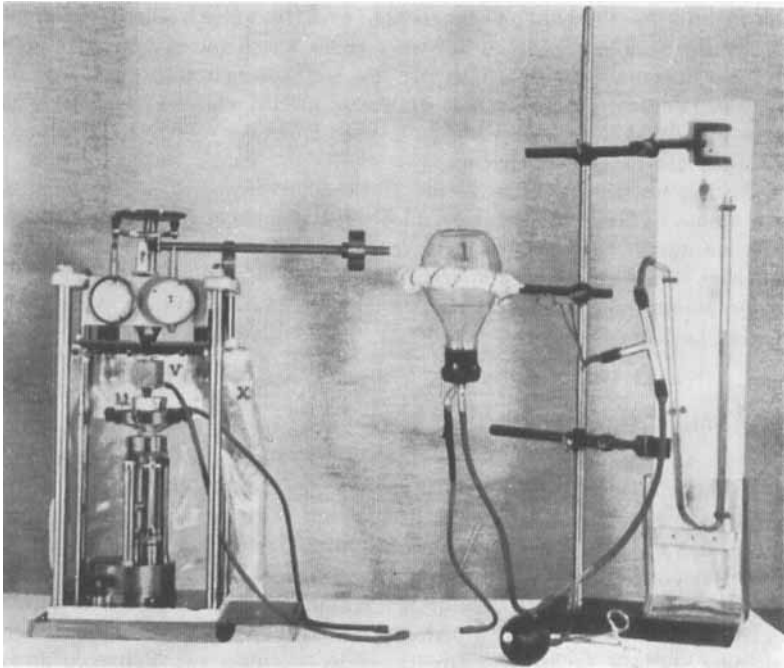


Abb. 3.

Kompressibilitätsmesser und Injektionsapparatur.  
Bezeichnungen siehe Text.

Messingzylinder gestellt, der sich in einem Glasgefäß mit kaltem Wasser befindet, das anfänglich bis an den oberen Rand des Zylinders reicht. Das Eingiessen geht in zwei Etappen vor sich. Zuerst wird eine Bodenplatte gegossen, wobei das Metall ein Stück über den horizontalen Kanülenschenkel hinausragen muss. Der Wasserstand in dem Glasgefäß wird unmittelbar auf das gleiche Niveau wie das des Metalls gehoben. Bei der Fortsetzung des Giessens muss das Metall bis an den oberen Rand des Blechrahmens reichen, und das Kühlwasser wird anschliessend wieder auf

die gleiche Höhe eingestellt. Bei diesem Verfahren erstarrt das Metall schnell, und man vermeidet eine Schädigung des Knorpels durch hohe Temperatur.

Beim Eingiessen des Humerus wird der Blechrahmen auf eine Messingplatte gestellt, auf deren oberer Fläche sich ein 8 mm hoher zylindrischer Block von 11 mm Durchmesser befindet. Die Lage wird so abgepasst, dass der Block gerade unter das Gelenk zu liegen kommt. Die Bodenplatte wird also mit einer Vertiefung ( f in Abb. 2) versehen, in welche dann die Pelotte des Elastometers eingepasst wird (s. unten). Die Eingiessung des Humerus geht prinzipiell auf die gleiche Weise vor sich, wie sie oben für die Scapula beschrieben wurde. Es soll jedoch darauf aufmerksam gemacht werden, dass man dem Humerus hierbei eine solche Lage gibt, dass der Winkel zwischen Scapula und Humerus der Normalstellung während des Lebens entspricht.

Zu Beginn der Injektion in die Markhöhle kann man oft beobachten, wie kleine Gefässe auf der Oberfläche der Gelenkkapsel gefüllt werden. Hieraus dürfte hervorgehen, dass Verbindungen zwischen der Markhöhle und den Kapselgefässen existieren. Wenn diese Kapselgefässe beim Herauspräparieren in allzu grosser Ausdehnung lädiert werden, kann eine lästige Leckage entstehen.

## 6. Kompressionsapparatur.

Die Apparatur, die für die Registrierung der Kompressionen der Gelenkknorpel sowie für die Bestimmung der Veränderungen der Knorpeldicke angewandt wurde, ist in Abb. 3 und 4 wiedergegeben. Die Apparatur, die im vorliegenden »Kompressibilitätsmesser« genannt wird, ist von dem einen von uns (*Ingelmark*) konstruiert und in der feinmechanischen Werkstatt der Orthopädischen Klinik des Karolinschen Institutes in Stockholm hergestellt worden. Sie ist früher u. a. für eine Untersuchung über die Belastungsverhältnisse in Gelenken von Menschen angewandt worden, hat sich aber auch für die vorliegende Untersuchung als geeignet erwiesen.

Der Kompressibilitätsmesser besteht aus einer grösseren Metallscheibe (a), die auf einer Holzplatte (b) befestigt ist. Auf der Metallscheibe ist ein aus vier Stützpfellern (c) und einer oberen H-förmigen Stützplatte (d) bestehendes Stativ festgeschraubt. Durch einen zylindrischen Kanal in dieser Platte läuft ein in den Kanal genau eingepasster Kolben (e), der also leicht in vertikaler Richtung verschoben werden kann. Auf dem oberen Ende des Kolbens sitzt eine Gewichtschale (f). Am unteren Kolbenende ist eine zylindrische Pelotte (g) festgeschraubt.

Auf der oberen ebenen Fläche der Pelotte (g) ist eine kreisrunde, reichlich perforierte Messingscheibe angebracht. Die Scheibe kann auf der oberen Pelottenfläche um eine vertikale Achse rotieren.

Der Kolben (e), die Gewichtschale (f), die Pelotte (g), die Messing-  
scheibe und die daran fixierten Gegenstände werden mittels eines auf  
dem Wagebalken (h) verschiebbaren Gewichtes (i) im Gleichgewicht  
gehalten.

Die Verschiebungen des Kolbens (e) nach oben und unten können auf  
den beiden Messuhren (j und k) abgelesen werden, auf welche zwei mit

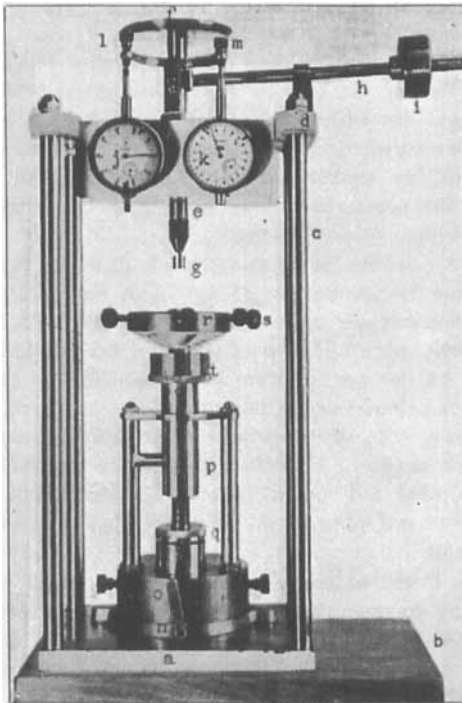


Abb. 4.

*Der angewandte Kompressibilitätsmesser  
ohne eingesetztes Präparat und Erwärmungsanordnung.  
Bezeichnungen siehe Text.*

Stellschrauben versehene Arme (l und m) einwirken, die von dem Kolben (e) ausgehen. Eine ganze Umdrehung des Zeigers auf der Messuhr (j) bedeutet eine Verschiebung des Kolbens (e) um 1 mm. Eine entsprechende Zeigerdrehung auf der Uhr (k) markiert eine Verschiebung von 0,2 mm. Die Zifferblätter sind in 100 bzw. 200 Teile eingeteilt, so dass die Messgenauigkeit mindestens  $5 \mu$  beträgt.

Auf der Metallscheibe (a) ruhen zwei zirkuläre Metallplatten (n und

o). Auf der oberen Platte (o) ist ein Metallstativ (p) befestigt. Dies Stativ ist exzentrisch angebracht und kann nur in einer Ebene parallel mit der oberen Fläche der Scheibe (a) verschoben werden. Dies geht so vor sich, dass die untere Platte (n) um einen exzentrisch stehenden Zapfen im Verhältnis zur Metallscheibe (a) gedreht werden kann. Die Platten (n) und (o) lassen sich in gleicher Weise im Verhältnis zueinander um einen im Zentrum der Kreise stehenden vertikalen Zapfen drehen.

Auf diese Art kann das Stativ (p) in eine gewünschte Lage gebracht und dort fixiert werden.

Den oberen Teil des Stativs kann man durch eine Schraubenanordnung (q) heben und senken. Er besteht aus einem plangeschliffenen Objektisch (r), auf dem das Objekt mit Hilfe von 6 Schrauben (s) befestigt werden kann. Der Objektisch (r) kann rotiert werden, ohne dass man ihn zu heben und zu senken braucht. Ausserdem lässt er sich durch Drehen um eine zur Vertikalen schräg gestellte Achse längs der Ebene (t) in einen gewünschten Winkel stellen.

Diese ganze Apparatur ist so konstruiert, dass die Nachgiebigkeit in derselben bei einer Belastung von 15 kgf nicht einmal  $1 \mu$  beträgt.

Das Metallstück mit der umgebenden Blechform (u in Abb. 3), welche die Scapula enthält, wird auf dem Objektisch (r) mit Hilfe der Schrauben (s) fixiert. An der perforierten Messingscheibe ist das Metallstück, welches das Proximalende des Humerus enthält, dadurch befestigt, dass Stahldrahtschlingen von der Blechform (v in Abb. 3) um das erwähnte Metallstück durch ein Loch hinauf in die Scheibe gehen. Der Druck von dem Kolben (e) wird auf das Metallstück in der Form (v) durch die Pelotte (g) übertragen, die in die oben beschriebene Aussparung des Metallstückes passt.

Nachdem das Präparat mit den Einglessungsklötzen und den Blechformen (u und v) in dem Kompressibilitätsmesser fixiert ist, wird das oben beschriebene Hebelstangensystem so abgewogen, dass der Zeiger auf der Uhr (j) sich nicht einmal dann verschiebt, wenn der Kompressibilitätsmesser durch Stösse gegen die Holzplatte (b) in Vibration versetzt wird.

Das untere Ende des Kolbens (e) mit der Messingscheibe, dem Präparat und dem Stativ (p) ist während des Versuches in einem ziemlich gut abgedichteten Raum eingeschlossen. Das Dach desselben wird von einer Masonitscheibe (Abb. 3) gebildet, die von dem Kolben (e) durchbohrt wird. An den Rändern dieser Scheibe ist eine Hülle aus Plastik (x in Abb. 3) befestigt, die ausserhalb der 4 Stützpfeiler (c) verläuft. Um eine passende Temperatur in dem durch die Masonitscheibe und die Plastikhülle (x) abgegrenzten Raum zu erzielen, befinden sich an der Unterseite der Scheibe zwei Glühbirnen. Durch ein Loch in der Scheibe ist während des Versuches ein Thermometer in den Raum eingesteckt.

Auf diese Weise kann man ständig kontrollieren, dass das Präparat und die Injektionsflüssigkeit die richtige Temperatur erhalten.

### 7. *Kompressionsverfahren.*

Die zu Gruppe III und IV gehörigen Gelenke wurden auf die oben angegebene Weise in dem Kompressibilitätsmesser fixiert und hierauf einer Behandlung nach folgendem Schema unterworfen:

1. Zuerst haben wir die Lage registriert, welche die beiden Gelenkflächen einnehmen, wenn sie einander ohne Kompression anliegen. Um immer den gleichen Anlegungsdruck zu behalten, haben wir die Gewichtschale (f in Abb. 4) zu diesem Zweck mit einem 50 g Gewicht belastet. Der Zeiger an der Messuhr (k in Abb. 4) gibt dann einen gewissen Ausschlag. Danach wird die Skala der Messuhr so gedreht, dass der Zeiger bei dem erhaltenen Ausschlag auf den Teilstrich Null zeigt. Der Einfachheit halber haben wir die Bezeichnung »Nullpunktbestimmung« für diese Registrierung des Anliegens der Gelenkflächen aneinander eingeführt. Durch wiederholte Nullpunktbestimmungen kann man im Laufe des Versuches über eventuelle Dickenveränderungen des Knorpels Aufschluss erhalten.

2. Die Péans, die an den Gummischläuchen angebracht waren, und die während des Eingießens und der Befestigung des Präparates das Strömen der Flüssigkeit durch die Kanülen und in die Markhöhlen verhindert hatten, werden entfernt. Nach Verlauf einer weiteren Minute wird wieder eine Nullpunktbestimmung vorgenommen.

3. Hierauf werden periodische Kompressionen des Gelenkes ausgeführt. Auf die Gewichtschale wird ein Gewicht von 2 kg gelegt, wobei die Gelenkenden gegeneinander gepresst werden. Durch abwechselndes Herabdrücken und Loslassen des peripheren Teils des Wagebalkens (h in Abb. 4) wird das Gelenk entlastet bzw. belastet. Um den physiologischen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen, haben wir Kompressionsperioden mit Entlastungsperioden abwechseln lassen und dem Knorpel hierdurch eine Möglichkeit zur Erholung gegeben.

In einer ersten Kompressionsperiode werden im Verlauf von 10 Sekunden 10 Belastungen ausgeführt, wobei man damit rechnen kann, dass der Knorpel bei jeder einzelnen Kompression ca  $\frac{1}{2}$  Sek. belastet wird. Etwa 2 Sekunden nach der letzten Kompression wird eine Nullpunktbestimmung gemacht. Danach wird das Gelenk 30 Sekunden lang unbelastet gelassen.

Auf eine erneute Nullpunktbestimmung folgt eine Kompressionsperiode mit 20 Belastungen innerhalb von 20 Sekunden. Auch diese Periode wird mit einer Nullpunktbestimmung abgeschlossen, und das Gelenk bleibt wieder 30 Sekunden lang unbelastet. Das soeben beschriebene Verfahren mit zwei Kompressionsperioden von 10 bzw. 20 Sekunden Dauer mit der

dazwischenliegenden und anschliessenden Ruheperiode von 30 Sekunden wird dreimal hintereinander wiederholt; danach wird das Gelenk für 120 Sekunden entlastet.

4. Der Versuch wird so lange fortgesetzt, bis 8 derartige grössere Kompressionsperioden ausgeführt sind, was in ca. 50 Min. der Fall ist.

Die Grösse der Kompressionen wurde auf der Messuhr (k in Abb. 4) mit einer Genauigkeit von  $5 \mu$  registriert. Eine solche Registrierung hat am Anfang und am Ende der 10-Sekundenperioden sowie am Anfang, in der Mitte und am Ende der 20-Sekundenperioden stattgefunden. Selbstverständlich handelt es sich hier um die Gesamtkompression des ganzen Systems. Die Nachgiebigkeit des Kompressibilitätsmessers ist, wie oben angegeben, so gering, dass die Messuhr keinen Ausschlag gibt. Ebenso liegt, praktisch betrachtet, keine Nachgiebigkeit bei dem Eingiessungsmetall vor. Der Knochen ist grösstenteils in Metall eingegossen. Deshalb braucht man nur mit einer Nachgiebigkeit in den Teilen des Präparates zu rechnen, die zwischen den Metallflächen liegen. Vorbereitende Versuche haben gezeigt, dass die Nachgiebigkeit in kurzen und relativ groben Knochen sehr gering ist. Deshalb gehen wir in dieser Arbeit davon aus, dass die ganze gemessene Kompression in den beiden Gelenkknorpeln stattgefunden hat. Dies stimmt mit der Wahrnehmung *Raubers* (1876) überein, dass der Elastizitätsmodul des Knochens 2.000 kg/qmm beträgt.

Bei der Entlastung zwischen den einzelnen Kompressionen haben wir danach gestrebt, die Gelenkflächen nicht voneinander zu entfernen, um hierdurch eine Saugwirkung im Gelenk zu vermeiden. Durch Kontrollieren der Zeigerbewegungen auf der Messuhr haben wir verhindern können, dass die Gelenkflächen mehr voneinander entfernt wurden, als dem zuletzt erhaltenen »Nullpunkt« entsprach.

Während der Ruheperioden wurden die Gelenkenden so eingestellt, dass der Abstand zwischen der Pelotte (g) und dem Objektisch (r) höchstens  $50 \mu$  grösser war als bei dem zunächst vorausgehenden Nullpunkt.

Mit den Gelenken aus Gruppe II sind wir auf folgende Weise verfahren. Nach der Befestigung in dem Kompressibilitätsmesser wurde die Nullpunktbestimmung ausgeführt. Sobald die Flüssigkeit in die Markhöhlen hineingelassen war, wurden eine Stunde lang jede Minute Nullpunktbestimmungen vorgenommen.

## 8. Histotechnik.

Nachdem das Gelenk dem oben beschriebenen Kompressionsverfahren unterzogen war, kam es zur histologischen Bearbeitung. In den Materialgruppen I, II und III wurde zunächst die Gelenkkapsel aufgeschnitten, wobei man zu vermeiden suchte, dass Weichteilpartien oder dgl. in die Gelenkhöhle eingeführt wurden, die man im Verdacht haben konnte, dass sie Stärkekörner enthielten. Mit einem Glasstab wurde eine Probe

der Gelenkflüssigkeit entnommen und auf einen Objektträger gelegt. Nach der Färbung mit Jodjodkalium wurde die Probe auf das eventuelle Vorkommen von Stärkekörnchen untersucht. Wurden solche angetroffen, so wurde die Menge der Stärkekörnchen grob geschätzt. Ein Stück der Gelenkkapsel wurde entnommen, auf eine Korkscheibe gespannt und mit Formalin fixiert.

Die Gelenke aus Gruppe IV wurden prinzipiell auf die gleiche Weise behandelt. Nach dem Aufschneiden der Kapsel wurde eine Probe der Gelenkflüssigkeit als Kontrolle dafür entnommen, dass die Injektion der Stärkeaufschwemmung wirklich intraartikulär erfolgt war. Danach wurde die Gelenkhöhle sorgfältig mit Wasser ausgespült, um zu vermeiden, dass an den Knorpelflächen und an der Synovialmembran haftende Stärkekörnchen auf die Schnitte verschleppt wurden. Ein Stück der Gelenkkapsel wurde in einem Bezirk, der sich in genügendem Abstand von der Injektionsstelle befand, herausgeschnitten.

Von den beiden Gelenkflächen wurden mit einem scharfen Präpariermesser Knorpelstreifen abgelöst. Dabei waren wir bestrebt, soweit möglich, den verkalkten Knorpel mitzubekommen. Hierdurch ist der nicht verkalkte Knorpel fast durchweg intakt geblieben.

Der Knorpel wurde dann im Gefriermikrotom geschnitten, wobei die Präparate aus Gruppe I, II und III so eingestellt waren, dass das Mikrotommesser von der Knorpeloberfläche nach der Tiefe zu gehen konnte. Ehe das Messer zurückgeführt wurde, hat man es abgetrocknet und das Präparat etwas gesenkt, damit das Messer keine Gelegenheit bekäme, Stärketeilchen aus den tieferen Teilen des Präparates mit sich hinauf nach der Oberflächenschicht des Knorpels zu führen. In Gruppe IV war die Schnittführung umgekehrt, also von der Knorpel-Knochengrenze aufwärts nach den oberflächlichsten Teilen des nicht verkalkten Knorpels hin. Bei diesem Material wurden dieselben Vorsichtsmassnahmen getroffen, um ein Mitschleppen von Stärkekörnchen durch das Mikrotommesser zu vermeiden. Von jedem Gelenkknorpel wurden etwa 20 ca 30  $\mu$  dicke unbeschädigte Schnitte aufgelegt.

Die Schnitte wurden ca. 30 Sek. lang mit Jodjodkalium gefärbt. Hierauf wurden sie in Glycerin-Gelatine mit einer Temperatur von 50—60° C eingedeckt. Die relativ hohe Temperatur der Glycerin-Gelatine bewirkt, dass die Stärkekörnchen quellen. Aus Abb. 1 und Tab. 1 geht nämlich hervor, dass die Durchschnittsgrösse des kleinsten Körnchenquerschnitts sowie die Anzahl der »grossen« Körnchen mit dem Eindeckungsverfahren wächst, während die Anzahl der »kleinen« Körnchen abnimmt.

Die in Formalin fixierten Gelenkkapseln wurden nach dem Entwässern im Gefriermikrotom geschnitten, danach in gleicher Weise wie die Knorpelschnitte gefärbt und eingedeckt.

### 9. *Mikroskopische Untersuchung.*

Bei der mikroskopischen Untersuchung der Knorpel- und Kapselschnitte haben wir die 600—900 fache Vergrößerung angewandt. Jedes hierbei angetroffene Stärkekörnchen ist nur dann registriert worden, wenn man mit Sicherheit feststellen konnte, dass es wirklich in dem Schnitt selbst lag. Als Kriterium hierfür haben wir aufgestellt, dass eine benachbarte Zelle in derselben Ebene wie das Stärkekörnchen liegen muss. Bei jeder Gelegenheit, wo der geringste Zweifel darüber herrschte, ob das Körnchen im Schnitt lag, ist es nicht mitgerechnet worden.

Um uns eine Vorstellung von der Verteilung der Stärkekörnchen im Knorpelschnitt zu verschaffen, haben wir den nicht verkalkten Knorpel in drei gleichdicke Schichten eingeteilt, eine obere, der Gelenkhöhle zugekehrte, eine mittlere und eine basale, dem verkalkten Knorpel anliegende Schicht. Den oberflächlichsten Teil des oberen Drittels haben wir als Oberflächenschicht bezeichnet. Bei der Registrierung haben wir also das angetroffene Körnchen in einem der Drittel lokalisiert oder es zur Oberflächenschicht gerechnet, wenn das Körnchen oberflächlich im Verhältnis zu den oberflächlichsten Knorpelzellen gelegen hat.

Die in dem verkalkten Knorpel angetroffenen Körnchen sind registriert, aber nicht zum Gegenstand einer statistischen Bearbeitung gemacht worden, weil der verkalkte Knorpel nicht in seiner ganzen Ausdehnung mit in den Schnitt gekommen war.

### 10. *Bestimmung des Schnittvolumens.*

Um eine Auffassung über das Schnittvolumen des Humerus und der Scapula zu gewinnen, sind wir folgendermassen vorgegangen:

Von 23 Gelenken wurden je drei zufällig gewählte Schnitte eines jeden Knorpels auf gleichdickem Papier von bekanntem Gewicht pro Flächeneinheit abgezeichnet. Hierzu haben wir uns eines Projektionsverfahrens bedient, bei dem mit 30-facher linearer Vergrößerung gearbeitet wurde. Es wurde nur der nicht verkalkte Knorpel berücksichtigt. Die abgezeichneten Schnitte wurden ausgeschnitten und die drei zu demselben Knorpel gehörigen gleichzeitig gewogen. Danach haben wir das Verhältnis zwischen den Papiergewichten der einerseits von den Humerus- andererseits von den Scapulaknorpeln hergestellten Schnitte für jedes Gelenk bestimmt. Dann wurde für diese Verhältnisse das arithmetische Mittel mit seinem mittleren Fehler berechnet. Hierbei ergab sich, dass die Schnitte vom Humerus sich zu denen von der Scapula wie  $1,25 \pm 0,06 : 1$  verhalten. Dies gilt nur für den Fall, dass die Schnitte von Gelenkköpfen und Gelenkpfannen bei der histotechnischen Behandlung die gleichen Veränderungen erfahren haben. Hierbei muss man an die Einwirkung denken, die das Schneiden im Gefriermikrotom, das Färben mit Jodjodkalium und das Eindecken in Glycerin-Gelatine auf die Schnitte gehabt

haben können. Hinsichtlich der Einwirkung des Schneidens im Gefriermikrotom auf histologische Schnitte gibt es verschiedene Auffassungen. Man weiss, dass Glycerin Wasser an sich reisst und hierdurch schrumpfend auf die Präparate einwirkt. Aber wie die anderen Faktoren auf die Präparate einwirken, darüber ist nichts Sicheres bekannt. Ebenso wenig weiss man, ob der Humerus- und der Scapulaknorpel in verschiedenem Grade beeinflusst werden. Wir haben keine Kontrolluntersuchungen bezüglich der Einwirkung des histotechnischen Verfahrens auf das Knorpelvolumen gemacht, wollen aber auf die Möglichkeit einer solchen hinweisen. Da sämtliche Knorpel genau derselben Behandlung unterworfen wurden und kein direkter Grund zu der Annahme vorliegt, dass die Knorpel vom Humerus und von der Scapula nennenswert verschieden von dieser Behandlung beeinflusst sein sollten, haben wir gemeint, mit dem angegebenen Verhältnis zwischen den Knorpelvolumina rechnen zu können.

Die Oberfläche der Schnitte von dem Humerus- und dem Scapulaknorpel ist dadurch berechnet worden, dass man das arithmetische Mittel der registrierten Papiergewichte, d. h. für je drei Schnitte jeder Gelenkfläche von den 23 Gelenken genommen hat. Hierbei werden folgende Werte erhalten: Humerus 1,7 qmm, Scapula 1,4 qmm. Dies besagt, dass die Mittelzahl des Schnittvolumens bei einer berechneten Schnittdicke von 30  $\mu$  für den Humerus 0,05 cmm und für die Scapula 0,04 cmm beträgt.

#### 11. *Diskussion der Untersuchungsmethode.*

Die oben beschriebene Untersuchungsmethode ist so ausgestaltet worden, dass man versucht hat, unter möglichst physiologischen Verhältnissen zu arbeiten. Dies ist natürlich nicht ganz gelungen, aber die vorliegende Untersuchung scheint uns doch in dieser Hinsicht früheren Untersuchungen auf dem Gebiet der Knorpelforschung überlegen in sein. Der Grund hierfür ist, dass wir mit ganzen, uneröffneten Gelenken von Tieren gearbeitet haben, die unmittelbar vor Beginn des Versuches getötet wurden, sowie dass die Gelenke bei normaler Körpertemperatur aufbewahrt wurden, während gleichzeitig eine Flüssigkeit, deren physikalisch-chemische Eigenschaften ziemlich gut mit denjenigen des Blutes übereinstimmen, unter geeignetem Druck zugeführt wurde.

Präparate von Individuen, die längere Zeit vor dem Beginn des Versuches getötet wurden, ausgeschnittene Teile von Gelen-

ken oder Versuchsanordnungen, bei denen die Knorpel einem Druck durch feste Pelotten ausgesetzt werden, erachten wir nicht als geeignet für Untersuchungen über die Ernährungsverhältnisse der Gelenke.

Zuverlässige Werte inbetreff der Kompressibilitätsverhältnisse der Gelenkknorpel können nur nach einer Eingiessung der ganzen Gelenkenden in Metall oder nach einer anderen ausserordentlich kräftigen Fixierung derselben erzielt werden. Gesägte Knochenflächen, die gegen plane Metallflächen angelegt werden, geben nämlich, wie wir bei Kontrolluntersuchungen gefunden haben, den Gelenkenden keine genügende Stütze, sondern liefern systematische Fehler, indem sie die für die Kompressibilität des Knorpels erhaltenen Werte erhöhen. Ein anderer Umstand, der beachtet werden muss, ist der, dass keine begrenzten Teile der Gelenkenden zur Untersuchung entnommen werden dürfen, weil man durch Ausschneiden das kollagene Arkadensystem der Knorpel zerstört und hierdurch die Kompressibilität steigert. Ferner ist eine Flüssigkeitszufuhr sowohl zu den Markhöhlen der Gelenkenden als zu den Gelenkflächen notwendig. Durch eine Kompression des Gelenkknorpels wird nämlich Flüssigkeit aus dem komprimierten Gebiete entfernt. Dies haben *Benninghoff* (nach *Bär* 1926) sowie *Bär* (1926) und *Hirsch* (1944) vermutet. Die Richtigkeit dieser Vermutung konnte durch den einen von uns (*Ingelmark* 1947) bewiesen werden. Ein normaler Rückfluss von Flüssigkeit in das einem Druck ausgesetzte Gebiet kann offenbar nicht erzielt werden, wenn die Flüssigkeitszufuhr fehlt. Dies wurde durch unsern Befund erwiesen, dass Knorpel, die ohne Flüssigkeitszufuhr zu den Markhöhlen der Gelenkenden belastet werden, ein schlechteres Erholungsvermögen zeigen als solche mit Flüssigkeitszufuhr. Flüssigkeitsarmer Knorpel ist, wie schon *Bär* (1926) gezeigt hat, weniger kompressibel als Knorpel mit normalem Flüssigkeitsgehalt. Dies bewirkt, dass man bei mangelnder Flüssigkeitszufuhr fehlerhafte Werte für die Kompressibilität des Knorpels erhält.

Aus dem Gesagten geht hervor, dass man durch die Verbesserungen in der Untersuchungsmethode, die, soweit wir bei unseren Literaturstudien gefunden haben, in der vorliegenden

Arbeit zum ersten Male eingeführt sind, Untersuchungsergebnisse erhält, welche die physiologischen Verhältnisse richtiger widerspiegeln, als es die Resultate früherer Forscher auf diesem Gebiete getan haben.

## UNTERSÜCHUNGSERGEBNISSE

### 1. *Verteilung der Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln.*

Durch genaues Studium der histologischen Schnitte von Knorpel der nach der oben beschriebenen Methode untersuchten Gelenke sind die Resultate erhalten worden, die in Tab. 2 und Abb. 5 vorgelegt werden. Aus diesen geht hervor, dass die Gelenkknorpel in Gruppe I, d. h. von Gelenken, die lediglich eine intraarterielle Injektion von Stärkeaufschwemmung erhalten haben, ca  $\frac{3}{4}$  ihrer Stärkekörnchen in dem basalen Drittel und  $\frac{1}{4}$  der Körnchen in dem mittleren Drittel aufweisen. Stärkekörnchen in dem oberen Drittel sind seltene Erscheinungen. Diese stark schiefe Verteilung bedeutet, dass es sich nicht um eine zufällige Streuung der Körnchen handeln kann. Wie oben erwähnt, haben wir stets danach gestrebt, nur solche Körner mitzunehmen, die wirklich innerhalb des Schnittes liegen. Die hier konstatierte schiefe Verteilung beweist, dass wir richtig gehandelt haben, weil Verunreinigungen der Präparate wahrscheinlich gleichmässig über die Schnitte hätten verteilt liegen müssen. Möglicherweise könnte man sich denken, dass die angewandte Technik beim Schneiden eine Neigung zur Ansammlung von Körnchen in den der Gelenkhöhle zunächst gelegenen Teilen der Schnitte hätte mit sich bringen können. Dies käme dadurch zustande, dass Stärkekörnchen, die bei der Passage des Mikrotommessers durch den verkalkten Knorpel und den eventuell darunter liegenden Knochen an dem Messer haften geblieben wären, sich von demselben lösten und auf den Knorpel setzten, wenn das Mikrotommesser das nächste Mal in das Präparat eindränge.

Die Technik des Schneidens, die histotechnische Behandlung und die mikroskopische Beurteilung der Schnitte sind bei den

TABELLE 2

Die prozentuale Verteilung der Stärkekörnchen innerhalb der verschiedenen Partien des nicht verkalkten Knorpels in den Materialgruppen I, II, III und IV.

Gelenk- gruppe	Gelenk- fläche	Oberflächen- schicht	Oberes Drittel	Mittleres Drittel	Basales Drittel
I	H	0	3,4 ± 1,5	27,6 ± 3,7	69,0 ± 3,8
	S	0	4,9 ± 1,5	27,1 ± 3,3	68,0 ± 3,4
II	H	0	13,7 ± 2,4	37,5 ± 3,4	50,7 ± 3,5
	S	0,4 ± 0,4	12,7 ± 2,2	32,1 ± 3,1	54,0 ± 3,2
III	H	5,2 ± 1,5	40,9 ± 2,6	28,4 ± 2,4	25,5 ± 2,3
	S	6,1 ± 1,2	39,4 ± 2,5	26,6 ± 2,2	28,0 ± 2,2
IV	H	100	0	0	0
	S	100	0	0	0

H = Humerus.

S = Scapula.

verschiedenen Gelenkgruppen genau dieselben gewesen. Dieser Umstand sowie die soeben beschriebene Verteilung der Stärkekörnchen in Gruppe I bürgt dafür, dass die für Gruppe II, III und IV in Tab. 2 und Abb. 5 erhaltenen Werte keine Artefakte sind.

Gruppe II, d. h. die Gelenke, denen die Stärkelösung eine Stunde lang in die Markhöhle injiziert wurde, deren Gelenkknorpel aber nicht komprimiert wurden, weist eine von Gruppe I abweichende Verteilung der Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln auf. So ist die prozentuale Anzahl Körnchen in dem basalen Drittel bei Gruppe II geringer als bei Gruppe I, während die entsprechende Anzahl im oberen Drittel des Knorpels das umgekehrte Verhalten zeigt. Diese Beobachtung gilt sowohl für den Scapula- als auch für den Humerusgelenkknorpel.

Gruppe III, d. h. die Gelenke, denen Stärkelösung eine Stunde lang in die Markhöhle injiziert wurde, während der Knorpel gleichzeitig einem periodischen Druck ausgesetzt war, zeigt eine Verteilung der Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln, die sich in markanter Weise von der in den beiden früheren Gruppen unterscheidet. Etwa die Hälfte der Körnchen liegt nämlich in

der Oberflächenschicht und im oberen Drittel des Knorpels, während das mittlere und das basale Drittel des Knorpels je ungefähr  $\frac{1}{4}$  der Körnchen bergen. Die prozentualen Werte für das basale Drittel in Gruppe III (Tab. 2) unterschreiten die entsprechenden Werte für die Gelenkgruppen I und II mit einer statistisch sichergestellten Differenz. Das obere Drittel in Ge-

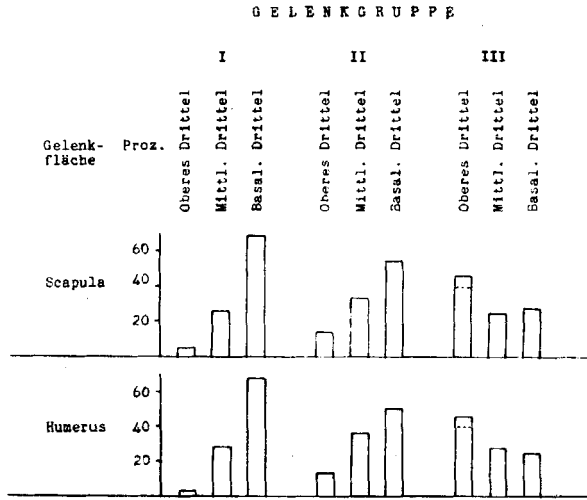


Abb. 5.

Die prozentuale Verteilung der Stärkekörnchen innerhalb der verschiedenen Partien des nicht verkalkten Knorpels in den Materialgruppen I, II, III und IV.

lenkgruppe III dagegen weist statistisch sichergestellt höhere Werte auf als in den beiden übrigen Gruppen.

Gruppe IV, d. h. die Gelenke, denen 0,25 ccm Stärkeaufschwemmung in die Gelenkhöhle und hierauf eine Stunde lang Dextran in die Markhöhle injiziert wurde, während das Gelenk gleichzeitig periodischen Kompressionen ausgesetzt war, zeigt eine Verteilung der Stärkekörnchen, die sich vollständig von der in den drei ersten Materialgruppen unterscheidet. Sämtliche Körnchen liegen nämlich in der Oberflächenschicht, d. h. an der Grenze zwischen der Gelenkhöhle und dem nicht verkalkten Knorpel.

Es scheint uns bemerkenswert, dass die Gelenkknorpel der Scapula und des Humerus in Tab. 2 und Abb. 5 eine sehr gute Übereinstimmung innerhalb der verschiedenen Teile der Gelenkknorpel aus den einzelnen Gelenkgruppen zeigen.

TABELLE 3

*Die prozentuale Anzahl Gelenkknorpel, die, wie die histologische Bearbeitung erwies, keine Stärkekörnchen enthielten.*

Gelenkgruppe	Gelenkfläche	Oberflächenschicht	Oberes Drittel	Mittleres Drittel	Basales Drittel
I	H	100	75,0 ± 11,2	0	0
	S	100	56,3 ± 12,8	12,5 ± 8,5	0
II	H	100	18,8 ± 10,1	6,3 ± 6,3	0
	S	93,8 ± 6,3	12,5 ± 8,5	0	0
III	H	18,8 ± 10,1	0	0	0
	S	12,5 ± 8,5	0	6,3 ± 6,3	0
IV	H	75,0	100	100	100
	S	58,3	100	100	100

H = Humerus. S = Scapula.

Es ist uns wünschenswert erschienen, auch die prozentuale Anzahl derjenigen Gelenkknorpel zu registrieren, die keine Stärkekörnchen innerhalb ihrer resp. Teile aufgewiesen haben. Die erhaltenen Werte sind in Tab. 3 zusammengestellt. Diese zeigt prinzipiell die gleichen Verhältnisse wie Tab. 2. Die Anzahl der negativen Beobachtungen in der Oberflächenschicht des Knorpels ist nämlich geringer in der Gelenkgruppe III als in den beiden übrigen Gruppen. Ferner weist Gruppe II im oberen Drittel des Humerus- und des Scapulaknorpels weniger negative Beobachtungen auf als Gruppe I. Dieser Unterschied ist statistisch sichergestellt oder wahrscheinlich.

## 2. Anzahl Stärkekörnchen in den untersuchten Knorpelschnitten.

Durch die oben beschriebene Methode ist die Oberfläche des nicht verkalkten Knorpels an drei zufällig gewählten histologischen Schnitten von jedem einzelnen Gelenkknorpel der 23

TABELLE 4

Anzahl beobachteter Stärkekörnchen pro Schnitt von den Scapula- und Humerusknorpeln in den Materialgruppen I, II, III und IV.

Zeile Nr.	Gelenkgruppe Nr.			
	I	II	III	IV
1 Scapula .....	0,69 ± 0,08	0,81 ± 0,06	1,41 ± 0,13	0,025
2 Humerus .....	0,53 ± 0,06	0,75 ± 0,08	1,39 ± 0,16	0,017
3 Korrigierter Sca- pulawert .....	0,86 ± 0,10	1,01 ± 0,08	1,51 ± 0,16	0,031
4 Differenz zwischen Zeile 2 und 3 ...	0,33 ± 0,11	0,26 ± 0,11	0,12 ± 0,22	

untersuchten Schultergelenke bestimmt worden. Hierbei wurde konstatiert, dass sich die Oberflächen der Schnitte vom Humerus und von der Scapula wie  $1,25 \pm 0,06:1$  verhalten.

Da das Ausschneiden der Gelenkknorpel die ganze Untersuchung hindurch in gleicher Weise stattgefunden hat, liegt kein Grund zu dem Verdacht vor, dass die Schnittgrösse in den einzelnen Gelenkgruppen verschieden gewesen sei. Man dürfte auch berechtigt sein, davon auszugehen, dass die Dicke der Schnitte von den Gelenkköpfen und den Gelenkpfannen die gleiche gewesen ist. Hieraus erhellt, dass sich die Volumina der Schnitte vom Humerus und von der Scapula wie  $1,25:1$  verhalten.

Das arithmetische Mittel der Stärkekörnchen pro Schnitt wurde ausgerechnet und in Zeile 1 und 2 in Tab. 4 wiedergegeben. Um entscheiden zu können, ob die Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpel für den Gelenkkopf und die Gelenkpfanne dieselbe ist, muss der Wert für die letztgenannte mit  $1,25$  multipliziert werden. Hierbei werden die Werte auf Zeile 3 der Tab. 4 erhalten. Die Differenzen zwischen den auf diese Weise korrigierten Werten für Scapula und Humerus sind in Zeile 4 der gleichen Tabelle wiedergegeben. Hieraus geht hervor, dass die Anzahl Körnchen pro Volumeneinheit Knorpel in Gruppe I für die Gelenkpfanne grösser als für den Gelenkkopf ist, während die übrigen Gelenkgruppen keine sichergestellten Differenzen aufweisen.

Der festgestellte Unterschied besitzt selbstverständlich nur

dann einen Wert, wenn die Knorpel des Gelenkkopfes und der Gelenkpfanne während der histotechnischen Behandlung die gleichen Volumenveränderungen erleiden. Diese Probleme sind oben diskutiert worden und werden deshalb in diesem Zusammenhang nicht näher behandelt.

Vergleicht man die Werte für die verschiedenen Gelenkgruppen in Tab. 4, so zeigt es sich, dass die Körnchenanzahl pro Volumeneinheit Knorpel in Gruppe III sicher grösser ist als in den Gruppen I und II. Zwischen den beiden letztgenannten bestehen keine statistisch sichergestellten Differenzen. Hieraus geht hervor, dass die Kompression der Gelenkknorpel die Menge der Stärkekörnchen unter der Voraussetzung steigert, dass den Markhöhlen der Knochenenden im Verlauf des Versuches Stärkeaufschwemmung zugeführt wird. Enthält die Gelenkflüssigkeit wie in Gruppe IV Stärkekörnchen, wird aber den Markhöhlen während der Dauer der periodischen Kompressionen stärkefreies Dextran zugeführt, so dringen nur in vereinzelt Ausnahmefällen Stärkekörnchen in die Gelenkknorpel ein. In keinem Fall hat sich dies Eindringen tiefer als in die Oberflächenschicht des Knorpels erstreckt. Dies besagt, dass die Körnchen gewöhnlich teilweise in der Gelenkhöhle selbst gelegen haben und niemals zwischen die oberflächlichsten Knorpelzellen hinabgedrungen sind. Die Unterschiede in der Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpel sowie in der Verteilung der Körnchen innerhalb der verschiedenen Teile der Gelenkknorpel zwischen Gruppe IV einerseits und den übrigen Materialgruppen andererseits haben sich als so durchgehend erwiesen, dass wir es für überflüssig hielten, das Material in Gruppe IV hinreichend gross für die übliche Berechnung des Mittelfehlers zu machen.

### 3. Verhalten der Gelenkflüssigkeit.

Wie oben näher auseinandergesetzt worden ist, wurde die Gelenkflüssigkeit sämtlicher Gelenke des Materials auf das Vorkommen von Stärkekörnchen untersucht. Hierbei haben in Gelenken aus Gruppe I und II nur in insgesamt drei Fällen Stärkekörnchen nachgewiesen werden können. In dem einen dieser

Fälle handelte es sich sicher um eine Verunreinigung. In den beiden anderen konnten bloss 2 bzw. 4 Stärkekörnchen in der ganzen Probe nachgewiesen werden, weshalb die Befunde als unsicher bezeichnet werden müssen. Hieraus erhellt, dass bei der Technik, die für die Gelenkgruppen I und II angewandt wurde, wahrscheinlich keine Stärkekörnchen in die Gelenkhöhle gelangen. In Gruppe III dagegen wiesen sämtliche Gelenke Stärkekörnchen in der Gelenkflüssigkeit auf. Die Körnchenzahl der Proben hat in keinem einzigen Fall 15 unterschritten. Ab und zu hat man Proben mit mehr als 50 Stärkekörnchen bekommen. Hieraus folgt, dass das Kompressionsverfahren ein Eindringen von Stärkekörnchen in die Gelenkhöhle selbst mit sich bringt. Welche Wege hierbei in Frage kommen können, soll unten eingehender diskutiert werden.

In der Synovia sämtlicher der zu Gruppe IV gehörigen Gelenke konnten Stärkekörnchen in so reichlicher Menge nachgewiesen werden, dass sie die Zahl der in irgendeinem Gelenk aus Gruppe III angetroffenen bedeutend überstiegen.

Selbstverständlich wäre es von grösstem Interesse gewesen, die Menge der Gelenkflüssigkeit in Gelenken aus verschiedenen Gruppen zu registrieren. Es ist uns indessen nicht gelungen, eine Lösung für die technischen Probleme zu finden, die uns hier entgegnetreten. Die Gründe hierfür sind unter anderem folgende: Die Gelenkflüssigkeit ist zähe und adhäriert kräftig an den Knorpelflächen und den Wänden der Gelenkkapsel. Die Höhle des Schultergelenks kommuniziert mehr oder weniger breit mit Schleimbeuteln, deren Synoviamenge zur Gelenkflüssigkeit gerechnet werden kann. Ausserdem dürfte es äusserst schwierig sein, diese Schleimbeutel sicher von ihrem Inhalt zu entleeren. Beim Aufsammeln der Gelenkflüssigkeit darf die Oberfläche des Gelenkknorpels oder die Synovialmembran nicht beschädigt werden, weil andere wichtige Teile der Untersuchung hierdurch ungünstig beeinflusst oder völlig zunichte gemacht würden. Wir haben uns daher entschlossen, die Menge der Gelenkflüssigkeit in jedem eröffneten Gelenk ganz subjektiv zu schätzen. Hierbei sind drei Gradbezeichnungen zur Anwendung gekommen, nämlich spärlich, mässig und reichlich.

Wenn man die einzelnen Registrierungen zusammenstellt, zeigt es sich, dass die Gelenkflüssigkeit in Gruppe III möglicherweise reichlicher vorkommt als in Gruppe I und II. Wir sind uns der grossen Schwierigkeiten, die mit einer solchen Registrieremethode verbunden sind, wohl bewusst. Deshalb messen wir der beschriebenen Beobachtung keine nennenswerte Bedeutung bei. Der Grund dafür, dass dieselbe hier erwähnt wurde, liegt teils darin, dass der Unterschied auffallend erschien, teils darin, dass jeder, der sich mit den Ernährungsverhältnissen des Knorpels und der Bildung der Gelenkflüssigkeit beschäftigt, selbstverständlich gern wissen möchte, wie die Gelenkflüssigkeit in den verschiedenen Teilen des Untersuchungsmaterials variiert.

#### 4. *Vorkommen von Stärkekörnchen in den verschiedenen Teilen der Gelenkkapsel.*

In Gelenkkapseln aus Gruppe I, II und III, die nach der oben angegebenen Technik untersucht wurden, sind Stärkekörnchen durchgehends in den Gefässen innerhalb der fibrösen Kapselteile sowie innerhalb der auf deren Aussenseite zurückgebliebenen Reste von Skelettmuskulatur angetroffen worden. Dies gilt für Kapseln von Gelenken aus allen drei Materialgruppen. Wir haben auf eine quantitative Registrierung der Körnchen nicht eingehen wollen, weil es nicht möglich war, stets völlig vergleichbare Schnitte zu erhalten.

Auch die Synovialmembran selbst ist mit starker Vergrösserung (ca. 900 fach) untersucht worden. Hierbei wurden Stärkekörnchen in den unmittelbar unter den Oberflächenzellen der Synovialmembran gelegenen Kapillaren von solchen Gelenken angetroffen, welchen Stärkelösung auf keinem anderen Wege als durch die in die Markhöhlen der Knochenenden hineingesteckten Kanülen zugeführt worden war. In diesen Fällen haben auch die fibrösen Teile der Kapsel sowie die daransitzenden Muskelreste Stärkekörnchen enthalten. Diese Wahrnehmungen wurden an Gelenken aus Gruppe II gemacht, wo die Probe der Synovialflüssigkeit keine Stärkekörnchen enthielt. Selbstverständlich kann nicht ausgeschlossen werden, dass Stärkekörn-

chen in irgendeinem nicht untersuchten Teil der Gelenkflüssigkeit haben vorkommen *können*.

Es kommt einem sehr unwahrscheinlich vor, dass die beobachteten Körnchen durch den Gelenkknorpel in die Gelenkhöhle gelangt und dann von der Synovialmembran resorbiert sein sollten. Dieser Standpunkt wird u. a. durch folgende Umstände bekräftigt. Bloss in einem von reichlich 600 Schnitten, die von Gelenken aus Gruppe II untersucht wurden, hat ein einziges Stärkekörnchen in der Oberflächenschicht des Knorpels wahrgenommen werden können. Dies spricht stark dagegen, dass man es in dieser Materialgruppe mit einer Passage aus dem Knorpel in die Gelenkhöhle zu tun haben sollte. Hierzu kommt ferner, dass man in keinem zu Gruppe II gehörigen Gelenk mit Sicherheit Stärkekörnchen in Proben der Gelenkflüssigkeit hat nachweisen können. Die gemachte Beobachtung eines reichlichen Vorkommens von Stärkekörnchen in den oberflächlichsten Kapillaren der Synovialmembran eines solchen Gelenkes dürfte sehr stark dafür sprechen, dass Anastomosen zwischen den erwähnten Kapillaren und den Markhöhlen der Knochenenden bestehen.

Es wurde noch eine andere Beobachtung von gewisser Bedeutung bei der Diskussion der Flüssigkeitsströmungen in den Gelenkknorpeln gemacht. Dieselbe besteht darin, dass Gelenke aus Gruppe III, denen bloss Dextran anstatt Stärkeaufschwemmung in die Aorta eingespritzt worden war, in sämtlichen Schichten des Gelenkknorpels, in der Gelenkflüssigkeit, in der fibrösen Schicht der Gelenkkapsel sowie in der Muskulatur, die an der Kapsel festsass, aber nicht in den Kapillaren der Synovialmembran Stärkekörnchen aufweisen. Von der Gelenkkapsel wurden keine Serienschnitte gemacht, sodass es nicht ausgeschlossen werden kann, dass Stärkekörnchen in den erwähnten Kapillaren haben vorkommen *können*.

Stellt man jedoch die hier erwähnten Beobachtungen mit dem zusammen, was oben bezüglich des Vorkommens von Stärkekörnchen in der Gelenkflüssigkeit von den Gelenken in den verschiedenen Materialgruppen gesagt worden ist, so ergibt sich unseres Erachtens hieraus die Schlussfolgerung, dass die Stärkekörnchen, die in der Gelenkflüssigkeit von den Gelenken in

Gruppe III nachgewiesen wurden, von der Markhöhle her auf dem Wege durch den Gelenkknorpel in die Gelenkhöhle gelangt zu sein scheinen. Die Gelenkkapseln in Gruppe IV weisen durchgehends Stärkekörnchen in der Synovialmembran auf. Hieraus geht nämlich hervor, dass die Synovialmembran unter den Bedingungen, die in dieser Untersuchung für Gruppe III und IV zur Anwendung gekommen sind, sich im Laufe des Versuches in einem solchen Zustand befunden hat, dass Stärkekörnchen von der Gelenkhöhle in die Synovialmembran gelangen konnten.

5. *Veränderung der Knorpeldicke im Verlauf der Versuche bei den Gelenkgruppen II und III.*

Durch die oben beschriebene »Nullpunktbestimmung« ist es möglich geworden, sich eine Auffassung über die gesamten Dickenveränderungen zu bilden, welche die Gelenkknorpel auf den beiden Gelenkflächen im Zusammenhang mit den Versuchen erfahren.

In Gelenken aus Gruppe II ist eine Dickenzunahme gewöhnlich 2—3 Minuten, nachdem man mit der Zufuhr von Stärkeaufschwemmung zu den Markhöhlen der Knochenenden begonnen hatte, eingetreten. Die Zunahme ist sukzessive erfolgt und hat ihr Maximum gewöhnlich nach 5—10 Minuten erreicht. Danach haben keine Veränderungen der Knorpeldicke mehr konstatiert werden können. Die totale Dickenzunahme hat sich im Durchschnitt auf  $25,7 \pm 3,8 \mu$  belaufen.

Es ist von Interesse, diesen Wert mit der Dickenzunahme zu vergleichen, die man in Gruppe III erhält, wo die Gelenkknorpel periodischen Kompressionen unterworfen werden. Dort sind die Veränderungen der ursprünglichen totalen Knorpeldicke sowohl unmittelbar vor als nach jeder Kompressionsserie registriert worden.

Es scheint, als ob sich die vor den Kompressionen gemachten Nullpunktbestimmungen am ehesten mit dem Wert der Dickenveränderung bei den Gelenken aus Gruppe II vergleichen lassen. In Gruppe III wird am Ende der 30 Sek. langen Ruheperioden durchgehends eine sukzessive Senkung dieser Nullpunktwerte

erhalten, bis die längere Ruheperiode von 120 Sek. einsetzt. Die letztere pflegt eine so bedeutende Zunahme der Knorpeldicke mit sich zu bringen, dass sie die Abnahmen, die während der vorausgegangenen 6 kurzen Kompressionsperioden erhalten wurden, mehr als genügend kompensiert. Dies gilt gewöhnlich während der ersten 20—30 Min. nach Beginn des Versuches und bedeutet, dass die totale Knorpeldicke dann ihren Maximalwert erreicht hat.

Eine Ausnahme hiervon bildet immer die erste, ca 4 Min. lange Kompressionsserie mit der anschliessenden Ruheperiode von 2 Min. Dauer. Diese Kompressionsserie bewirkt durchgehends eine so starke Verminderung der Knorpeldicke, dass es nicht gelingt, dieselbe während der 2 Min. dauernden Entlastung zu kompensieren.

Nachdem die Knorpeldicke jedoch ihren Maximalwert erreicht hat, pflegt sie auf demselben Niveau zu verharren, bis der Versuch nach etwa einer Stunde abgebrochen wird. Dies bedeutet, dass die Senkung, welche die totale Knorpeldicke im Zusammenhang mit den Kompressionen erfährt, während der 2 Minuten langen Ruhepausen ungefähr kompensiert wird. Ab und zu kann jedoch während der letzten 5—10 Min. des Versuches eine gewisse Tendenz zum Sinken der Kurve wahrgenommen werden.

Die totale Dickenzunahme, welche die Gelenkknorpel in Gelenken aus Gruppe III erfahren, beträgt im Mittel  $69,4 \pm 8,1 \mu$ . Weil die entsprechende Zunahme für Gelenkgruppe II  $25,7 \pm 3,8 \mu$  ausmacht, ergibt dies eine statistisch sichergestellte Differenz ( $43,7 \pm 8,9$ ) zwischen den beiden Dickenzunahmen. Hieraus erhellt, dass die periodischen Gelenkkompressionen eine Zunahme der totalen Knorpeldicke der Gelenke mit sich bringen. Wie man sich das Zustandekommen dieser Zunahme denken kann, soll unten eingehender diskutiert werden.

Die unmittelbar nach jeder Kompressionsserie von 10 bzw. 20 Sek. Dauer registrierte Knorpeldicke ergibt eine Kurve, die prinzipiell mit derjenigen übereinstimmt, welche beim Bestimmen der Knorpeldicke unmittelbar vor dem Beginn jeder Kompressionsserie erhalten wird.

Während der langen Entlastungsperioden mit Ausnahme der allerersten findet gewöhnlich eine solche Erholung statt, dass sie die sukzessive Senkung während der 6 aufeinander folgenden kurzen Kompressionsperioden gut deckt. Hieraus folgt, dass die Kurve zuerst sinkt, um dann schwach zu steigen und nach 20 bis 30 Min. ihr Maximum zu erreichen. Auf diesem Wert bleibt sie dann gewöhnlich bis zum Schluss der Versuchszeit stehen. Die maximale Erhebung der Kurve, d. h. die Steigung vom ersten Punkt der Kurve bis zu ihrem Maximalwert, beläuft sich im Mittel auf  $28,6 \pm 5,9 \mu$ . Dieser Wert ist statistisch sichergestellt kleiner als die Dickenzunahme des Knorpels, die erhalten wird, wenn man die Dicke vor jeder Kompressionsserie in der oben beschriebenen Art registriert. Die Differenz zwischen den beiden Werten beträgt nämlich  $40,8 \pm 10,0$ . Zwischen der unmittelbar nach den Kompressionsserien bestimmten totalen Dickenzunahme der Knorpel und der Dickenzunahme, die bei den Gelenken in Gruppe II erhalten wird, existiert kein sichergestellter Unterschied. Die Differenz beläuft sich nämlich auf bloss  $2,9 \pm 7,0 \mu$ .

#### 6. *Kompressibilität und Erholungsvermögen<sup>1</sup> der Gelenkknorpel in Gruppe III.*

Wie oben beschrieben, sind die Knorpel der Gelenke aus Materialgruppe III mit einer Kraft von ca. 2 kgf periodisch gegeneinander gedrückt worden. Die periodische Belastung dauerte ca.  $\frac{1}{2}$  Sek. und wurde einmal in der Sekunde in Perioden von abwechselnd 10 und 20 Kompressionen mit dazwischenliegender 30 Sek. langer Entlastung wiederholt. Die Grösse der Kompression wurde bei der ersten Belastung sowie nach 10 und nach 20 Sek. registriert. Mit Hilfe dieser Angaben sowie der Nullpunktbestimmungen vor und nach jenen 30 Sek. langen Entlastungsperioden kann man eine ziemlich gute Vorstellung

---

<sup>1</sup> Unter *Erholung* wird in diesem Zusammenhang die elastische Nachwirkung des Knorpels verstanden, die das Bestreben eines Gewebes, seine ursprüngliche Dicke wieder anzunehmen, bedeutet.

von der Kompressibilität bzw. dem Erholungsvermögen des Knorpels gewinnen.

Die Kompressibilität des Knorpels scheint im Verlauf des ganzen Versuches ungefähr gleich gross zu sein. Die gesamte Kompression der beiden Gelenkknorpel im Zusammenhang mit der ersten Belastung in jeder der 10 oder 20 Sek. dauernden Kompressionsserien beläuft sich im Mittel auf  $268 \pm 24 \mu$ . Nach einer Belastung von ca.  $\frac{1}{2}$  Sek. sinkt die Knorpeldicke im Verlauf jeder Kompressionsperiode. Diese Verminderung beträgt durchschnittlich  $32,0 \pm 2,2 \mu$ .

Die Erholung der Gelenkknorpel ist ebenfalls studiert worden. Man hat nämlich den Unterschied zwischen der totalen Knorpeldicke am Schluss einer aus 10 bzw. 20 Kompressionen bestehenden Kompressionsperiode und derjenigen Dicke bestimmt, welche die Knorpel ca. 2 Sek. nach Beendigung der erwähnten Periode aufweisen. Diese Erholung beträgt  $282 \pm 22 \mu$ .

Die totale Dickenzunahme während der 30 Sek. langen Entlastungsperioden beläuft sich im Mittel auf  $49,4 \pm 4,1 \mu$ . Die entsprechende Dickenzunahme während der langen Entlastungsperioden von 2 Min. Dauer beträgt  $82,4 \pm 7,8 \mu$ . Diese Erholung ist also grösser als während der kurzen Entlastungsperioden (Differenz  $33,0 \pm 8,8$ ).

## DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

### A. *Verteilung der Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln.*

Schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts konnte man zeigen, dass Farbstoffe in Form kleiner Körnchen, die bei Tieren in die Venen bzw. in die Markhöhlen langer Röhrenknochen injiziert werden, später in den Gelenkknorpeln wiedergefunden werden können. Diese Feststellungen stimmen mit den Beobachtungen überein, die wir an den Knorpeln aus Gelenkgruppe I gemacht haben. Der Verteilung der Körnchen innerhalb der verschiedenen Teile des Knorpels hat man indessen früher keine Beachtung geschenkt. Durch die statistische Behandlung unseres Materials (Tab. 2 und Abb. 5) haben wir zeigen können, dass Körnchen,

die nach Injektion einer Stärkeaufschwemmung in die Aorta in den Knorpel gelangten, hauptsächlich in den basalen Teilen des Knorpels lokalisiert sind. Eine derartige Verteilung der Stärkekörnchen dürfte nicht anders als so zu erklären sein, dass die Körnchen von dem basalen Rand des Knorpels in letzteren eindringen.

In Gelenkgruppe II liegen die Stärkekörnchen näher an der Gelenkfläche als in Gruppe I. Dies stimmt gut mit dem überein, was man zu erwarten hat, wenn man in Betracht zieht, dass die Injektion in Gruppe I binnen einiger Minuten erfolgt ist, während sie in Gruppe II eine Stunde gedauert hat.

Die Auffassung, dass die Stärkekörnchen wirklich von den basalen Teilen in die Gelenkknorpel aus Gruppe I und II eingedrungen sind, wird weiterhin dadurch bekräftigt, dass wir in keinem Fall Stärkekörnchen sicher in der Gelenkflüssigkeit haben nachweisen können.

Die Verteilung der Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln aus Gruppe III würde, wenn man die Verhältnisse unter gleichen Gesichtspunkten betrachtet, wie es oben für Gruppe I und II geschehen ist, dafür sprechen, dass die Körnchen durch die Knorpeloberfläche eingedrungen und nach der Knorpel-Knochengrenze zu hinabgewandert sind. Andererseits kann man sich sehr wohl vorstellen, dass die in Gruppe III angetroffene Körnchenverteilung dadurch entstehen kann, dass die Körnchen dem Knorpel von dessen basaler Partie zugeführt und aufwärts verschoben worden sind, es aber auf Grund einer gewissen Filterwirkung schwer gehabt haben, den Knorpel durch seine Oberfläche zu verlassen. Diese Filterwirkung muss solchenfalls in der Oberflächenschicht stärker als innerhalb der übrigen Teile des Knorpels gewesen sein.

Eine derartige Abnahme der Durchlässigkeit des Knorpels innerhalb seiner Oberflächenschicht mutet mit Rücksicht auf die arkadenförmige Anordnung der kollagenen Fibrillen im Knorpel wahrscheinlich an. Diese bringt es nämlich mit sich, dass die Fibrillenrichtung innerhalb der Oberflächenschicht beinahe parallel mit der Knorpeloberfläche verläuft, und dass die

Fibrillen dort dichter liegen, während sie innerhalb der tieferen Knorpelteile ungefähr senkrecht zur Oberfläche stehen.

Unseres Erachtens gibt es ausserdem eine Anzahl Faktoren, die dagegen sprechen, dass die Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln aus Gruppe III durch die Oberflächenschicht eingedrungen sein sollten. Es handelt sich um folgendes:

1. Trotzdem den Markhöhlen der Knochenenden in Versuchsgruppe II eine Stunde lang Stärkeaufschwemmung zugeführt wurde, haben wir niemals mit Sicherheit Stärkekörnchen in der Gelenkflüssigkeit aus dieser Gruppe nachweisen können.

2. Das einzige, worin sich die Gruppen II und III voneinander unterscheiden, ist das Kompressionsverfahren, das in der letzterwähnten Gruppe zur Anwendung kam. Die Kompressionen haben allerdings eine gewisse Bewegung in der Gelenkkapsel und der Synovialmembran zur Folge, die eine Erhöhung der Durchlässigkeit der letzteren für Stärkekörnchen mit sich bringen könnte. Da man aber bei dem Kompressionsverfahren ständig danach gestrebt hat, so kleine Bewegungen wie möglich an den Gelenkenden auszuführen, mutet es unwahrscheinlich an, dass diese Bewegung einen entscheidenden Einfluss auf die Permeabilität der Membran ausgeübt haben sollte. Die Bewegungen waren nämlich so gering, dass man bei der Inspektion kaum eine Bewegung der Gelenkkapsel wahrnehmen konnte.

3. Als weitere Stütze für diese Auffassung sei angeführt, dass wir Gelenke aus Gruppe III gehabt haben, deren Synovialmembran bei der histologischen Untersuchung keine Stärkekörnchen aufwies, die aber gleichwohl solche Körnchen in der Gelenkflüssigkeit enthielten. Der wirklich schlüssige Beweis dafür, dass die Stärkekörnchen in Gruppe I, II und III nicht durch die nach der Gelenkhöhle gerichtete Oberfläche der Gelenkknorpel in diese Knorpel gelangt sind, sind die Beobachtungen in Gruppe IV. Trotzdem in dieser Materialgruppe Stärkeaufschwemmung in die Gelenkhöhle injiziert wurde, haben wir Stärkekörnchen nirgendwo anders als in der Oberflächenschicht des Knorpels gefunden. Diese Befunde sind ausserdem äusserst spärlich gewesen, indem nur 2 bis 3 % der histologischen Knorpelschnitte einige Körnchen aufweisen.

Auf Grund der oben geschilderten Feststellungen in bezug auf die Verteilung der Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln sowie ihr Vorkommen in Gelenkflüssigkeit und Synovialmembran innerhalb der verschiedenen Gelenkgruppen glauben wir bewiesen zu haben, dass, praktisch betrachtet, sämtliche Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln der Gruppe III aus der Markhöhle in dieselben eingedrungen sind. Diese Körnchen sind dann teilweise durch die Knorpeloberfläche in die Gelenkflüssigkeit ausgewandert. Dies bedeutet, dass wir zu der Annahme geneigt sind, dass, praktisch betrachtet, alle Körnchen, die in Gruppe III innerhalb der Knorpelpartie angetroffen wurden, die wir in dieser Arbeit als »Oberflächenschicht« bezeichnet haben, auf dem Wege sind, in die Gelenkhöhle hinauszudringen.

Gewisse Forscher haben hervorgehoben, dass das Knochenmark durch eine kompakte Knochenlamelle vom Knorpel getrennt sei. So verhält es sich nicht bei den Schultergelenken des Kaninchens. Hier grenzt nämlich die Markhöhle innerhalb kleinerer, ziemlich dicht liegender Bezirke direkt an die basale Schicht des verkalkten Knorpels.

Man ist erstaunt, dass so grosse Partikel wie Stärkekörnchen (wahrscheinlich bis zu  $2 \mu$  Durchmesser) aus der Markhöhle in den Gelenkknorpel passieren können, insbesondere deshalb, weil man unter physiologischen Verhältnissen niemals Blutkörperchen in Gelenkknorpel findet. Eine mitwirkende Ursache zu dem ersterwähnten Verhalten kann möglicherweise die Gefässerweiterung sein, die durch die intravenöse Injektion von 1 mg Histamin zu Beginn der Operation erzielt wurde.

Natürlich kann man nicht leugnen, dass die Stärkekörnchen auf dem Wege über die Synovialmembran in die Gelenkhöhle gelangt sein können. Es soll jedoch betont werden, dass wir bei dieser Untersuchung nichts gefunden haben, was einen direkten Hinweis in dieser Richtung gäbe. Durch fortgesetzte Untersuchungen teils in Form von Rekonstruktionen der Gefässverhältnisse in den Gelenken und deren nächster Umgebung mit besonderer Berücksichtigung der vorhandenen Anastomosen zwischen der Markhöhle und den Kapillaren der Synovialmembran, teils in Form intravenöser Injektionen von Stärkeaufschwemmung

an lebenden Tieren unter verschiedenen funktionellen Verhältnissen, beabsichtigen wir, eine Lösung dieser Probleme zu versuchen.

B. *Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpelgewebe.*

Oben konnte für die Gelenkgruppe I nachgewiesen werden, dass Gelenkknorpel von der Scapula mehr Stärkekörnchen pro Volumeneinheit als Humerusknorpel enthält. Der Grund für diese Verschiedenheit konnte nicht sicher angegeben werden. Wir haben indessen einen Sachverhalt gefunden, auf das wir hinweisen wollen.

Es dürfte sich von selbst verstehen, dass die Stärkekörnchen, welche sich in den Gelenkknorpeln befinden, nicht durch solche Teile des Gewebes gewandert sind, die von dessen zellulären Elementen eingenommen werden. In einer erst teilweise publizierten Untersuchung von *Holmdahl* und *Ingelmark* konnte gezeigt werden, dass der relative Zellgehalt in Gelenkknorpel aus dem Schultergelenk von Kaninchen in der Scapula geringer ist als im Humerus (Differenz  $9,5 \pm 3,0$  %). Dies dürfte unseres Erachtens dafür sprechen, dass die Körnchen im Knorpel der Gelenkpfanne grössere Bewegungsmöglichkeiten als im Knorpel des Gelenkkopfes gehabt haben. Es muss jedoch hervorgehoben werden, dass die Kausalität im Zusammentreffen dieser verschiedenen Verhältnisse nicht bewiesen ist.

Die Gelenkgruppen II und III weisen keinen solchen Unterschied in der Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpelsubstanz zwischen dem Gelenkknorpel des Humerus und der Scapula auf. Insbesondere Gruppe II zeigt jedoch eine gewisse Tendenz in derselben Richtung.

Gruppe III ist reichlicher mit Stärkekörnchen in ihren Gelenkknorpeln versehen als die übrigen Gruppen. Das einzige, worin sich die Materialgruppen II und III unterscheiden, ist das in der letzterwähnten Gruppe ausgeführte Kompressionsverfahren. Hieraus erhellt, dass es gerade das Kompressionsverfahren ist, das die Zunahme in der Anzahl Stärkekörnchen verursacht hat. Weil eine derartige Zunahme unter den angewand-

ten Versuchsbedingungen durch eine reichlichere Zufuhr von Stärkeaufschwemmung aus der Markhöhle zum Knorpel zustande kommen könnte, müssen die gemachten Beobachtungen zeigen, dass eine vermehrte Gelenkfunktion die Flüssigkeitsströmung in den Gelenkknorpeln steigert.

Eine vollständige Beschreibung der Faktoren, welche die vermehrte Flüssigkeitsströmung in den Gelenkknorpeln aus Gruppe III zuwegegebracht haben, meinen wir nicht liefern zu können, weil die Verhältnisse u. a. auf Grund des verwickelten Knorpelaufbaus sicherlich äusserst kompliziert sind.

### C. *Veränderungen der Knorpeldicke im Verlauf des Versuches bei den Gelenkgruppen II und III.*

Die Dickenzunahme der Gelenkknorpel in Gruppe II, die während der ersten 5 bis 10 Minuten nach der unter Druck erfolgten Zufuhr von Stärkeaufschwemmung zu den Markhöhlen erhalten wird, kann verschiedene Ursachen haben. Es scheint uns, als ob folgende zwei Alternativen am nächsten zur Hand lägen. Die erste ist, dass der Knorpel in dem Zeitintervall zwischen der Tötung des Tieres und dem Beginn der Injektion Flüssigkeit verloren haben kann. Die andre Alternative ist, dass der Knorpel eine gewisse Affinität zu der Injektionsflüssigkeit besitzt, die auf deren physikalisch-chemischen Eigenschaften beruht. Wir haben jedoch bei dieser Untersuchung eine Flüssigkeit angewandt, deren physikalisch-chemische Eigenschaften die gleichen wie beim Blutserum sind (s. *Grönvall-Ingelman* 1944, 1945). Es kommt uns deshalb unwahrscheinlich vor, dass der Knorpel eine spezielle Neigung haben sollte, diese Flüssigkeit aufzunehmen und dabei aufzuquellen. Uns mutet die erste dieser beiden Alternativen am wahrscheinlichsten an, weil man sich vorstellen kann, dass der Knorpel geneigt ist, den Flüssigkeitsverlust zu kompensieren, den er zwischen der Tötung des Tieres und dem Beginn des Versuches erlitten hat. Die festgestellte Dickenzunahme besitzt an sich kein grösseres theoretisches oder praktisches Interesse; um so wertvoller ist es aber, sie zu kennen,

wenn es die entsprechende Dickenzunahme für Gruppe III zu beurteilen gilt.

Die Dickenzunahme des Knorpels im Verlauf des Versuches ist für Gruppe III, statistisch sichergestellt, grösser als für Gruppe II. Dieser Unterschied muss bedeuten, dass während des Versuches in Gruppe III ein grösseres Flüssigkeitsvolumen in den Knorpel eingedrungen ist als während der entsprechenden Zeit in Gruppe II. Diese Flüssigkeit hat sicher wenigstens teilweise in Stärkeaufschwemmung bestanden, weil die Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpelsubstanz, wie oben gezeigt, in Gruppe III grösser ist als in Gruppe II.

Dass wirklich eine Dickenzunahme der Gelenkknorpel in Gruppe III zustande gekommen ist, wird dadurch bestätigt, dass eine ähnliche Zunahme beim Bestimmen des Verhaltens der totalen Knorpeldicke unmittelbar nach Abschluss der kurzen Kompressionsperioden nachgewiesen werden kann. Die hierbei konstatierte Dickenzunahme ist nicht grösser als diejenige, welche für die Gelenkgruppe II beobachtet wurde. Dies Verhalten beruht indessen darauf, dass die totale Knorpeldicke so bald nach Aufhören der Kompression bestimmt wurde, dass der Knorpel keine Zeit gehabt hatte, sich in voller Ausdehnung zu »erholen«.

#### D. *Kompressibilität des Knorpels.*

Es muss als bemerkenswert gelten, dass die Kompressibilität des Knorpels im Verlauf des Versuches (ca. 1 Stunde) nicht nennenswert verändert worden ist, trotzdem die Knorpel während dieser Zeit mehr als 700 Kompressionen mit einer Gesamtdauer von ca. 6 Min. ausgesetzt wurden. Das Leistungsvermögen des Knorpels ist in dieser Hinsicht bedeutend besser unter den Versuchsbedingungen, die für Gelenkgruppe III angewandt wurden, als wenn man die entsprechenden Verhältnisse ohne Zufuhr einer geeigneten Flüssigkeit zu den Markhöhlen der Knochenenden untersucht. Dies erweist deutlich die Wichtigkeit der Flüssigkeitszufuhr für die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Knorpels.

Die grosse Resistenz der Gelenkknorpel unter den angewandten Versuchsbedingungen geht auch daraus hervor, dass die während jeder kleinen Druckserie erzielte Kompressionssteigerung für beide Gelenkknorpel zusammen nur etwa  $30 \mu$  beträgt.

E. *Erholungsvermögen der Gelenkknorpel nach der Kompression.*

Die Erholung des Knorpels nach den kurzen Kompressionsserien ist sehr gut. Sie erreicht nämlich binnen ca. 2 Sek. den gleichen Wert wie eine Kompression, die dadurch erzielt wird, dass man das Gelenk ca.  $\frac{1}{2}$  Sek. lang mit 2 kgf unmittelbar nach einer Ruheperiode belastet. Nach jenen 2 Sek. vollzieht sich die Erholung bedeutend langsamer. Dauert nämlich die Entlastung 120 Sek. an, so entfallen ca.  $\frac{3}{4}$  der Erholung auf die ersten 2 Sek., während die darauffolgenden 30 Sek.  $\frac{1}{8}$  und die restlichen 90 Sek.  $\frac{1}{8}$  der Erholung umfassen. Alles dies spricht stark dafür, dass der Knorpel unter den angewandten Versuchsbedingungen sehr gute physikalische Eigenschaften besitzt, die sich den während des Lebens geltenden Verhältnissen nähern dürften.

### KRITISCHER EXKURS

Bei Betrachtung der erhaltenen Untersuchungsergebnisse erhebt sich selbstverständlich die Frage, inwieweit Fehlerquellen darauf eingewirkt haben können. Wie aus der obigen Beschreibung erhellt, sind wir stets bestrebt gewesen, nach Möglichkeit unter physiologischen Verhältnissen zu arbeiten. Dies ist, in Übereinstimmung mit praktisch allen experimentellen biologischen Untersuchungen, nicht vollständig gelungen. Die wesentliche Fehlerquelle dürfte sein, dass die Gelenke während der Dauer des Versuches keine normale Ernährung erhalten haben. Man kann sich vorstellen, dass dies verschiedenartige Schädigungen des Knorpels zur Folge gehabt hat, z. B. Veränderungen in seinen Durchlässigkeitsverhältnissen, die bei dieser Untersuchung von besonderer Bedeutung sind.

Wir sind uns der erwähnten Fehlerquelle voll bewusst, wollen jedoch gewisse Beobachtungen hervorheben, die dafür sprechen, dass die Gewebe des Gelenkes während des Versuches am Leben waren. Ferner haben wir eine Anzahl Faktoren wahrgenommen, die darauf hindeuten, dass die angewandte Methode Resultate ergibt, welche die während des Lebens herrschenden Verhältnisse ziemlich gut widerspiegeln dürften.

Die Synovialmembran mit ihrem Reichtum an Gefässen kann als ein verhältnismässig gut ernährtes Gewebe betrachtet werden. Die Ernährung des Gelenkknorpels ist spärlicher als diejenige der Synovialmembran. Hierfür spricht teils, dass der Gelenkknorpel eigener Blutgefässe entbehrt, teils, dass sein Stoffwechsel nur ca.  $\frac{1}{10}$  von dem des Bindegewebes ist. Hieraus folgt, dass die Synovialmembran höchstwahrscheinlich empfindlicher gegenüber Ernährungsstörungen sein muss als der Gelenkknorpel. Diese Auffassung wird dadurch bekräftigt, dass Knorpelstücke wochenlang in Nährlösung aufbewahrt werden können und danach bei der Implantation fortfahren zu wachsen. Dieser Gedankengang in bezug auf das Vermögen des Knorpels, Ernährungsstörungen zu überleben, betrifft vor allem dessen zelluläre Komponente. Etwas anderes ist es mit der Permeabilität des Knorpels, die in erster Linie an die Interzellulärsubstanz gebunden ist.

In sämtlichen zu Gruppe IV gehörigen Fällen ist eine Resorption von Stärkekörnchen aus der Gelenkhöhle in die Synovialmembran und die Gelenkkapsel konstatiert worden. Diese Resorption kann nicht durch eine Erhöhung des intraartikulären Druckes zustande gekommen sein, da nur 0,25 ccm Stärkeaufschwemmung injiziert wurden. Ebensowenig kann man von dem Umstand, dass die Blutzirkulation mit der Tötung des Tieres aufgehört hat, vernünftigerweise annehmen, dass er eine gesteigerte Permeabilität der Synovialmembran für Stärkekörnchen bewirkt haben sollte. Hieraus erhellt, dass die Permeabilitätsverhältnisse der Synovialmembran während des Versuches im grossen ganzen mit den während des Lebens herrschenden übereinstimmen dürften.

Die Permeabilitätsverhältnisse gegenüber Stärkekörnchen bei

lebendem Knorpel haben wir durch intravenöse Injektion einer Aufschwemmung von Reisstärke in Dextran an lebenden Kaninchen kontrolliert. Die Tiere weisen keine Krankheitszeichen nach der Injektion auf. Ein einige Stunden nach dem Eingriff getötetes Kaninchen hat Stärkekörnchen in seinen Gelenkknorpeln. Hieraus geht hervor, dass Stärkekörnchen auch unter, praktisch betrachtet, physiologischen Verhältnissen in die Gelenkknorpel eindringen können. Dies berechtigt zu der für die Beurteilung des Wertes unserer Untersuchungsergebnisse äusserst wichtigen Schlussfolgerung, dass in der Permeabilität des Gelenkknorpels für Stärkekörnchen zwischen lebenden Kaninchen und den Präparaten, die bei der vorliegenden Untersuchung angewandt wurden, kein *qualitativer* Unterschied besteht. Ein eventueller *quantitativer* Unterschied in der Permeabilität des Knorpels bei lebenden Tieren und in den untersuchten Präparaten hat nicht zum Gegenstand einer genaueren Nachprüfung gemacht werden können.

Die benutzte Injektionsflüssigkeit, Reisstärke in Dextran, dürfte auch als ein sehr geeigneter Indikator für die Knorpeler-nährung und die Bildung der Synovia betrachtet werden können. Dextran hat innerhalb der menschlichen Medizin ausgedehnte Anwendung als Infusionsflüssigkeit an Stelle von Blutplasma gefunden. Dies ist dadurch möglich geworden, dass Dextran praktisch dieselben physikalisch-chemischen Eigenschaften wie Blutplasma besitzt. Die Reisstärke, ein hohes Polysaccharid, verhält sich indifferent zu den Geweben und übt auf diese keinen nennenswerten Reiz aus. Er dürfte deshalb offenbar sein, dass, wenn Stärkekörnchen unter praktisch physiologischen Verhältnissen durch ein Gewebe passieren, die eigenen Gewebeflüssigkeiten des Körpers dieselbe Passage mindestens ebenso leicht durchlaufen. Hieraus folgt, dass die Einführung von Stärkekörnchen in ein Gewebe unter praktisch physiologischen Verhältnissen, wie sie im Zusammenhang mit der intravenösen Injektion von Stärkeaufschwemmung beim Kaninchen und der Beobachtung von Körnchen in den Gelenkknorpeln stattgefunden hat, dafür sprechen muss, dass auch unter völlig

normalen Verhältnissen eine Flüssigkeitsströmung in derselben Richtung vorliegt.

Mit Hilfe der Versuchsgruppen I, II, III und IV ist oben gezeigt worden, dass Stärkekörnchen nicht von der Gelenkhöhle, wohl aber von der darunterliegenden Markhöhle und dem Knochen aus in den Knorpel eindringen können. Hieraus folgt, dass die Stärkekörnchen, die nach der intravenösen Injektion von Stärkeaufschwemmung in den Gelenkknorpeln gefunden wurden, auf dem Wege durch die basalen Teile des Knorpels in diesen eingedrungen sein müssen.

Eine andere Frage von grösster Bedeutung für die Untersuchungsergebnisse ist, ob man vollkommen sicher sein kann, dass die Stärkekörnchen, die in den verschiedenen Teilen des Knorpels registriert wurden, wirklich dort gelegen haben, als der Versuch abgebrochen wurde, oder ob sie durch irgendeinen Mangel in der angewandten Histotechnik dorthin geführt worden sind. Gegen eine derartige Annahme sprechen teils der Umstand, dass wir nur solche Körnchen registriert haben, die soweit wir es beurteilen können, innerhalb des Schnittes lagen, und teils, was wichtiger ist, die sichergestellten Unterschiede in der Verteilung der Stärkekörnchen, die sowohl für die Gelenkköpfe als auch für die Gelenkpfannen zwischen den Gruppen I, II und III konstatiert werden konnten, trotzdem alle diese Gelenke genau dieselbe histotechnische Behandlung durchgemacht hatten. Ein weiterer Beweis dafür, dass keine solche systematische Fehlerquelle vorliegt, ist die Feststellung, dass die Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpelsubstanz in Gruppe III mit statistischer Sicherheit grösser ist als in den übrigen Gruppen.

Durch die oben gelieferte kritische Betrachtung über den Wert der Untersuchungsergebnisse haben wir folgende Hauptpunkte hervorheben wollen:

1. Wir sind uns der Tatsache voll bewusst, dass wir die vorliegende Untersuchung nicht unter völlig physiologischen Verhältnissen für die Gelenke haben ausführen können.

2. Für die Auffassung, dass die Gewebe der Gelenke während

des Versuches nicht in höherem Grade geschädigt worden sind, spricht teils der Umstand, dass in Gruppe IV eine Resorption von Stärkekörnchen aus der Gelenkhöhle in die Synovialmembran und die Gelenkkapsel stattgefunden hat, teils, dass in der Permeabilität des Gelenkknorpels für Stärkekörnchen zwischen lebenden Kaninchen und unserem Versuchsmaterial kein qualitativer Unterschied existiert.

3. Es gibt keinen triftigen Grund für die Annahme, dass eine Aufschwemmung von Reissstärke in Dextran als solche die Permeabilität des Knorpels steigern sollte.

4. Mängel in der Histotechnik können keine systematischen Fehler inbetreff der Verteilung der Stärkekörnchen in den verschiedenen Schichten der Gelenkknorpel mit sich gebracht und nicht die Ursache für die grössere Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit in Gruppe III gegenüber den Gruppen I, II und IV gebildet haben. Die konstatierte Verteilung der Stärkekörnchen in den verschiedenen Materialgruppen muss also während des Versuches entstanden sein.

Gestützt auf das oben Angeführte halten wir uns für berechtigt, den Schluss zu ziehen, dass prinzipiell dieselbe Flüssigkeitsströmung durch die Gelenkknorpel, die in unseren Präparaten stattgefunden hat, auch unter rein physiologischen Verhältnissen vor sich gehen muss. Hieraus folgt erstens, dass der Knorpel zum grösseren oder geringeren Teil von den Gefässen der darunter gelegenen Markhöhle bzw. des Knochens aus ernährt wird, und zweitens, dass, wenn der Knorpel Kompressionen ausgesetzt wird, Flüssigkeit aus der Markhöhle durch den Gelenkknorpel in die Gelenkhöhle passiert und auf diese Weise an der Bildung der Synovia teilnimmt.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung dürften folgendermassen zusammengefasst werden können:

1) Nach intraarterieller Injektion einer Stärkeaufschwemmung (Gelenkgruppe I) können in den hyalinen Gelenkknorpeln Stärkekörnchen nachgewiesen werden. Die Körnchen sind hierbei

so verteilt, dass ca.  $\frac{3}{4}$  von ihnen in dem basalen und  $\frac{1}{4}$  in dem mittleren Drittel des nicht verkalkten Knorpels liegen.

2) Wird eine Stärkeaufschwemmung eine Stunde lang unter physiologischem Druck in die Markhöhlen der Knochenenden injiziert (Gelenkgruppe II), so können danach Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln nachgewiesen werden. Die Körnchen sind hierbei so in der nicht verkalkten Partie des Knorpels verteilt, dass die Hälfte in seinem basalen,  $\frac{1}{3}$  in seinem mittleren und  $\frac{1}{6}$  in seinem oberen Drittel liegt. Dies bedeutet, dass die Körnchen bei dem erwähnten Verfahren näher an der Knorpeloberfläche liegen als nach der intraarteriellen Injektion.

3) Wird eine Stärkeaufschwemmung in gleicher Weise, wie sie für die Gelenkgruppe II beschrieben wurde, injiziert, aber werden die Gelenkknorpel gleichzeitig periodischen, physiologischen Kompressionen ausgesetzt (Gelenkgruppe III), so erhält man eine ganz andere Verteilung der Stärkekörnchen, die in dem nicht verkalkten Knorpel nachgewiesen werden können. Hierbei liegen nämlich in dessen basalem und mittlerem Drittel je ca.  $\frac{1}{4}$  der Körnchen, während sich die restliche Hälfte in dem oberen Drittel befindet.

4) Werden die Gelenke in gleicher Weise wie in Gruppe III behandelt, jedoch mit dem Unterschied, dass den Markhöhlen der Knochenenden während des Versuches Dextran ohne Stärke zugeführt und in die Gelenkhöhle vor Beginn der Gelenkkompressionen 0,25 ccm Stärkeaufschwemmung injiziert wird (Gruppe IV), so werden in einzelnen Fällen Stärkekörnchen in der Oberflächenschicht der Gelenkknorpel angetroffen. Die übrigen Teile der Gelenkknorpel sind ganz frei von Stärke.

5) Nach der intraarteriellen Injektion der Stärkeaufschwemmung ist die Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpelsubstanz grösser im Knorpel der Gelenkpfanne als in demjenigen des Gelenkkopfes. Dies kann eventuell mit dem von *Holmdahl* und *Ingelmark* nachgewiesenen Verhalten zusammenhängen, dass der relative Gehalt an zellulärer Substanz in dem Scapulaknorpel des Kaninchens geringer als in seinem Humerusknorpel ist.

6) Die Anzahl Stärkekörnchen pro Volumeneinheit Knorpel

ist in Gelenkgruppe III grösser als in den anderen Gruppen. Dies zeigt, dass die Flüssigkeitsströmung im Knorpel im Zusammenhang mit der gesteigerten funktionellen Inanspruchnahme zunimmt.

7) Eine sichere Registrierung der Menge der Gelenkflüssigkeit ist nicht vorgenommen worden. Bei einer groben subjektiven Schätzung hat man jedoch den Eindruck, als ob die Synovia in den Gelenken, deren Knorpel periodisch komprimiert wurde, reichlicher sei als in den übrigen Gelenken. Schlüssige Beweise hierfür fehlen indessen.

8) Proben von der Gelenkflüssigkeit der Gelenkgruppen I und II haben niemals mit Sicherheit Stärkekörnchen enthalten. In entsprechenden Proben aus sämtlichen zu Gruppe III und IV gehörigen Gelenken haben Stärkekörnchen nachgewiesen werden können.

9) In Gelenken, wo Stärkeaufschwemmung bloss in die Markhöhlen der Knochenenden injiziert worden war, konnten Stärkekörnchen in den Kapillaren der Synovialmembran gefunden werden. Dies zeigt, dass zwischen diesen Gefässen und den Markhöhlen Anastomosen existieren.

10) In Gruppe IV, wo nur intraartikulär Stärke injiziert worden war, konnten Stärkekörnchen nach Beendigung des Versuches durchgehends in der Synovialmembran nachgewiesen werden.

11) Auch bei Gelenken, die zu Gruppe III gehören, wo in den Kapillaren der Synovialmembran keine Stärkekörnchen gefunden werden konnten, hat sich gezeigt, dass Proben der Gelenkflüssigkeit solche Körnchen enthielten.

12) Die vorgefundenen Verhältnisse bezüglich der Verteilung der Stärkekörnchen in den Gelenkknorpeln, bezüglich der Anzahl Körnchen pro Volumeneinheit des Gelenkknorpels und bezüglich des Vorkommens von Körnchen in der Gelenkflüssigkeit und den Kapillaren der Synovialmembran beweisen, dass die Stärkekörnchen auf dem Wege über die Knochen-Knorpelgrenze in den Gelenkknorpel gelangt und dann immer weiter in dem Knorpel hinaufgewandert sind bis sie schliesslich während des Kom-

pressionsverfahrens die Oberflächenschicht des Knorpels durchdringen haben und in die Gelenkhöhle gelangt sind.

13) Bei der Zufuhr von Stärkeaufschwemmung in die Markhöhlen der Knochenenden (Gelenkgruppe II) wird nach einigen Minuten eine Verdickung der Gelenkknorpel erhalten. Dies beruht unseres Erachtens wahrscheinlich darauf, dass der Knorpel den Flüssigkeitsverlust zu ersetzen versucht, den er durch die mangelnde Blutzufuhr in dem Zeitintervall zwischen der Tötung des Tieres und dem Beginn der Stärkeinjektion erlitten hat.

14) In Gelenkgruppe III wird ebenfalls eine Verdickung der Gelenkknorpel im Laufe des Versuches erhalten. Diese Verdickung ist indessen grösser als diejenige in Gruppe II. Da die Knorpel in Gruppe III ausserdem mehr Stärkekörnchen pro Volumeneinheit als in Gruppe II enthalten, spricht dies dafür, dass die Knorpelverdickung durch eine Flüssigkeitszufuhr zum Knorpel von der Markhöhle aus entsteht.

15) Die Kompressibilität des Knorpels wird unter den Bedingungen, die in Gruppe III angewandt werden, nicht verändert, trotzdem ca. 700 Kompressionen mit einer Gesamtdauer von ungefähr 6 Min. im Verlauf einer Stunde auf den Knorpel ausgeübt werden.

16) Die Neigung des Knorpels, nach den Kompressionen sein ursprüngliches Volumen wiederanzugewinnen, ist gross und erfährt im Laufe des Versuches keine nennenswerte Veränderung.

17) Die unter Punkt 15 und 16 hervorgehobenen Verhältnisse deuten darauf hin, dass der Knorpel unter den angewandten Versuchsbedingungen gute physikalische Eigenschaften besitzt. Dieselben sind bedeutend besser als bei Gelenkknorpel mit zugehörigem Knochen, der keine Flüssigkeitszufuhr auf dem Wege über die Markhöhle des Knochens erhält. Dies zeigt, dass die Versuchsbedingungen, die bei dieser Untersuchung angewandt wurden, sich den während des Lebens herrschenden Verhältnissen nähern. Diese Tatsache spricht ihrerseits in gewissem Sinne dafür, dass die Feststellungen, die bei der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich der Flüssigkeitsströmungen in den Gelenkknorpeln, der Bildung der Gelenkflüssigkeit usw. gemacht wurden, auch bei dem lebenden Individuum Gültigkeit besitzen.

## SUMMARY

The present investigation purports to contribute towards our knowledge of the nutrition of the articular cartilage and the production of synovial fluid under various functional conditions.

A brief historical survey is given of earlier and recent conceptions pertaining to these problems. As for the conceptions generally acknowledged at present, we refer chiefly to the large work by *Bauer, Ropes and Waine (1940)*.

We have worked with shoulder-joints of rabbits. The material can be divided into 4 groups.

1st Group:—The joints were quickly removed from the newly killed animal. Prior to killing the animal, the cranial part of the body was flushed with normal saline and subsequently with dextran, or with a suspension of pulverized rice starch in dextran. The suspension contained about 1,000 starch particles per mm<sup>3</sup>. As regards the size of the particles, see Fig. 1.

2nd Group:—The joints were treated in the same way as in Group I. After removal of the joints, the above starch suspension was under physiological pressure for one hour injected into the medullary cavities of the scapula and humerus. The injection was carried out by means of cannulas, after the bones having been cast into blocks of Wood's metal (Fig. 2). The joint with the blocks was fixed in an apparatus for registering the compressibility (Fig. 4). This apparatus was constructed so that the changes which the thickness of the cartilages will undergo as fluid is being injected, could be very accurately estimated.

3rd Group:—The joints were treated in the same way as in Group II. During injection of fluid into the medullary cavities of the bones, the articular surfaces were periodically pressed against each other in the apparatus for registering the compressibility. This was done in such a way that the conditions obtaining when the animals are running about, were imitated as closely as possible.

4th Group:—The joints were treated in the same way as in Group III. The fluid injected into the medullary cavities was pure dextran. Before the start of the experiment, 0.25 ml of the

suspension of rice starch was injected into the articular cavity via the articular capsule.

The experiments having been perfected, sections from the articular cartilages and articular capsules were prepared with a freezing microtome. The thickness of the sections was  $30\mu$ . The staining was done with a solution of iodine and potassium iodide. All precautions were taken to avoid displacement of the starch particles in connection with the histo-technical preparation. 20 sections of each articular cartilage were systematically and accurately examined with a high-power microscope. All starch particles situated definitely *within* the sections were counted.

The cartilage was divided into 3 layers, the superficial third, i.e. adjacent to the joint cavity, the middle third, and the basal third, i.e. adjacent to the calcified cartilaginous stratum. The distribution of the particles over those 3 layers was noted.

The procedure used was subjected to critical examination. Thus it was shown, that we have applied a method of investigation which better reproduces the conditions obtaining during life than previous investigations in this field of knowledge.

The principal results of the present investigation may be briefly summarized as follows:—

- (1) In the joints comprised in Group I, starch can be demonstrated in the hyaline articular cartilage. The particles are so distributed that about  $\frac{3}{4}$  of them are found in the basal and  $\frac{1}{4}$  in the middle third of the non-calcified cartilage.
- (2) In the joints comprised in Group II, starch particles can be demonstrated in the articular cartilage. The particles are so distributed that  $\frac{1}{2}$  of them are lying within the basal,  $\frac{1}{3}$  within the middle, and  $\frac{1}{6}$  within the superficial third. This tends to show that with this method particles lie nearer the cartilage surface than after intraarterial injection.
- (3) In the joints comprised in Group III, quite different distribution of the starch particles is revealed. About  $\frac{1}{4}$  of the particles are lying within the basal and the middle third respectively of the cartilage, while the remaining  $\frac{1}{2}$  are found in the superficial third.
- (4) In the joints comprised in Group IV in rare cases starch

particles have been found only within the uppermost part of the superficial layer of the articular cartilage. The remaining portions of the latter were entirely devoid of starch.

(5) After intra-arterial injection of starch infusion, the number of starch particles per volume unit of cartilage substance is greater in the cartilage of the socket than in that of the condyle. This fact can possibly be connected with an observation by *Holmdahl* and *Ingelmark*, viz, that in the rabbit the relatively content of cellular substance is lower in the articular cartilage of the scapula than in that of the humerus.

(6) The number of starch particles per volume unit of cartilage is greater in Group III than in the other Groups. From this it emerges that the fluid circulation within the cartilage increases with growing functional strain.

(7) As regards the amount of synovial fluid no accurate registration was carried out. On approximate subjective estimation, the synovial fluid seemed to be more plentiful in joints of the 3rd group than in those of the others. This was not definitely established, however.

(8) Specimens of the fluid in the 1st and 2nd groups have never definitely contained starch particles. In corresponding specimens from all joints in the 3rd and 4th groups, starch particles could be demonstrated.

(9) In joints comprised in Group I starch particles were found in the capillaries of the synovial membrane. This tends to show that there are anastomoses between these vessels and the medullary cavity.

(10) After the experiment in the 4th group, starch particles could be consistently demonstrated in the synovial membrane.

(11) Also in joints belonging to the 3rd group, where starch particles have not been found in the capillaries of the synovial membrane, specimens of the synovial fluid proved to contain such particles, however.

(12) Our observations recorded in the present paper seem to entitle us to the conclusion that starch particles have entered the articular cartilage via the bone-cartilage-limit. Subsequently they have gradually proceeded upwards in the cartilage, during

the pressure treatment pervading the uppermost part of the superficial layer into the articular cavity.

(13) Some few minutes after the beginning of the injection of starch suspension into the medullary cavity of the bones (the 2nd group) a swelling of the cartilage can be noted. This swelling may probably be due to the fact that the cartilage tends to replace the loss of fluid, which it suffered by the failing blood-supply in the interval between the killing of the animal and the start of the starch injection.

(14) Also in the 3rd group a swelling of the articular cartilages during the experiment can be observed. However, this swelling is more conspicuous than in the 2nd group. As in Group III the articular cartilage in addition contains more starch particles per volume unit than in Group II, this findings should be interpreted by the swelling of the cartilage resulting from its being supplied with fluid from the medullary cavity.

(15) The compressibility of the cartilage was not changed under the conditions obtaining in the 3rd group, notwithstanding the fact that the cartilage was for one hour exposed to about 700 compressions with a total duration of about 6 minutes.

(16) The tendency of the cartilage to resume its initial volume after the compressions is strong, and does not change materially during the experiment.

(17) The findings reported under (15) and (16) suggest that under the experimental conditions obtaining, the cartilage has satisfactory physical properties. These properties are considerably superior to those of articular cartilage attained to the bone belonging to it, i.e. not supplied with fluid via the medullary cavity of the bone. From this it emerges that the conditions selected in the present investigation correspond closely to those obtaining during life. This supports the conception that the statements made in this paper with respect to the fluid circulation within the articular cartilages, the production of synovial fluid, etc. apply also to living subjects.

## RÉSUMÉ

Contribution à l'étude de l'irrigation des cartilages articulaires et du mode de production de la synovie dans des conditions fonctionnelles variées. Vue d'ensemble historique des conceptions anciennes et récentes. En ce qui concerne la théorie actuellement admise nous référons aux travaux de *Bauer, Ropes* et *Waine* (1940).

1. I. Groupe. Nous avons constaté la présence de particules d'amidon de riz dans les cartilages après injection intraartérielle d'une émulsion d'amidon. La répartition de ces particules dans l'épaisseur du cartilage est la suivante : Les  $\frac{3}{4}$  des particules se trouvent dans le tiers inférieur et  $\frac{1}{4}$  dans le tiers moyen du cartilage non ossifié.

2. II. Groupe. Si on injecte pendant une heure sous pression physiologique une émulsion d'amidon dans la cavité médullaire de l'omoplate et de l'humérus on constate ensuite la présence de particules d'amidon dans l'épaisseur des cartilages. La répartition diffère de la répartition après injection intraartérielle : la moitié des particules se trouve dans la couche profonde.  $\frac{1}{3}$  dans le tiers moyen et  $\frac{1}{6}$  dans le tiers supérieur. Par ce procédé les particules sont plus près de la surface du cartilage qu'après injection intraartérielle.

3. III. Groupe. La répartition des particules d'amidon dans les cartilages est tout autre, si les cartilages sont soumis à des pressions périodiques et physiologiques pendant l'injection sous pression dans les cavités médullaires. La moitié environ des particules se trouve dans le tiers inférieur et le tiers moyen, l'autre moitié dans le tiers supérieur.

4. IV. Groupe. Même technique que pour le groupe III. Le liquide injecté dans les cavités médullaires ne contenait pas d'amidon. (Dextran pur). Une injection intraarticulaire de 0,25 ccm. d'émulsion d'amidon était faite avant de commencer les compressions de l'articulation. Nous avons trouvé des particules d'amidon dans plusieurs coupes de la partie superficielle des cartilages mais pas dans toutes les coupes — rien dans les parties profondes.

5. Après injection intraartérielle, nous avons trouvé davantage de particules d'amidon dans le cartilage de l'omoplate que dans celui de la tête de l'humérus. Ceci provient peut-être de ce fait : la densité cellulaire du cartilage scapulaire est moindre que celle du cartilage huméral.

6. Le nombre de particules d'amidon dans les cartilages est plus grand dans le groupe III que dans les autres groupes. L'irrigation des cartilages augmente donc d'intensité quand l'articulation travaille.

7. Nous n'avons pas mesuré la quantité de synovie dans les articulations. Nous avons néanmoins l'impression qu'il y a davantage de synovie dans les articulations soumises à des compressions périodiques.

8. Nous n'avons jamais trouvé de particules d'amidon dans la synovie des groupes I et II, tandis que les prélèvements des groupes III et IV contenaient régulièrement des particules d'amidon.

9. Nous avons trouvé de particules d'amidon dans les capillaires de la membrane synoviale des articulations injectées seulement par voie médullaire — ceci prouve la présence d'anostomoses entre les capillaires synoviales et les capillaires médullaires.

10. IV groupe. Injection intraarticulaire d'amidon. Ni injection intraartérielle, ni médullaire. La présence de particules d'amidon a été constatée dans la membrane synoviale de toutes les articulations.

11. Dans les articulations du groupe III, où les capillaires synoviales ne contenaient pas de particules d'amidon, nous avons trouvé ces particules dans plusieurs prélèvements de synovie.

12. Toutes nos observations semblent prouver le passage dans la cavité articulaire des particules d'amidon à travers les cartilages venant de la cavité médullaire.

13. Nous avons constaté une augmentation de volume des cartilages articulaires quelques minutes après introduction sous pression d'une émulsion d'amidon dans les cavités médullaires — les cartilages remplacent le liquide perdu par manque d'irriga-

tion artérielle pendant le temps qui s'écoule entre la mort de l'animal et le commencement de l'expérience.

14. Une augmentation de volume des cartilages est également constatée dans le groupe III pendant l'expérience ; plus grande même que pour le groupe II. Les cartilages du groupe IV contiennent également d'avantage de particules d'amidon que ceux du groupe II ce qui semble prouver que l'augmentation de volume des cartilages provient d'un apport de liquide de la cavité médullaire.

15. La compressibilité du cartilage ne varie pas malgré 700 compressions d'une durée totale de 6 minutes environ pendant la durée de l'expérience. ( Une heure ).

16. Le cartilage reprend tout de suite son volume normal après la compression aussi bien au début qu'à la fin de l'expérience.

17. Les constatations mentionnées sous les numéros 15 et 16 montrent, que le cartilage est en bon état physique dans les conditions d'expérience données — meilleur même que celui d'un cartilage articulaire adhérent à l'os qui ne reçoit pas de liquide par la voie médullaire. Ceci montre que les conditions d'expérience s'approchent des conditions normales pendant la vie et permet de penser que le résultat de nos recherches concernant la circulation dans les cartilages articulaires et la production de synovie s'applique également à l'individu vivant.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- Arnold, J.*: Virchows Archiv. 1878: 73: 125.  
*Axhausen, G.*: Virchows Archiv. 1924: 252: 458.  
*Bauer, W., Ropes, M. W., Waine, H.*: Physiol. rev. 1940: 20: 272.  
*Bier, A.*: Deutsch. med. Wchnschr. 1919: 45: 1: 225.  
*Bür, E.*: Arch. Entw., mechan. 1926: 108: 739.  
*Fisher, Timbrell, A. G.*: Brit. J. Surg. 1922: 10: 52.  
*Gerlach, L.*: Zit. Arnold 1878.  
*Grönwall, A., Ingelman, B.*: Acta physiol. scand. 1944: 7: 97.  
*Grönwall, A., Ingelman, B.*: Acta physiol. scand. 1945: 9: 1.  
*Hildebrand*: Deutsch. Z. Chir. 1896: 42: 292.  
*Holmdahl, D. und Ingelmark, B. E.*: Unter Veröffentlichung in Acta Anatom.

- Hunter, W.*: Philos. Transactions. 1742: 42: 514.  
*Ischido, B.*: Virchows Archiv. 1923: 244: 424.  
*Ito, L. K.*: Brit. J. Surg. 1924: 12: 31.  
*Leidy*: Zit. Ito 1924.  
*Lubosch, W.*: Bau und Entstehung der Wirbeltiergelenke. Jena 1910.  
*Müller, W.*: Biologie der Gelenke. Leipzig 1929.  
*Nussbaum, A.*: Deutsch. med. Wehnschr. 1923: 49: 1: 849.  
*Schaffer, J.*: Das Knorpelgewebe in v. Möllendorff, W. Handb. d. mikr. Anat. d. Mensch. 1930: 2: 2: 210.  
*Schmieden, V.*: Arch. klin. Chir. 1900: 62: 542.  
*Strangeways, T. S. P.*: Brit. med. J. 1920: 1: 661.  
*Toynbee, J.*: Philos. Transactions. 1841: 1: 159.  
*Wollenberg, G. A.*: Arch. Orthop. Mechanother. und Unfallchir. 1909: 7: 226.