Morphologische Veränderungen an der sich entwickelnden Mandibula

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt
dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von
Karina Möller
geboren am 20.12.1979 in Marienberg

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 5

2 MATERIAL UND METHODEN 8

3 ERGEBNISSE 10

3.1 Befunde an den Skeletten aus der Anatomischen Sammlung 10
3.1.1 Charakterisierung und Altersbestimmung der Skelette 10
3.1.2 Vermessung der Mandibulae 11

3.2 Befunderhebung und Befunde bei der makroskopischen Präparation ... 16

3.3 Befunde aus den bildgebenden Verfahren 26
3.3.1 Röntgen 26
3.3.2 Computertomografie (CT) 28
3.3.3 Magnetresonanztomografie (MRT) 31

3.4 Erstellung und Befundung der histologischen Präparate 34
3.4.1 Gewinnung des Untersuchungsgutes 34
3.4.2 Histotechnische Bearbeitung der Kiefergelenke 34
3.4.3 Auswertung der histologischen Präparate 35
3.4.4 Allgemeiner Überblick 35
3.4.5 Der Processus condylaris 38

4 DISKUSSION 50

4.1 Makroskopische Befunde an der fetalen und frühkindlichen Mandibula . 51

4.2 Makroskopisch-topographische Präparation der Kiefergelenkregion 54

4.3 Radiologische Untersuchungen 58

4.4 Histologische Untersuchungen 59
4.4.1 Entwicklungsbedingte Veränderungen am condylären Knorpel 66

4.5 Schlussfolgerungen 69

5 ZUSAMMENFASSUNG 72

6 LITERATURVERZEICHNIS 74

Abkürzungsverzeichnis

A./ Aa.	Arteria/ Arteriae
bzw.	beziehungsweise
CT	Computertomographie
DFOV	Display Field of View
EW.	Entwicklungswoche
M./Mm.	Musculus/ Musculi
MRT	Magnetresonanztomographie
N./ Nn.	Nervus/ Nervi
Proc.	Processus
R./ Rr.	Ramus/ Rami
V./ Vv.	Vena/ Venae

1 Einleitung

Treten während des Wachstums Schädigungen oder Defekte am Kiefergelenk auf, stehen die Therapeuten oft vor erheblichen Problemen. Sie sehen sich unter anderem mit angeborenen Dysplasien, vor allem im Rahmen von Fehlbildungssyndromen wie Dysostosis mandibulofacialis oder Goldenhar-Syndrom, sowie entzündlichen Defekten, etwa infolge einer Otitis media, oder Kiefergelenkstraumen, welche unbehandelt zur Ankylosierung und damit Entwicklungsstörungen führen, konfrontiert. Des weiteren kann es bei der juvenilen Polyarthritis zu einer Beteiligung des Kiefergelenkes kommen [Reich 1995]. Die Inzidenz von Tumoren im Unterkieferbereich, die eine Resektion erfordern, ist im Kinder- und Jugendalter dagegen vergleichsweise gering [Cornelius et al. 1994]. In Abhängigkeit vom Alter der Betroffenen, der Lokalisation des Defektes und begleitenden Weichteilschädigungen besteht die Gefahr, dass sich das Untergesicht im Sinne einer hemifacialen Mikrosomie asymmetrisch entwickelt. Je weiter das Wachstum voranschreitet, umso deutlicher wird die Ausprägung der Asymmetrie, wobei deren Ausmaß nicht immer dem fehlenden anatomischen Substrat entspricht [Farmand 1994]. Dabei sind von den Wachstumsretardierungen nicht nur die primär hypoplastischen Anteile des Unterkiefers betroffen, sondern auch sekundär weitere Teile des Gesichtsschädels. Dazu gehören der Oberkiefer, die Nase und die Orbita auf der hypoplastischen Seite. Resultierend ergeben sich irreversible Funktionseinschränkungen, die zu Behinderungen bei der Nahrungsaufnahme, des Kauvorgangs und der Sprache führen [Cornelius et al. 1994; Michel et al. 1994]. Aufgrund der Gesichtsdeformitäten entwickeln sich außerdem oft noch psychische Probleme, so dass eine frühestmögliche Behandlung angestrebt werden sollte [Kaban et al. 1998; Klein 1994].

Führen dabei konservative kieferorthopädische Behandlungsmethoden nicht zu ausreichenden Ergebnissen, so steht eine operative Behandlung des Unterkiefers als Alternative im Vordergrund der therapeutischen Überlegungen [Hellner et al. 1994; Klein 1994]. Gelingt damit die Korrektur, können sekundäre Fehlbildungen in den angrenzenden Regionen weitestgehend verhindert werden. Heute wird deswegen eine Mandibula-Rekonstruktion bereits in der Wachstumsphase angestrebt [Farmand et al. 1994]. Zur Rekonstruktion des Kiefergelenks, insbesondere des Gelenkfortsatzes, werden verschiedene Verfahren angegeben: der alloplastische Gelenkersatz durch eine Prothese, das autologe ventrale Rippentransplantat vom costochondralen Übergang, das autologe freie Beckenkammtransplantat und autologe mikrochirurgische Knochenspäne vom Beckenkamm, von der Scapula oder von der Fibula. Auch das Os metatarsale wird diskutiert [Ordnung et al. 1994].
Im Kindesalter wird der primär autologe Condylusersatz durch ein Knorpel-Knochen-Transplantat, welches die Möglichkeit des Mitwachsens bietet, der Rekonstruktion durch alloplastische Platzhalter vorgezogen, da damit weitere korrigierende Operationen in ihrem Ausmaß erheblich reduziert werden können oder sogar entfallen [Reich 1995]. Obwohl nicht unumstritten [Guyuron et Lasa 1992], kommt der costochondrale Übergang einer Rippe dafür am häufigsten zur Anwendung [Lindquist et al. 1986; Ordnung et al. 1994; Farmand et al. 1994].

Auf der Suche nach geeigneten Transplantaten zur Rekonstruktion des gelenktragenden Mandibula-Abschnittes im Kindesalter, sind fundierte Kenntnisse zum anatomischen Aufbau und zu den Wachstumsvorgängen an der Mandibula absolute Voraussetzung. Damit besteht die Möglichkeit, aus anatomischer Sicht ähnliche Skelettabschnitte oder Gelenke auf ihre Transplantierfähigkeit zu prüfen und in entsprechende klinische Untersuchungen einzubeziehen.
Obgleich einige Autoren den Processus condylaris intensiv morphologisch untersucht haben [Durkin et al. 1973; Blackwood 1976; Öberg 1985; Schroeder 1992; Ben-Ami et al. 1992; Berraquero 1995], sind die Aussagen zum strukturellen Aufbau des Condylus nicht ausreichend und zum Teil widersprüchlich. Gleichzeitig wird in der Literatur eine Kontroverse darüber deutlich, ob der Gelenkknorpel des Kiefergelenkköpfchens als primäres Wachstumszentrum angesehen werden sollte

[Symons 1952; Baume 1970] oder lediglich der Funktion des adaptiven Remodellings dient [Durkin et al. 1973, Thilander et al. 1976]. Der Versuch eines Vergleichs des Knorpels am Processus condylaris mit der Knorpelwachstumszone in den Epiphysen der langen Röhrenknochen ist dabei die Grundlage für die Auffassung, dass vom Condylus aktives Wachstum ausgeht.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es deshalb, die topographischen Beziehungen am Ramus mandibulae, mit besonderem Interesse für den Processus condylaris und dessen Veränderungen während des Wachstums, anatomisch detailliert zu charakterisieren. Zudem sollte geklärt werden, ob und wo am Kiefergelenk eine Wachstumszone existiert und ob damit ein Vergleich mit den Wachstumszonen am langen Röhrenknochen berechtigt ist. Zur Erreichung des Zieles sollten sowohl makroskopische als auch mikroskopische Untersuchungen durchgeführt werden, die durch radiologische Verfahren zu ergänzen sind, um interessante Ergebnisse auf den Lebenden übertragen zu können.

2 Material und Methoden

Im Mittelpunkt stand der Ramus mandibulae mit seinen beiden Fortsätzen, Processus coronoideus und Processus condylaris. Von besonderem Interesse waren dabei die topographischen Verhältnisse am Processus condylaris.
Die Charakterisierung der anatomischen Strukturen erfolgte mittels makroskopischer Präparation, histologischer Schnittserien und röntgenologischer Methoden.

Für die Untersuchungen standen die Feten- und Kinderskelette der Anatomischen Sammlung, sowie fixiert ein Neugeborenes, zwei Feten und ein isolierter fetaler Unterkiefer zur Verfügung. Sie sind in der nachstehenden Tabelle 1 aufgeführt. Hinweise auf Entwicklungsanomalien oder Fehlbildungen lagen nicht vor.

Tabelle 1: *Untersuchungsgut*

	Geschlecht	**Alter**
1. Fetus	männlich	32. Entwicklungswoche
2. Fetus	weiblich	39. Entwicklungswoche
3. Neugeborenes	männlich	1 Woche
4. Unterkiefer	männlich	31. Entwicklungswoche

Die Präparate waren nach dem am Institut für Anatomie, Anatomie I, der Friedrich-Schiller-Universität Jena für diese Altersgruppe üblichen Verfahren fixiert worden. Präparat 1 und 2 wurden zunächst für drei Wochen in einer 5%ige Formalinlösung fixiert und danach verblieben sie in einer 3%igen Formalinlösung zur Aufbewahrung. Das Neugeborene und die isolierte Mandibula wurden in einer 2%igen Formalinlösung fixiert.
An 1, 2 und 3 wurde beiderseits die Regio faciei lateralis schichtweise präpariert, die einzelnen Präparationsschritte ausgewertet und fotografisch dokumentiert. Vor der Präparation erfolgte im Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie

der Friedrich-Schiller-Universität Jena eine Untersuchung der Kiefergelenke mit Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT). Von den isolierten Mandibulae wurden außerdem Röntgenaufnahmen unter Verwendung der Mammographietechnik angefertigt.

Nach Abschluss der Präparation wurden die Kiefergelenke mit den angrenzenden Knochenteilen entnommen und zur Gewinnung histologischer Schnitte in Paraplast eingebettet. Zur Verbesserung der Schneidbarkeit war eine Entkalkung mit new decalc® (Firma: Meditec; Burgdorf/ Deutschland) vorgenommen worden. Die Blöcke wurden in Serie geschnitten, wobei eine Schnittstärke von 10 µm angestrebt und jeder vierte Schnitt auf Sammelobjektträger gebracht wurde. Die Schnittserien wurden routinemäßig mit Azan oder Hämatoxylin-Eosin (HE) angefärbt und mikroskopisch untersucht. Teilweise wurden die Befunde fotografisch dokumentiert.

Zusätzlich standen histologische Schnitte von Kiefergelenken zur Verfügung, die freundlicherweise von Prof. Dr. med. Küpper (Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde der Friedrich Schiller Universität Jena) bereitgestellt worden waren.

3 Ergebnisse

3.1 Befunde an den Skeletten aus der Anatomischen Sammlung

3.1.1 Charakterisierung und Altersbestimmung der Skelette

Es konnten 7 historische fetale und kindliche Skelette aus dem Museum Anatomicum Jenense der Friedrich-Schiller-Universität Jena untersucht werden. Bei den Präparaten 1 und 5, siehe Tabelle 2, ist im Katalog eine exakte Altersangabe (5. Entwicklungsmonat / 10 Tage altes Neugeborenes) enthalten. Für die Altersbestimmung der anderen fünf Skelette wurden morphometrische Messungen vorgenommen und das Alter nach Rummer (1998), Fröber et al. (1996) und Merz (1988) sowie anhand des Zahnstatus nach Kohlbach u.a. (2003) bestimmt (Tabelle 2).

Tabelle 2: *Morphometrische Messungen an historischen Skeletten*

Skelette	Morphometrische Daten (in mm)	Ermitteltes Alter
1	Alter bekannt = Fet im 5. Entwicklungsmonat	
2	NSL = 125 FOD = 70 Femur = 55 Ulna = 40	20./21. SSW
3	BPD = 90 FOD = 105 Femur = 65 Ulna = 50	34./ 35. SSW
4	BPD = 100 FOD = 115	37.- 40. SSW
5	Alter bekannt = 10 Tage	
6	BPD = 110 FOD = 120	Neugeborenes
7	SSL = 660 Zahnstatus: Schneidezähne und erste Milchmolaren oben und unten vorhanden	12-16 Monate

3.1.2 Vermessung der Mandibulae

Um die Größenveränderungen am Unterkiefer in der Fetalperiode und im ersten Lebensjahr zu untersuchen, wurden die Mandibulae der Skelette zusätzlich vermessen. Die Messungen wurden mit einem Gleitzirkel nach der Methode von Martin und Saller (1957) durchgeführt. Als Referenzpunkte dienten das Gnathion (= derjenige Punkt des Unterrandes der Mandibula, der in der Mediosagittal-Ebene am meisten nach ventrokaudal hervorragt), das Gonion (= derjenige Punkt des Unterkiefers, an welchem der Basalrand des Corpus und der Hinterrand des Ramus zusammentreffen) und der höchste Punkt des Caput mandibulae (Abb. 2). Ist der Kieferwinkel wie beim Feten und Säugling noch stumpf und nicht deutlich ausgeprägt, dient der Knochenpunkt mit der höchsten Wölbung am Corpus mandibulae als Messpunkt (Präparat 1-6), (Abb. 1). Es wurden die Maße Gnathion - Gonion (= Corpus mandibulae) und Gonion - höchster Punkt des Corpus mandibulae (=Ramus mandibulae) bestimmt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: *Vermessung der kindlichen Unterkiefer*

Skelett	Alter	Corpus mandibulae rechts (in mm)	Ramus mandibulae rechts (in mm)
1	5 Monate	26	15
2	20./ 21. SSW	26	15
3	34./ 35. SSW	31	21
4	37.-40. SSW	36	22
5	10 Tage	35	23
6	Neugeborenes	38	23
7	12-16 Monate	45	30

Anhand dieser Daten wurden versucht, die Fotografien der Skelette im gleichen Vergrößerungsmaßstab herzustellen, so dass die Größenveränderungen im Verhältnis deutlich sichtbar werden (Abb. 3). Eine exakt maßstabsgerechte Darstellung war aufgrund der fehlenden Dreidimensionalität der Bilder nicht möglich.

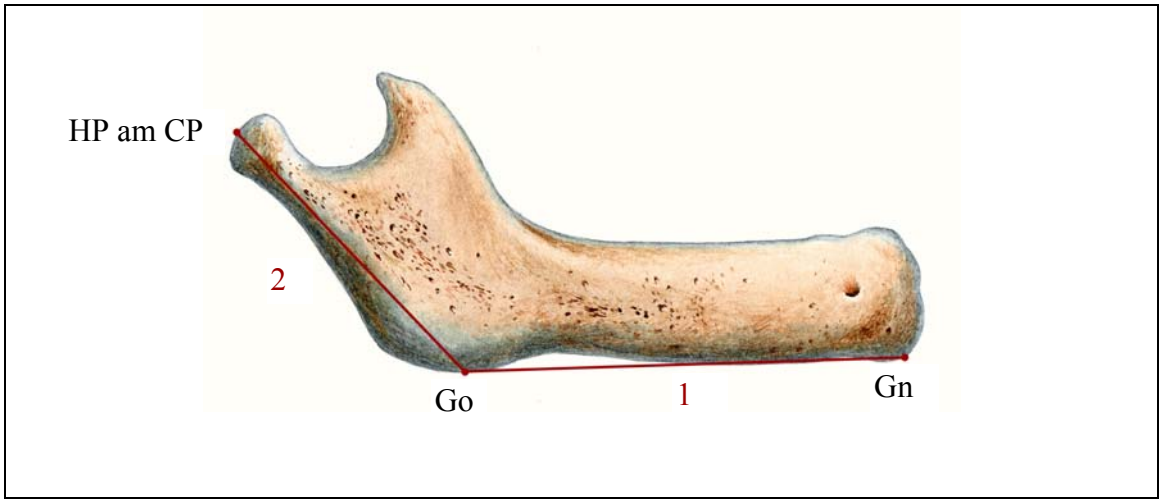


Abb. 1: *Referenzpunkte für die morphometrischen Messungen bei fetalen Mandibulae (Präparat 1-6). Go = Gonion, Gn = Gnathion, HP am CP = höchster Punkt am Caput mandibulae, 1 = Corpus mandibulae, 2 = Ramus mandibulae*

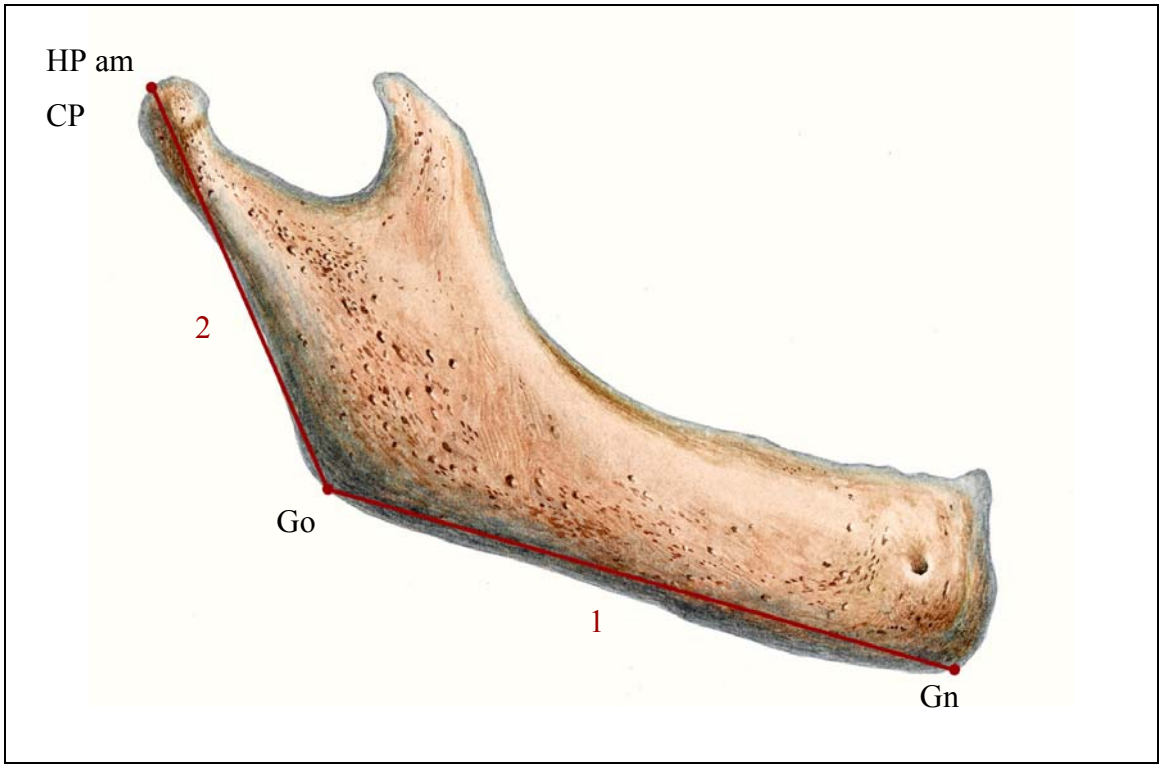
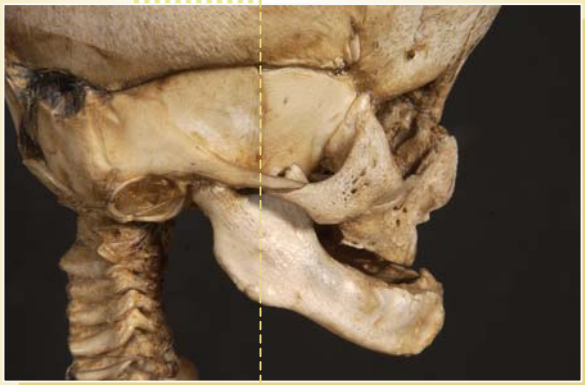


Abb. 2: *Meßmethode beim Kleinkind (Präparat 7). Angulus mandibulae deutlich weniger stumpf. Go = Gonion, Gn = Gnathion, HP am CP = höchster Punkt am Caput mandibulae, 1 = Corpus mandibulae, 2 = Ramus mandibulae*

1



2

3

4

Abb. 3: *Darstellung der morphologischen Veränderungen an der Mandibula (gelbe Linie entspricht dem Gonion)*

Bei der Betrachtung zeigt sich in diesem Zeitfenster eine nahezu gleichmäßige Größenzunahme von Corpus und Ramus. Das Corpus mandibulae hat im ersten Lebensjahr jedoch geringfügig mehr an Größe gewonnen als der Ramus mandibulae. Intrauterin und auch noch zum Zeitpunkt der Geburt ist der Angulus mandibulae stumpf und der Processus condylaris liegt mit dem Corpus mandibulae nahezu in einer Ebene. Erst im Laufe des ersten Lebensjahres werden stärkere Veränderungen sichtbar. Der Kieferwinkel wird zunehmend spitzer und der Ramus zeigt einen vertikaleren Verlauf.

Makroskopisch stellt sich der Proc. condylaris bis zum Zeitpunkt der Geburt als „carrot-shaped wedge“ (Durkin, 1973; Scheuer and Black, 2000) oder auch „cone-shaped“ (Sperber, 1989) dar. Wörtlich übersetzt bedeutet das zum einen „karottenförmiger Keil“ und zum anderen „kegelförmig“. Da die Form am ehesten einem Keil gleicht, soll in den folgenden Ausführungen die Bezeichnung „keilförmig“ bevorzugt werden. Dieses Merkmal verliert sich jedoch im Laufe des ersten Lebensjahres. Bei dem Skelett des einjährigen Kindes ist diese charakteristische Form nicht mehr zu erkennen.

Makroskopisch ist am Gelenkfortsatz kein Hinweis auf eine Wachstumszone erkennbar.

3.2 Befunderhebung und Befunde bei der makroskopischen Präparation

Die Präparation der Regio faciei lateralis erfolgte unter Verwendung einer Vergrößerungslupe (2-fache Vergrößerung) mit mikrochirurgischem Präparierbesteck und einer Kaltlichtquelle. Die einzelnen Präparationsschritte wurden jeweils fotodokumentiert.

Der erste Arbeitsschritt bestand in der Fensterung des gewünschten Präparationsgebietes (Abb. 4). Die Schnittlinie wurde so gewählt, dass alle relevanten Strukturen der seitlichen Gesichtsregion dargestellt werden können.

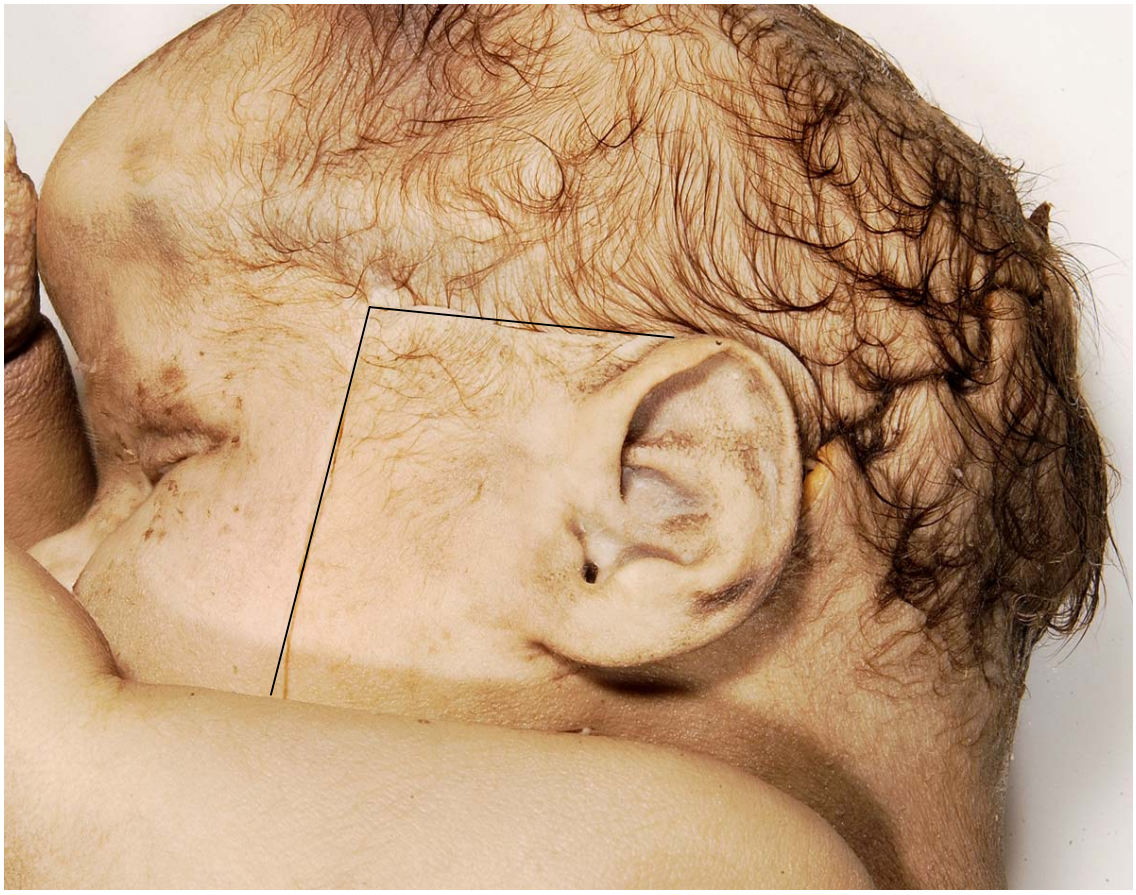


Abb. 4: *Darstellung des Präparationsfensters am Neugeborenen*

Die Haut wurde unter Schonung des Unterhautfettgewebes abpräpariert. Es wurden die oberflächlichen anatomischen Strukturen (Nerven, Gefäße, Muskulatur, Glandula parotis und Fettkörper) aufgesucht. Sie sind in Abb. 5 dargestellt.

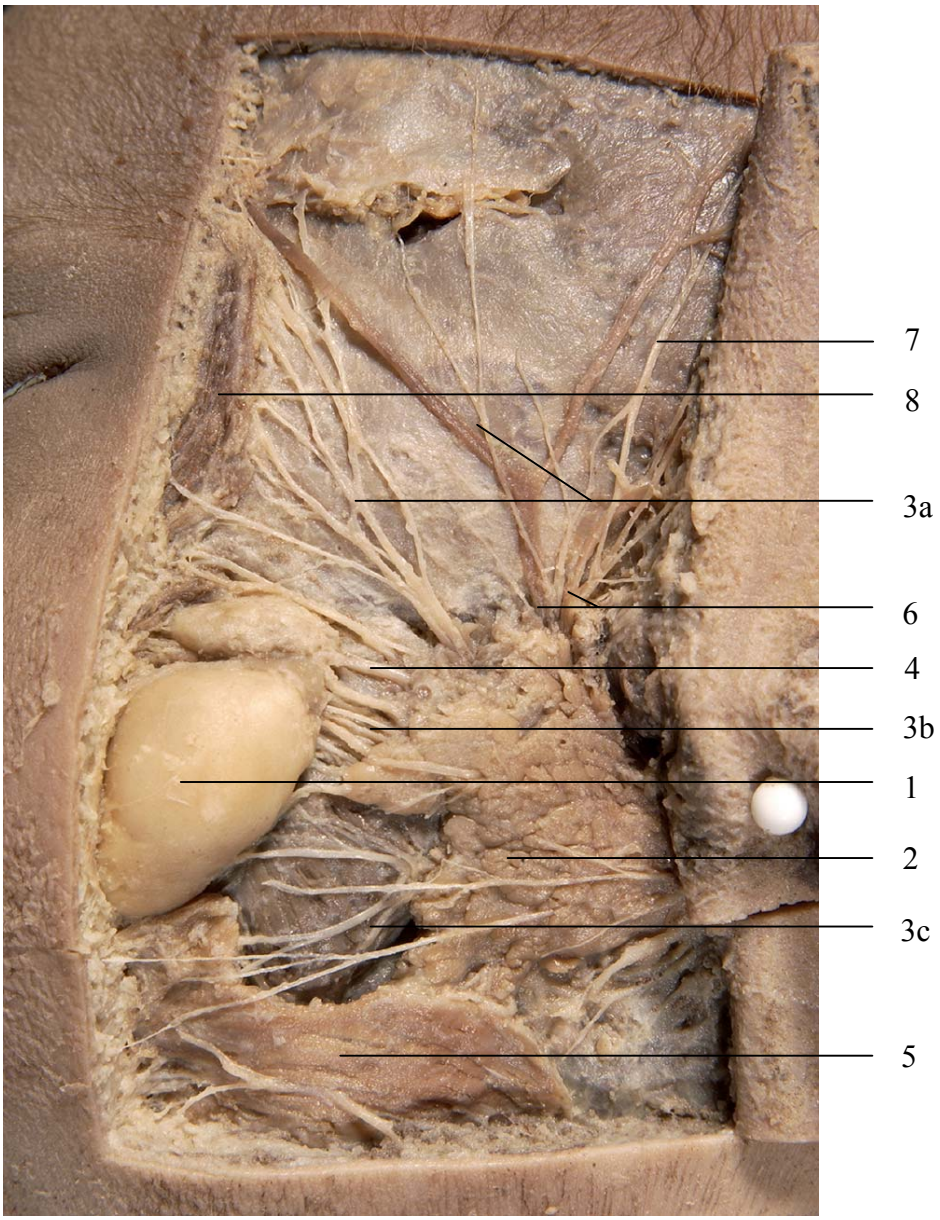


Abb. 5: *Oberflächliche Nerven und Gefäße der Regio faciei lateralis sinistra bei einem Feten der 39. Entwicklungswoche. 1 Bichat´scher Fettpfropf, 2 Glandula parotis, 3 Plexus facialis: 3a Rr. temporales et zygomatici, 3b Rr. buccales, 3c R. marginalis mandibulae, 4 Ductus parotideus, 5 Platysma, teilweise entfernt, 6 A., V. temporalis superficialis, 7 N. auriculotemporalis, 8 M. orbicularis oculi.*

An der seitlichen Gesichtsgegend des Neugeborenen fällt vor allem die Form und Ausdehnung der Ohrspeicheldrüse (*Glandula parotis*) auf. Diese ist nicht wie beim Erwachsenen länglich dreieckig mit unterer Spitze, sondern annähernd nierenförmig. Ihr oberer Rand überschreitet nicht den Jochbogen. Nach dorsal hin schmiegt sich die Drüse eng dem äußeren Gehörgang an. Der vordere Rand der Glandula parotis liegt auf dem M. masseter. Der untere Rand der Drüse liegt meist in gleicher Höhe wie der Angulus mandibulae. Er kann ihn aber auch, wie in Abb. 5, nach kaudal überschreiten. Der Ausführungsgang der Drüse (*Ductus parotideus*) verlässt dieselbe in ihrem oberen Drittel am vorderen Drüsenrand. In seinem Verlauf liegt er dem M. masseter auf und wird teilweise durch den Wangenfettpfropf bedeckt. Die Glandula parotis wird wie beim Erwachsenen vom Nervus facialis durchzogen, der in ihr den Plexus parotideus bildet (Abb. 6). Dabei verlaufen die Äste strahlenförmig vom Foramen stylomastoideum nach nasal. Nach der Verzweigung des Nerven innerhalb der Drüse treten an deren Vorderrand die Endäste Rami temporales et zygomatici, Rami buccales und der Ramus marginalis mandibulae hervor. Den ersten Abschnitt des Ramus marginalis mandibulae und des Ramus colli sieht man auf Abb. 6.

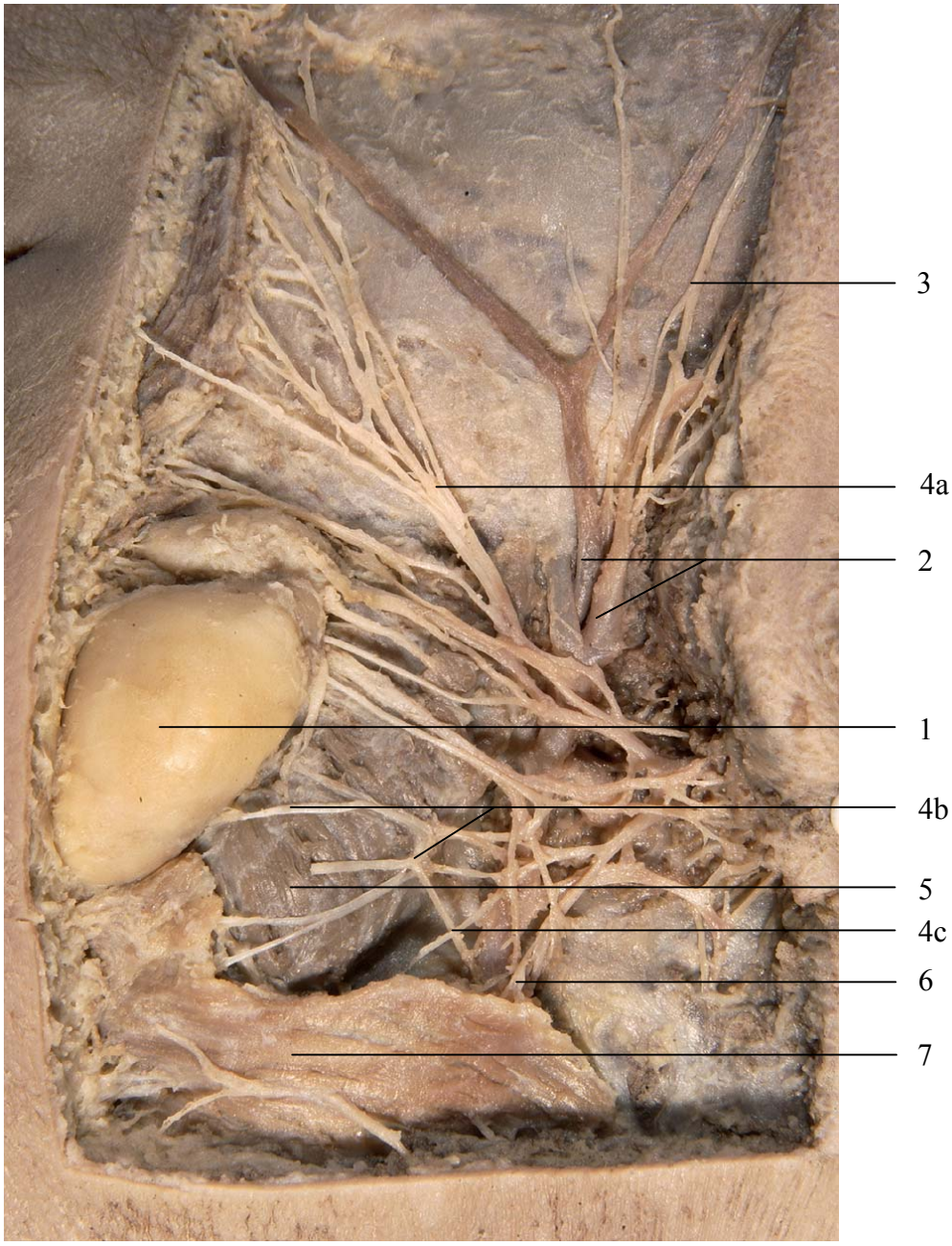


Abb. 6: *Plexus parotideus sinister beim Feten der 39. Entwicklungswoche.*
1 Corpus adiposum buccae, 2 A., V. temporalis superficialis,
3 N. auriculotemporalis, 4 Plexus facialis: 4a Rr. temporales et zygomatici,
4b Rr. buccales, 4c R.. marginalis mandibulae, 5 M. masseter, 6 R. colli,
7 Platysma

Eine weitere auffällige Struktur ist der Wangenfettpfropf (*Corpus adiposum buccae*), diesem verdankt die Wangengegend des Neugeborenen ihre Rundung. Der Fettpfropf ist durch eine Kapsel vom umliegenden Gewebe abgegrenzt und durch einen Stiel mit der Fettmasse der tiefen Gesichtsgegend verbunden. Dieser Stiel verläuft zwischen dem Hinterrand des M. buccinator und dem Vorderrand des M. masseter sowie dem M. temporalis in die Tiefe. Die Masse des Fettpfropfes wendet sich nach dorsal und legt sich dem M. masseter auf und bedeckt diesen in seinem anterosuperioren Anteil. Die dem Muskel aufliegende Seite ist abgeplattet, die Außenfläche halbkugelig. Die Größe und Form des Fettkörpers ist individuell sehr verschieden (Abb. 7). Gelegentlich ist er in mehrere Anteile untergliedert.

Die topographischen Beziehungen der Nerven und Gefäße der seitlichen Gesichtsgegend stellen sich beim Neugeborenen ähnlich wie beim Erwachsenen dar.

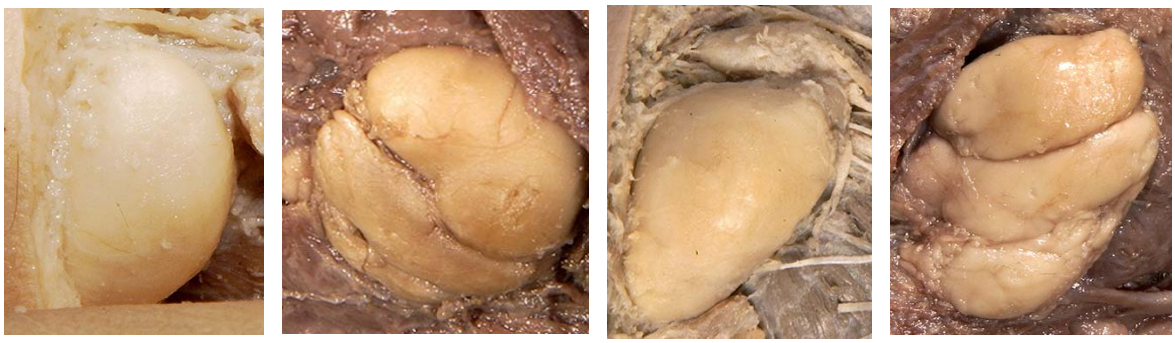


Abb. 7: *Variationen des Corpus adiposum buccae*

Die für die weiteren Untersuchungen relevanten Strukturen wurden in die Tiefe verfolgt. Die Glandula parotis und der Plexus parotideus wurden entfernt. Die Faszien des M. temporalis und des M. masseter wurden ebenfalls abpräpariert, um die Muskelfaserverläufe deutlich darstellen zu können (Abb. 8).

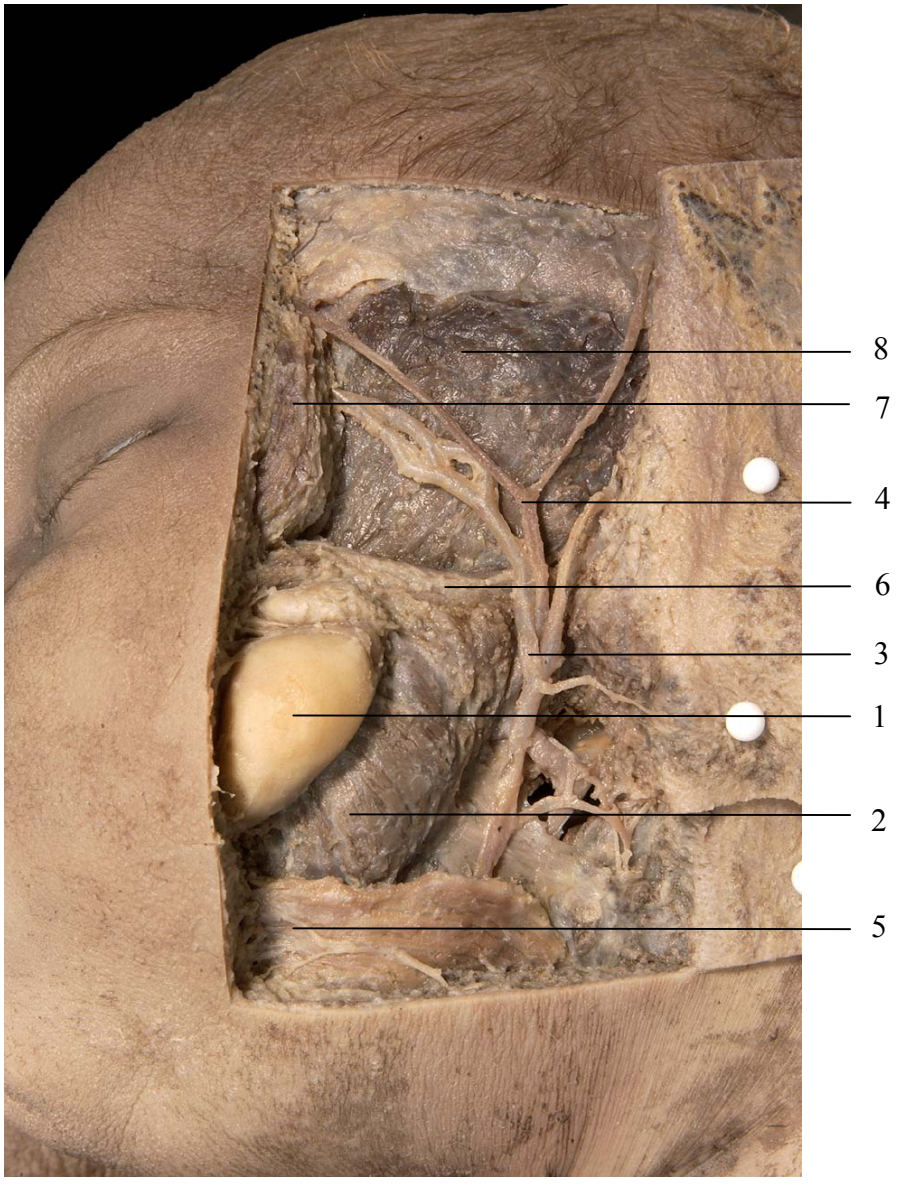


Abb. 8: *Linke Gesichtsregion eines Feten aus der 39. Entwicklungswoche nach Entfernung der Gl. parotis und des Plexus parotideus. Die Fascie des M. temporalis ist z.T. entfernt. 1 Corpus adiposum buccae, 2 M. masseter, 3 V. temporalis superficialis, 4 A .temporalis superficialis, 5 Platysma, 6 Arcus zygomaticus, 7 M. orbicularis oculi, 8 M. temporalis*

Es stellt sich der Gefäßverlauf der Vasa temporalia superficialia dar. In Höhe des Kiefergelenks geht die Arterie als Endast aus der A. carotis externa hervor, verläuft vor dem Ohr zur Temporalgegend und teilt sich oberhalb des Jochbogens in einen Ramus frontalis, der zur Stirn zieht, und einen Ramus parietalis, der die Schläfengegend versorgt. Die Vene, welche sich in Abb. 8 auf dem M. temporalis verzweigt und eine sehr dünne Venenwand besitzt, verläuft eigentlich unter der Faszie des Muskels und wurde durch Entfernung derselben sichtbar gemacht. Unterhalb des Jochbogens liegt sie retromandibulär und vereinigt sie sich mit dem oberflächlichen Ast, der für den Blutabfluss aus der Schläfengegend verantwortlich ist. Sie zieht unter Mitnahme weiterer kleinerer Äste in das Trigonum caroticum und findet Anschluss an die Vena jugularis interna und das System der Venae jugulares externae.

Der Bichat´sche Fettpropf, dem M. masseter aufliegend und diesen zum großen Teil bedeckend, wurde so weit entfernt, dass der M. masseter vollständig frei liegt. Gleichzeitig gelingt so die Darstellung der seitlichen Gesichtsmuskulatur (Abb. 9).

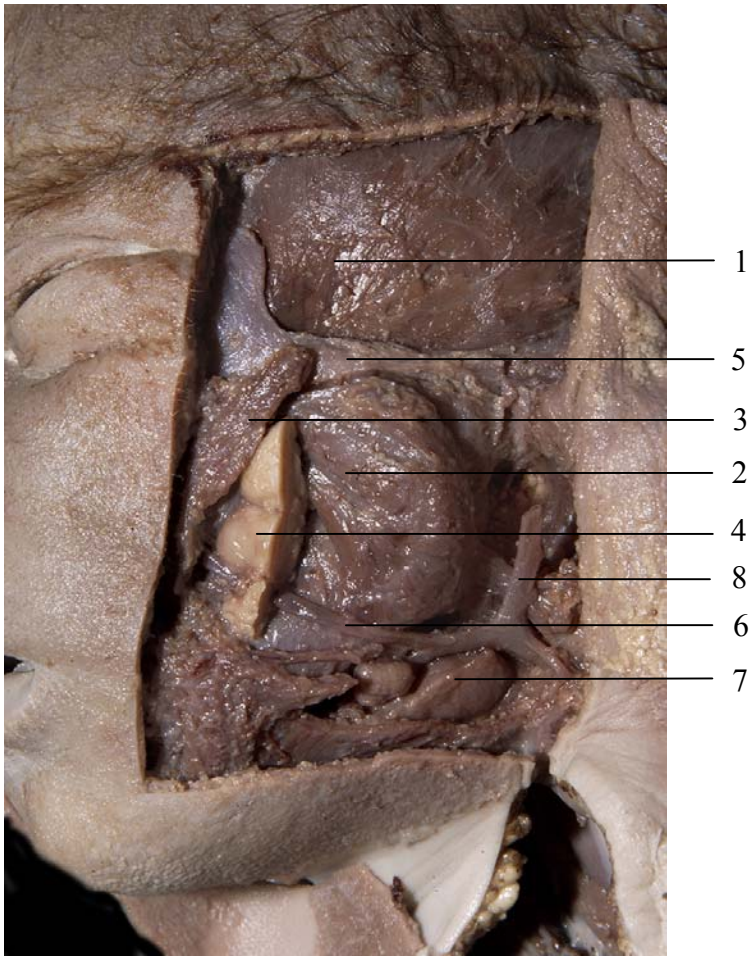


Abb. 9: *Seitliche Gesichtsmuskulatur links (Fettkörper z.T. entfernt) und die Mm. temporalis und masseter, Fet 32. Entwicklungswoche. 1 M. temporalis, 2 M. masseter, 3 M. zygomaticus major, 4 Corpus adiposum buccae, 5 Arcus zygomaticus, 6 A. facialis, 7 Gl. Submandibularis, 8 A. temporalis superficialis*

Die Fasern des oberflächlichen Anteils des Muskels verlaufen parallel und sind nach nasal gerichtet sind (Abb. 8, Abb. 9). Der M. masseter besitzt in diesem Alter schon einen kräftigen Muskelbauch. Im Gegensatz dazu wirkt der M. temporalis noch weniger kräftig ausgebildet. Des weiteren fällt auf, dass die sehnigen Anteile der Muskeln bei den Feten nur spärlich vorhanden sind. Der Sehnenspiegel des M. temporalis, wie man ihn beim Erwachsenen kennt, ist bei ihnen noch nicht ausgebildet.

Um den Ramus mandibulae mit seinen Fortsätzen untersuchen zu können, war es notwendig, den M. masseter von seinem Ursprung am Ramus zygomaticus und am Os zygomaticum zu lösen. Nachdem der mobilisierte Muskelbauch nach dorsocaudal geklappt worden war, war der Ramus mandibulae überschaubar. Das Periost wurde vom Knochen gelöst. Es wurde lediglich am Proc. condylaris belassen, um Beschädigungen am Kiefergelenk zu vermeiden. Der radiär verlaufende sehnige Ansatz des M. temporalis am Proc. coronoideus wird nach teilweiser Entfernung des Ramus zygomaticus gut sichtbar.

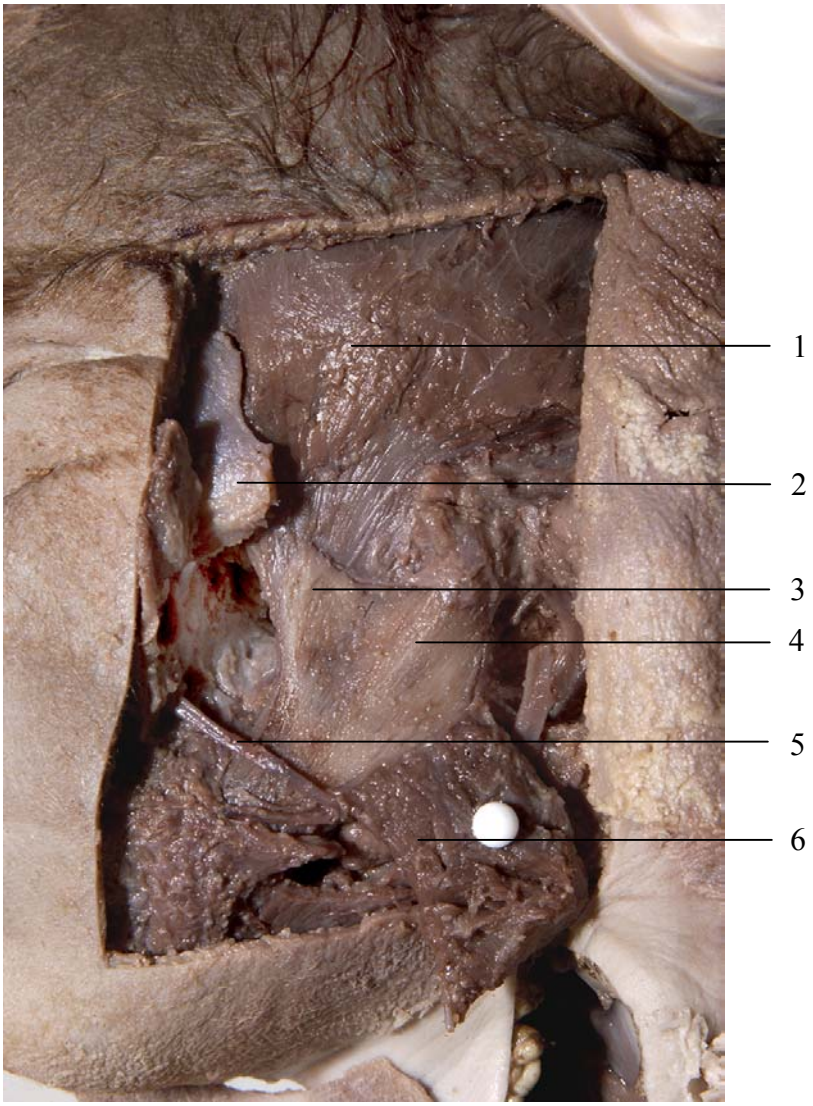


Abb. 10: *Ramus mandibulae mit den beiden Processus. Der Proc. zygomaticus wurde zur Darstellung des Ansatzes des M. temporalis teilweise entfernt und der M. masseter nach kaudal geklappt. Fet 32. Entwicklungswoche links. 1 M. temporalis, 2 Processus zygomaticus, 3 Processus coronoideus, 4 Proc. Condylaris, 5 A. facialis, 6 M. masseter.*

Am Präparat 1 (siehe Tabelle 1) erfolgte die Eröffnung der Gelenkkapsel, um den Discus articularis und den Gelenkspalt zu zeigen. Außerdem sollte der M. pterygoideus lateralis dargestellt werden. Dazu wurde der kaudale Anteil des M. temporalis angeschnitten und weggeklappt.

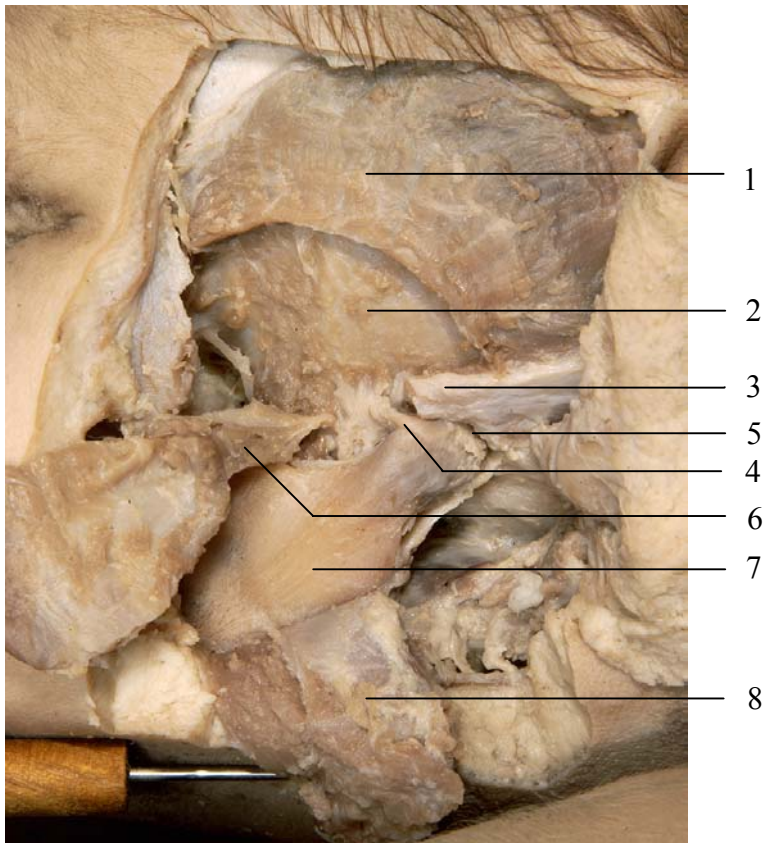


Abb. 11: *Das eröffnete linke Kiefergelenk des Neugeborenen. 1 M. temporalis, 2 Planum temporale, 3 Arcus zygomaticus, 4 Discus articularis, 5 Oberer Gelenkspalt, 6 M. pterygoideus lateralis, 7 Mandibula, 8 M. masseter.*

Die vollständige Darstellung des M. pterygoideus lateralis gelang nicht. Der Muskelbauch wurde möglicherweise bei der Abpräparation des unteren Anteils des M. temporalis mit angeschnitten und entfernt. Der Discus articularis ist gut dargestellt. Er erscheint flach und wölbt sich kappenartig über den Proc. condylaris. Dadurch ist makroskopisch ist der untere Gelenkspalt nicht zu erkennen. Anterior ist die Verbindung zu den Kapselstrukturen erkennbar. Der temporale Gelenkanteil stellt sich nahezu plan dar, das Tuberculum articulare ist nicht ausgebildet. An der Mandibula ist wieder die charakteristische keilähnliche Form des Proc. condylaris offensichtlich.

3.3 Befunde aus den bildgebenden Verfahren

3.3.1 Röntgen

Von den isolierten Mandibulae (31. und 39. Entwicklungswoche) wurden Röntgen-Aufnahmen mit einem digitalen Mammographiegerät (Senographe 2000 D) der Firma GE Medical Systems, Milwaukee, USA angefertigt. Die dafür verwendeten Aufnahmeparameter betrugen 27 kV und 22 mAs, der Fokus-Detektor-Abstand 66 cm und die Fokusgröße lag bei 0,15 mm. Diese Technik wurde gewählt, weil damit eine Darstellung der Trabekelstrukturen der Mandibula erwartet wurde. Die Präparate wurden grundsätzlich filmnah gelagert, um eine detailgetreue Darstellung der Knochenstrukturen ohne Vergrößerungseffekte zu gewährleisten.

Die Mammographietechnik stellte sich als sehr gut geeignet zur Darstellung der Trabekelstrukturen heraus. Sie ermöglichte eine gute Beurteilung der Knochenstruktur des Unterkiefers.

Bei der Aufsicht auf den Unterkiefer (31. Entwicklungswoche) (Abb. 12) wird deutlich, dass die kindliche Mandibula noch aus zwei Hälften besteht, die an der Symphysis menti nur knorpelig miteinander verbunden sind. Weiterhin sind die Alveolen für die Milchzähne und die Anlage des ersten bleibenden Molaren im Unterkiefer zu erkennen. Die Zahnanlagen nehmen einen ganz überwiegenden Raum ein, die letztere reicht sogar bis in die Basis des Proc. coronoideus hinein. Der Proc. condylaris stellt sich in seiner für dieses Lebensalter typischen Form dar, mit dem kurzen Collum mandibulae und dem sich nach dorsal hin verbreiternden Kieferköpfchen. Am Collum mandibulae ist peripher schon eine geschlossene Knochenmasse zu sehen, am Gelenkköpfchen ist der Ossifikationsprozess noch nicht so weit fortgeschritten. Dort sind lediglich einzelne Knochenbälkchen erkennbar.

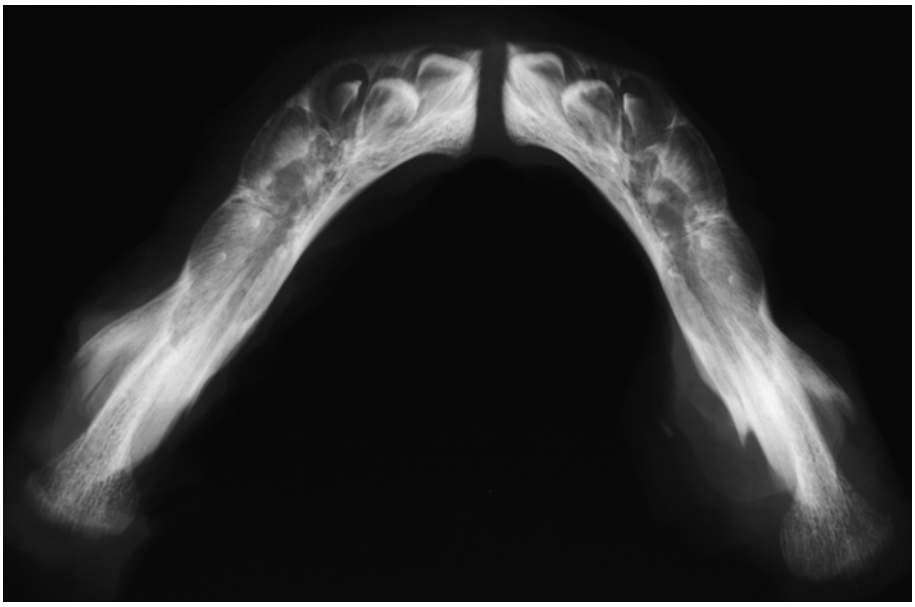


Abb. 12: *Aufsicht auf eine Mandibula der 31. Entwicklungswoche*

Bei den Aufnahmen von lateral (Abb. 13) fällt wieder die keilähnliche Form des Proc. condylaris auf. Die Spitze reicht bis zur Anlage des ersten bleibenden Molaren. Der Fortsatz erscheint als eigenständige Struktur, was einerseits in seiner charakteristischen Form begründet ist und andererseits dadurch, dass der Ossifikationsprozess an den anderen Teilen der Mandibula schon wesentlich weiter fortgeschritten ist, was auch an der Trabekelstruktur erkennbar wird. Am Corpus und Angulus mandibulae, sowie am Proc coronoideus hat sich bereits geschlossene Knochenmasse ausgebildet, während sich am Proc condylaris noch die Verknöcherung vollzieht.

Bei der Analyse der Trabekelstruktur fällt auf, dass diese einen zentralen Ausgangspunkt im Corpus mandibulae hat. Dieses Zentrum liegt etwa in Höhe des ersten Milchmolaren und von dort aus verlaufen die Trabekel radiär in Richtung auf den Proc. coronoideus, den Angulus mandibulae, die Symphysis menti und den Alveolarkamm. Der Proc. condylaris bleibt davon ausgespart, was wiederum ein Hinweis auf seine Eigenständigkeit ist.

Die Beurteilung der Knorpelstrukturen war mit dieser Technik nicht möglich, da sich der Knorpel nicht darstellte.

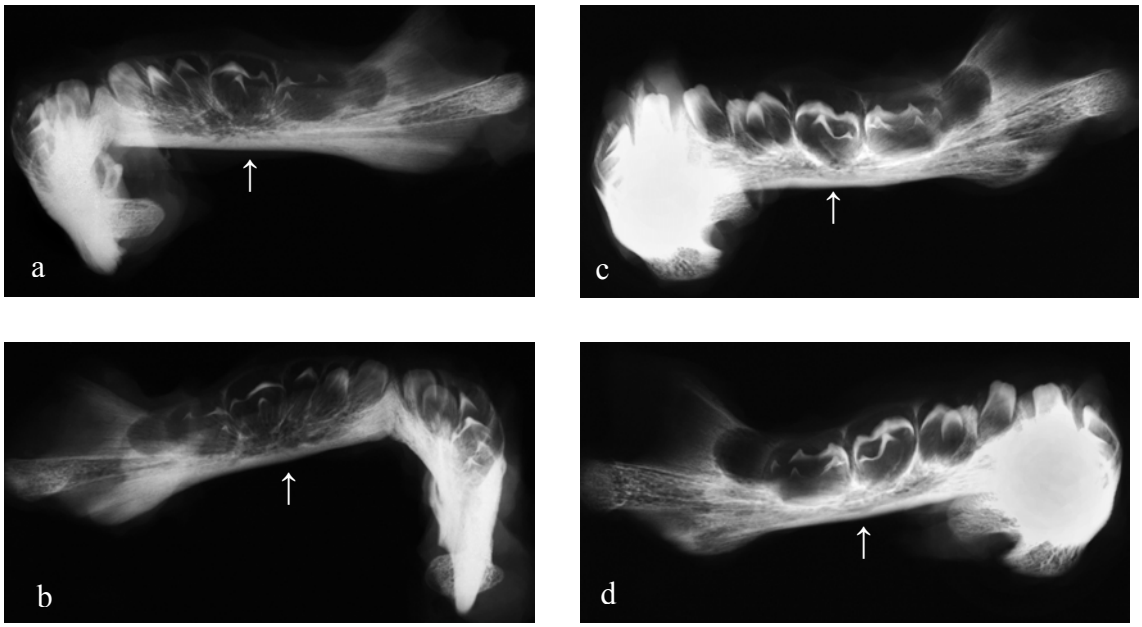


Abb. 13: *Ansicht der Mandibulae von lateral. a) 32. EW, links; b) 39. EW., links; c) 32. EW., rechts; d) 39. EW. rechts; Ausgangspunkt der Knochentrabekel in der Mandibula(↑)*

3.3.2 Computertomografie (CT)

Die Computertomografie wurde an einem 4-Zeilen-Spiral-CT der Firma GE, Light-Speed QX/i, Milwaukee/ USA, durchgeführt. Es wurde mit verschiedenen Aufnahmeparametern gearbeitet. Sie sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: *Aufnahmeparameter im CT*

Aufnahmeparameter	**1. Aufnahme**	**2. Aufnahme**	**3. Aufnahme**	**4. Aufnahme**
Schnittführung	Transversal	Coronar	Transversal	Transversal
Schichtdicke (mm)	0,63/ 2i, 2s	0,63/ 2i, 2s	XP-Technik 0,78/3,75/0,36 mm HQ	XP-Technik 1,25/3,75/0,12 mm HQ
Spannung (kV)	120	120	120	120
Stromstärke (mA)	130	130	200	200
Matrix	512	512		
DFOV (cm)	12	15,3	20	20
Gantrywinkel	I 18,5	S 22,0		
Rekonstruktions-algorithmus	Bone	Standard	Bone	Bone
Fensterweite	2858	180	325	3000/ 350
Fenstercenter	300	35	41	300/ 45

Die Computertomographie erwies sich insgesamt als geeignet zur genauen Beurteilung der Knorpelstrukturen. Aussagen zur Verteilung der corticalen und trabekulären Strukturen waren möglich, jedoch nicht zu deren Ausrichtung.

Bei den ersten Aufnahmen (Abb. 14b) sind die Alveolen mit den Zahnanlagen im Unterkiefer zu erkennen. Am Proc. condylaris selbst ist auszumachen, dass eine helle, hyperdense periphere Knochenmanschette existiert, während die zentralen Anteile sowohl hypodense als auch hyperdense Areale zeigen. Die hyperdensen Areale werden durch die Knochentrabekel hervorgerufen, während die hypodensen Areale durch Markstrukturen bedingt sind (siehe Kap. 3.4.3)

Die zweite Aufnahmeserie hatte die Darstellung der Weichteile zum Ziel, eine Beurteilung des Knochens war demnach nicht möglich. Aufgrund der homogen hellen, hyperdensen Aufnahme der untersuchten Region konnte der Knorpel nicht vom Knochen abgegrenzt werden (Abb. 14c)

Auch bei den dritten Aufnahmen konnte die Feinstruktur des Knochens deshalb nicht beurteilt werden (Abb. 14d).

Bei der vierten Aufnahmeserie wurde mit zwei unterschiedlichen Einstellungen für Fensterweite und Fenstercenter gearbeitet. Mit den Werten Fensterweite = 3000 und Fenstercenter = 300 (Abb. 14e) entsprachen die Bilder vom Ergebnis her etwa denen der ersten Aufnahmeserie. Angaben zur Trabekelstruktur waren, wie oben erwähnt, nur eingeschränkt möglich. Bei den gewählten Einstellungen Fensterweite = 350 und Fenstercenter = 45 (Abb. 14f) waren wiederum aufgrund der homogenen Darstellung keinerlei Aussagen möglich.

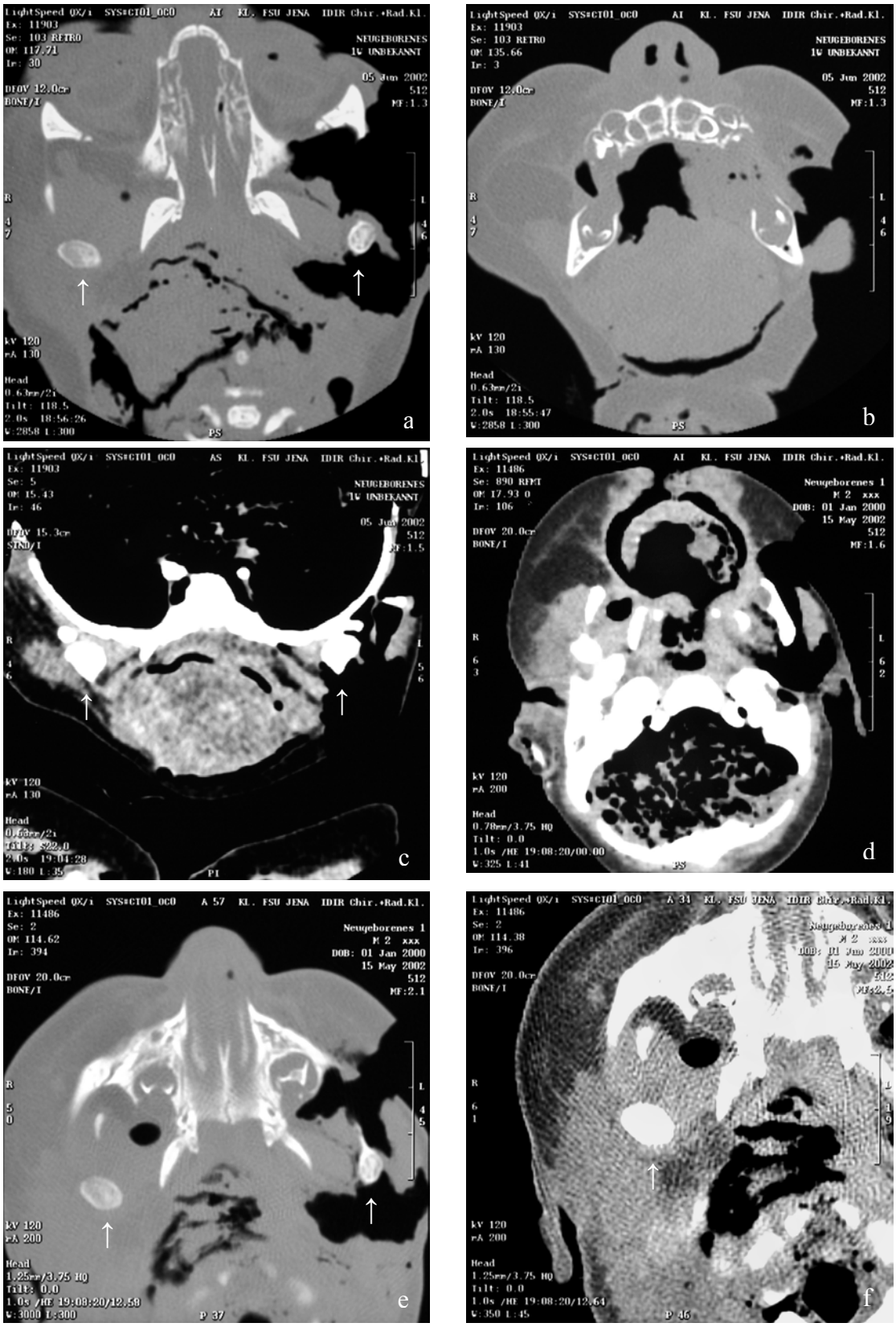


Abb. 14: *CT-Aufnahmen vom Neugeborenen. Die Kieferköpfchen sind mit einem Pfeil markiert, Aussagen zu deren Feinstruktur sind nicht möglich. Nähere Informationen in Tabelle 4 und obenstehendem Text.*

3.3.3 Magnetresonanztomografie (MRT)

Unter Verwendung eines 1,5 T MRT-Gerätes Magnetom Vision der Firma Siemens, Erlangen wurden mit einer Kniespule Aufnahmen ausgewählter Präparate angefertigt. Dazu wurden zum einen T_1-gewichtete Aufnahmen mit einer flash-3D Sequenz mit den Aufnahmeparametern Repetitionszeit T_R = 36 ms; Echozeit T_E = 11 ms; Aufnahmezeit T_A = 1:18 Stunden und zum anderen T_2-gewichtete Sequenzen mit der CISS-Sequenz und den Aufnahmeparametern T_R = 12,3 ms; T_E = 5,9 ms; T_A = 27:25 min erstellt. Bei beiden Aufnahmetechniken betrug die Schichtdicke = 0,5 mm.

In den T_1-gewichteten Aufnahmen sind am Proc. condylaris Knorpel und Knochen sehr gut voneinander abzugrenzen. Der Knorpel stellt sich als ca. 1 mm dicke helle, signalreiche/ hyperintense Schicht dar. In der sagittalen Schnittführung ist der Knorpel an allen Stellen gleichmäßig dick. Er wird vor allem dorsal von vertikal verlaufenden schmalen, signalarmen/ hypointensen Bezirken durchsetzt. Diese Unterbrechungen in der homogenen Struktur sind möglicherweise durch die Gefäßkanäle bedingt.

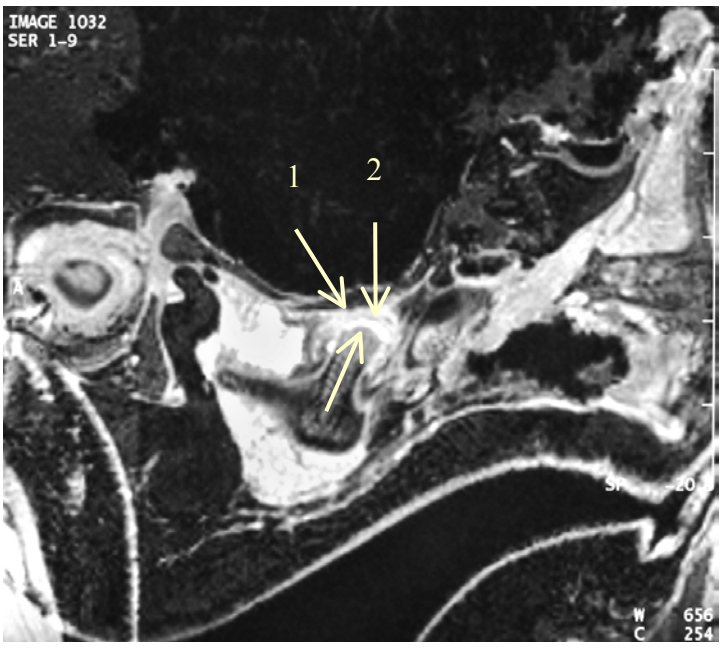


Abb. 15: *Sagittale Schnittführung im MRT bei einem Feten der 39. Entwicklungswoche. Der Pfeil markiert das Capitulum mandibulae, dessen verknöcherte Anteile grau erscheinen, während der aufsitzende Knorpel als helle Kappe imponiert, die auch den Discus articularis umfasst, da der untere Gelenkspalt nicht dargestellt ist. Gelenkpfanne (1) und oberer Gelenkspalt (2) sind markiert.*

Eine Beurteilung der Trabekelstrukturen war mit der MR-Technik nur begrenzt möglich. Es ist die Keilform des Condylus zu erkennen. Perichondral ist schon eine geschlossene Knochenmasse vorhanden, auch sind einzelne Knochenbälkchen kaudal am Condylus erkennbar. Eine differenziertere Aussage war jedoch nicht möglich.

In der coronaren Schnittführung nimmt die Dicke der Knorpelschicht nach medial hin geringfügig ab. Auch hier sind Unterbrechungen, besonders lateral, durch signalärmere Areale sichtbar. Der angrenzende Gelenkspalt stellt sich in beiden Schnittebenen gut dar.

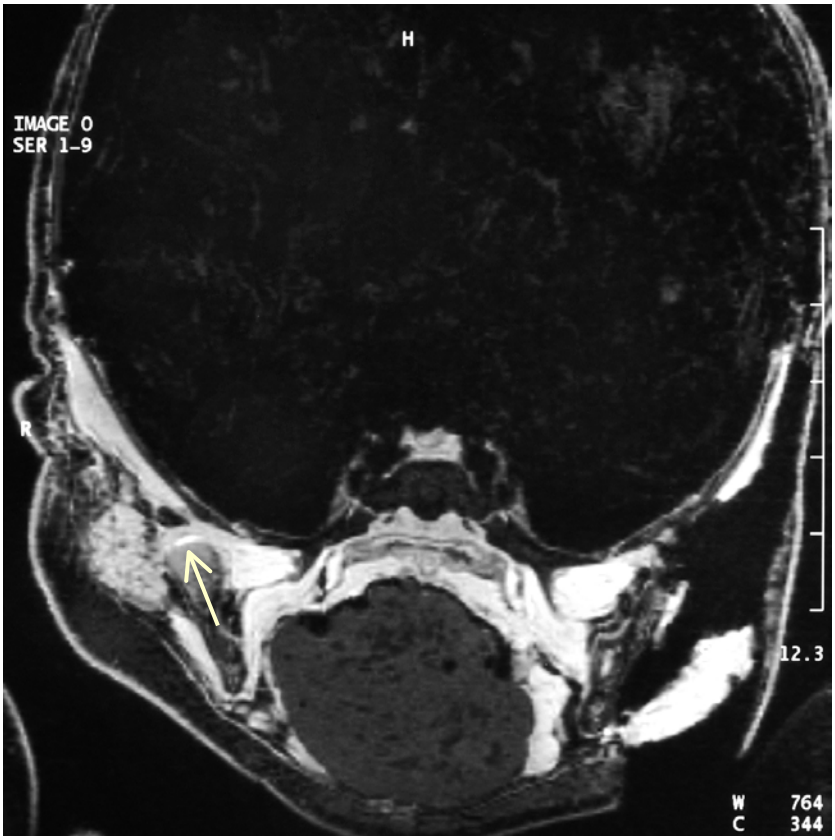


Abb. 16: *Coronare Schnittführung im MRT bei einem Feten der 39. Entwicklungswoche. Der Pfeil markiert das Capitulum mandibulae, dessen verknöcherte Anteile grau erscheinen, während der aufsitzende Knorpel als helle Kappe imponiert.*

Die T_2-gewichteten Aufnahmen erscheinen insgesamt unschärfer als die T_1-gewichteten. Dennoch war die Beurteilung der Feinstruktur des Proc. condylaris damit relativ gut möglich. Der Knorpel hebt sich als hyperintenses Areal von den Knochenstrukturen ab, wenn auch im Kontrast nicht so deutlich wie bei den vorherigen Aufnahmen. Manchmal erscheint die Grenze zwischen Knorpel und Knochen undeutlich. In der sonst gleichmäßig dick erscheinenden Knorpelkappe finden sich wieder hypointense Unterbrechungen, die in vertikaler Richtung den Knorpel durchsetzen. Die periphere Knochenmanschette am Collum mandibulae stellt sich signalarm dar. Basal sind am keilförmigen Processus ebenfalls signalarme Areale sichtbar, zum Knorpel hin werden die Strukturen wieder signalreicher. Dazwischen liegen einzelne signalärmere Inseln. Eine detailliertere Aussage zu den trabekulären Strukturen kann mit dieser Aufnahmetechnik nicht getroffen werden.

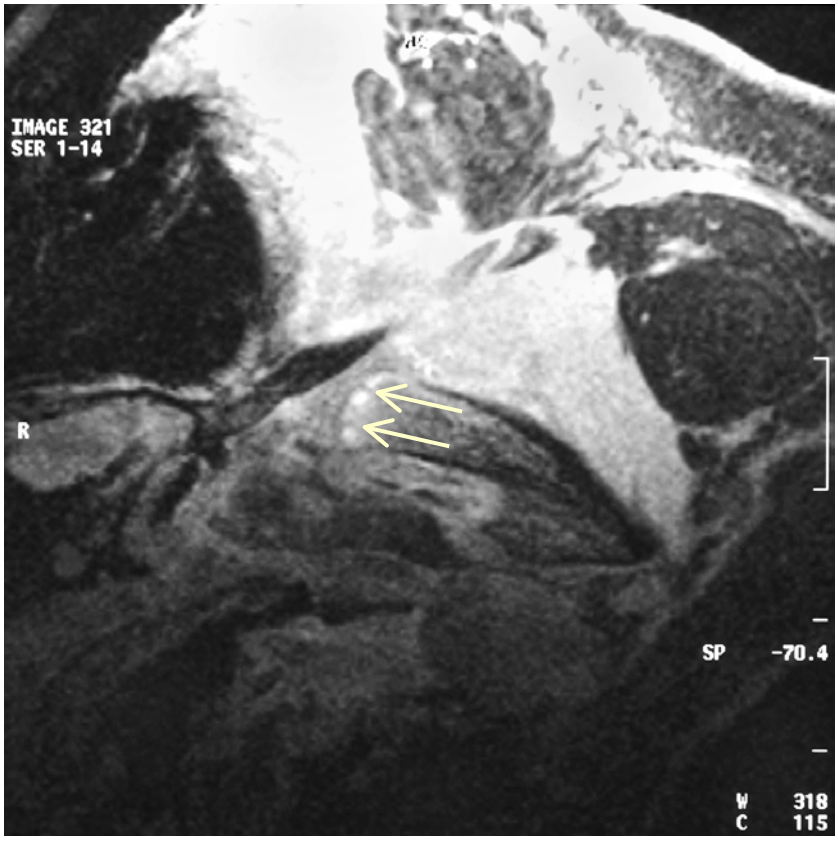


Abb. 17: *Die MRT-Aufnahme (T_2-gewichtet) des Processus condylaris in Längsrichtung zeigt in der hellen (hyperintensen) Knorpelkappe senkrecht angeordnete Strukturen (↑), die den aus den histologischen Präparaten bekannten Gefäßkanälen entsprechen dürften. Oberer und unterer Gelenkspalt mit dazwischenliegendem Discus sind angedeutet.*

3.4 Erstellung und Befundung der histologischen Präparate

3.4.1 Gewinnung des Untersuchungsgutes

Nach Abschluss der anatomischen Präparationen wurden bei dem Feten aus der 32. Entwicklungswoche und dem Neugeborenen jeweils das Kiefergelenk entnommen, bei dem anderen Feten (39. Entwicklungswoche) der gesamte Unterkiefer mobilisiert und der histologischen Aufarbeitung zugeführt. Das noch anhängende Weichteilgewebe wurde belassen und in die Untersuchung einbezogen. Zusätzlich konnte die isolierte Mandibula eines Feten der 31. Entwicklungswoche für die histologischen Untersuchungen verwendet werden.

3.4.2 Histotechnische Bearbeitung der Kiefergelenke

Die isolierten Kiefergelenke wurden über drei Wochen in einer Lösung mit 3% Ascorbinsäure entkalkt. Das Medium wurde alle zwei bis drei Tage gewechselt. Anschließend erfolgte zusätzlich eine Schnellentkalkung (new decale®, Firma: Medite, Burgdorf/ Deutschland) über zwei Stunden. Die Entwässerung der Präparate erfolgte in Alkohollösungen steigender Konzentration (50%, 60%, 70%, 80%, 90%) für jeweils 24 Stunden. In der 100%igen Alkohollösung verblieben die Gewebsblöcke 48 Stunden. Mit der Überführung der Gelenke in 100%iges Isopropanol für weitere 24 Stunden wurde eine optimale Dehydrierung erreicht. Für 24 Stunden verblieben die Präparate in einem 1:1 Gemisch aus Isopropanol und Paraffin bei einer Temperatur von 60°C im Brutschrank. Die erhöhte Temperatur war notwendig, um das Paraffin zu verflüssigen. Anschließend wurden die Kiefergelenke bei ebenfalls 60°C im Brutschrank für 3 Tage mit Paraffin durchtränkt, und danach in Paraffin (Medite tissue wax, Firma: Medite, Burgdorf/ Deutschland) bei 52-54°C in Blöckchen gegossen. Nach der vollständigen Auskühlung wurden mit einem Schlittenmikrotom (SM 2000 R; Firma: Leica, Solms/ Deutschland) 12-14 µm dicke Schnitte angefertigt. Zur weiteren Analyse wurde jedes vierte Schnittpräparat mit Azan angefärbt.

Die Unterkiefer der Feten aus der 31. und 39. Entwicklungswoche erfuhren eine geringfügig andere Bearbeitung. Sie wurden zu Beginn in einer Lösung aus Ameisensäure und 70%igen Alkohol (Mischungsverhältnis 1:1) entkalkt. Nach 9 Tagen war der Prozess so weit fortgeschritten, dass der Unterkiefer an der Symphysis menti in seine beiden Hälften geteilt werden konnte. Die beiden Mandibulahälften wurden noch eine weitere Woche entkalkt. Die Entwässerung und Einbettung erfolgten auf die gleiche Weise wie oben, ebenso die Anfertigung und Färbung der Schnittserien.

3.4.3 Auswertung der histologischen Präparate

Die Auswertung der Schnittserien erfolgte mit Mikroskopen der Firmen Zeiss und Olympus.
Mit den drei verschiedenen Objektiven (3,2-; 10- und 40-fache Vergrößerung) und dem Okular, dass 10fache Vergrößerungen ermöglichte, konnte demnach zwischen 32-; 100- und 400-facher Vergrößerung gewählt werden.

3.4.4 Allgemeiner Überblick

Bei der allgemeinen Übersicht über die Schnittserien fallen einige Strukturen besonders auf. Deren Auswertung erfolgt gemäß der Anfertigung der Schnittserien von lateral nach medial.

Lateral (Abb. 18) erkennt man vor allem Knochengewebe mit dem Schwerpunkt an der Basis des Proc. condylaris. Auch am unteren Rand des Corpus mandibulae und am Proc. coronoideus ist das Knochengewebe schon gut ausgebildet. Am Angulus mandibulae und am Proc. condylaris sieht man Markräume, die hämatopoetisches Gewebe enthalten. Weiterhin sind die Zahnanlagen zu erkennen. Es fällt auf, dass die Knochentrabekel im Corpus mandibulae einen gerichteten Verlauf zeigen. Ausgehend von den Zahnanlagen reichen die Ausläufer zum einen bis in den Proc. coronoideus, zum anderen verlaufen sie in Richtung Angulus mandibulae. Der Proc. condylaris wirkt eigenständig. Er hat in diesem Schnitt ein keulenförmiges Aussehen. Die Basis aus Knochen liegt ventral. Nach dorsal hin verschmälert sich die Struktur und läuft schmal aus. Das Gelenkköpfchen selbst ist kaum verknöchert,

man erkennt aber deutlich den Knorpel, welcher dem Köpfchen aufsitzt. Am Proc. coronoideus finden sich in der 31. EW noch einzelne Areale mit Knorpelgewebe, in der 39. EW ist hingegen keinerlei Knorpelgewebe mehr erkennbar.

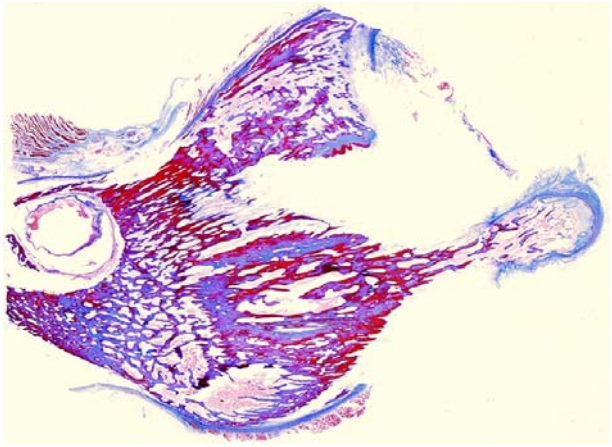


Abb. 18: *Übersicht : dorsale Mandibula mit Processus condylaris (Fet 39. Entwicklungswoche, rechts).* x *3*

Nach medial hin erscheint der Proc. condylaris zunehmend kompakter (Abb. 19). Das Collum mandibulae wird breiter und auch das Gelenkköpfchen gewinnt an Größe.

An der Basis des Proc. condylaris, am Kieferwinkel sowie am Gelenkköpfchen findet sich reichlich hämatopoetisches Gewebe in der Spongiosa. Kompaktes Knochengewebe ist wiederum am unteren Rand des Corpus mandibulae, am Proc. coronoideus und dorsocaudal am Ramus mandibulae, vom Angulus mandibulae ausgehend bis zum Collum mandibulae, zu erkennen. In diesem Schnitt deutet sich schon die charakteristische Form des Proc. condylaris an.

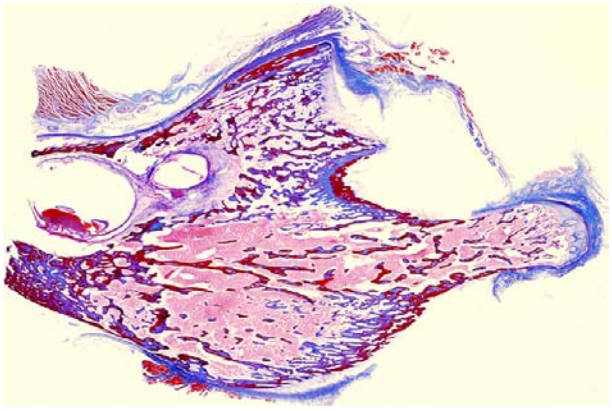


Abb. 19: *Übersicht dorsaler Mandibula-Abschnitt rechts (Fet 39. Entwicklungswoche).* x *3*

Weiter medial wird die Form des Proc. condylaris besonders deutlich. Dieser erscheint karotten- bzw. kegelförmig, wobei die Spitze in das Corpus mandibulae ragt und das Kieferköpfchen mit der Knorpelkappe das breite Ende bildet. Der Gelenkfortsatz ist noch nicht vollständig verknöchert, lediglich einzelne Knocheninseln sind zu erkennen, besonders an der Spitze des Keils. Im Gegensatz dazu sind die dem Condylus benachbarte Anteile der Mandibula schon knöchern. Die Schwerpunkte liegen dabei im Corpus mandibulae, im Kieferwinkel und im Proc. coronoideus, besonders dessen Oberkante. Die Zahnanlage für den ersten bleibenden Molaren reicht bis in die Basis des Proc. coronoideus hinein. Man erkennt auf Abb. 20 den Ansatz des M. temporalis.

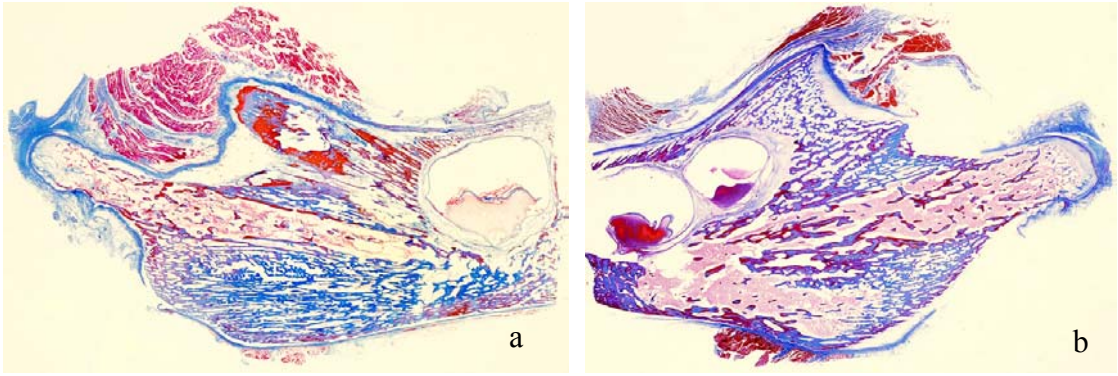


Abb. 20: *Übersicht: dorsaler Mandibula-Abschnitt a) Fet 31. Entwicklungswoche, links; b) Fet 39. Entwicklungswoche, rechts.* x 3

Verfolgt man die Schnittserien weiter nach medial verliert der Proc. condylaris in Höhe des Canalis mandibulae seine „Karottenform“. Er ist jetzt queroval. Der Discus articularis ist in dieser Höhe vollständig erkennbar. Auch der Proc. coronoideus hat eine Gestaltänderung erfahren. Er ist kleiner und flacher, während die ihm benachbarten Zahnsäckchen deutlich an Größe zugenommen haben (Abb. **21**a).

In den medialen Schnitten (Abb. 21b) ist nur noch das Kieferköpfchen erkennbar. Es ist im Anschnitt rund. Der Diskus liegt dem Condylus vollständig auf. Der Proc. coronoideus ist in diesem Schnitt nicht mehr auszumachen.

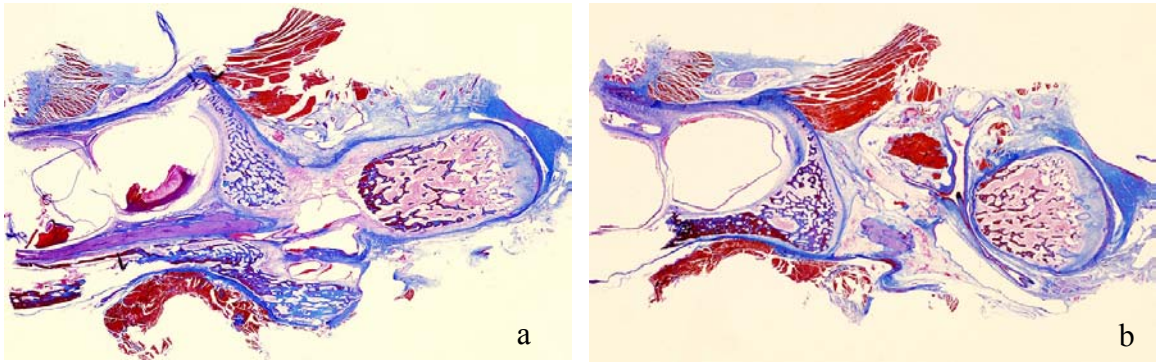


Abb. 21: *Übersicht: dorsaler Mandibula-Abschnitt (Fet 39. Entwicklungswoche).* ***x*** *2,8*

3.4.5 Der Processus condylaris

Wie schon im vorigen Abschnitt erwähnt, hat der Proc. condylaris eine Form, die einem Keil ähnlich ist. Die Basis bildet das Kieferköpfchen und die Spitze verläuft in Richtung Corpus mandibulae. Der Fortsatz zeigt einen horizontalen Verlauf, so dass das Capitulum mandibulae mit dem Oberrand des Corpus nahezu auf einer Linie liegt (Abb. 3, Aufnahme 1 und 5). Im Inneren des Proc. condylaris liegt Knochenmark. Dem Capitulum mandibulae sitzt die Knorpelkappe auf, die gegenüber dem Discus articularis eine Artikulationsfläche bildet.

Die Dicke der Knorpelschicht beträgt um den Zeitpunkt der Geburt bis zu 1,5 mm. Am fetalen und frühkindlichen Kiefergelenk weist der Knorpel eine 5-Schichtung auf. Vom Gelenkspalt bis zum Knochen sind das in Anlehnung an Ben-Ami et al. (1992):

1) eine oberflächliche, fibröse Schicht
2) eine Übergangszone (Chondroprogenitorzellen)
3) eine Chondroblastenschicht
4) eine hyaline Knorpelschicht
5) eine Verknöcherungszone

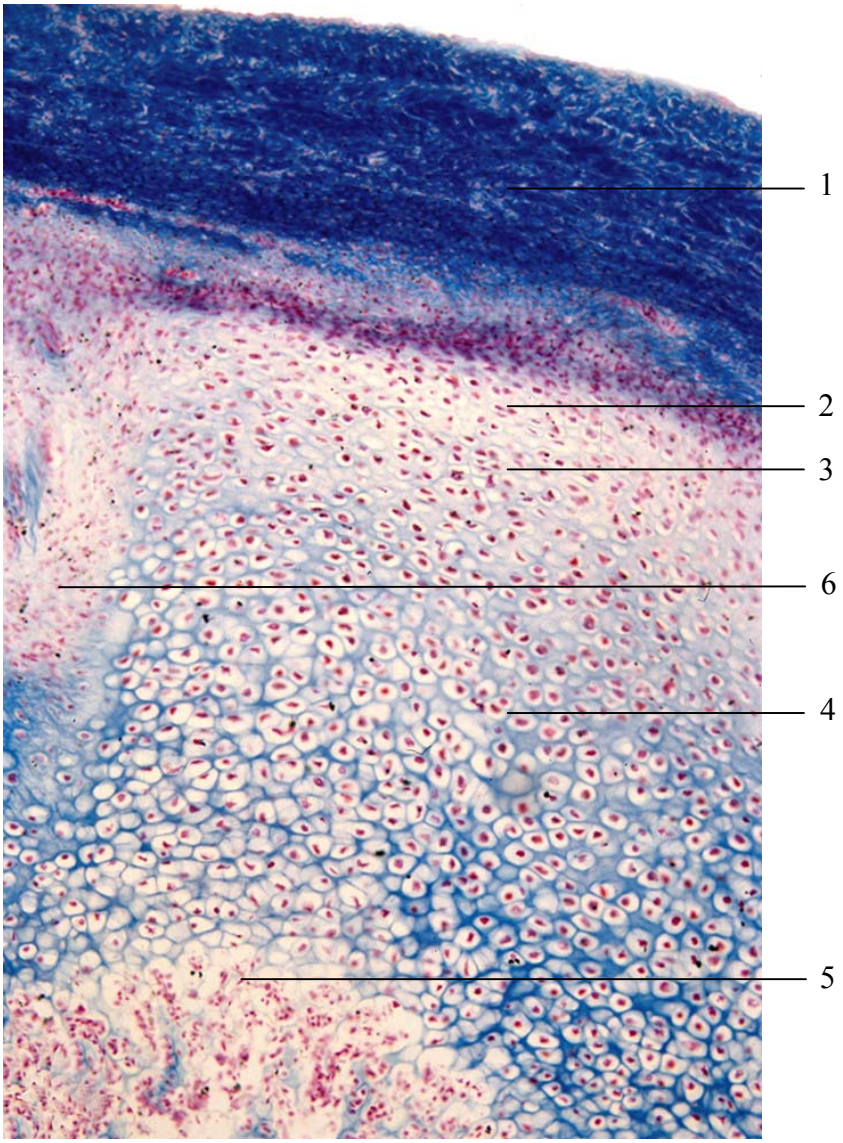


Abb. 22: *Aufbau des Knorpels am Processus condylaris einer Mandibula der 39. Entwicklungswoche. 1 Oberflächliche, fibröse Schicht, 2 Übergangszone mit Chondroprogenitorzellen, 3 Chondroblastenschicht, 4 Hyaline Knorpelschicht, 5 Verknöcherungszone, 6 Gefäßkanal.* ***x*** *100*

Die oberflächlichste Schicht, welche die eigentliche Gelenkfläche bildet, besteht aus dichten kollagenen Faserbündeln und ist gleichmäßig dick. Die kollagenen Fasern verlaufen, variabel übereinandergeschichtet, im wesentlichen parallel zur Oberfläche und in anteroposteriore Richtung. Dazwischenliegend befinden sich fibroblastenähnliche Zellen mit langgezogenen Zellkernen und kapselnah auch einzelne Gefäße. Diese oberflächliche Schicht geht am Rande der Gelenkflächen in das Periost über.

Die darauffolgende dünne Zwischenschicht besteht aus zahlreichen, dichtgedrängten, abgeplatteten Zellen. Die Zellkerne sind abgeflacht und langgestreckt. Diese Zellschicht zeigt nach Schroeder (1992) hohe mitotische Aktivität. Daran schließt sich die Zone der Chondroblasten an. Diese ovalen bis spindelförmigen Zellen sind umgeben von einer blassen Matrix, in der kollagene Fasern liegen. Die Zellkerne erscheinen vielgestaltig. Der Großteil ist oval und abgeflacht, es finden sich aber auch runde Formen. Die Chondroblasten differenzieren sich weiter zu Chondrozyten. Die Schichten 2 und 3 kann man als Proliferationszone zusammenfassen. Sie sind für das kondyläre Wachstum verantwortlich.

Die hyaline Knorpelschicht enthält Chondrozyten, welche zufällig angeordnet sind. Sie hypertrophieren zum Knochen hin und zeigen zur Verknöcherungszone eine Zunahme ihres intrazellulären Volumens. Die Kerne sind rund und im Verhältnis zur Zellgröße klein. Die Interzellularsubstanz ist im unteren Anteil dieser Zellschicht stärker rötlich-violett gefärbt, was für eine Mineralisation der Knorpelgrundsubstanz spricht. Die tieferen Lagen der Knorpelschicht zeigen mit Reihenknorpel, Blasenknorpel und Eröffnungszone ein Muster, welches der enchondralen Verknöcherung entspricht.

In den Präparaten von der Mandibula aus der 31. EW fallen Unterschiede im Hinblick auf die Dicke des Knorpels auf (Abb. 23). Posterior hat er in diesem Entwicklungsstadium eine wesentlich größere Ausdehnung als im anterioren Bereich. Die Schichtung des Knorpels ist mit der oben beschriebenen identisch.

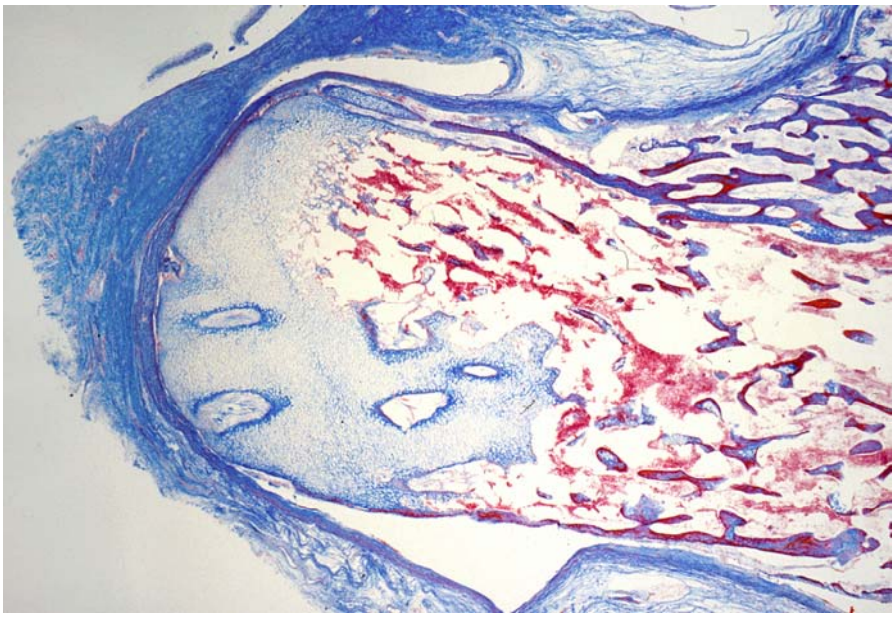


Abb. 23: *Processus condylaris einer Mandibula der 31. Entwicklungswoche. Dorsale Knorpelanteile besonders ausgeprägt. x 16,5*

Ein interessanter Aspekt ist, dass die gelenkspaltnahen Anteile sowie der Discus articularis in diesem Stadium der Entwicklung sehr gut mit Gefäßen versorgt sind. Der Knorpel auf dem Proc. condylaris wird von vaskularisierten Bindegewebssträngen durchzogen, die Markraum und Oberfläche miteinander verbinden. In den Kanälen selbst befinden sich lockeres Bindegewebe und Gefäße, aber auch kollagenfaserreiche Anschnitte, und vereinzelt sogar kleine Knorpelinseln. Um die Gefäßkanäle erscheint die Matrix dunkler und die Zellformation aufgelockert. In den tieferen Schichten sind die Gefäßkanäle teilweise von Knochengewebe umgeben. Meist finden sich mehrere solcher Kanäle, die in vertikaler Richtung verlaufen. Es war dabei auffällig, dass anterior meist nur ein einzelner, langgestreckter Kanal zu finden war, während posterior mehrere und auch größere Gefäßkanäle vorhanden waren (Abb. 23; Abb. 24). Vereinzelt konnten sie durch den gesamten Knorpel verfolgt werden (Abb. 26).

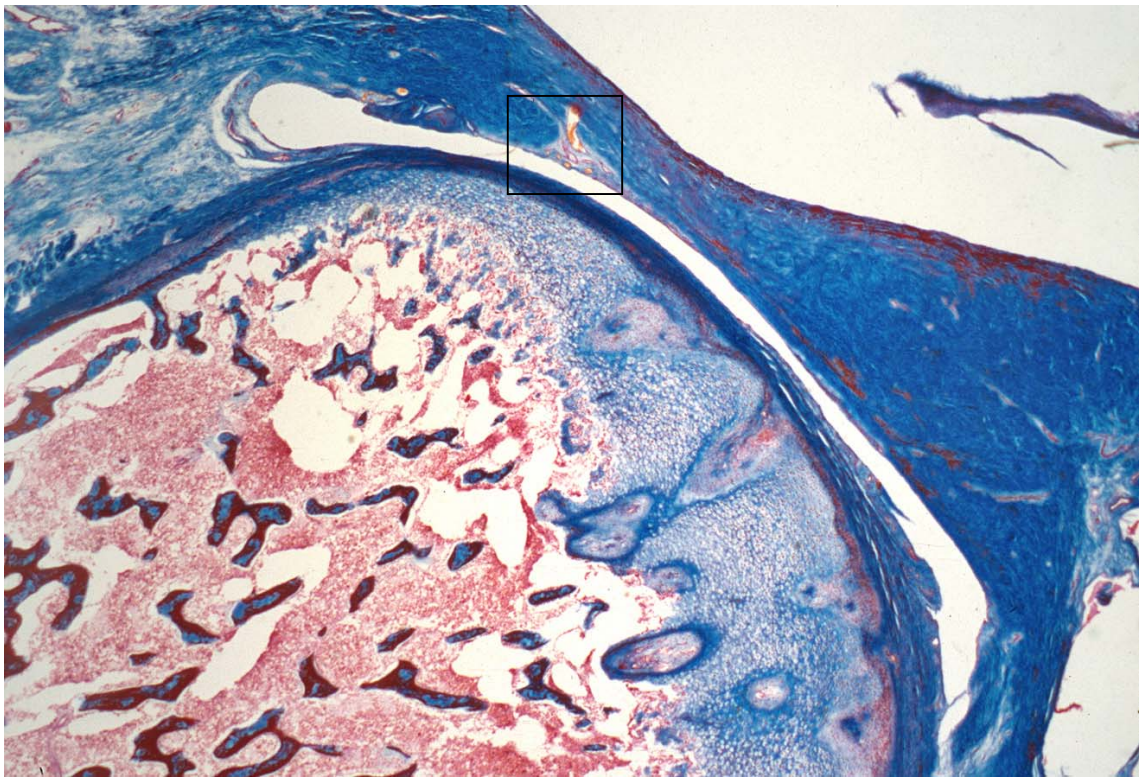


Abb. 24: *Vaskularisation des Discus articularis und des Knorpels am Processus condylaris eines Feten der 39. Entwicklungswoche. x 32*

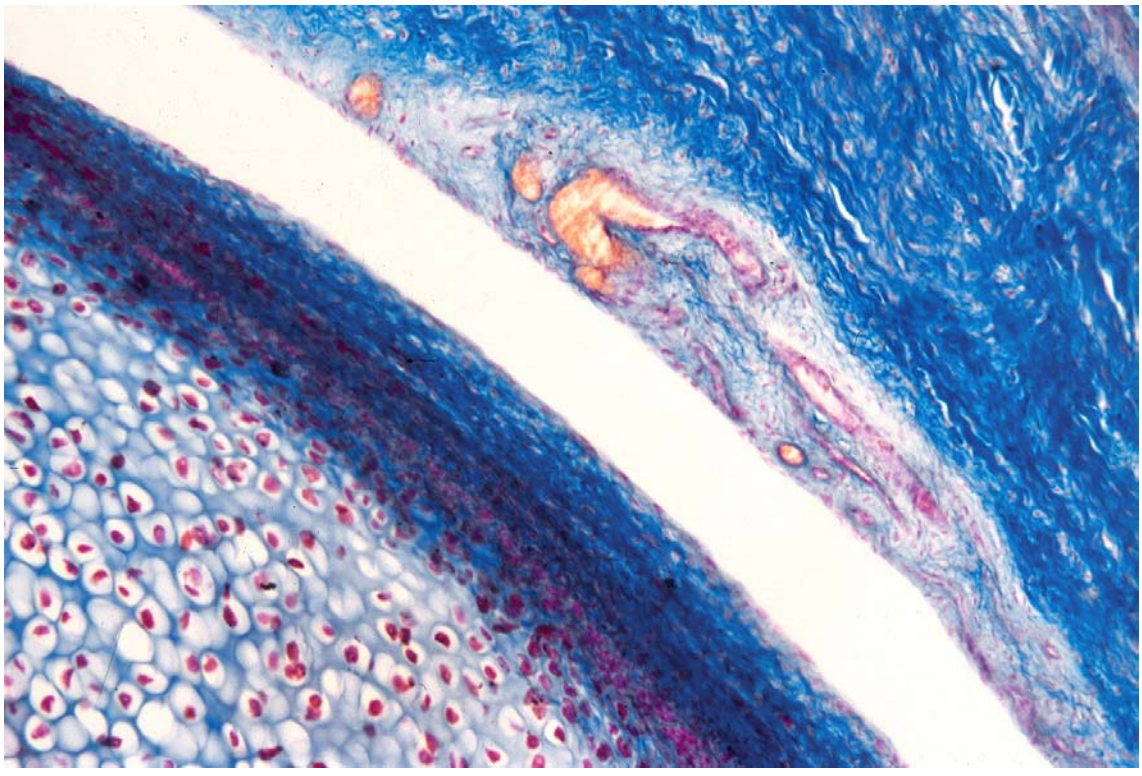


Abb. 25: *Stärkere Vergrößerung des Bildausschnittes mit Darstellung der Gefäße im Discusarticularis .x 160*

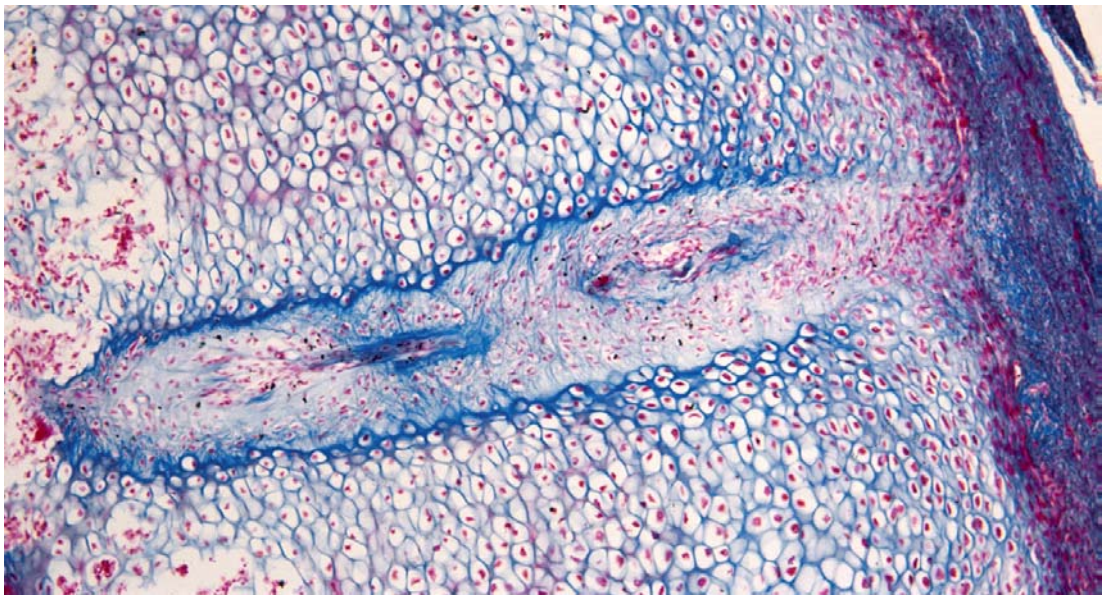


Abb. 26: *Durch den gesamten Knorpel verfolgbarer Gefäßkanal . x 100*

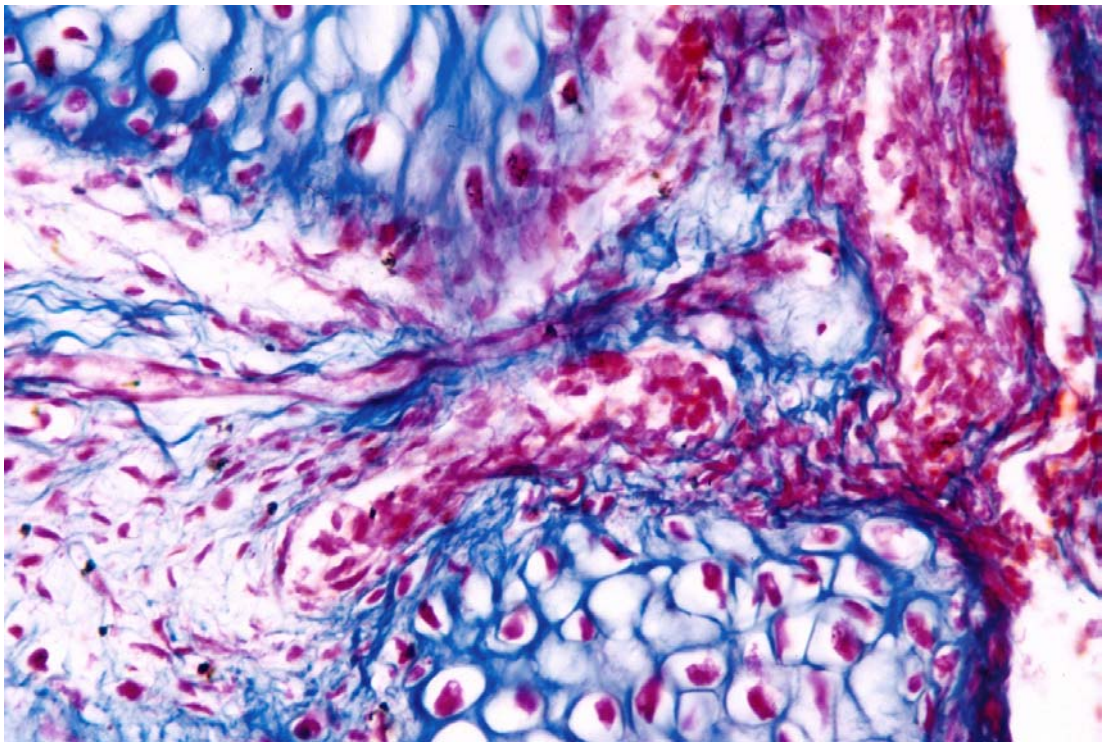


Abb. 27: *In einen Gefäßkanal eindringendes Gefäß. x 200*

Dank der freundlichen Unterstützung durch Prof. Dr. med. Küpper (Poliklinik für zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde der Friedrich-Schiller-Universität Jena) standen zusätzlich histologische Schnitte von Kiefergelenken (8 Wochen alter Säugling; 25jähriger und 68jähriger Mann) zur Verfügung. Damit konnten die Knorpel- und Knochenstrukturen aus den unterschiedlichen Altersgruppen verglichen und Aussagen zu deren Veränderungen im Laufe des Alternsprozesses gemacht werden.

Im Frontalschnitt vom Condylus des 8 Wochen alten Säuglings (Abb. 28) fällt makroskopisch auf, dass der Condylus und der Diskus scheinbar eine Struktur bilden. Der untere Gelenkspalt ist nicht zu erkennen. Erst im Mikroskop ist ein Spalt auszumachen. Die Schichtung des Knorpels ist identisch mit der, die vorher am Beispiel eines Feten aus der 39. Entwicklungswoche beschrieben wurde. Auch hier sind fünf verschiedene Zonen vorhanden und durch die Färbetechnik wird die Abstufung innerhalb des hyalinen Knorpels in diesem Präparat besonders deutlich.
Die oberflächliche fibröse Schicht besteht aus einem Netzwerk kollagener Fasern in die unterschiedliche Zellen eingestreut sind. An der Grenze zum Gelenkspalt hin sind vor allem Fibroblasten zu finden. Tiefer sind es dagegen hauptsächlich Knorpelzellen und nur noch vereinzelt Fibroblasten. Daneben finden sich auch einzelne Gefäße. An die Artikulationsschicht schließt sich eine Schicht kleiner abgeplatteter bis runder Zellen an, die in eine homogene Grundsubstanz eingebettet sind. Diese Zellen kommen teilweise bis in die Gefäßkanäle hin vor. Die Gefäßkanäle durchsetzen den Knorpel vertikal in seiner gesamten Ausdehnung. Die nächstfolgende Schicht erscheint zunächst homogen hell und zellarm. Bei stärkerer Vergrößerung sind jedoch flache bis spindelförmige Zellen zu erkennen, dazwischenliegend reichlich Grundsubstanz. Weiter in der Tiefe liegt schließlich eine ausgedehnte Schicht typischen hyalinen Knorpels. Anfangs sind die Zellen relativ klein und werden von einer homogenen Grundsubstanz umgeben. In Richtung auf den Markraum nehmen die Zellen an Größe zu und die stärkere violette Färbung der Grundsubstanz deutet auf Mineralisation hin. Die Grenze zwischen dem noch nicht mineralisierten und dem mineralisierten Anteil wird in Abb. 28a deutlich. Dem Blasenknorpel folgt eine Eröffnungszone mit der

Ausbildung von Knorpel-Knochen-Bälkchen, die in typische Knochenbälkchen mit eingeschlossenem Knochenmark übergeht. Der Knorpel hat insgesamt eine Dicke von ca. 1,5-2 mm.

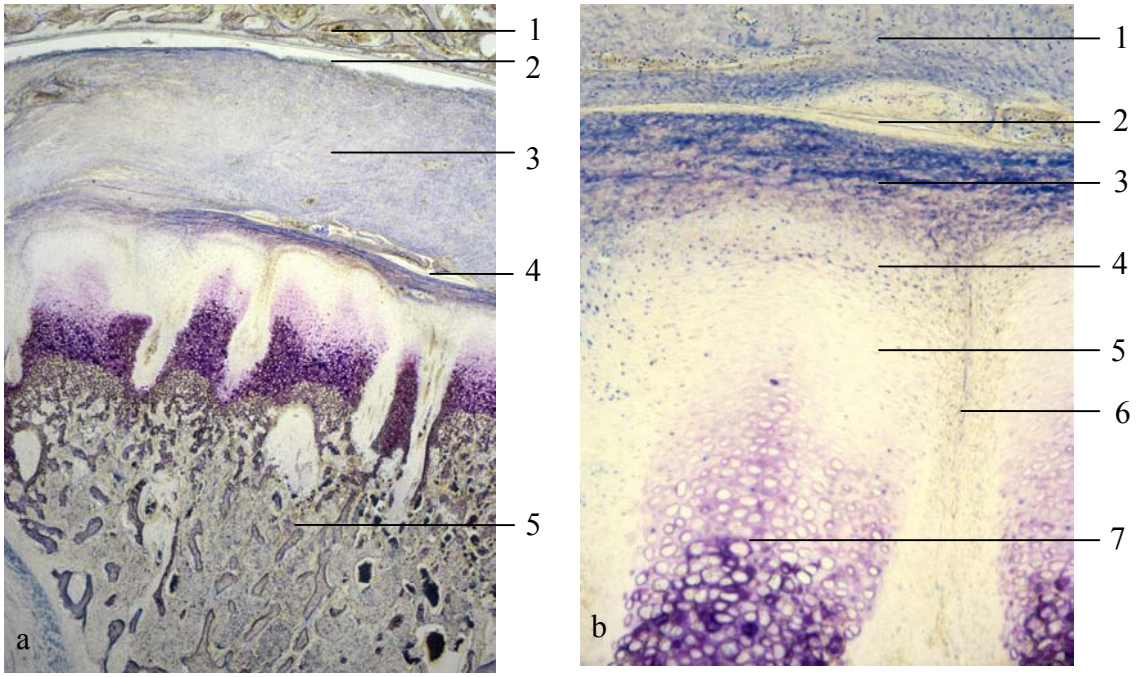


Abb. 28: *a) Histologischer Schnitt durch das Kiefergelenk eines 8 Wochen alten Säuglings. 1 Fossa articularis, 2 Oberer Gelenkspalt, 3 Discus articularis, 4 Unterer Gelenkspalt, 5 Caput mandibulae. x 13*
b) Aufbau des Knorpels am Processus condylaris eines 8 Wochen alten Säuglings. 1 Discus articularis, 2 Oberer Gelenkspalt, 3 Discus articularis, 4 Übergangsschicht mit Chondroprogenitorzellen, 5 Chondroblastenschicht, 6 Gefäßkanal, 7 Hyaliner Knorpel

Eine wesentliche Veränderung der Knorpelstruktur wird im Schnittpräparat des Kiefergelenks eines 25jährigen Mannes deutlich. Die Knorpelkappe ist nur noch 0,1-0,3 mm dick. Es lassen sich am Gelenkköpfchen dennoch fünf verschiedene Zellschichten erkennen. Diese unterscheiden sich jedoch von denen am fetalen und kindlichen Processus condylaris.

Die erste Schicht erscheint homogen faserig und ist gleichmäßig dick. Die kollagenen Fasern verlaufen vorwiegend in anteroposteriorer Richtung. Ganz vereinzelt findet man eingestreute Knorpelzellen. Fibroblasten sind nur noch selten zu finden. Insgesamt fällt auf, dass die fibröse Deckschicht homogener in ihrer Organisation, sowie zellärmer und faserreicher ist. Der Eindruck einer

Zweischichtung ist nicht mehr gegeben. Es sind im Discus articularis keine Gefäße mehr vorhanden. Gleichfalls fällt auf, dass es keine Gefäßkanäle gibt, die den Knorpel durchsetzen. An die Deckschicht schließt sich direkt eine dünne Zellschicht an, die superoanterior am deutlichsten ausgeprägt ist, und nach posterior hin immer dünner wird. Diese Schicht besteht zum einen aus knorpelähnlichen und zum anderen aus kleinen spindelförmigen Zellen mit relativ großem Zellkern. Zwischen den Zellen befindet sich reichlich Interzellularsubstanz. Anschließend sieht man eine Übergangszone. Sie enthält vereinzelt kleine runde Knorpelzellen und reichlich kollagene Fasern, die in vertikaler bzw. diagonaler Richtung angeordnet sind. Auch diese Schicht hat superoanterior die größte Ausdehnung. Eine im Gegensatz zum Säugling viel schmalere Knorpelschicht schließt sich an, wobei die Grenze zwischen den zwei Schichten teilweise unscharf erscheint. Sie hat anterior ebenfalls ihre stärkste Ausprägung. Der Knorpel zeigt nicht mehr das typische Erscheinungsbild des hyalinen Knorpels. Die Knorpelzellen sind unterschiedlich groß, rund und zufällig in zunehmend verkalkte Grundsubstanz angeordnet. Eine deutliche Größenzunahme der Knorpelzellen Richtung Knochen ist nicht zu verzeichnen. Die Zellen befinden sich in verschiedenen Stadien auf dem Weg zur enchondralen Verknöcherung. Der Übergang von Knorpel zu Knochen ist an einigen Stellen nicht scharf. Es hat sich kaudal der Knorpelschicht eine Knochenplatte ausgebildet, die aber regelmäßig durch Markräume unterbrochen wird. Die Knochenstrukturen sind in diesem Alter anterior besonders gut ausgeprägt. Die Einwirkung des M. pterygoideus lateralis führt zur Ausbildung einer breiten Knochenmanschette am Proc. condylaris. Posterior ist die Knochenmanschette schmaler. Zwischen den Knochentrabekeln befinden sich Markräume. Anhand des zellulären Aufbaus des Gelenknorpels kann davon ausgegangen werden, dass ein Wachstum in diesem Alter noch möglich ist.

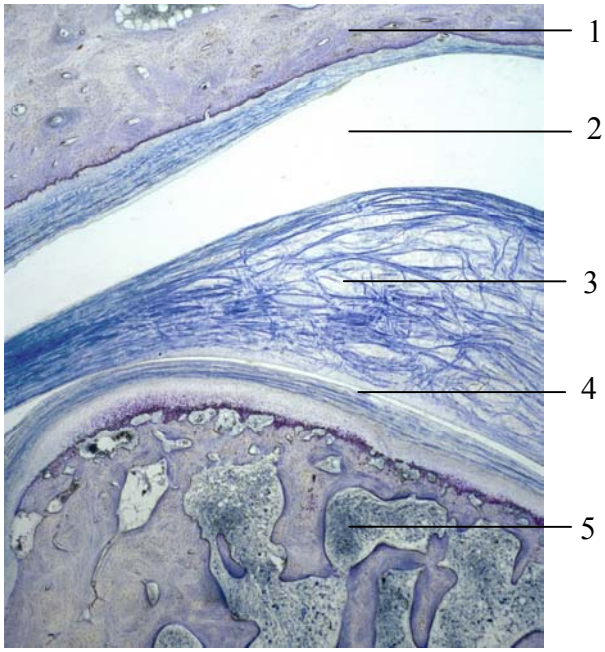


Abb. 29: *Histologischer Schnitt durch das Kiefergelenk eines 25jährigen Mannes. 1 Fossa articularis, 2 Oberer Gelenkspalt, 3 Discus articularis, 4 Unterer Gelenkspalt, 5 Processus condylaris*

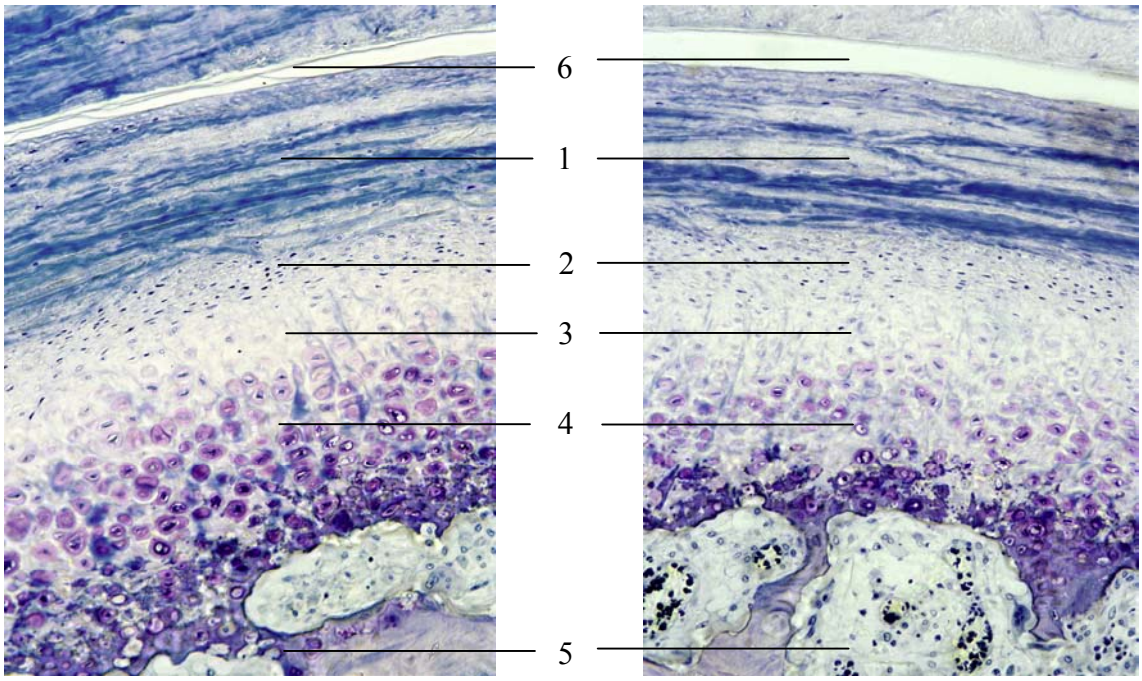


Abb. 30: *Aufbau des Knorpels am Processus condylaris eines 25jährigen Mannes. a) ventraler Abschnitt b) dorsaler Abschnitt. 1 Fibrös-articuläre Schicht, 2 Proliferationszone, 3 Faserknorpelige Schicht, 4 Verkalkt-knorpelige Schicht, 5 Lamellenknochen mit Kompakta und Spongiosa, 6 Unterer Gelenkspalt. x 130*

Beim älteren Menschen (68 Jahre, männlich) finden sich ebenfalls noch fünf unterschiedliche Schichten am Köpfchen des Proc. condylaris. Gelenkspaltnah befindet sich wieder eine faserige Schicht. Sie besitzt eine ähnliche Struktur wie beim 25jährigen beschrieben. Es ist jedoch eine zusätzliche Verarmung an eingelagerten Zellen zu verzeichnen, und die faserigen Anteile haben zugenommen. Anschließend ist eine dünne Zelllage kleiner, unregelmäßig gestalteter Zellen zu erkennen, deren relativ großer Zellkern von einem hellen Hof umgeben ist. Es ist der gleiche Zelltyp, der auch schon beim Präparat des 8 Wochen alten Säuglings und beim 25jährigen unterhalb der fibrösen Schicht zu finden war. Die Zellen ähneln unreifen Knorpelzellen. Danach folgt eine breite faserige Schicht mit vereinzelten, unregelmäßig eingestreuten runden Knorpelzellen. Die kollagenen Fasern sind hier netzartig angeordnet. Die Knorpelschicht ist nur noch sehr dünn und erscheint inhomogen. Die Zellen liegen vereinzelt und unregelmäßig in einer aufgelockerten, verkalkten Grundsubstanz angeordnet. Eine einheitliche Schichtung des Knorpels ist nicht mehr vorhanden. Auch die Zellen selbst haben eine ungleichmäßige Gestalt. Einige scheinen im Untergang begriffen. Dennoch ist dieser Aufbau des Proc. condylaris ein Hinweis darauf, dass auch noch im hohen Alter Wachstums- bzw. Umbauvorgänge realisiert werden können. Beim Erwachsenen ist eine geschlossene Lage Lamellenknochen zwischen Knorpel und Spongiosa ausgebildet. Im hohen Alter finden sich am Condylus aber auch Zeichen der Knochenresorption. Es ist eine Rarifizierung der spongiösen Strukturen offensichtlich. Der Markraum enthält neben hämatopoetischen Zellen auch Fettzellen, die sich durch große Vakuolen auszeichnen (Abb. 31a).

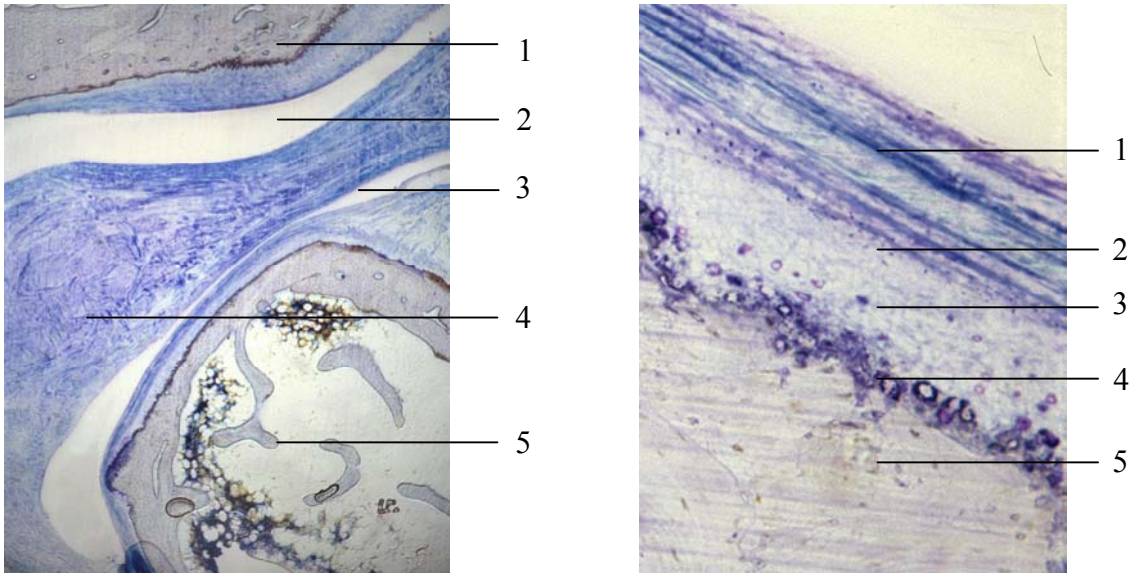


Abb. 31: *a) Schnitt durch das Kiefergelenk eines 68jährigen Mannes. 1 Fossa articularis, 2 Oberer Gelenkspalt, 3 Unterer Gelenkspalt, 4 Discus articularis, 5 Caput mandibulae. x 12*
b) Struktur des Gelenkknorpels am Processus condylaris bei einem 68jährigen Mann. Es sind folgende Schichten gegeneinander abzugrenzen: 1 fibrös – articuläre Schicht, 2 Proliferationszone, 3 Faserknorpelige Schicht, 4 Verkalkt – knorpelige Schicht, 5 Lamellenknochen mit Kompakta und Spongiosa. x 100

Am Proc. condylaris des Erwachsenen ist also ebenfalls eine 5-Schichtung erkennbar, der Aufbau und die zelluläre Zusammensetzung der einzelnen Zonen unterscheidet sich jedoch beträchtlich von den Strukturen am juvenilen Gelenkköpfchen. Der Aufbau des adulten Proc. condylaris gestaltet sich vom Gelenkspalt aus nach Schroeder (1992) folgendermaßen:

1) eine fibrös- artikuläre Schicht
2) eine Proliferationszone
3) eine faserknorpelige Schicht
4) eine verkalkt-knorpelige Schicht

es folgt Lamellenknochen mit Kompakta und Spongiosa

4 Diskussion

Aufgrund der Besonderheiten, die das Kiefergelenk und die Mandibula auszeichnen, standen diese schon bei zahlreichen Untersuchungen im Mittelpunkt des Interesses. Die Mandibula, die aus dem ersten Kiemenbogen hervorgeht und sich lateral des Meckel´schen Knorpels ausbildet [Moore und Persaud 1996], kann anhand ihrer Entwicklung und Funktion nach Moss und Salentijn (1970) in „skeletal units“ unterteilt werden. Das Corpus mandibulae bildet das Zentrum, welchem der Processus alveolaris, der Processus angularis sowie die Processus coronoideus und condylaris und eine Kinn-Untereinheit angelagert sind. Das menschliche Kiefergelenk ist phylogenetisch betrachtet ein relativ neues Gelenk, welches in dieser Form nur bei Säugern existiert. Die dorsalen Anteile des primären Kiefergelenks der Reptilien zwischen Meckel´schem Knorpel und Palatoquadratum, wurden als Hammer-Amboß-Komplex in das Mittelohr eingebaut [Gaupp 1911, zitiert nach Moffett 1957]. Infolgedessen musste eine neue Artikulation mit der Schädelbasis aufgebaut werden. Ein Resultat aus diesem Prozess ist der Proc. condylaris [Enlow 1989]. Aufgrund dieser komplizierten Evolution entwickelt sich das Kiefergelenk, im Vergleich zu anderen Synovialgelenken, in der Fetalperiode zeitlich später [Ogus und Toller 1984].

Bedingt durch seine einzigartige Genese stellt der Proc. condylaris eine besondere Struktur am Unterkiefer dar. Eine noch weitreichendere Bedeutung erlangte er jedoch durch die kontroverse Diskussion bezüglich seiner Rolle beim Wachstum des Unterkiefers.

Die Meinungen gehen darüber auseinander, ob der Proc. condylaris der maßgebliche Motor für das Unterkieferwachstum ist oder er nur passiv aufgrund exogener Einflüsse zum Wachstum beiträgt. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus dieser Untersuchung sollte das anatomische Wissen über die Mandibula und speziell zum Processus condylaris erweitert und präzisiert werden. Vor dem Hintergrund der Frage, ob und wo am Condylus eine Wachstumszone existiert, werden die einzelnen Untersuchungsergebnisse aufgegriffen und separat diskutiert.

4.1 Makroskopische Befunde an der fetalen und frühkindlichen Mandibula

Bei der Untersuchung der fetalen und kindlichen Skelette aus der Anatomischen Sammlung der Friedrich – Schiller – Universität Jena wurden die morphologischen Veränderungen, die bis zum zweiten Lebensjahr an der Mandibula auftreten, erfasst.
Das Corpus und der Ramus mandibulae stellen sich als kompakte ossäre Elemente des Unterkiefers dar und nehmen während der Fetalentwicklung linear mit dem Alter an Größe zu. Berraquero et al. (1995) kamen zu dem gleichen Ergebnis und stellten dabei zusätzlich eine Korrelation des Wachstums zur fetalen Gewichtszunahme fest.
Pränatal und zum Zeitpunkt der Geburt besitzt der Unterkiefer einen relativ großen Corpus, während der Ramus eher unterentwickelt erscheint. Er ist bei Feten und bei Säuglingen kleiner als das Corpus mandibulae, erst beim Erwachsenen sind beide nahezu gleich lang [Gray 1995]. Am Ramus mandibulae ist besonders der nach dorsal gerichtete, annähernd horizontale Verlauf auffällig. Gleichzeitig ist der Angulus mandibulae stumpf und misst laut Scheuer und Black (2000) zwischen 135 - 150°. Resultierend liegt das Caput mandibulae mit der superioren Begrenzung des Corpus mandibulae nahezu in einer Linie. Der Processus coronoideus ragt dagegen steil empor. Diese Befunde finden Bestätigung bei Schumacher (1997) sowie Scheuer und Black (2000). Der zunächst rudimentäre Charakter des Processus condylaris erweist sich für den Saugakt als optimal [Ranly 2000]. Aus makroskopischer Sicht, ergibt sich kein Anhaltspunkt für eine Wachstumszone am Processus condylaris der Mandibula.
Im Verlauf der postnatalen Entwicklung vollziehen sich an der Mandibula, im Vergleich zu anderen Schädelknochen, die umfangreichsten Veränderungen in Wachstum und Morphologie [Kieffer 1908]. Diese werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die Mandibula muss sich einerseits den Größenveränderungen des Schädels, dabei speziell der Maxilla und der mittleren Schädelgrube [Rakosi und Jonas 1989], sowie andererseits der Entwicklung der Zähne anpassen. Weiterhin ergeben sich durch das Sprechen, das Schlucken, die Atmung und den Kauvorgang neue funktionelle Einflüsse auf die Mandibula [Steinhard 1935].

Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass der Durchbruch der Zähne eine nachhaltige Gestaltänderung des Unterkiefers bedingt. Neben der Längenzunahme des Corpus mandibulae ist der steilere Verlauf des Ramus mandibulae offensichtlich. Die posteriore Begrenzung des Ramus richtet sich in vertikaler Richtung auf, was gleichzeitig dazu führt, dass der Kieferwinkel spitzer wird. Scheuer und Black (2000) geben dafür 130-140° nach Durchbruch des Milchgebisses an und 120-130° nach erfolgter Dentition der bleibenden Zähne. Daraus resultierend steht das Caput mandibulae jetzt cranialer als die Okklusionsebene der Zähne. Lee et al. (2001) beschreiben auch schon während der Fetalperiode eine geringfügige Abnahme des Kieferwinkels.

Über die Wachstumsvorgänge, die diese Veränderungen bedingen, wird eine Hypothese, die bereits von Hunter (1771) [zitiert nach Brodie 1941] erstmals publiziert wurde, auch heute noch als gültig angesehen. Demnach vollzieht sich am Ramus mandibulae ein nach posterior und superior gerichtetes Wachstum bedingt durch stetigen Knochenanbau posterior am Ramus mandibulae und Knochenabbau anterior am Proc. coronoideus. Daraus resultierend kommt es zu einer nach kaudal und anterior gerichteten Transposition der Mandibula. Das bedeutet, dass der Unterkiefer eine Verlagerung entgegengesetzt zu seiner Wachstumsrichtung erfährt. Der für die Zähne und die Vergrößerung der orofacialen Strukturen zusätzlich benötigte Raum wird dadurch gewonnen.
Diese Theorie erhielt nachfolgend durch zahlreiche Autoren eine Bestätigung. Das wohl eindrucksvollste Experiment wurde dabei von Humphry (1864) [zitiert nach Brodie 1941] durchgeführt. Er implantierte bei Schweinen jeweils einen Ring an den anterioren und an den posterioren Rand des Ramus mandibulae. Als er die Tiere zu einem späteren Zeitpunkt tötete und präparierte, fand er den posterioren Ring vollständig in den Knochen eingeschlossen, den anterioren Ring dagegen im vorgelagerten Weichgewebe. Damit erwies sich Hunters Theorie als richtig.
Einige Autoren schreiben dem Proc. condylaris die entscheidende Rolle beim Wachstum der Mandibula zu [Brodie 1941; Mills 1983; Sperber 1989].

Moss und Salentijn (1971) publizierten dagegen erstmals die Auffassung, dass das condyläre und damit auch mandibuläre Wachstum rein sekundärer und kompensatorischer Natur sei. Die Größenzunahme am Unterkiefer erfolgt nach dieser Auffassung passiv als Anpassungsreaktion auf die Vergrößerung der „funktionellen Matrix", zu der die Autoren die orofacialen, orbitalen und neurocranialen Funktionsräume (= kapsuläre Matrix) sowie die umgebenden Weichgewebsstrukturen (= periostale Matrix) zählen. Sie sprechen dem condylären Knorpel kein primäres Wachstumspotential zu.

Dass der Processus condylaris dennoch eine besondere Stellung an der wachsenden Mandibula einnimmt, wird bei der makroskopischen Untersuchung des Unterkiefers von lateral deutlich. Der Proc. condylaris zeigt in der Fetalzeit und in den ersten Lebensmonaten eine charakteristische Form. In der Literatur finden sich dafür verschiedene Bezeichnungen: „carrot-shaped wedge" [Levy 1964; Durkin et al. 1973; Kjaer 1978; Scheuer und Black 2000], „cone-shaped structure" [Blackwood 1976; Ogus und Toller 1984; Sperber 1989; Ranly 2000], „conical shape" [Merida-Velasco 1999; Radlanski et al. 1999; Lee et al. 2001]. Im eigenen Sprachgebrauch bevorzugen wir die Bezeichnung „keilförmig". Das Caput mandibulae bildet die Basis des Keils, und die Spitze ragt bis zur Anlage des ersten bleibenden Molaren in das Corpus mandibulae hinein.

Diese Besonderheit lässt sich mit der anfangs erwähnten außergewöhnlichen Embryologie des Condylus erklären. Der Condylus hat seinen Ursprung in einem condylären Blastem, welches sich in der siebten bis achten Entwicklungswoche am dorsalen Ende der sich entwickelnden Mandibula ausbildet. In diesem Blastem, das aus mesenchymalen Zellen besteht, entwickelt sich in der neunten bis zehnten Entwicklungswoche „*secondary cartilage*" [Baume 1962; Merida-Velasco 1999; Lee et al. 2001]. Dieser sekundäre Knorpel stellt den Vorläufer für den späteren Processus condylaris dar. Auch am Processes coronoideus sowie Anteilen der Symphysis menti ist dieses Gewebe zu beobachten [Mills 1983].

Die Bezeichnung „sekundärer Knorpel" ergibt sich daraus, dass dieser Knorpel zeitlich später entsteht sowie eine andere Zellausrichtung und endostale Gefäßstruktur besitzt als der „primäre Skelettknorpel", aus welchem die übrigen

Anteile der Mandibula und des kranialen Skeletts hervorgehen [Durkin et al. 1973; Ranly 2000]. Der condyläre Vorläuferknorpel entwickelt sich also unabhängig von dem „*skeletal cartilage primordium*“ [Levy 1964], aus dem auch die Epiphysen entstehen. Die knorpelige Anlage des Condylus wächst schnell und nimmt die charakteristische keilförmige Gestalt an [Lee et al. 2001].

Viele Autoren beschreiben am Condylus eine enchondrale Verknöcherung [Baume 1962; Blackwood 1976; Sperber 1989; Schroeder 1992; Ben-Ami et al. 1992; Berraquero et al. 1995; Shibata et al. 1996; Ranly 2000; Lee et al. 2001], die dazu führt, dass nur am dorsalen bzw. cranialen Ende des Condylus eine Knorpelkappe persistiert. Auf die Verknöcherungsmuster an der Mandibula und die Bedeutung des Knorpels soll später bei der Diskussion der histologischen Ergebnisse eingegangen werden.

4.2 Makroskopisch-topographische Präparation der Kiefergelenkregion

Die Präparationen geben zwar wenig Aufschluss über die Wachstumsprozesse an der Mandibula, erscheinen aber dennoch sinnvoll im Hinblick auf den klinischen Bezug der Arbeit. Um Transplantationen im Kindesalter durchführen zu können, ist die Kenntnis der topographischen Beziehungen am Kiefergelenk unabdingbar. Abbildungen der kindlichen Mandibula bzw. des kindlichen Schädels finden sich in nahezu jedem anatomischen Lehrbuch oder Atlas. Bildmaterial zur Topographie der Regio faciei lateralis beim Kind ist in der Literatur jedoch vergleichsweise selten. Lediglich bei Peter, Wetzel und Heiderich im „Handbuch der Anatomie des Kindes“ (1938) finden sich Abbildungen dieser Region.
Aus diesem Grund wurde eine Präparationsserie angefertigt, in der schrittweise die topographischen Verhältnisse bis zum Kiefergelenk dargestellt wurden.
Bedingt durch die geringe Größe und das verhältnismäßig gering entwickelte Unterhautfettgewebe bei den Feten und Neugeborenen gestaltete sich die Bearbeitung oft schwierig und machte das Arbeiten mit einer Kopflupe notwendig. Besonders die Gefäß- und Nervenstrukturen waren mit bloßem Auge und teilweise

auch noch mit der Lupe nur schwer zu erkennen. Eine optimale Darstellung der Strukturen konnte infolge dessen nicht bei allen Präparationen gewährleistet werden.

Da der Unterkiefer beim Neugeborenen annähernd horizontal verläuft, erscheint das kindliche Gesicht relativ breit und vertikal relativ kurz [Enlow 1989]. Bei der Präparation der oberflächlichen seitlichen Gesichtsregion fallen beim Neugeborenen vor allem das Corpus adiposum buccae und die Glandula parotis auf. Das aus Baufett bestehende Corpus adiposum buccae, auch Bichat´scher Fettpfropf genannt, nimmt beim Neugeborenen eine verhältnismäßig große Fläche ein, was sich durch dessen Funktion beim Saugakt erklärt. Er gibt der Wange einen gewissen Halt und dient dazu, den für das Saugen notwendigen Unterdruck in der Mundhöhle zu erzeugen [Moll 1997].
Die Form der Ohrspeicheldrüse ist beim Säugling eher nierenförmig als dreieckig [Peter, Wetzel und Heiderich 1938]. Auch an den angefertigten Präparaten konnten wir dies bestätigen. Die Glandula parotis überschritt bei keinem der Präparate den Jochbogen und reichte mit ihrem unteren Pol meist bis in das Trigonum caroticum hinein. Bei dem Feten aus der 32. Entwicklungswoche konnte rechts eine akzessorische Drüse nachgewiesen werden. Diese befand sich entlang des Ausführungsgangs der Drüse cranial des Wangenfettkörpers.

Der Verlauf der Nerven und Gefäße stellt sich pränatal und beim Säugling ähnlich wie beim Erwachsenen dar. Der Nervus facialis bildet innerhalb der Glandula parotis seinen Plexus aus. An dem Präparat aus der 39. Entwicklungswoche wurde versucht, die Verzweigungen darzustellen. Bei dem Präparat aus der 32. Entwicklungswoche wurde davon abgesehen, da die Nerven noch sehr fein und die Präparation der einzelnen Äste schwierig waren. Von den Endästen des Nervus facialis haben besonders die Rami zygomatici und vereinzelt auch die Rami buccales eine enge topographische Beziehung zum Kiefergelenk. Die Äste gehen untereinander zahlreiche Verbindungen ein. Sie ziehen in ihrem Verlauf über die Kiefergelenksregion hinweg. Darauf sollte bei operativen Eingriffen geachtet werden.

Die in dieser Region verlaufenden Gefäße haben ebenfalls eine enge topographische Beziehung zum Kiefergelenk. Dorsal des Collum mandibulae geht aus der A. carotis externa, vom N. auriculotemporalis begleitet, die A. temporalis superficialis hervor, die sich oberhalb des Jochbogens in ihre Endäste aufzweigt. Sie ist neben dem Gefäßsystem der A. maxillaris maßgeblich an der periostalen Versorgung des Kiefergelenks beteiligt. Die A. transversa faciei zweigt sich in der Nähe des Gelenks aus der A. temporalis superficialis ab und entlässt regelmäßig kleinere Äste zum Kiefergelenk [Voy und Fuchs 1980; Funakoshi 2001]. Die aus der Literatur bekannte enge anatomische Beziehung der Gefäße zum Gelenk konnte durch die Präparationen bestätigt werden. Die kleinen Äste konnten mit der von uns eingesetzten herkömmlichen Präparationstechnik nicht nachgewiesen werden; spezielle injektionstechnische Verfahren könnten bei der Darstellung dieser zarten Gefäße hilfreich sein [Voy und Fuchs 1980], sie setzen aber eine entsprechende Injektion gefäßfüllender Substanzen am unfixierten Organismus voraus. Die Gefäßversorgung des Kiefergelenks war jedoch hier nicht vorrangiger Gegenstand der Untersuchungen, so dass zu dieser Problematik keine detaillierteren Befunde beigesteuert werden können.

Während sich die Nerven und Gefäße an den untersuchten Präparaten in nahezu gleicher Weise wie beim Erwachsenen darstellen, fallen bei der Kaumuskulatur erhebliche Unterschiede auf. Am M. masseter werden diese anhand seines Verlaufs deutlich. Beim Säugling zeigt der oberflächliche Teil des Muskels ausgesprochen schräg von ventrocranial nach dorsocaudal ausgerichtete Fasern, beim Erwachsenen verlaufen sie dagegen deutlich steiler craniocaudal. Dies lässt sich aber durch den unterschiedlichen craniofacialen Aufbau und die Funktionsanforderungen erklären. Der M. masseter wirkt beim Neugeborenen viel stärker in anteriore Richtung als beim Erwachsenen. Er zieht den Unterkiefer während des Saugaktes nach vorn. Da er die Hauptarbeit verrichtet, resultiert daraus der kräftig ausgebildete Muskelbauch. Der M. temporalis scheint dagegen weniger gut ausgebildet. Er übt seine Kontraktionswirkung in vertikaler Richtung aus, erreicht also eine Klemmwirkung beim Saugakt. Diese erfordert weniger Kraftaufwand als der Vorschub des Unterkiefers im Gelenk. Folglich ist der M. temporalis noch nicht so kräftig

entwickelt wie beim Erwachsenen. Diese Verhältnisse kehren sich jedoch im Laufe des Lebens um. Nach vollständiger Ausbildung der Dentes permanentes hat der M. temporalis aufgrund der veränderten funktionellen Anforderungen den größeren physiologischen Querschnitt [Peter, Wetzel und Heiderich 1938].

Das Kiefergelenk nur beim Neugeborenen bis zur Eröffnung der Kapselstrukturen präpariert. Es war lediglich der obere Gelenkspalt offensichtlich. Der Discus articularis wölbt sich kappenartig über den Proc. condylaris, so dass der untere Gelenkspalt ohne Entfernung des Discus articularis nicht erkennbar war. Der Discus erscheint noch relativ plan und steht anterior mit den Kapselstrukturen in innigem Kontakt. Eine Verbindung des Discus zum M. pterygoideus lateralis wie Rees et al. (1954) oder Öberg und Carlsson (1985) sie beschreiben, konnte bei dem Präparat nicht eindeutig nachgewiesen werden. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei der Entfernung des caudalen Anteils des M. temporalis der M. pterygoideus lateralis mit angeschnitten wurde und deshalb keine vollständige Darstellung des Muskels möglich war. Der direkte Ansatz des M. pterygoideus lateralis am Discus, wie er in den meisten Lehrbüchern der Anatomie Erwähnung findet, wird aber auch von manchen Autoren in Frage gestellt. Meyenberg et al. (1986) stellten in ihren Untersuchungen zur Beziehung der Kaumuskulatur zum Discus fest, dass nur bei 60% der untersuchten Gelenke wenige Muskelfasern am Discus inserieren. Auch Moritz (1986) bestätigt in seiner Arbeit, dass der Ansatz des M. pterygoideus lateralis am Discus nicht obligat ist. Hingegen fanden Purrmann et al. (1988) bei der Präparation von über einhundert Kiefergelenken von Erwachsenen, Kindern und Feten nur in einem Fall den Ansatz des Muskels an der Fossa pterygoidea mandibulae, sonst strahlten die Sehnenfasern über die vordere Gelenkkapsel in den Discus articularis ein. Linß (1990) verwies darauf, dass der Diskus über die Gelenkkapsel mit dem Processus condylaris sehr eng verbunden ist, also der Bewegung des Kieferköpfchens unabhängig vom Ansatz des M. pterygoideus lateralis am Discus articularis oder am Kieferköpfchen folgen muss.

Der temporale Gelenkanteil ist beim Neugeborenen fast flach, das Tuberculum articulare ist noch nicht zu erkennen. Bogoeff (1933) weist darauf hin, dass sich das Tuberculum articulare erst nach der Geburt entwickelt, wenn die Kiefertätigkeit einsetzt. Seine postnatale Entwicklung ist gut erforscht und weithin bekannt. Im Laufe der Kindheit und Adoleszenz bildet sich durch funktionelle Inanspruchnahme [Steinhardt 1935] ein S-förmiges Profil an der temporalen Gelenkregion heraus [Öberg und Carlsson 1985; Schroeder 1992].

Auch bei den makroskopischen Präparationen war an der Mandibula die charakteristische Form des Proc. condylaris augenscheinlich. Die keilähnliche Form konnte bei allen beurteilten fetalen und frühkindlichen Präparaten festgestellt werden.

4.3 Radiologische Untersuchungen

Mit den verfügbaren bildgebenden Verfahren Röntgen, CT und MRT wurde versucht, die Knochen- und Knorpelstrukturen an der Mandibula darzustellen. Hinsichtlich der Trabekelstruktur konnten die genauesten Aussagen anhand der mit der Mammographietechnik gewonnenen Röntgenaufnahmen gemacht werden. Dieses Summationsbild im seitlichen Strahlengang erlaubte eine detaillierte Charakterisierung der Trabekelausrichtung an der Mandibula. Berraquero et al. (1992) und Lee et al. (2001) nutzen ebenfalls diese Technik für ihre Untersuchungen am Unterkiefer. Bei den Röntgenbildern wird die Eigenständigkeit des Processus condylaris erneut verdeutlicht. Die charakteristische keilähnliche Form des Processus condylaris in der fetalen und frühkindlichen Phase ist mit dieser Technik optimal nachweisbar. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass die Knochentrabekel einen zentralen Ausgangspunkt in der jeweiligen Mandibularhälfte haben. Dieser befindet sich etwa in Höhe des ersten Milchmolaren. Lee et al. (2001) sehen dort das Ossifikationszentrum des Corpus mandibulae.

Auch bei den computertomographischen Aufnahmen waren die Trabekelstrukturen abgrenzbar, eine Bestimmung der Gesamtausrichtung bzw. der räumlichen Verteilung war mit den einzelnen axial angefertigten Schichtaufnahmen nicht möglich. Mit Hilfe des Weichteilfensters (2. Aufnahmeserie) sollte versucht werden,

die knorpeligen Anteile am Proc. condylaris darzustellen, was jedoch nicht gelang. Anhand von multiplanaren Rekonstruktionen (MPR) in sagittaler und coronarer Orientierung war eine bessere Erfassung der Trabekelorientierung möglich, die aber im Vergleich zum Summationsbild der Mammographietechnik nicht so gut geeignet war, den Gesamtaspekt übersichtlich darzustellen.
Dagegen bot die MR-Technik die Möglichkeit, den signalreichen (hyperintensen) Knorpel vom signalarmen (hypointensen) Knochen anhand des unterschiedlichen Gehalts an Protonen zu unterscheiden. In diesen Aufnahmen konnten außerdem hypointense Areale innerhalb des Knorpels beobachtet werden, die dem Verlauf der Gefäßkanäle entsprechen könnten. Die nahezu signalfreien Areale innerhalb des Knochens dürften den Trabekeln entsprechen. Ihre Abgrenzung gelang im Vergleich mit der CT- oder der Mammographietechnik wesentlich schlechter.
Bei keiner der angewandten Techniken ergaben sich Hinweise auf eine Epiphysenfuge am kindlichen Processus condylaris.

4.4 Histologische Untersuchungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der histologische Aufbau an fetalen und kindlichen sowie an adulten Proc. condylares untersucht. Dies bereitete anfangs methodische Schwierigkeiten, da bei den fetalen Präparaten zunächst angestrebt wurde, das gesamte Kiefergelenk für die histologische Aufarbeitung zu gewinnen. Teilweise wurden die Kiefergelenke jedoch bei der Entnahme leicht beschädigt. Gleichzeitig gestaltete sich die histotechnische Bearbeitung aufgrund der vergleichsweise geringen Größe der Präparate und der daraus resultierenden mangelnden Orientierung bei der Wahl der Anschnittfläche nicht optimal. Die Qualität und die Beurteilbarkeit der Schnittserien des kompletten Kiefergelenks erwiesen sich daher als unbefriedigend. Daraufhin wurde bei den nachfolgenden Präparaten die gesamte Mandibula mobilisiert, um eine bessere Orientierung zu erreichen und einen Gesamteindruck des Unterkiefers zu erhalten. Die davon gewonnenen Schnittserien erlaubten detaillierte Aussagen zum Aufbau der Mandibula und der Knorpelkappe, die im Mittelpunkt der Untersuchungen stand.

In der Literatur finden sich bereits zahlreiche Publikationen zur Struktur des Proc. condylaris und dessen Wachstumsverhalten. Meist formulieren Autoren jedoch keine eindeutige Aussage, sondern es wird oft nur auf die kontroverse Diskussion zu dieser Problematik verwiesen. Es herrscht trotz intensiver Forschungen auf diesem Gebiet keine Klarheit darüber, wie sich das Wachstum an der Mandibula vollzieht. Ein Beispiel für die Unsicherheit bezüglich dieser Thematik sind die Ausführungen über die Veränderungen an der Mandibula im Laufe des Alters in dem Standardwerk „Gray´s Anatomy“ (1995). Der condyläre Knorpel wird einerseits als eine Epiphysenfuge bezeichnet, andererseits wird aber zusätzlich auf eine Arbeit von Petrovic (1972) verwiesen, in welcher für den Knorpel kein primäres Wachstumspotenzial nachgewiesen werden konnte. Diese Aussagen stehen im Widerspruch zueinander.

Durkin et al. (1973) unterscheiden in ihrem umfangreichen Artikel über den condylären Knorpel zwei verschiedene Schulen „The Classicists“ auf der einen und „The Modernists“ auf der anderen Seite. Die Klassizisten vertreten dabei die Meinung, die Mandibula sei mit einem langen Röhrenknochen vergleichbar und der condyläre Knorpel in Struktur und Funktion dessen Knorpel in der Wachstumsfuge identisch. Diese Auffassung begründet die Theorie, dass der Knorpel ein primäres Wachstumszentrum für die Mandibula darstellt. Brodie (1940) und Mills (1983) schreiben dem Proc. condylaris die entscheidende Rolle beim Wachstum der Mandibula zu. Symons (1952) versuchte den Condylus als „major growth site“ zu etablieren, Blackwood (1965) vertrat ebenso die Meinung, der Condylus erfülle eine ähnliche Funktion wie die Wachstumszone am Röhrenknochen, und Baume (1970) bezieht in seinen Ausführungen die gleiche Position. Auch er klassifiziert den Knorpel als „primary growth center“. Becker (1965) betont die Rolle des Gelenkknorpels als epiphysäres Wachstumszentrum und hebt ihn gleichzeitig als einziges Wachstumszentrum am Unterkiefer hevor. Der dominierende Gedanke der Klassizisten ist, dass der Condylus die maßgebende Determinante für Wachstum, Größe und Gesamtform der Mandibula ist.

Angeregt durch die Ergebnisse von Moss und Salentijn (1971) bildete sich eine zweite Schule bei der Erforschung der Wachstumsvorgänge an der Mandibula heraus, die sogenannten Modernisten. Sie vertreten die Ansicht, dass das condyläre

Wachstum als adaptive Reaktion auf die Veränderungen der „funktionellen Matrix“, das heißt der benachbarten oro-facialen Strukturen, z.B. der Nebenhöhlen, der Mundhöhle inklusive der Zähne sowie der Muskeln und der Knochen, zu verstehen ist. Die primäre Funktion des condylären Knorpels bestehe darin, die Kontinuität zwischen der Mandibula und der Fossa articularis am Os temporale aufrecht zu erhalten. Das vertikale Wachstum sei vorrangig auf die Krafteinwirkung des umgebenden Weichgewebes zurückzuführen. Die Modernisten schreiben dem Condylus zwar auch ein gewisses Wachstumspotential zu, verweisen aber auf deutliche Unterschiede in Morphologie, histologischer Struktur, Vaskularisation und Ossifikation zum Wachstum des Knorpels in Epiphysen.

In den eigenen Untersuchungen fanden sich zahlreiche Hinweise, die diese Ergebnisse bestätigen. Am fetalen und kindlichen Kiefergelenk wies der Knorpel eine 5-Schichtung auf. Die Abgrenzung zwischen den einzelnen Zellzonen ist dabei jedoch nicht so klar wie die bei Mäusen und Ratten beschriebene [Silbermann und Frommer 1972]. Die oberflächlichste Schicht, die in das Periost übergeht und als eigentliche Gelenkfläche mit dem Discus artikuliert, besteht hauptsächlich aus kollagenem Fasermaterial. Ein Merkmal, welches das Kiefergelenk, neben dem Sternoclaviculargelenk, von den übrigen Synovialgelenken unterscheidet [Fick 1911]. Diese Fasern sind vorrangig parallel zur Oberfläche ausgerichtet. Weinmann (1964) sieht darin eine Anpassung an die funktionellen Anforderungen der Artikulation. Dazwischen finden sich eingestreute Zellen. Meist wurden ausschließlich Fibroblasten identifiziert [Weinmann 1964; Schroeder 1992, Berraquero et al. 1992], das Vorhandensein von Chondrozyten wird von Wright und Moffett (1974) verneint. In den eigenen Schnittserien konnten jedoch Chondrozyten eindeutig nachgewiesen werden.
Weiterhin fanden sich kapselnah Gefäße. Während der fetalen und frühen postnatalen Entwicklung konnte eine umfangreiche Vaskularisation aller Gelenkstrukturen nachgewiesen werden. Darauf soll später noch näher eingegangen werden.

Die Fülle der Bezeichnungen für die oberflächlichste Schicht wie „articular layer“ [Wright und Moffett 1974], „superficial zone“ [Luder 1998], „oberflächliche, fibrös-artikuläre Schicht“ [Schroeder 1992], „fibrous tissue layer“ [Kantomaa 1986], „surface articular zone [Thilander et al. 1976] belegen sehr deutlich die Uneinigkeit hinsichtlich der Nomenklatur für die Schichten. In der vorliegenden Arbeit wurden Bezeichnungen in Anlehnung an Ben-Ami et al. (1992) und Schroeder (1992) verwendet.

An die oberflächliche fibröse Schicht schließt sich eine Zelllage an, deren Funktion für den Condylus von entscheidender Bedeutung ist. Sie besteht aus kleinen abgeplatteten bis runden Zellen. Öberg und Carlsson (1985) bezeichnen diese Zellen als „undifferenziertes Mesenchym“. Über deren Teilungsfähigkeit finden sich unterschiedliche Angaben in der Literatur. Blackwood (1976), Thilander et al. (1976), Öberg und Carlsson (1985) und Schroeder (1992), wiesen mitotische Aktivität nach, Wright und Moffett (1974) bestreiten dagegen das Vorkommen von Mitosen. Die Zellen zeigten allerdings in den Experimenten von Ben-Ami et al. (1992) als einzige die Fähigkeit [^{3}H]-Thymidin aufzunehmen, so dass von ihrer Proliferationsfähigkeit ausgegangen werden kann. Die Bezeichnung „chondroprogenitor cells“ [Ben-Ami et al. 1992] verweist gleichzeitig auf die Entwicklungsrichtung dieser Zellen. Sie differenzieren sich weiter zu Chondroblasten und Chondrozyten. Experimentelle Studien konnten außerdem nachweisen, dass die Differenzierung von biomechanischer Stimulation abhängig ist, woraus die Bezeichnung „bipotential skeletoblasts“ [Berraquero et al.1995] resultiert.

Ohne biomechanische Stimulation erfolgt eine Differenzierung zu Osteoblasten, während aus der Gelenkfunktion bedingte Reizungen eine Differenzierung zu Chondroblasten triggern [Kantomaa 1987; Livne et al. 1987]. Bei Versuchen an Affen konnte Stöckli (1972) weiterhin zeigen, dass es durch mechanische Stimulation zu einer Zunahme der Dicke der Proliferationszone und ihrer Aktivität kommt. Dieses Wissen wird auch bei der kieferorthopädischen Behandlung angewendet [Rakosi und Jonas 1989; Obwegeser 2001]. Die Steigerung der Proliferationsaktivität ist jedoch laut Copray et al. (1988) von der Stärke, der Expositionsdauer und dem Modus (kontinuierlich oder intermittierend) der

einwirkenden Kraft abhängig. Sie weisen darauf hin, dass das Wachstum nach Stimulation ebenso sistieren kann.

Die darauffolgende Schicht ist aus Zellen aufgebaut, die sich als Chondroblasten identifizieren lassen. Sie befinden sich in einem Übergangsstadium zwischen undifferenzierten Zellen und Knorpelzellen [Thilander et al.1976]. Die Zellen erscheinen runder und sind in reichlich Grundsubstanz eingebettet.

Die beiden Schichten, Übergangsschicht mit Chondroprogenitorzellen und die Chondroblastenschicht, können funktionell zu einer Schicht zusammengefasst werden. Sie stellen die Proliferationszone am Kiefergelenk dar und von ihnen geht das condyläre Wachstum aus. Diese Vorstellung wird in der Literatur bestätigt [Blackwood 1976; Öberg und Carllson 1985; Ben-Ami et al. 1992; Rakosi und Jonas 1989].

An die Proliferationszone schließt sich typischer hyaliner Knorpel an, der am fetalen und frühkindlichen Kiefergelenk einen großen Teil der Knorpelkappe ausmacht. Die anfangs noch kleinen Zellen nehmen zum Markraum hin an Größe zu. Die Chondrozyten sind nicht wie bei einer Epiphyse säulenartig angeordnet, sondern zeigen ein zufälliges Verteilungsmuster. Wright und Moffett (1974) bezeichnen es als schaumartig, Durkin (1973) sieht darin eher eine wabenähnliche Struktur. Jede einzelne Zelle ist von einem Knorpelhof umgeben, eine Organisation in isogenen Zellgruppen konnte nicht beobachtet werden. Diese spezifische Charakteristik des condylären Knorpels stellt einen erheblichen Unterschied zur Epiphysenfuge langer Röhrenknochen dar. In den tiefen Lagen des hyalinen Knorpels kommt es zur Mineralisation der Grundsubstanz. Das Vorkommen von Blasenknorpel und von einer Erosionszone mit Ausbildung von Knorpel-Knochen-Bälkchen sind Anhaltspunkt für Verknöcherungsvorgänge nach einem enchondralen Muster am Unterkieferköpfchen.

Die überwiegende Zahl der Autoren beschreibt die Knochenbildung am Condylus als enchondrale Ossifikation [Blackwood 1976; Perry 1985; Schroeder 1992; Ben-Ami et al. 1992; Berraquero et al. 1995; Shibata et al. 1996; Lee et al. 2001], während die übrigen Anteile der Mandibula nach dem Schema der desmalen Ossifikation verknöchern. Infolgedessen wird die Mandibula auch als gemischter

Knochen bezeichnet [Baume 1962]. Detaillierte Angaben bezüglich der prenatalen Ossifikationsvorgänge an der Mandibula wurden unlängst von Radlanski et al. (2003) veröffentlicht. Die Ossifikation am Kiefergelenk selbst wurde jedoch nicht in deren Betrachtungen miteinbezogen.
Weinmann (1964) betont, dass der Ersatz des Knorpels durch Knochen am Condylus auf die gleiche Weise wie am epiphysären Knorpel geschieht. Lediglich Silbermann und Frommer (1972) und Durkin et al. (1973) stellen dies infrage. Sie schreiben, dass die Resorption des mineralisierten Knorpels am Condylus durch Chondroklasten erfolgt, während Erosionsvorgänge am langen Röhrenknochen vorwiegend durch eindringende Kapillaren realisiert werden. Silbermann und Frommer (1972) sind der Meinung, dass die hypertrophen Chondrozyten am Condylus nicht wie am langen Röhrenknochen untergehen, sondern durch Fusion die Chondroklasten bilden. In den eigenen Präparaten konnten zahlreiche Chondroklasten entlang der Erosionszone nachgewiesen werden. Es ist demnach wahrscheinlich, dass sich am Kiefergelenk keine „klassische“ enchondrale Verknöcherung vollzieht, sondern dass sie lediglich nach einem enchondralen Muster erfolgt. Auch in den Ausführungen von Kjaer (1978) wird auf eine Verknöcherung „ähnlich der enchondralen Ossifikation“ verwiesen. Thilander et al. (1976) umgehen diese Diskussion, indem sie allgemein über „subchondral bone formation“ berichten, ohne jedoch auf den genauen Mechanismus einzugehen.

Eine weitere morphologische Besonderheit am fetalen und frühkindlichen Proc. condylaris ist die Vaskularisation. Während der Fetalzeit und beim Säugling wird der Knorpel von vaskularisierten Bindegewebssträngen durchzogen, die den Markraum und die Gelenkoberfläche miteinander verbinden. Diese wurden in der Literatur erstmals von Vindagroff (1910) [zitiert nach Merida-Velasco 1999] erwähnt. Er bezeichnete die Gefäßkanäle als „crampons“. Es war bei unseren Präparaten auffällig, dass anterior meist nur ein einzelner Kanal zu finden war, während posterior mehrere große Gefäßkanäle in Erscheinung traten. Dieses Ergebnis deckt sich mit denen früherer Untersuchungen [Merida-Velasco 2002].
Es liegen unterschiedliche Angaben darüber vor, wann sich diese Kanäle während der Embryogenese entwickeln. Symons (1952) fand sie bei 19 Wochen alten Feten,

Blackwood (1965) beschreibt sie dagegen in der 15. und Merida-Velasco et al. (1999) in der 16. Woche der Entwicklung. Es wird angenommen, dass die Kanäle aktiv in den Knorpel eindringen, möglicherweise mit Hilfe von Makrophagen oder anderen erosiven Zellen [Wilsman und Van Sickle 1972].

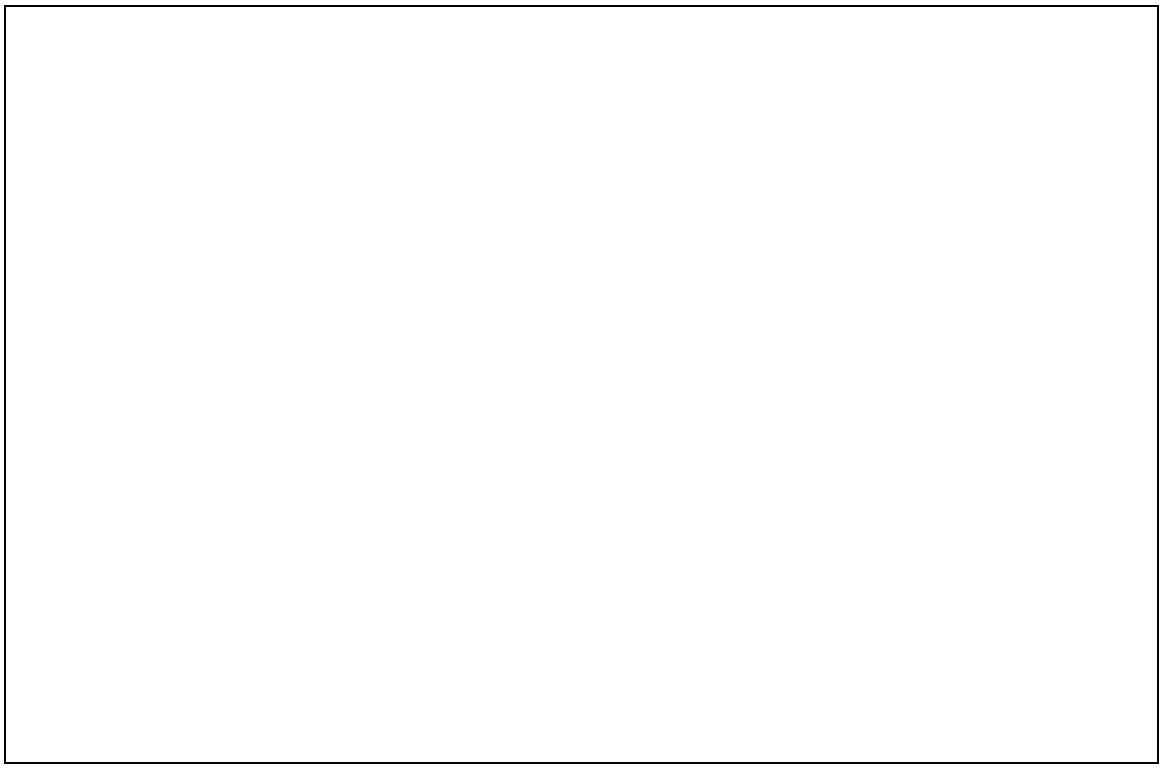
An den eigenen Präparaten ließ sich nicht klären, ob die Gefäße in den Kanälen aus der kapsulären oder der ossären Blutversorgung hervorgehen. Beide Möglichkeiten müssen in Betracht gezogen werden. In früheren Studien konnte die Herkunft der Gefäßkanäle ebenfalls nicht eindeutig bestimmt werden. Blackwood (1965) nimmt an, dass die Gefäße vom Markraum her eindringen, da vor der Entwicklung der Kanäle keine Vaskularisation im Perichondrium beobachtet wurde, und er zusätzlich eine Kontinuität zwischen den Gefäßen in den Kanälen und denen des Markraums zeigen konnte.

Blackwood (1965) sowie Wright und Moffett (1974) postulieren, die Funktion dieser Knorpelkanäle bestehe darin, die ausreichende Ernährung des Knorpels zu gewährleisten, um ihm ein schnelles Wachstum zu ermöglichen. Dieses sei nötig, um Platz für den Durchbruch der Zähne zu schaffen. Sie sehen untermauern diese These damit, dass die Vaskularisation nach der Geburt kontinuierlich abnimmt und nach der vollständigen Ausbildung des Milchgebisses im 3.-5. Lebensjahr verschwindet. Unter der Annahme der Ernährungsfunktion der Gefäßkanäle erscheint auch deren Verteilungsmuster erklärbar. Die meisten Kanäle konnten posterior gefunden werden und dort vollzieht sich bekanntlich das vorrangige Wachstum.

Bemerkenswerteweise scheinen die Gefäßkanäle ein spezifisches Merkmal des menschlichen Condylus zu sein, bei Ratten oder Meerschweinchen konnten solche nicht beobachtet werden [Durkin et al. 1973]. Beim Menschen sind sie zusätzlich in den Epiphysen langer Röhrenknochen oder im Knorpel des Respirationstrakts präsent [Gray 1995].

4.4.1 Entwicklungsbedingte Veränderungen am condylären Knorpel

Im Rahmen dieser Untersuchung konnten Präparate eines 25jährigen und eines 68jährigen Mannes mikroskopiert werden. Die auffälligste Veränderung am adulten Condylus ist eine signifikante Reduktion der Knorpelschicht. Wright und Moffett (1974) geben bereits für das Alter von sechs Monaten nur noch eine Dicke von etwa 0,5 mm an. Ursache ist vorrangig eine Abnahme des Ausmaßes der hyalinen Knorpelschicht. Trotzdem sind beim Erwachsenen fünf verschiedene Schichten abgrenzbar. Aus der Literatur geht hervor, dass einige Autoren weniger Schichten unterscheiden. Luder (1997) verdeutlicht in seiner Arbeit gleichzeitig die Fülle der existierenden Nomenklatur hinsichtlich der verschiedenen Schichten. Er selbst grenzt ebenfalls fünf Schichten voneinander ab.



Die zelluläre Zusammensetzung der Schichten differiert gegenüber dem infantilen Proc. condylaris. Die fibrös-artikuläre Schicht erscheint dicker sowie homogener in ihrem Aufbau. Es kommt zu einer Zunahme der Fasern und einer Abnahme der Zellzahl. Die Proliferationszone ist sehr dünn und teilweise sogar unvollständig, bleibt jedoch bis ins hohe Alter vorhanden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Wachstums- bzw. Umbauvorgänge auch im Erwachsenenalter möglich sind.

Eine Vaskularisation des Knorpels ist beim Erwachsenen nicht mehr nachweisbar. Demnach ist schnelles Wachstum wie im Kindesalter nicht zu erwarten.

Eine Chondroblastenschicht im eigentlichen Sinne ist nicht mehr existent. Statt dessen findet sich am adulten Condylus eine faserknorpelige Schicht zwischen der Proliferationszone und dem darunter liegenden Knorpel. Die Faserknorpelschicht weist reichlich kollagene Fasern auf, die in vertikaler und diagonaler Richtung angeordnet sind. Luder (1997) bezeichnet diese als „grid-fibrous fibrocartilage“ und betont damit die netzartige Anordnung der kollagenen Fasern. Es ist wiederum ein Rückgang der Zellzahl offensichtlich, die Masse der Interzellularsubstanz hat dagegen zugenommen. Diese Schicht hat neben der fibrös-artikulären Schicht die größte Ausdehnung am adulten Knorpel.

Eine hyaline Knorpelschicht, wie sie beim fetalen und frühkindlichen Kiefergelenk nachweisbar ist, findet sich nicht. Es ist lediglich eine dünne Lage knorpelähnlicher Zellen vorhanden, die von verkalkter Interzellularsubstanz [Luder 1998] umgeben sind. Die Abgrenzung zum darunter befindlichen kompakten Knochen ist nicht immer scharf. Insgesamt fiel auf, dass anterior und superior die Ausdehnung der separaten Schichten am größten war, nach dorsal verschmälerten sie sich. Das lässt sich als Anpassung an die funktionellen Anforderungen interpretieren [Thilander et al. 1976].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es im Alter zu einer Abnahme der Dicke der Knorpelschicht kommt, wobei gleichzeitig die Zellzahl reduziert wird und eine fortschreitende Fibrosierung zu beobachten ist. Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit früheren Berichten. Öberg und Carlsson (1985) stellten fest, dass die zelluläre Zusammensetzung und die Dicke der Schichten in Abhängigkeit von deren funktioneller Belastung, von Umbauvorgängen sowie vom Alter variieren.

Der Rückgang des hyalinen Knorpels und die Zunahme des Faserknorpels wird von Luder (1998) ebenfalls als Antwort auf die veränderten funktionellen Anforderungen am adulten Condylus zurückgeführt. Er erklärt die geringe Zellzahl damit, dass die mitoptisch aktiven Zellen, die während des Wachstums für kontinuierlichen Nachschub von Chondrozyten sorgen mussten, allmählich beim Ersatz des hyalinen Knorpels durch Faserknorpel aufgebraucht werden. Andere Autoren sind dagegen der Meinung, dass die Zellzahl durch anhaltende Knorpelbildung für Umbauvorgänge („remodelling“) zurückgeht [Lubsen et al. 1985].

Es konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass am Condylus zeitlebens eine Proliferationsschicht erhalten bleibt, was beweist, dass sich dort ständig Umbauvorgänge vollziehen können und auch ein Wachstum grundsätzlich möglich ist. Copray et al. (1988) beschreiben die Funktion des condylären Knorpels während der Entwicklung in drei Phasen. In der ersten Phase (intrauterin) fungiert er ausschließlich als Wachstumsknorpel. Mit der Geburt kommt in zunehmendem Maße die Artikulationsfunktion hinzu, während die Wachstumsfunktion langsam, aber kontinuierlich nachlässt. Nach dem 20. Lebensjahr überwiegt die Gelenkfunktion, ein Wachstumspotenzial bleibt jedoch zeitlebens erhalten. Die eigenen histologischen Ergebnisse unterstützen diese Theorie. Copray et al. (1988) nehmen an, dass das nachlassende Wachstumspotenzial am condylären Knorpel auf die zunehmende funktionelle Belastung zurückzuführen ist, denn sie konnten zeigen, dass der juvenile Knorpel bei verminderter funktioneller Belastung seine Wachstumsaktivität wiedererlangt. Sie weisen jedoch auch darauf hin, dass der adulte Knorpel sich nicht mehr problemlos veränderten funktionellen Einflüssen anpassen kann, woraus tiefgreifende morphologische Veränderungen mit erheblichen funktionellen Beeinträchtigungen resultieren.

4.5 Schlussfolgerungen

Die eigenen Ergebnisse zum makroskopischen und histologischen Aufbau am Condylus weisen auf ein appositionelles Wachstum hin. Bei der vorliegenden zellulären Organisation der Chondrozyten kann davon ausgegangen werden, dass die Zellen in der Proliferationsschicht, gebildet von den Chondroprogenitorzellen und den Chondroblasten entstehen, und für das Wachstum verantwortlich sind. Die Neubildung von Knochengewebe erfolgt nach dem Schema der enchondralen Ossifikation. Youdelis (1966); Durkin et al. (1973), Wright und Moffett (1974), Blackwood (1976) sowie Ranly (2000) kommen in ihren Untersuchungen zu einem ähnlichen Resultat.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse ist ein Vergleich des Knorpels am Proc. condylaris mit einer epiphysären Wachstumszone an Röhrenknochen nicht berechtigt. Es existieren zu viele Verschiedenheiten zwischen den beiden Strukturen. Die Differenzen bestehen in der embryologischen Herkunft, im histologischen Aufbau, in der Art der Ossifikation und nicht zuletzt in der Funktion. Ranly (2000) verweist zusätzlich auf biochemische Unterschiede.

Der condyläre Knorpel hat zweierlei Funktionen. Zum einen ist er Gelenkknorpel, dient also der Artikulation, zum anderen spielt er eine herausragende Rolle beim Wachstum der Mandibula. Die Ansicht, er sei dabei identisch einem primären Wachstumszentrum wie dem in einer Epiphysenfuge ist eher weitherzig begründet. Der condyläre Knorpel ist aus embryologischer Sicht ein sekundärer Knorpel, während die Epiphysenfugen aus dem primär knorpelig angelegten Skelettanteil hervorgehen. Weiterhin finden sich einige morphologische Unterschiede, die im besonderen bei der histologischen Untersuchungen offensichtlich wurden. Die zelluläre Organisation der Chondrozyten fällt dabei als erstes auf. Im Knorpel am Condylus sind diese Zellen nicht streng säulenartig angeordnet (Säulenknorpel), sondern mehr oder weniger zufällig in der Ossifikationszone verteilt.

Eine so ausgeprägte fibröse Deckschicht ist am Gelenkknorpel der langen Röhrenknochen nicht vorhanden. Lediglich am Sternoclaviculargelenk gibt es einen vergleichbaren Aufbau des Gelenkknorpels [Ogus und Toller 1984, Ellis und Carlson 1986].

Gewisse Spezifika liegen in der Vaskularisation vor. Am Proc. condylaris konnte nur ein aus der Medulla ossea aufsteigendes Gefäß nachgewiesen werden, welches sich dann baumartig an der Grenze zum Knorpel aufzweigt [Durkin et al. 1973]. Hingegen werden an Röhrenknochen, wie das Beispiel der Tibia zeigt, mehrere intraossäre zuführende Gefäße gefunden. Die kapsuläre Blutversorgung des Kiefergelenks erfolgt aus kleinen Ästen benachbarter Blutgefäße, zeigt also keine besonderen Spezifika.

Bei der Betrachtung dieser Fakten wird deutlich, dass der condyläre Knorpel nicht ohne weiteres dem Knorpel der epiphysären Wachstumszone verglichen bzw. gleichgesetzt werden kann. Somit wird die Meinung der Modernisten bestätigt. Der Proc. condylaris kann nicht als ausschließlicher Motor für das Wachstums an der Mandibula angesehen werden. Die klinischen Ergebnisse von Obwegeser (2001) unterlegen dies. Er beobachtete ein nahezu normales Wachstum sowie eine vollständige Funktionstüchtigkeit nach einer einseitigen Condylektomie im Kindesalter. Zusätzlich erhärtet dies die Theorie, dass condyläres Wachstum adaptiver Natur ist [Moss und Salentijn 1971]. Dennoch betont Obwegeser (2001) zum einen die Wichtigkeit des Condylus für die normale Funktion des Unterkiefers, zum anderen dessen Potenzial, abnormales Wachstum zu induzieren.
Es sollte daher von der Ansicht Abstand davon genommen werden, dem Knorpel am Kiefergelenk keinerlei eigenes Wachstumspotenzial zuzusprechen. Es ist anzunehmen, dass es besonders am infantilen und juvenilen Kiefergelenk vorhanden ist. Die intensive Vaskularisation durch Gefäßkanäle während der frühen Entwicklungsphase kann als Hinweis dafür gewertet werden. Beim Krankheitsbild der Akromegalie wird aber auch am adulten Kiefergelenk deutlich, dass das Wachstum nicht ausschließlich adaptiver Natur sein kann [Ranly 2000].
Enlow (1989) berichtet in seiner ausführlichen Abhandlung zum Wachstum des Gesichtsschädels, dass ein begrenztes, genetisch determiniertes Programm für das Wachstum am Proc. condylaris anzunehmen ist. Jedoch scheint es auf die Kapazität der kontinuierlichen Zellteilung begrenzt zu sein. Zu deren Aufrechterhaltung seien zusätzlich extrakondyläre Faktoren notwendig. Der Proc. condylaris erfülle die Aufgabe eines regionalen Wachstumszentrums, was die Anpassung an die lokalen

Verhältnisse gewährleistet. Er kann daher nicht länger als die bestimmende Struktur für die Morphogenese der Mandibula angesehen werden. Vielmehr ist die endgültige Gestalt der Mandibula das Ergebnis von Größenzunahme, Knochenumbauvorgängen und Knochenverlagerung am gesamten Unterkiefer [Enlow und Harris 1964]. Zweifellos stellt der Proc. condylaris dabei ein Hauptwachstumszentrum dar. Aufgrund ihrer enormen Vielfältigkeit sind erschöpfende Angaben zum Unterkieferwachstum an dieser Stelle nicht möglich. Es muss auf die Ausführungen von Enlow (1989) sowie Rakosi und Jonas (1989) verwiesen werden.

5 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Suche nach geeigneten Transplantaten zum Ersatz des gelenktragenden Mandibula-Abschnittes im Wachstumsalter sind fundierte anatomische Kenntnisse dieser Region unbedingte Vorraussetzung. Die in der Literatur vorhandenen Angaben zum Aufbau und zum Wachstum am Processus condylaris und der Mandibula insgesamt sind jedoch unvollständig und teilweise widersprüchlich.
Unter diesem Blickwinkel wurde die vorliegende Arbeit von Mund-, Kiefer-Gesichtschirurgen angeregt. Es sollte mittels makroskopischer, mikroskopischer sowie radiologischer Untersuchungen versucht werden, die anatomisch-topographischen Verhältnisse an der Mandibula und insbesondere am Processus condylaris zu charakterisieren, und mit Hilfe der erarbeiteten Ergebnisse das bereits vorhandene Wissen zu ordnen und neu zu bewerten.
Im Vordergrund stand die Frage nach der Art und Weise des Wachstums am Processus condylaris. Wie weit sind Vergleiche mit den Wachstumsvorgängen an Epiphysenfugen anderer Knochen berechtigt?

Weder in den makroskopischen noch in den radiologischen Befunden ergaben sich Hinweise auf die Existenz einer Epiphysenfuge. In den histologischen Schnittserien wies der condyläre Knorpel sowohl bei Feten und Neugeborenen als auch bei adulten Individuen eine 5-Schichtung auf. Die zelluläre Zusammensetzung sowie der strukturelle Aufbau unterliegen Veränderungen im Laufe des Alternsprozesses. Beim Feten und Neugeborenen bestimmt vorwiegend typischer hyaliner Knorpel das Bild. Beim Erwachsenen kommt es zu einer deutlichen Reduktion der Höhe der Knorpelschicht. Außerdem nimmt die Zellzahl ab und damit der Anteil der Interzellularsubstanz zu, verbunden mit einer fortschreitenden Fibrosierung. Es existiert jedoch in jeder der untersuchten Lebensperioden eine Zone proliferationsfähiger Zellen am Processus condylaris. An den fetalen und kindlichen Condylen konnte eine ausgeprägte Blutversorgung des Knorpels durch

Knorpelkanäle, die beim Erwachsenen nicht mehr vorkommen, beobachtet werden.

Die histologischen Ergebnisse liefern den eindeutigen Beleg, dass am Processus condylaris zu keinem Zeitpunkt eine Epiphysenfuge existiert. Der oft gezogene Vergleich zwischen dem condylären Knorpel und der Wachstumszone am Epiphysenknorpel langer Röhrenknochen ist nicht zulässig. Vielmehr kann der Processus condylaris anhand der Struktur seiner Knorpelkappe als lokales Wachstumszentrum angesehen werden, welches durch Apposition zeitlebens multidirektionales Wachstum und Remodellierungen möglich macht. Dieses Zentrum ist jedoch nicht allein verantwortlich für die endgültige Gestalt der Mandibula und für funktionsbedingte Umbauvorgänge im Laufe des Lebens.

Der Nachweis, dass am Processus condylaris des Unterkiefers keine Epiphysenfuge ausgebildet wird, ist für zukünftige Überlegungen zur Auswahl geeigneter Transplantate für den Ersatz des Condylus im Wachstumsalter von entscheidender Bedeutung. Das Vorhandensein einer Epiphysenfuge am prospektiven Transplantat ist demnach keine unbedingte Voraussetzung für eine erfolgreiche Rekonstruktion des gelenktragenden Abschnitts der Mandibula. Aus morphologischer Sicht ist der Aufbau der Clavicula am Sternoclaviculargelenk dem Processus condylaris sehr ähnlich. Beide Gelenkköpfchen weisen eine sehr ähnliche Schichtung der knorpeligen Strukturen und der Knochenbildungszone auf [Ellis und Carlson 1986]. Von diesem Standpunkt aus betrachtet, erscheint die Clavicula besonders geeignet für ein mitwachsendes Transplantat.

Bei Kindern und Jugendlichen sind in die Überlegungen zur Transplantatauswahl jedoch auch das Alter der Betroffenen, die Prognose der Grunderkrankung, die Defektlokalisation und –größe, die dimensionsgetreue Konturierbarkeit des Transplantates und die Morbidität der Entnahmeregion mit einzubeziehen [Cornelius et al. 1994].

Auf der Grundlage der hier gewonnenen Kenntnisse sollte es daher Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, welche knöchernen Strukturen einen funktionsfähigen Ersatz des Kieferköpfchens darstellen können.

6 Literaturverzeichnis

Bareggi R (1995) *Mandibular growth rates in human fetal development*. Archs. Oral Biol. 40 (2): 119-125

Baume LJ (1962a) *Embryogenesis of the human temporomandibular joint*. Science 138: 904-905

Baume LJ (1962b) *Ontogenesis of the human temporomandibular joint 1. Development of the condyles.* J. Dent. Res. 41: 1327-1339

Baume LJ (1970) *Differential response of condylar, epiphyseal, synchondrotic and articular cartilages of the rat to varying levels of vit. A.* Amer. J. Orthod. 58: 537-551

Becker R (1965) *Das Wachstum des Unterkiefers. Untersuchungen zur Pathogenese der Wachstumsstörungen des Unterkiefers*. Dtsch. Zahn-, Mund- u. Kieferheilkunde 44: 177-208

Ben-Ami Y, Lewinson D and Silbermann M (1992) *Structural characterization of the mandibular condyle in human fetuses: light and electron microscopy studies*. Acta Anat. 145: 79-87

Berraquero R, Palacios J and Rodriguez JI (1992) *The role of the cartilage in mandibular growth. A study in thanatophoric dysplasia*. Am. J. Othod. Dentofacial Orthop. 102: 220-226

Berraquero R, Palacios J, Gamallo C, de la Rosa P and Rodriguez JI (1995) *Prenatal growth of the human mandibular condylar cartilage*. Am. J. Othod. Dentofacial Orthop. 108 (2): 194-200

Bibb C, Pullinger A and Baldioceda F (1992) *The relationship of undifferentiated mesenchymal cells to TMJ articular tissue thickness*. J. Dent. Res. 71: 1816-1821

Blackwood HJ (1965) *Vascularization of the condylar cartilage of the human mandible*. J. Anat. 99: 551-563

Blackwood HJ (1966) *Cellular remodeling in articular tissue*. J. Dent. Res. 45 : 480-489

Blackwood HJ: *The mandibular joint: Development, structure and function*. In: Cohen B and Kramer IRH (eds): *Scientific foundations of dentistry*. Heinemann: London (1976) S.590-595

Bogoeff I (1933) *Untersuchung über den Bau der Pfanne, des Höckers und die Form des Gelenkkopfes am Material des Rassenschädels*. Med. Diss., Leipzig

Brodie A (1941) *On the growth pattern of the human head*. Am. J. Anat. 68: 209-262

Copray JC, Dibbets J and Kantomaa T (1988) *The role of the condylar cartilage in the development of the temporomandibular joint*. The Angle Orthodontist 58: 369-380

Cornelius CP, Ehrenfeld M und Schwenzer N (1994) *Zur Unterkieferrekonstruktion im Wachstumsalter*. Fortschr. Kiefer-Gesichts-Chir. 39: 141-146

De Bont L, Boering G, Havinga P and Liem R (1984) *Spatial arrangement of collagen fibrils in the articular cartilage of the mandibular condyle: A light microscopic and scanning electron microscopic study*. J. Oral Maxillofac. Surg. 42: 306-313

Durkin JF, Heeley JD and Irving JT (1973) *The cartilage of the mandibular condyle*. Oral Science Review 2: 29-99

Ellis E and Carlson D (1986) *Histologic comparison of the costochondral, sternoclavicular and temporomandibular joints during growth in Macaca mulatta*. J. Oral Maxillofac. Surg. 44: 312-321

Enlow DH and Harris DB (1964) *A study of the postnatal growth of the human mandible*. Am. J. Orthod. 50: 25-50

Enlow DH: *Handbuch des Gesichtswachstums*. Quintessenz Verlags-GmbH: Berlin (1989)

Farmand M, Hirschfelder U und Müßig D (1994) *Die Rekonstruktion des lateralen Gesichts bei Kindern*. Fortschr. Kiefer-Gesichts-Chir. 39: 146-149

Fick R: *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke*, Bd. 3. Fischer-Verlag: Jena (1911)

Flygare F, Klinge B, Rohlin M, Akerman S and Lanke J (1993) *Calcified cartilage zone and ist dimensional relationship to the articular cartilage in the human temporomandibular joint of elderly individuals*. Acta Odontol. Scand. 51: 183-191

Fröber R, Rummer R, Groß W, Schleicher Ch, Neumann R, Schulze E, Kuhne M and Linß W: *The suitability of femoral and tibial lenghts in the age determination of human fetuses*. In: Vogel R, Fanghänel J, Giebel J (eds): Aspects of teratology Vol.1, Proceedings on the 9th Teratology Symposium Greifswald. Tectum Verlag: Marburg (1996) S. 194-197

Funakoshi K (2001) *Nutrient arteries of the temporomandibular joint: An anatomical and a pathological study*. Okajimas Folia Ant. Jpn. 78 (1): 7-16

Gaupp E (1911) *Beiträge zur Kenntnis des Unterkiefers der Wirbeltiere*. Anat. Anz. 39: 609-666 zit. In: Moffett BC (1957) *The prenatal development of the human temporomandibular joint*. Contributions to Embryology 36: 19-28

Griffin C, Hawthorn R and Harris R *Anatomy and histology of the human temporomandibular joint*. In: Griffin C and Harris R (eds.): *The Temporomandibular Joint Syndrome. The Masticatory Apparatus of Man in Normal and Abnormal Function*. Monographs in Oral Science, Vol. 4, Karger: Basel (1975) S. 1-26

Guyuron B and Lasa C (1992) *Unpredictable growth pattern of costochondral graft.* Plast. Reconstr. Surg. 90: 880-889

Hansson T, Öberg T, Carlsson G and Kopp S (1977) *Thickness of the soft tissue layers and the articular disc in the temporomandibular joint*. Acta Odontol. Scand. 35: 77-83

Hellner D, Klein B, Schmelzle R, Vocke C und Rottke B (1994) *Rekonstruktion des Ober- und Unterkiefers durch freie und mikrovaskuläre Transplantate*. Fortschr. Kiefer-Gesichts-Chir. 39: 132-135

Humphry G (1864) *On the growth of the jaws*. Trans. of the Cambridge Phil. Society, Cambridge; zit. In: Brodie A (1941) *On the growth pattern of the human head*. Am. J. Anat. 68: 209-262

Hunter J (1771) *Natural history of the human teeth*. London zit. In: Brodie A (1941) *On the growth pattern of the human head*. Am. J. Anat. 68: 209-262

Kaban LB, Moses MH and Mulliken JB (1988) *Surgical correction of hemifacial microsomia in the growing child*. Plast. Reconstr. Surg. 82: 9-19

Kantomaa T (1986) *New aspects of the histology of the mandibular condyle in the rat*. Acta Anat. 126: 218-222

Kantomaa T (1987) *Effect of functional change on cell differentiation in the condylar cartilage*. J. Anat. 152: 133-143

Kieffer J (1908) *Beiträge zur Kenntnis der Veränderungen am Unterkiefer und Kiefergelenk des Menschen durch Alter und Zahnverlust*. Z. Morphol. Anthropol. 11: 1-82

Kjaer I (1978) *Histochemical and radiologic studies of the human fetal mandibular condyle*. Scand. J. Dent. Res. 86: 279-299

Klein C (1994) *Die Knochenverlängerung nach Ilizarov zur Behandlung der mandibulären Mikrognathie im Kindesalter*. Fortschr. Kiefer-Gesichts-Chir. 39: 150-152

Kohlbach W: *Anatomie der Zähne und des kraniofacialen Systems*. Quintessenz Verlag: Berlin u.a. (2003) S. 181-185

Lee SK, Kim YS, Oh HS, Yang KH, Kim EC and Chi JG (2001) *Prenatal development of the human mandible*. Anat. Rec. 263: 314-325

Levy BM: *Embryological development of the temporomandibular joint*. In: Sarnat BG (ed.): *The temporomandibular joint*, 2. ed, Charles C. Thomas Publisher: Springfield (1964) S. 59-70

Lindquist C, Pihakari A, Tasanen A and Hampf G (1986) *Autogenous costochondral grafts in temporomandibular joint arthroplasty*. J. max.-fac. Surg. 14: 143-149

Linß W (1990) *Bemerkungen zur funktionellen Morphologie des menschlichen Kiefergelenks*. Gegenbaur´s Morph. Jb. 136: 28-29

Livne E, Oliver C and Silbermann M (1987) *Further characterization of the chondroprogenitor zone in mandibular condyles of suckling mice. An ultrastrucutral and cytochemical study*. Acta Anat. 129: 231-237

Lubsen C, Hansson T, Nordström B and Solberg W (1985) *Histomorphometric analysis of cartilage and subchondral bone in mandibular condyles of young human adults at autopsy*. Arch. Oral Biol. 30: 129-136

Lubsen C, Hansson T, Nordström B and Solberg W (1987) *Histomorphometry of age and sex changes in mandibular condyles of young human adults*. Arch. Oral Biol. 32: 729-733

Luder HU (1997) *Frequency and distribution of articular tissue features in adult human mandibular condyles: A semiquantitative light microscopic study*. Anat. Rec. 248: 18-28

Luder HU (1998) *Age changes in the articular tissue of human mandibular condyles from adolescence to old age: A semiquantitative light microscopy study*. Anat. Rec. 251: 439-447

Merida-Velasco JR (2002) *Vascular canals. A model for the mandibular condyle growth*. An. R. Acad. Nac. Med. 119 (1): 41-54

Merida-Velasco JR, Rodriguez-Vasquez JF, Merida-Velasco JA, Sanchez-Montesinos I, Espin-Ferra J and Jiminez-Collado J (1999) *Development of the human temporomandibular joint*. Anat. Rec. 255 (1): 20-33

Merz E: *Sonographische Diagnostik in Gynäkologie und Geburtshilfe*. Georg Thieme Verlag: Stuttgart u.a. (1988) S. 280-294

Meyenberg K, Kubik S, Palla S (1986) *Relationships of the muscles of mastication to the articular disc of the temporomandibular joint*. Helv. Odont. Acta 30: 815-830

Michel C, Reuther J, Meier J und Eckstein T (1994) *Die Differenzialindikation mikrochirurgischer und freier autogener Knochentransplantate zur Rekonstruktion des Unterkiefers*. Fortschr. Kiefer-Gesichts-Chir. 39: 96-100

Mills J (1983) *A clinician looks at facial growth*. Br. J. Orthod. 10: 58-72

Moffett BC (1957) *The prenatal development of the human temporomandibular joint. Contributions to Embryology* 36: 19-28

Moffett BC, Johnson LC, McCabe JB and Askew HC (1964) *Articular remodeling in the adult temporomandibular joint*. Am. J. Anat. 115: 119-142

Moll KJ und Moll M: *Anatomie*, 15. Aufl., Gustav Fischer Verlag: Lübeck, Stuttgart, Jena, Ulm (1997)

Moore K und Persaud T: *Embryologie*. 4.Aufl., Schattauer: Stuttgart, New York (1996)

Moritz T: *Der Ansatz des Musculus pterygoideus lateralis am Kiefergelenk des Menschen*. Med. Dent. Diss. Kiel (1986)

Moss M and Salentijn L (1970) *The logarithmic growth of the human mandible*. Acta Anat.77: 341-360

Moss ML and Salentijn L (1971) *The compensatory role of the condylar cartilage in mandibular growth: Theoretical and clinical implications*. Deutsche Zahn-Mund- und Kieferheilkunde 56: 5-16

Murakami K and Hoshino K (1985) *Histological studies on the inner surfaces of the articular cavities of human temporomandibular joints with special reference to arthroscopic observations*. Anat. Anz. 160: 167-177

Öberg T and Carlsson G *Macroscopic and microscopic anatomy of the temporomandibular joint*. In: Zarb G and Carlsson G (eds.): *Temporomandibular Joint Function and Disfunction*. Munksgaard: Copenhagen (1979) S. 101-118

Öberg T und Carlsson G: *Makroskopische und mikroskopische Anatomie des Kiefergelenks*. In: *Physiologie und Pathologie des Kiefergelenks*. Quintessenz Verlag: Berlin (1985) S. 115-133

Obwegeser HL: *Mandibular growth anomalies. Terminology, Aetiology, Diagnosis, Treatment.* Springer Verlag: Berlin u.a. (2001) S. 47-48, 118- 122, 134-135, 347-353

Ogus H und Toller P: *Die Quintessenz der Erkrankungen des Kiefergelenks*. Bd. 20, Quintessenz Verlags-GmbH: Berlin (1984)

Ordnung R, Reuther J, Michel C, Pistner H und Eckstein T (1994) *Die Problematik der Kiefergelenkrekonstruktion mit freien Knochentransplantaten von der Rippe und vom Beckenkamm*. Fortschr. Kiefer-Gesichts-Chir. 39: 156-160

Perry HT and Castelein PT (1985) *Anatomic, histologic and radiographic investigation of the mandible in the 8 - 30 week human fetus*. (Abstract) J. Oral Rehabil. 12: 529-530

Peter, Wetzel und Heiderich: *Handbuch der Anatomie des Kindes*, Bd 1 und 2, Verlag von J.F. Bergmann: München (1938)

Petrovic AG (1972) *Mechanism and regulation of mandibular condylar growth*. Acta Morphol.Neerl-Scand. 10: 25-34

Platzer W (1980) *Zur Anatomie der Kiefergelenke*. Fortschr. Mund- Kiefer-Gesichtschirurgie 25: 1-2

Purrmann G, Pätzold L und Linß W *Zum Ansatz des Musculus pterygoideus lateralis*. In: Schumacher GH, Fanghänel J und Brehmer H: *Oral – Anatomie*. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock (1988) S.81

Putz R und Pabst R (Hrsg.): Sobotta J: *Atlas der Anatomie des Menschen*. Bd 1, 20. Aufl., Urban & Schwarzenberg: München u.a. (1993)

Radlanski R, Lieck S and Bontschev N (1999) *Development of the human temporomandibular joint. Computer-aided 3D-reconstructions*. Eur. J. Oral Sci. 107: 25-34

Radlanski R, Renz H, Klarkowski M (2003) *Prenatal development of the human mandible*. Anat. Embryol. 207: 221-232

Rakosi T und Jonas I: *Kieferorthopädie, Diagnostik*. In: Rateitschak KH (Hrsg.) *Farbatlanten der Zahnmedizin*, Bd. 8, Georg Thieme Verlag: Stuttgart u.a. (1989)

Ranly DM (2000) *Craniofacial growth*. Dental clinics of North America 44: 457-470

Rees LA (1954) *The structure and function of the mandibular joint*. Brit. Dent. Journal 96: 125-133

Reich RH: *Kiefergelenkchirurgie*. In: Hausamen JE, Machtens E und Reuther J: *Mund- Kiefer- und Gesichtschirurgie*. 3. Aufl., Springer: Berlin, Heidelberg, New York (1995) S. 181-209

Richards L, Lau E and Wilson D (1985) *Histopathology of the mandibular condyle*. J. Oral Pathol. 14: 624-630

Rummer R: *Biometrische Altersbestimmungen an fixierten menschlichen Feten des 2. Trimenons*. Med. Diss., Friedrich-Schiller-Universität Jena (1998)

Scheuer L and Black S: *Developmental juvenile osteology*. Academic Press: San Diego a.o. (2000) S. 139-147

Schroeder HE: *Orale Strukturbiologie*, Kap. 5: Kiefergelenk, 4. Aufl., Thieme Verlag: Stuttgart, New York (1992)

Schumacher GH: *Principles of skeletal growth*. In Dixon AD, Hoyte D and Rönning O (eds.): *Fundamentals of craniofacial growth*. CRC Press: New York (1997)

Shibata S, Suzuki S, Tengan T, Ishii M and Kuroda T (1996) *A histological study of the developing condylar cartilage of the fetal mouse mandible using coronal sections. Archs*. Oral Biol. 41 (1): 47-54

Silbermann M and Frommer J (1972) *The nature of endochondral ossification in the mandibular condyle of the mouse*. Anat. Rec. 172: 659-668

Slootweg P and de Wilde P (1985) *Condylar pathology in jaw dysfunction*: *A semiquantitative study*. J. Oral Pathol. 14: 690-697

Sperber GH: *Craniofacial embryology*, Chapter 12 and 13. Dental Practicer Handbook 15, Fourth Edition, Wright: England (1989)

Steinhardt G (1935) *Die Bedeutung funktioneller Einflüsse für die Entwicklung und Formung der Kiefergelenke*. Deutsche Zahn- Mund- und Kieferheilkunde 11: 711-722

Stöckli P (1972) *Die Reaktionsfähigkeit des mandibulären Gelenkknorpels auf orthopädische Stimulation während der Wachstumsphase*. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 82: 335-379 (Teil I)

Stöckli P (1972) *Die Reaktionsfähigkeit des mandibulären Gelenkknorpels auf orthopädische Stimulation während der Wachstumsphase*. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 82: 558-575 (Teil II)

Stratmann U, Schaarschmidt K and Santamaria P (1996) *Morphometric investigation of the condylar cartilage and disc thickness in the human temporomandibular joint: Significance for the definition of osteoarthrotic changes.* J. Oral Pathol. Med. 25: 200-205

Symons NB (1952) *The development of the human mandibular joint*. J. Anat. 86: 326-333

Thilander B, Carlsson G and Ingervall B (1976) *Postnatal development of the human temporomandibular joint. I. A histological study*. Acta Odontol. Scand. 34: 117-126

Voy ED und Fuchs M (1980) *Anatomische Untersuchungen zur Blutgefäßstruktur im Bereich des Kiefergelenks*. Fortschr. Mund- Kiefer- Gesichtschirurgie 25: 2-5

Waldeyer A, Mayet A: *Anatomie des Menschen*. Bd. 1 und 2, 16. Auflage, de Gruyter: Berlin, New York (1993)

Weinmann J and Sicher H: *Histophysiology of the temporomandibular joint*, Chapter 4. In: Sarnat BG (ed.): *The temporomandibular joint*, 2. ed, Charles C. Thomas Publisher: Springfield (1964) S. 71-76

Williams PL (ed.): *Gray's Anatomy*, 38th ed, Churchill Livingstone: New York, Edinburgh, London, Tokyo, Madrid, Melbourne (1995)

Wilsman NJ and Van Sickle DC (1972) *Cartilage canals, their morphology and distribution*. Anat. Rec. 173: 79-93

Wright DM and Moffett BC (1974) *The postnatal development of the human temporomandibular joint*. Am. J. Anat. 141: 235-250

Yuodelis R (1966) *The morphogenesis of the human temporomandibular joint and its associated structures*. J. dent. Res. 45: 182-19

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich Schiller Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönliche Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben:

Herr Prof. Dr. med. habil. Werner Linß

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, den

Lebenslauf

Karina Möller
geboren am 20. Dezember 1979 in Marienberg
ledig

Ausbildung:

1986 – 91	Grundschule „Emil Wölk“, Stadtroda
1991 – 98	Gymnasium „Johann Heinrich Pestalozzi“, Stadtroda
	09.07.1998 Abitur
1998	Beginn des Medizinstudiums an der FSU Jena
	06.09. 2000 Physikum
	28.08. 2001 I. Staatsexamen

Famulaturen:

26.02. – 25.03. 2001	Chirurgische Abteilung des Städtischen Krankenhauses Pforzheim
19.09. – 18.10. 2001	Abteilung für Interventionelle Kardiologie des Städtischen Krankenhauses Pforzheim
18.02. – 17.03. 2002	HNO – Privatpraxis Dr. Heidrun Sonnefeld
19.09. – 18.10. 2002	Abteilung für Gynäkologie und Geburtshilfe des Städtischen Krankenhauses Pforzheim

Danksagung

Herzlicher Dank gilt meinem verehrten Herrn Professor Dr. med. habil. Werner Linß für die stets engagierte Betreuung der Versuche, die konstruktive Diskussion der Ergebnisse und die kritische Korrektur des Manuskripts. Durch seine fürsorgliche Begleitung hat er herausragend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Frau OÄ Dr. R. Neumann und Herrn OA Dr. H.-J. Mentzel (Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie) möchte ich für die freundliche Unterstützung bei der Anfertigung der radiologischen Aufnahmen danken.

Des weiteren möchte ich den Mitarbeitern des Instituts für Anatomie I meinen Dank aussprechen. Herr M. Szabo stellte mit der Anfertigung der Fotografien einmal mehr sein fachliches Können unter Beweis und Frau S. Freund stand mir bei den morphometrischen Messungen mit Rat und Tat zur Seite.

Für die Unterstützung bei der Datenverarbeitung dieser Dissertation gilt meinem guten Freund Patrick ein besonderer Dank.

Die zahlreichen Hinweise und Anregungen dieser Personen haben das Entstehen dieser Arbeit entscheidend mitbestimmt.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern und meinem Freund Mayk bedanken, die mich stets motiviert und unterstützt haben, diese Arbeit fertig zu stellen.