

Schriftenreihe  
Neurologie  
Neurology Series  
Band 8

EUROLOGIE - NEUROLOGY

Kurt Pisco

**Die Blutversorgung  
des Rückenmarkes  
und ihre klinische Relevanz**



Springer-Verlag  
Berlin · Heidelberg · New York

Kurt Piscal

Die Blutversorgung des  
Rückenmarkes  
und ihre klinische Relevanz

*Mit 37 Abbildungen und 3 Tabellen*



Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1972

Privatdozent Dr. KURT PISCOL  
Leitender Oberarzt an der Neurochirurgischen Abteilung  
des Chirurgischen Zentrums Heidelberg  
Wissenschaftlicher Rat der Universität Heidelberg

---

ISBN 3-540-05740-4 Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York  
ISBN 0-387-05740-4 Springer-Verlag New York · Heidelberg · Berlin

---

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1972. Library of Congress Catalog Card Number 72-75721

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Herstellung: Konrad Triltsch, Graphischer Betrieb, 87 Würzburg

# Schriftenreihe Neurologie — Neurology Series

8

## *Herausgeber*

H. J. Bauer, Göttingen · H. Gänshirt, Heidelberg · P. Vogel, Heidelberg

## *Beirat*

H. Caspers, Münster · H. Hager, Gießen · M. Mumenthaler, Bern  
A. Pentschew, Baltimore · G. Pilleri, Bern · G. Quadbeck, Heidelberg  
F. Seitelberger, Wien · W. Tönnis, Köln

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung . . . . .	1
A. Morphologische Grundlagen . . . . .	3
I. Extravertebrales und extradurales Zuflußsystem . . . . .	4
II. Die eigentlichen Rückenmarksarterien . . . . .	6
1. Aa. radicales anteriores . . . . .	6
2. „A. spinalis anterior“ . . . . .	7
3. Aa. sulci sive centrales . . . . .	9
4. Aa. radicales posteriores . . . . .	10
5. „Aa. spinales posterolaterales“ . . . . .	10
6. Corona vasorum sive Vasocorona und Capillaren . . . . .	11
III. Spinales Drainagesystem . . . . .	11
B. Experimentelle Grundlagen . . . . .	14
I. Tierexperimentelle Untersuchungen . . . . .	14
II. Untersuchungen an Rückenmarkspräparaten . . . . .	15
C. Spezielle Untersuchungen . . . . .	19
I. Material und Methodik . . . . .	19
II. Resultate . . . . .	21
1. Deskriptive Untersuchungen . . . . .	21
a) Arterielle Zuflüsse . . . . .	21
b) Aa. radicales . . . . .	23
$\alpha$ ) Aa. radicales anteriores . . . . .	23
$\beta$ ) Aa. radicales posteriores . . . . .	30
$\gamma$ ) Verlauf, Form und Aufzweigungsmodus der Aa. radicales . . . . .	32
c) Die sogenannten Aa. spinales . . . . .	37
d) Sulcusarterien und Vasocorona . . . . .	40
e) Die Venen . . . . .	46
f) Die Vascularisation bei Frühgeborenen . . . . .	46

2. Gefäßmessungen . . . . .	46
a) Aa. radicales anteriores . . . . .	48
b) „A. spinalis anterior“ und Sulcusarterien . . . . .	48
c) Aa. radicales posteriores und Vasocorona . . . . .	50
3. Durchströmungsversuche am ventralen Versorgungssystem . . . . .	51
a) Durchströmung oberflächlicher Gefäße mit Farbstofflösungen . . . . .	51
b) Durchströmungsversuche mit Röntgenkontrastmitteln . . . . .	53
D. Klinische Bedeutung der Ergebnisse . . . . .	58
I. Auswertung hinsichtlich orthologischer Probleme . . . . .	58
II. Auswertung hinsichtlich angiographisch-diagnostischer und neurochirurgischer Konsequenzen . . . . .	64
III. Allgemeine klinische Aspekte . . . . .	74
E. Zusammenfassung . . . . .	78
Literatur . . . . .	80
Sachverzeichnis . . . . .	88

## Einleitung

Das Rückenmark zählt zu den Organen, welche nicht nur in der allgemeinmedizinischen, sondern auch in der neurologischen Darstellung eine besonders weitgehende Schematisierung erfahren haben.

Diese Schematisierung geht einmal auf den Bauplan des Organs selbst zurück. Schon seine äußere Form mit der bilateralen Symmetrie, den so regelhaft angeordneten Wurzeln und Intumescenzen, die durchgehende und formal so eindrucksvolle Trennung von grauer und weißer Substanz und die histologischen Gesetzmäßigkeiten bieten sich hierfür an. Zum anderen hat aber die glanzvolle Entwicklung der Neurologie und ihrer Nachbarwissenschaften, nicht zuletzt auch der Neurochirurgie hieran ihren Anteil. Immer mehr neurologische Phänomene ließen sich der umschriebenen Schädigung ganz bestimmter Strukturen und Systeme in definierbarer Ausdehnung über den Quer- und Längsschnitt des Rückenmarks zuordnen und pathophysiologisch begreifen. Die Namen aller hieran beteiligten Kliniker, Anatomen, Pathologen und Physiologen aufzuzählen, würde den Rahmen der Arbeit sprengen. Der neurochirurgischen Intentionen wegen, welche den folgenden Untersuchungen zugrunde liegen, sei jedoch erlaubt, auf zwei Daten hinzuweisen: das Jahr 1887, in dem GOWERS durch die Diagnostik und HORSLEY durch die erste Exstirpation eines Rückenmarkstumors die eminente praktische Bedeutung der Lokalisationslehre demonstrierten, und das Jahr 1936, in welchem FOERSTER in seinem Handbuchbeitrag „Symptomatologie der Erkrankungen des Rückenmarks“ die bisherigen Erkenntnisse und seine großen eigenen, auch neurochirurgischen Erfahrungen zusammenfaßte und ein zusammenhängendes Bild der spinalen Organisation entwarf. Diese in der Phase der klassischen Neurologie aus der diagnostischen Praxis und dem Experiment abgeleiteten Schemata einer strukturellen und funktionellen Gliederung haben sich — von erforderlichen Modifikationen und Vertiefungen abgesehen — vielfach bewährt.

Anders verhält es sich mit dem geläufigen Bild von der Gefäßversorgung des Rückenmarks. Hier besteht eine eklatante Divergenz zwischen dem klassischen Schema und der Realität.

Seit der eindeutig ästhetisierenden Wiedergabe spinaler Gefäße durch VIEUSSENS in der „Neurographia universalis“ des Jahres 1690, besonders aber seit dem Erscheinen der „Elementa physiologiae corporis humani“ ALBRECHT VON HALLERS aus dem Jahre 1762 zieht sich durch alle nennenswerten Lehrbücher folgende Darstellung der Hauptarterien des Rückenmarkes: vom intracraniellen Abschnitt der beiden Vertebralarterien entspringen drei große Längsarterien, eine ventrale „A. spinalis anterior“ und zwei dorsale „Aa. spinales posteriores“, welche sich kontinuierlich und ohne nennenswerte Änderung des Kalibers, höchstens mehr oder weniger geschlängelt bis zum caudalen Ende des Rückenmarks hinziehen. Seitliche Zuflüsse, also Wurzelgefäße, dienen nur der besseren Auffüllung. Von speziellen Abhandlungen abgesehen, finden sich auch in modernen Darstellungen entweder nur eine Erhöhung der Zahl der

Längsarterien, nämlich von drei auf neun (zusätzlich ventrolaterale, laterale und posterolaterale Paare), oder aber die spinale Vascularisation wird nur unvollständig oder andeutungsweise erwähnt, selbst in der nur dem Nervensystem gewidmeten Abhandlung von CLARA (1959). Es handelt sich dabei jedoch offensichtlich um eine internationale Erscheinung, denn unter anderen weisen PERESE et al. 1959 in den USA, LAZORTHES et al. 1962 in Frankreich und TURNBULL et al. 1966 in Schweden auf diesen Sachverhalt hin. Und dies, obwohl ADAMKIEWICZ bereits 1882 und KADYI 1886 bzw. 1889 die einzelnen Gefäßsysteme des Rückenmarks in den Grundzügen exakt beschrieben haben.

Durch klinische Fragen, z. B. nach den Grundlagen hämodynamischer Störungen in bestimmten Zonen des Rückenmarks (s. ZÜLCH) oder nach zirkulatorischen Sekundärschäden bei Wirbelsäulentraumen (s. D. TÖNNIS) bzw. bei raumfordernden spinalen Prozessen (als Vermutung schon von FOERSTER geäußert), ist das Problem der spinalen Vascularisation wieder aktuell geworden. Auch hier basieren offensichtlich die unterschiedlichen Ansichten auf den noch unvollkommenen anatomischen und physiologischen Kenntnissen von der spinalen Blutversorgung.

Die Tatsache, daß unser Wissen gerade von entscheidend wichtigen Teilaspekten der spinalen Kreislaufphysiologie so lückenhaft ist, muß sicher mit den besonders großen Schwierigkeiten begründet werden, welche sich exakten Untersuchungen entgegenstellen. Es soll nur darauf aufmerksam gemacht werden, daß praktisch kein Pathologisches Institut in der Lage ist, diese bei der erforderlichen Sorgfalt äußerst zeitraubenden Maßnahmen routinemäßig durchzuführen, daß die Dimensionen der spinalen Gefäße bei dem jetzigen Stande der Untersuchungstechnik ein Spezialinstrumentarium und die Auflichtmikroskopie erforderlich machen und daß für Beobachtungen in vivo, also bei Operationen, das wesentliche ventrale Versorgungssystem dem Blick und Zugang bisher entzogen ist. Grundsätzlich dürfte aber die neubelebte Diskussion um die „spinalen Durchblutungsstörungen“ wieder ein zunehmendes Interesse an diesen Verhältnissen geweckt haben.

Die folgenden Untersuchungen sollen zur Erweiterung und Konsolidierung unserer allgemeinen Kenntnisse, besonders aber auch zur besseren Beurteilung spinaler Zirkulationsstörungen sowie zur Erhöhung der Sicherheit bei diagnostischen und therapeutischen Eingriffen beitragen.

## A. Morphologische Grundlagen

Die spezielle Problematik des Komplexes „spinale Vascularisation — spinale Durchblutungsstörungen“ geht aus dem Protokoll einer Sitzung der Wiesbadener Tagung der Deutschen Gesellschaft für Neurologie des Jahres 1966 hervor, welche das Thema „Die spinale Mangel durchblutung und ihre Folgen“ behandelte (Verh. Dtsch. Ges. Inn. Med. 72 (1967), 1007—1059). Diesem Protokoll sind nicht nur die abweichenden Befunde der einzelnen Autoren zu entnehmen, sondern auch die Tatsache, daß die bisher gesammelten Kenntnisse über die zugrunde liegende Gefäßversorgung noch gegensätzliche Auslegungen bzw. Rückschlüsse auf die Funktion zulassen. Das heißt aber, daß jedes weitere Faktum, welches diesen spekulativen Spielraum einengt, willkommen sein sollte.

Um für die folgenden Darstellungen und Untersuchungen eine Basis — auch in terminologischer Hinsicht — zu schaffen, sollen Grundzüge der Gefäßversorgung des Rückenmarks vorweg beschrieben werden.

Das arterialisierte Blut der linken Herzkammer erreicht auf mehreren Wegen den Spinalkanal. Für den oberen Abschnitt wird offensichtlich immer der Weg über eine A. subclavia benutzt. Von hier aus fließt es dann durch die A. vertebralis, cervicalis ascendens, cervicalis profunda oder intercostalis suprema in die Rami spinales. Unterhalb des Foramen intervertebrale  $D_{1/2}$  bzw.  $D_{2/3}$  verläuft die Zufuhr dagegen über die Rami spinales der Aa. intercostales, lumbales, lumbales imae, iliolumbales oder sacrales laterales, welche aus der thoracolumbalen Aorta bzw. direkt oder indirekt aus den Aa. iliacae abgehen.

Mit Ausnahme der atlanto-occipitalen Eintrittsstelle der A. vertebralis werden also die Foramina intervertebralia jeweils von den *Rami spinales* der verschiedenen Zubringerarterien erreicht. Diese Rami spinales treten durch die Foramina in den Spinalkanal ein und verzweigen sich in drei Äste, nämlich in einen *Ramus anterior canalis spinalis*, eine *A. nervomedullaris* und einen *Ramus posterior canalis spinalis*.

Die Rami anteriores et posteriores gehen in Anastomosenbildungen innerhalb des Spinalkanals über und versorgen neben den Strukturen des Epiduralraumes auch Anteile der Wirbelsäule.

Die A. nervomedullaris dagegen durchbohrt die Dura und kann sich in eine *A. radicularis anterior* und eine *A. radicularis posterior* teilen, welche mit einer Vorder- oder Hinterwurzel zum Rückenmark ziehen. Diese können dann Anschluß gewinnen an die drei Hauptlängsgefäßstämme, welche unter den Namen *A. spinalis anterior* und *Aa. spinales posteriores* bekannt sind und ihren Ursprung von den gleichnamigen Ästen des intrakanalikulären Abschnitts der Aa. vertebrales nehmen sollen.

Von diesen Längsstämmen gehen oberflächliche Querverbindungen ab, zum Teil unter Bildung sekundärer Längsketten, welche zusammen die *Vasocorona* bilden. Von der A. spinalis anterior nehmen außerdem die in die Fissura mediana anterior einstrahlenden *Aa. sulci* (auch centrales bzw. sulcocommissurales genannt) ihren Aus-

gang, um sich vorwiegend in den zentralen zwei Dritteln des Rückenmarkquerschnittes aufzuzweigen. Aus den Gefäßen der Vasocorona gehen die radiär angeordneten Äste für die peripheren Rückenmarksanteile ab. Danach folgt die Aufzweigung in das Capillarnetz.

Auf der venösen Seite führen horizontale und mehr oder weniger radiär verlaufende Venen das Blut wieder an die Oberfläche in einen *perimedullären Venenplexus* zurück. Dieser entleert sich letztlich in zwei große, geschlängelt in der Mittellinie der Ventral- und Dorsalfläche gelegene Venen, die *Vena mediana spinalis anterior* und *Vena mediana spinalis posterior*.

Von hier aus erfolgt dann die Drainage über *Venae radicales anteriores et posteriores* in epidurale und über transforaminale Verbindungen in extravertebrale Venenplexus, aus welchen das Blut über verschiedene Venensysteme letztlich in die *Venae cavae superior et inferior* gelangt.

## I. Extravertebrales und extradurales Zuflußsystem

Auf die sogenannten Zubringerarterien gehen in den letzten Jahren besonders CLEMENS u. Mitarb. ein. NOESKE (1958) gibt recht detailliert die Zuflüsse zur Hals- und obersten Brustwirbelsäule an. Dabei sollen als Quelle für die obersten zwei Rami spinales nur die A. vertebralis, für die zwei folgenden die A. vertebralis und die A. cervicalis ascendens, für die Rami spinales C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub> überwiegend die A. cervicalis ascendens, für den 8. Ramus spinalis die A. cervicalis profunda und für den ersten und zweiten thoracalen Ast die A. intercostalis suprema in Frage kommen. Die Äste verschiedener Provenienz können sich gegenseitig verstärken. Aus Gründen der segmentalen Organisation treten jedoch jeweils nur ein Ramus spinalis in das entsprechende Foramen intervertebrale ein. Da meist ältere anatomische Befunde zugrunde liegen, betont NOESKE, daß es sich um ein Ordnungsschema handle mit zahlreichen Abweichungsmöglichkeiten. Neuere präparatorische Untersuchungen an einem größeren Material sind nicht bekannt. Die Quellen für die Rami spinales D<sub>3</sub> bis L<sub>4</sub> sind durch die Anordnung der Aa. intercostales et lumbales weniger problematisch; allerdings wirkt sich die linksseitige Position der Aorta auf den Verlauf dieser Gefäße aus. Die Regelmäßigkeit der Anordnung soll im Intercostalbereich nach FORSSMANN u. PETREN (1938) Unterbrechungen erfahren können.

Für die caudalen Rami spinales kommen als Ursprungsgefäße die A. lumbalis V und die Sacralarterien in Frage. Nach SARTESCHI u. GIANNINI (1960) kann erstere aus der A. iliolumbalis, aus der A. iliaca communis oder direkt aus der Aorta hervorgehen, während letztere aus der A. sacralis lateralis superior, media oder lateralis inferior bzw. aus der A. hypogastrica entspringen können. JELLINGER (1966) weist darauf hin, daß der von DESPRONGE-GOTTERON (1955) und von DE SEZE et al. (1957) beschriebene Ast, welcher aus der A. iliaca communis entspringen und an die Wurzel L<sub>5</sub> oder S<sub>1</sub> herantreten soll, eine „seltene Variation“ darstelle und nur ausnahmsweise an der Versorgung des Conus beteiligt sei.

Gelegentlich vereinigen sich zwei oder wohl auch drei zuführende Ästchen zu einem stärkeren Ramus spinalis. In anderen Fällen verlaufen Ramus anterior et posterior canalis spinalis nach Vorverlegung der Teilungsstelle des Ramus spinalis bereits getrennt durch das Foramen (SOLOTUCHIN, 1933). Nach CLEMENS (1966) können auch mehrere Rr. spinales ganz fehlen.

Dazu schiebt er — im Gegensatz zu seinem Schüler NOESKE —: „Es sei daran erinnert, daß ein Foramen intervertebrale, durch das ein R. spinalis ziehen könnte, zwischen Occiput und Atlas sowie zwischen Atlas und Axis fehlt.“ Er weist weiter auf regelmäßige arterielle Anastomosennetze auf der Vorderseitenfläche und auf der Hinterfläche der Wirbelkörper sowie auf der Innenseite der dorsalen Spinalkanalbegrenzung hin, an welchen die Rr. spinales sowie Rr. anteriores et posteriores canalis spinalis mit ihren Aufzweigungen beteiligt seien. Auf diese Befunde wird später kritisch eingegangen werden.

Diese ausgedehnte Anastomosensbildung, welche „eine gleichmäßige Blutverteilung nach allen Richtungen . . . in jedem Falle gewährleistet“, veranlaßt CLEMENS (1966), jede Einteilung der Quellgebiete der spinalen Blutversorgung in Gruppen — z. B. eine craniale mit Ästen aus der A. subclavia und eine caudale mit Ästen aus der Aorta — abzulehnen. Wir werden auch hierauf noch zurückkommen.

Mit den Aa. nervomedullares beginnt das rückenmarkseigene Versorgungsterritorium. Seit ADAMKIEWICZ (1882) und wenig später sein Schüler KADYI (1886 und 1889) in ihren unübertroffenen Abhandlungen darauf hingewiesen haben, daß diese Gefäße mit ihren Wurzelästen essentiell und nicht nur auxiliar an der Versorgung des Rückenmarks beteiligt sind, beim Erwachsenen aber nur ein Teil von ihnen das Rückenmark erreicht, haben eine Reihe von Autoren ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Das größere Interesse haben immer die Vorderwurzelarterien gefunden; einmal weil sie wirklich den wesentlichen Anteil an der Versorgung des Rückenmarkes haben, zum anderen aber auch, weil sie sich besser darstellen und beurteilen lassen. Gemeint sind damit die „signifikanten“ Arterien (SUH u. ALEXANDER, 1939), welche mit ihren Aufzweigungen die A. spinalis anterior bilden.

Auf die Aa. nervomedullares selbst und diejenigen ihrer Äste, welche nicht in die großen Längsketten einmünden, wird in der Literatur u. E. zuwenig Wert gelegt. Es liegen auch recht unterschiedliche Angaben vor. Während man z. B. den Untersuchungen TANONS (1908) entnehmen kann, daß annähernd jedes Segment beiderseits eine A. nervomedullaris erhält, gewinnt man aus den Angaben von CLEMENS (1966), NOESKE (1958) und auch JELLINGER (1966) den Eindruck, daß die ontogenetische Zuflußreduktion die Aa. nervomedullares im gleichen Umfang wie die Wurzelarterien betrifft. Dabei kann es sich jedoch auch um eine Frage der Abgrenzung handeln, denn JELLINGER schreibt an anderer Stelle, daß „mit vielen Wurzeln eine zarte A. spinalis propria verläuft, welche sich nicht an der Spinalversorgung beteiligt“; ein solches Gefäß kann aber definitionsgemäß nur einer A. nervomedullaris entspringen.

Jede A. nervomedullaris kann sich

- a) in eine Vorder- und Hinterwurzelarterie aufzweigen oder
- b) nur in eine Vorder- bzw. Hinterwurzelarterie verlängern oder
- c) in kleine Ästchen verzweigen zur Versorgung der entsprechenden Wurzeln (s. NOESKE, 1958).

TANON unterteilt die Wurzelarterien grundsätzlich nach der Funktion in:

1. Artères radiculaires, welche sich in der Versorgung der Wurzeln erschöpfen und das Mark nicht erreichen,
2. Artères radiculo-pie-mériennes, welche bis an das piaie meningeale Gefäßnetz heranreichen und bestimmte Äste an die Vorderseitenstränge abgeben können, und
3. Artères radiculo-medullaires ou principales, welche in die Längsstämme übergehen und die eigentliche Versorgung übernehmen.

SUH u. ALEXANDER (1939) erwähnen diejenigen Wurzelarterien, welche sich an den Wurzeln oder der Pia mater erschöpfen, also nicht zu den „significant arteries“ gehören, nur nebenbei, geben aber doch Durchmesserwerte an, nämlich 34—214  $\mu$ .

Der größere Teil der Wurzelarterien soll nach FERRI u. FRIGNANI (1964) durch eine eigene Öffnung die Dura mater ventrocaudal der Wurzel passieren.

## II. Die eigentlichen Rückenmarksarterien

### 1. Arteriae radicales anteriores

Für die Blutversorgung des Rückenmarks spielen die Vorderwurzelarterien die entscheidende Rolle. Darüber besteht unter allen Autoren, welche sich mit diesem Problem näher befaßt haben, Einigkeit.

Die wesentlichen Arbeiten, welche sich mit der Zahl, der Verteilung und dem Verlauf dieser Arterien auseinandersetzen, stammen von ADAMKIEWICZ (1882); KADYI (1886); MIYADI (1931); SUH u. ALEXANDER (1939); WOOLLAM u. MILLEM (1955); LAZORTHES et al. (1957/58); GILLILAN (1958); NOESKE bzw. ROLL (gleiches Material, 1958); PERESE u. FRACASSO (1959); BARTSCH (1960); CORBIN (1961); MANNEN (1963); ROMANES (1964) und von JELLINGER (1966). Es handelt sich dabei um diejenigen Autoren, welche die Resultate ihrer Untersuchungen so detailliert niedergelegt haben, daß Vergleiche möglich sind. JELLINGER hat das große Verdienst, die weitgehende Auswertung dieses Materials in seiner Monographie 1966 vorgelegt zu haben.

Die Autoren stimmen darin überein, daß sich das „einheitliche phylo- und ontogenetische Prinzip der progressiven Dessegmentation der spinalen Gefäßversorgung“ (JELLINGER, 1966) an den Vorderwurzelarterien besonders deutlich ausgeprägt hat. LAZORTHES (1962) bezeichnet diesen Vorgang als „phénomène de sommation“, vergleichbar demjenigen, welchen TANDLER (1962) für das arterielle System des Verdauungstraktes beschrieben hat. Dieser Prozeß soll in caudocephaler Richtung verlaufen (s. a. GOUAZE et al., 1964) und bereits im 5. Embryonalmonat mit zunehmender Obliteration der Arterien beginnen (STRONG, 1962).

Faßt man die Ergebnisse zusammen, so erreichen durchschnittlich 5 bis 6 Vorderwurzelarterien (minimal 2 und maximal 17) die Mittellinie, um dann in die A. spinalis anterior aufzugehen. Nach JELLINGER beträgt die Durchschnittsfrequenz dieser Zuflüsse für das Halsmark 2 bis 3 (Extremwerte 0—14), für das Brustmark ebenfalls 2 bis 3 (0—8) und für das Lumbosacralmark 0 bis 1 (0—4; in 42%: 0).

Bei der Auswertung der prozentualen Segmentverteilung der Vorderwurzelarterien ergibt sich immer wieder eine Zuflüßhäufung im Bereiche der Intumescentia cervicalis (C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub>) und des caudalen Brustmarks am Beginn der Intumescentia lumbalis (D<sub>9</sub>—D<sub>12</sub>). Das Zuflußminimum der Gesamtauswertung liegt (vom Conusbereich abgesehen) im cervico-thoracalen Übergangsbereich bei D<sub>1</sub> und D<sub>2</sub>. (Kurve aus dem Gesamtmaterial im Vergleich mit den eigenen Ergebnissen s. Abb. 3.) Die Segmentverteilungskurven aus kleineren Fallsammlungen (z. B. NOESKE, 1958, oder BARTSCH, 1960) weichen hauptsächlich im Thoracalbereich von dieser Gesamtkurve ab, zeichnen z. B. das Minimum bei D<sub>4</sub>, besitzen aber nicht die statistische Relevanz der großen Zahl.

Diese macht sich auch bei der Frage nach der Lateralisation der Gefäße bemerkbar. Während nämlich CLEMENS (1966) angibt, daß eine Seitenbevorzugung nur bei der

A. radicularis magna zu beobachten sei, trifft dies bei größerem Material auf den gesamten Thoracolumbalbereich zu. Nur am Halsmark ist keine signifikante Seitendifferenz erkennbar (PISCOL, 1967).

Die A. radicularis magna (ADAMKIEWICZ) als größte Vorderwurzelarterie nimmt eine Sonderstellung in der Vascularisation des Rückenmarks ein, weil sie mit ihrem Ramus descendens und seinen Ästen die gesamte Versorgung der lumbalen Intumescenz übernehmen kann (z. B. TANON, 1908), und ihr nach ROLL (1958) eine besondere funktionelle Bedeutung zukommen soll.

Die A. radicularis magna begleitet nach LAZORTHES et al. (1962) sowie nach CORBIN (1961) in etwa 80% eine tiefe Thoracalwurzel und in etwa 20% eine Lumbalwurzel. Nach JELLINGERS statistischer Auswertung kann sie zwischen D<sub>6</sub> und L<sub>5</sub>, am häufigsten bei D<sub>9</sub>, D<sub>10</sub> und L<sub>1</sub> auftreten. Für den Neurochirurgen ist interessant, daß sie mit der Wurzel L<sub>2</sub> noch in etwa 10% der Fälle, mit der Wurzel L<sub>3</sub> dagegen nur noch in 1,4% verläuft. An den Wurzeln L<sub>4</sub> und L<sub>5</sub> (je 0,1%) hat sie bisher nur MIYADI (1931) beobachtet. In 80% der Fälle tritt das Gefäß von links an das Rückenmark heran.

Nach ADAMS u. VAN GERTRUYDEN (1956) sollen sich — unter Berufung auf KADYIS Material — bei einem höheren Zutritt der A. radicularis magna die tieferen Äste zurückbilden, während bei tiefem Zutritt die höheren Arterien persistieren. Mit einem „high type of arteria radicularis magna“ sei eine bessere Entwicklung von cervicalen und oberen thoracalen Arterien verbunden, das ganze Mark werde dafür jedoch von einer kleineren Zahl von größeren Zuflüssen versorgt! Zu einem ähnlichen Resultat kommt CORBIN (1961).

Das Kaliber der Vorderwurzelarterien wird von JELLINGER (1966), der die Ergebnisse von SUH u. ALEXANDER (1939); PERESE u. FRACASSO (1959); BARTSCH (1960); ROMANES (1964) u. a. zusammenfaßt, mit 200—1200  $\mu$ , für den Cervicalbereich mit 400—600  $\mu$ , für den Dorsolumbalbereich mit 550—1200  $\mu$  angegeben.

Für den Verlauf wird entsprechend den Wurzelverhältnissen eine von cranial nach caudal zunehmende schräge Richtung mit unterschiedlichem Aufzweigungsmodus in einen Ramus ascendens et descendens beschrieben. Auf die von NOESKE (1958) aufgezeichneten Verzweigungsbeispiele wird später noch einmal eingegangen werden müssen.

Diese Rami ascendentes et descendentes spielen für die Beurteilung der „A. spinalis anterior“ eine eminente Rolle.

## 2. „Arteria spinalis anterior“

Entgegen den eingangs erwähnten schematisierenden Darstellungen handelt es sich bei diesem Gefäßtrakt nicht um eine durchgehende Arterie, auch nicht um ein einheitliches Gefäßrohr von annähernd gleichem Kaliber (siehe hierzu Kapitel „Spezielle Untersuchungen“).

Den wesentlichen Anteil an der Erkenntnis, daß in diesem Gefäßtrakt eigentlich eine Anastomosenkette der auf- und absteigenden Äste der Wurzelarterien vorliegt, haben ADAMKIEWICZ (1882) und KADYI (1886 und 1889). Zu Recht wird von SUH u. ALEXANDER vermerkt: „A truly masterful piece of work“. ADAMKIEWICZ bezeichnet diesen Trakt bereits als „Anastomosis spinalis antica“, KADYI als „Tractus arteriosus

anterior medullae spinalis“. Obwohl beide Begriffe den Gegebenheiten besser gerecht werden als die Bezeichnung „A. spinalis anterior“, haben sie sich nicht gegen die seit VON HALLER eingebürgerte unrichtige Benennung durchsetzen können. Der besseren Verständigung wegen haben deshalb auch die jüngeren Autoren den Symbolnamen „A. spinalis anterior“ beibehalten.

Aus den Capillaren der Segmentgefäße soll sich embryonal zuerst eine paarige Anlage bilden, welche dann — wahrscheinlich durch Fusion — in den größtenteils unpaaren Gefäßtrakt aufgeht (STERZI, 1904; EVANS, 1911; TORR, 1957). Dieser Fusionsvorgang ist beim erwachsenen Menschen noch immer nur in den caudalen Anteilen konsequent vollzogen. Besonders im Halsmarkbereiche finden sich oft noch doppel-läufige Strecken und „Inselbildungen“ als Relikte der paarigen Ausgangsanlage (s. STERZI, 1904; NOESKE, 1958; ROMANES, 1964 u. a.).

Durch die unterschiedliche Art der Einmündung der Vorderwurzelarterien mit differenter Ausbildung der Rami ascendentes et descendentes und den erheblich divergierenden Abstand der Zuflüsse entsteht eine teils gerade, teils leicht geschlängelte, nicht immer streng der Mittellinie folgende, gelegentlich doppel-läufige arterielle Längskette mit unterschiedlichen Kaliberwerten. Diese sollen im Cervicalbereiche um 500  $\mu$ , thoracal um 340  $\mu$  und lumbal bis über 1000  $\mu$  betragen, streckenweise aber auf 50 bis 120  $\mu$  hinuntergehen können.

Das auffallend große Kaliber im Lumbalbereiche (bis über 1000  $\mu$ ) kommt nur dem absteigenden Ast der A. radicularis magna anterior (ADAMKIEWICZ) zu, welche durch den erwähnten „Summationsprozeß“ das Versorgungsgefäß der lumbalen Intumescenz schlechthin geworden ist. Nur in rund 30% der Fälle treten noch ein Gefäß, seltener zwei oder mehr kleine Arterien an den Ramus heran, ohne daß sie jedoch eine nennenswerte Rolle spielen.

Über zwei Rami cruciantes, welche zusammen mit dem Ramus descendens die Crux vasculosa bilden, fließt das Blut beiderseits in die Aa. posterolaterales über; es handelt sich dabei um besonders ausgebildete Anastomosen zwischen dem vorderen und dem hinteren Längssystem, welche meist in den Höhen S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub> oder S<sub>5</sub> vorliegen. NOESKE hat im Bereiche des Ramus descendens auch arteriovenöse Anastomosen gefunden. Er sieht in ihnen und den Rami cruciantes einen Kompensationsmechanismus bzw. eine funktionelle Einrichtung zur Anpassung an den wechselnden Energiebedarf bei schnellen Aktivitätsänderungen in der lumbalen Intumescenz.

Die Bedeutung, welche der Ventralanastomosenkette beigelegt wird, schwankt in der Literatur sehr. Es soll hier nur auf gegensätzliche Einstellungen hingewiesen werden.

Bereits SUH u. ALEXANDER (1939) bezeichneten eine Region, welche in annähernd gleichem Abstand zwischen zwei großen Wurzelarterien liegt, als „the watershed between the two adjoining districts of irrigation“. Sie geben eine Zone im unteren Teil des mittleren Brustmarks als besonders vulnerabel an, weil sie am Ende einer langen „Seitenstraße“ der Zirkulation liege, und weisen darauf hin, daß die Anastomosen zwischen der unteren Cervical- und oberen Thoracalregion oft so dünn und inadäquat sein können, daß z. B. Füllungsversuche über diese Strecken hinweg mißlingen. Über anatomische Diskontinuitäten der A. spinalis anterior berichten z. B. auch WOOLLAM u. MILLEM (1955), CORBIN (1961) u. LAZORTHES (1962); letzterer schreibt: „En particulier, elle (la voie artérielle médiane antérieure) est très grêle et disparaît même sur la moelle dorsale moyenne.“

CLEMENS (1966) bezeichnet dagegen diese Anastomosenkette als „ein Gefäßrohr, das von den cranialen Bezirken bis zum Filum terminale ununterbrochen durchgängig ist“ und lehnt eine segmentale Gefährdung (der „Wasserscheiden“ also) ab, weil die Wurzelarterien gar nicht in die Rückenmarkssubstanz eintreten, „sondern vielmehr durch die drei großen Längsstämme (*A. spinalis anterior* und *Aa. posterolaterales*) zu einem einheitlichen, ununterbrochenen Gefäßsystem zusammengefaßt werden“.

Von diesem vorderen Längstrakt, der *A. spinalis anterior*, gehen nun nach lateral Äste ab, welche am Aufbau der Vasocorona beteiligt sind (s. später), und nach dorsal Äste, welche in die *Fissura mediana anterior* eintreten: Die Sulcusarterien.

### 3. Arteriae sulci sive centrales

Sie bilden in ihrer Gesamtheit und mit ihren Endaufzweigungen das zentrale bzw. zentrifugale arterielle Binnensystem des Rückenmarks. Läßt man die Extremwerte unberücksichtigt, so dürften nach den Angaben in der Literatur und nach eigenen Ermittlungen durchschnittlich 200—250 Sulcusarterien an einem Rückenmark vorliegen. Dabei entfallen auf das Cervicalmark bei einer Länge von 10—12 Zentimetern ca. 60, auf das Thoracalmark bei einer Länge von 20—22 cm ca. 60 und auf das Lumbosacralmark bei einer Länge von 9—11 Zentimetern 80 bis 100 Sulcusarterien. Das heißt, daß auf einer Strecke von einem Zentimeter im Cervicalbereiche ca. 7, im Thoracalbereiche ca. 3 und im Lumbosacralbereich ca. 9 Sulcusarterien die *A. spinalis anterior* verlassen. Das Kaliber dieser Arterien beträgt cervical 90 bis 200  $\mu$ , thoracal 60—80  $\mu$  und lumbal bis 120  $\mu$ .

Auch der Verzweigungsmodus der Sulcusarterien wird noch immer falsch wiedergegeben. ADAMKIEWICZ hat eine dichotome Gabelung dieser Gefäße in 2 Äste, je einen für eine Markhälfte, angenommen. Spätere Untersuchungen haben aber ergeben, daß der typische Verzweigungsmodus in einem alternierenden Abgang der isoliert entweder für die rechte oder linke Hälfte bestimmten Sulcusarterien besteht (z. B. GILLILAN, 1962; JELLINGER, 1966). Nach den neuesten Untersuchungen (TURNBULL et al., 1966; PISCOL, 1967) handelt es sich dabei jedoch in allen Rückenmarksabschnitten um einen unregelmäßigen alternierenden Verlauf, d. h. es können auch zwei Äste für die rechte Hälfte aufeinanderfolgen und umgekehrt. Auch die alternierende Seitenverzweigung von einem kurzen gemeinsamen Stamm kann entgegen anderer Meinung in allen Etagen vorkommen.

Nach LAZORTHES u. CORBIN soll der Verlauf dieser Arterien in der Lumbalanschwellung leicht schräg gerichtet sein, JELLINGER erwähnt eine „leicht dorsocraniale oder -caudale“ Verlaufsrichtung auch im oberen Brustmark gegenüber einem meist streng rechtwinkligen Abgang im Halsmark. HERREN u. ALEXANDER (1939) dagegen geben in einer Arbeit, welche nur den Sulcus- und Binnengefäßen gewidmet ist, einen leicht schrägen Abgang und Verlauf der Sulcusarterien im Halsmark, einen erheblich schrägen Verlauf nach dorsocranial im Brustmark und einen relativ rechtwinkligen Abgang im Lumbalmark an.

Nach dem seitlichen Umbiegen nach rechts oder links als *A. sulcocommissuralis* fächert sich jedes Gefäß straußförmig auf in vertikale und horizontale Äste, deren spezielle Benennung für die vorliegende Untersuchung nicht erforderlich ist. Auf die Versorgungsareale wird bei der Besprechung des Capillarnetzes noch zurückzukommen sein.

#### 4. Arteriae radicales posteriores

Weniger eindeutig sind die Verhältnisse an den posterioren Abschnitten des spinalen Versorgungssystems. Die Annahme von ADAMKIEWICZ, daß fast jede Hinterwurzel von einer A. radicularis posterior begleitet wird, findet heute bei den meisten Autoren keine Bestätigung. Selbst CLEMENS nimmt 1966 an, daß von den Gefäßen, die an fast jeder Hinterwurzel zu erkennen sind, einige vom Rückenmark kommen und von hier aus an der Wurzelversorgung beteiligt sein können. Allerdings werden auch die extrem niedrigen Zahlen von 4—8 (SUH u. ALEXANDER, 1939; LINDENBERG, 1957) nicht bestätigt. JELLINGER faßt die wenigen stichhaltigen Angaben zusammen und steuert Befunde von 115 Präparaten bei. Danach ergebe sich eine Schwankungsbreite von 11—16 Hinterwurzelarterien pro Rückenmark bei Extremwerten von 8—28. An das Halsmark sollen 2—4 Dorsaläste (Extremwerte 1—9), an das Brustmark 6—9 (4—18) und an das Lumbosacralmark 3 (0—11) herantreten können. Im Gegensatz dazu findet CORBIN (1961) den Thoracalbereich entsprechend den ventralen Verhältnissen schlechter vascularisiert. Zur Segmentverteilung kann zusammengefaßt gesagt werden, daß auch hier eine Zuflüßhäufung in der unteren Cervicalregion und in der Thoracolumbalregion vorliegt, allerdings nicht so ausgeprägt wie am ventralen Versorgungssystem. Ein signifikantes Seitenüberwiegen läßt sich aus den vorliegenden Angaben nicht ermitteln. Wie bei den Vorderwurzelarterien schwankt das Kaliber auch bei den Hinterwurzelarterien ganz erheblich, nur sind sie insgesamt erheblich dünner. Die meisten Durchmesserwerte sollen zwischen 150  $\mu$  und 400  $\mu$  liegen (siehe hierzu Kapitel „Spezielle Untersuchungen“).

Wie GILLILAN (1958), LAZORTHES et al. (1962) u. ROMANES (1964) findet auch JELLINGER (1966) in 75% seines Materials eine größere hintere Radiculararterie (350—500  $\mu$ ), welche als A. radicularis magna posterior bezeichnet wird. Im Gegensatz zu LAZORTHES, welcher diesem Gefäß grundsätzlich einen gemeinsamen Ursprung mit der A. radicularis magna anterior zuspricht und daraus seine Bezeichnung „Artère du renflement lombaire“ ableitet, sieht er dieses Gefäß häufig getrennt und ohne jeden zugehörigen Ventralast zwischen D<sub>9</sub> und L<sub>5</sub>, meist in Höhe L<sub>1</sub> lokalisiert. CORBIN (1961) kommt nicht zu diesem Resultat, und CLEMENS schreibt 1966, eine A. radicularis magna dorsalis gebe es nicht!

#### 5. „Arteriae spinales posterolaterales“

Aus den Aa. radicales posteriores bilden sich durch Teilung in je einen Ramus ascendens et descendens die beiden primären hinteren Längstrakte, die Aa. spinales posterolaterales. SUH u. ALEXANDER (1939) bezeichnen sie noch (wie ja auch die meisten Lehrbücher) als Aa. oder Tractus posteriores, obwohl sie die Anastomosenketten in ihrer gut gelungenen Wiedergabe (s. Abb. 6 B ihrer Arbeit) teils hinter, teils aber auch vor der Wurzelaustrittszone verlaufen lassen. Auch CLEMENS hat beobachtet, daß diese Gefäßketten anfangs im Winkel zwischen Hinterwurzeln und Seitensträngen, später zwischen Hinterwurzeln und Hintersträngen verlaufen können, während JELLINGER nur den Weg ventral von der Wurzelaustrittszone angibt. CLEMENS bezeichnet den Verlauf als ununterbrochen von cranial bis caudal, JELLINGER als „meist kontinuierlich“ (könne sich jedoch im oberen und mittleren Brustmarkdrittel in ein zartes Maschenwerk auflösen). SUH u. ALEXANDER sowie LAZORTHES lehnen dagegen einen

durchgehenden Anastomosentrakt ab; erstere schreiben: „There is no continuous posterior spinal artery.“ Der oberste Zufluß kann sowohl aus der A. vertebralis als auch aus der A. cerebelli inferior posterior erfolgen, er kann auch von der A. radicularis posterior C<sub>2</sub> gebildet werden (TURNBULL et al., 1966; PISCOL, 1967). Das Kaliber schwankt wieder erheblich, ist häufig im Cervicalbereiche größer als lumbal und beträgt im Durchmesser zwischen 50  $\mu$  und 260  $\mu$ .

Von diesen Gefäßen können direkt Äste in die peripheren Abschnitte des Rückenmarkes eindringen oder Seitenäste abgehen.

## 6. Corona vasorum sive Vasocorona und Capillaren

Die Seitenäste der A. spinalis anterior und der Aa. spinales postero-laterales können diskontinuierliche Längsketten 2. Ordnung aufbauen (s. besonders NOESKE, 1958 und ROMANES, 1964). Es handelt sich um die sogenannten Aa. spinales anterolaterales (zwischen Vorderwurzeln und Seitenstrang), Aa. spinales laterales und Aa. spinales posteriores (immer dorsal der Hinterwurzeln, also auf der Hinterfläche verlaufend). Sie zeigen meist größere Unterbrechungen und sind deshalb nur selten auf einem Querschnitt gemeinsam anzutreffen.

Zwischen den einzelnen Längsketten finden sich im Gegensatz zu den üblichen Darstellungen nur unregelmäßige Querverbindungen (bis 100  $\mu$  stark, selten größer), welche nur in ihrer Summation und unter Berücksichtigung aller Seitenäste und Ästchen als Corona vasorum bzw. Vasocorona angesprochen werden können. Zu dieser Corona vasorum ist natürlich auch der periphere Anteil des medullären Binnensystems zu rechnen, also die Gesamtheit der Rami marginales und der längeren perforierenden Äste wie Aa. fissurae, interfuniculares, cornu posterioris et cornu anterioris (s. a. CLEMENS).

Von dem intramedullären Capillarnetz sollen unter Hinweis auf die Literatursammlung bei SARTESCHI u. GIANNINI (1960) hier nur die wichtigsten Fakten aufgezählt werden. Die Capillarsysteme der grauen und weißen Substanz unterscheiden sich erheblich. Während in der Marksubstanz ein lockeres, longitudinal ausgerichtetes Capillarnetz vorliegt, zeigt die graue Substanz dichte knäueiförmige Strukturen mit deutlicher Korrelation zur numerischen und formalen Organisation der Nervenzellen und der Synapsen sowie zum besonderen Zellmetabolismus. Die Capillaren sind in den Intumescenzen dichter angeordnet als in den übrigen Abschnitten, im Vorderhorn dichter als im Hinterhorn. CLEMENS weist besonders darauf hin, daß das intramedulläre Grenzgebiet zwischen der ventralen und dorsalen bzw. zentralen und peripheren Irrigationszone nur spärlich capillarisiert und deshalb versorgungsmäßig gefährdet sei. TURNBULL et al. geben dagegen eine stärkere Überlappung beider Systeme an, von welcher der Hinterhornbereich allerdings meist ausgenommen bleibe.

## III. Spinales Drainagesystem

Da sich die folgenden Untersuchungen nur am Rande auf das Venensystem erstrecken, soll die Drainage des Rückenmarks hier zusammenfassend dargestellt werden. Es kann auf die zusammenfassenden Arbeiten von CLEMENS (1961 und 1966), von QUAST (1961) und OSWALD (1961) hingewiesen werden.

2 Pisco, Blutversorgung