

Bundeswehrkrankenhaus Ulm

Abteilung Neurochirurgie

Leiter: Prof. Dr. U. Kunz

**Dynamische Bildgebung arachnoidaler Adhäsionen des Spinalkanals
bei Syringomyelie**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

Vorgelegt von

Silke Steinhoff

geboren in Gera

2012

Amtierender Dekan: Prof. Dr. Thomas Wirth

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Uwe Mauer

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Daniel Walcher

Tag der Promotion: 06.06.2013

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis		IV
1	Einleitung	1
	1.1. Liquordynamik, Syringomyelie und arachnoidale Adhäsionen	1
	1.2. Bildgebung der arachnoidalen Adhäsionen	6
	1.3. Ziel und Fragestellung der Dissertation	10
2	Material und Methoden	11
	2.1. Patientenkollektiv	11
	2.2. Untersuchungstechnik und Auswertung	12
3	Ergebnisse	15
	3.1. Untersuchungsergebnisse	15
	3.2. Darstellung arachnoidaler Adhäsionen ohne Syringomyelie	19
	3.3. Darstellung arachnoidaler Adhäsionen bei bestehender Syringomyelie	27
4	Diskussion	33
	4.1. Diskussion des Patientenkollektives und der Methodik	33
	4.2. Diskussion der Ergebnisse	36
	4.3. Idiopathische Syringomyelie und arachnoidale Adhäsionen	40
5	Zusammenfassung	43
6	Literaturverzeichnis	45

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
AP	Anterior Posterior
BFFE	Balanced fast field echo
BWK	Brustwirbelkörper
BWS	Brustwirbelsäule
CISS	Constructive Interference in Steady State
CT	Computertomographie
D	Digitus
EKG	Echokardiogramm
FH	Feed Head FOV
	Field of View
HWK	Halswirbelkörper
HWS	Halswirbelsäule
i.v.	intravenös
KM	Kontrastmittel
LWS	Lendenwirbelsäule
MR	Magnetresonanz
MRT	Magnetresonanztomographie
SWK	Sakralwirbelkörper
T	Tesla
T1/T2	Auslesezeit

TE	Echozeit
TH	thorakal
TR	Relaxationszeit
TSE	Turbospinecho

1 Einleitung

1.1. Liquordynamik, Syringomyelie und arachnoidale Adhäsionen

Das menschliche Zentralnervensystem wird von einer klaren Flüssigkeit, dem Liquor, umspült. Liquor wird intraventrikulär von Plexuszellen produziert (0,3-0,7ml/min). Die Gesamtmenge von Liquor beträgt ca. 125ml (45). Er zirkuliert durch die Ventrikel, den Subarachnoidalraum und durch das Parenchym über perivasculäre Räume. Der Hauptanteil an Liquor wird in den Sinus sagittalis superior drainiert. In erster Linie ist er als mechanischer Puffer anzusehen und reduziert so das Eigengewicht und den Druck auf die Nervenwurzeln. Zusätzlich dient der Liquor als lymphatisches System und spielt eine Rolle im hormonellen Gleichgewicht, als chemischer Puffer und bei der Neuroentwicklung (9, 10). Das Verständnis des Mechanismus der Liquorproduktion, der Pulsation und der Absorption hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten deutlich verändert (74). V.a. die Untersuchung des cerebralen Blutflusses während der Herzaktionen und der Änderung der Liquorpulsation gewinnt zunehmendes Interesse. Während der Systole kommt es zur Erhöhung des intrakraniellen Blutvolumens, von dem der eigentliche Impuls zur Liquorbewegung ausgeht. Die Volumenzunahme des Hirns bei Systole bewirkt eine nach caudal gerichtete Liquorwelle in Höhe des Foramen Magnum und des oberen Cervikalkanals (25).

Die craniocervikale und spinale Liquorpulsation kann mit den Methoden der MR-Bildgebung visualisiert werden. Neben Spinecho- und Gradientenecho-Sequenzen zur Darstellung unbewegter Strukturen werden zunehmend sich bewegende Strukturen mittels pulsationssensitiver Gradientenecho-Sequenzen bildgebend erfasst. Die MRT-gestützte Messung der Liquorpulsation nutzt dabei eine Phasenverschiebung der sich bewegenden Strukturen während der MRT-Untersuchung. Die Phasen-Kontrast-Methode wertet eine reproduzierbare Differenz zwischen Spins in Bewegung und stationären Spins aus. Während der Messung der Liquorpulsation entstehen drei Bilder: 1. ein Gradientenechobild mit noch anatomischer Information des stationären Gewebes, 2. ein Phasen-Kontrast-Betragsbild mit Darstellung sich bewegender Protonen und 3. ein Phasendifferenzbild zur Auswertung der Pulsation. Die Phasenverschiebung korreliert direkt mit der Signalintensität und ist proportional der Pulsationsgeschwindigkeit (61).

Während des Herzzyklus ändert sich in der Darstellung im MRT das Signal der Liquorpulsation zwischen der Pulsationsrichtung nach cranial im Wechsel mit caudal (6, 17). Während der Systole findet sich eine nach caudal gerichtete Liquorpulsation über den Aquädukt, die Foramina Magendii und Luschkae in die basalen Cisternen und den Subarachnoidalraum des Spinalkanals. Es zeigt sich eine Caudalbewegung der zentralen Hirnstrukturen und eine aufsteigende Bewegung peripherer Strukturen (20, 21, 61). In der Diastole ist die Pulsation nach cranial gerichtet (31, 66). Die normale Liquorpulsationsgeschwindigkeit liegt intraspinal im cervikalen Bereich zwischen 0,4 und 3,5cm/sec, wobei die höchste Geschwindigkeit auf Höhe des HWK 6 vorliegt. Hier ist in der Normalpopulation der Spinalkanal am schmalsten (20, 21, 30). Thorakal zeigen sich Geschwindigkeiten zwischen 5 und 8cm/sec. Im lumbalen Bereich finden sich Normalwerte zwischen 1 und 3cm/sec.

Die Störung der Liquordynamik kann zur Entwicklung von Ödemen im Myelon oder durch Ansammlung von Flüssigkeit zur Ausbildung liquorgefüllter Hohlräume führen. Diese Höhlenbildung wird als Syringomyelie bezeichnet. Es finden sich durch die Erweiterung des Zentralkanals eine Vielzahl daraus resultierender klinischer Beschwerden (33, 35, 36, 42, 71). Einige Autoren sehen eine abnorme Myelonbewegung als Ursache der Syringomyelie, jedoch ohne eine pathogenetische Erklärung geben zu können. Andere Ansichten schuldigen die Änderung der Druckverhältnisse im Spinalkanal bei craniocervikaler Dysbalance mit basaler Einklemmung an, so dass transmedulläre Flüssigkeitseinlagerungen eine Syringomyelie verursachen können. Auffallend ist jedoch auch, dass nicht alle Syringomyeliepatienten einen Tiefstand der Tonsillen wie bei der Chiari-Malformation aufweisen. Eine Syringomyelie ohne Pathologie des craniocervicalen Überganges kann nach Arachnoiditis, bei Weichteilläsionen, nach Trauma oder bei anderen extramedullären Läsionen im spinalen Subarachnoidalraum gesehen werden (77). All diese Erkrankungen können zu einer Änderung der Myelonbewegung und der Liquorzirkulation führen. Der Mechanismus der Entstehung einer Syringomyelie kann also genau wie bei Chiari-Malformationen durch geänderte Druckverhältnisse während der Liquorpulsation erklärt werden. Kontrovers diskutiert wird die Theorie, dass über unterschiedliche Liquordruckverhältnisse in den perivaskulären Räumen eine Verbindung vom Subarachnoidalraum zum Zentralkanal besteht. Dabei geht man davon aus, dass über diese perivaskulären Räume Liquor in den Zentralkanal gepresst wird und so eine Syringomyelie entstehen kann (28, 42, 75).

Die idiopathische Syringomyelie liegt vor, wenn keine der folgenden Pathologien erkennbar bzw. bekannt sind (15, 23, 24, 75):

- Spinales Trauma
- Extra-oder intraduraler Tumor
- Z.n. Operation an der Wirbelsäule
- Fehlbildungen des craniocervikalen Überganges (z.B. Chiari-Malformation)
- Spinale Deformitäten (z.B. tethered cord oder Meningomyelocele)
- Bandscheibenvorfall
- Meningitis oder Spondylodiscitis

Tabelle 1: Ursachen für die Entstehung einer Syringomyelie in den unterschiedlichen Höhenlokalisationen der Wirbelsäule.

Craniocervical	Chiari-Malformation Tumore Infektionen
Cervicothorakal	Intradurale extramedulläre Infektionen (Arachnoiditis) Extradurale Infektionen (Spondylitis, Discitis) Intra- und extramedulläre Tumore Veränderungen nach Trauma
Lumbal	Tethered cord Meningocele und Meningomyelocele Tumore Veränderungen nach Trauma

Die idiopathische Syringomyelie ist eine seltene Erkrankung. Bei ca. 25% dieser Patienten finden sich arachnoidale Adhäsionen und/oder Zysten (49, 50). Diese können über mehrere Wirbelkörperhöhen ausgedehnt sein, spinnennetzartig verlaufen, leicht raumfordernd und somit komprimierend auf das Myelon wirken. In selten Fällen wird dann im Myelon selbst ein Ödem gesehen, jedoch kein liquorgefüllter Hohlraum. Manche Patienten zeigen daraus

resultierend das klinische Beschwerdebild einer Erkrankung wie bei Syringomyelie. Einige Autoren klassifizieren dies als sogenanntes „Präsyrixstadium“ (23, 24, 67).

Inoue et al. beschreiben die Entwicklung einer Syringomyelie distal der gesehenen Blockade der Liquorpulsation (34). Jedoch lassen neuere Untersuchungen diese Aussagen als fraglich erscheinen (26). Modelle zeigen, dass durch die arachnoidalen Verklebungen der intraspinaler Druck auf Höhe der Blockade erhöht wird. Die behinderte Liquorpulsation induziert eine fortgeleitete Welle in den anliegenden Subarachnoidalraum. Die Pulswelle wird zusätzlich nach intramedullär geleitet, so dass interstitielle Flüssigkeit in den Zentralkanal gepresst wird und so die Syringomyelie entsteht (14, 35, 36). Wie schnell sich der Zentralkanal unter Änderung einzelner äußerer Umstände erweitern kann, ist bisher nicht geklärt (52, 54).

Letztendlich kann zur Vereinfachung die Syringomyelie in zwei Typen eingeteilt werden: Syringomyelie vergesellschaftet mit Pathologien des craniocervikalen Überganges, meist Chiari-Malformation (Abbildung 1) und die Syringomyelie spinaler Ursache bei adhäsiver Arachnoiditis unterschiedlicher Genese mit Zysten (Abbildung 2) (4, 5, 7, 9, 52, 53).



Abbildung 1: Sagittales T2 Bild mit Darstellung einer Syringomyelie dorsal des Halswirbelkörpers 2 bis 6 bei vorliegender Chiari-Malformation mit Kleinhirntonsillientiefstand (Pfeil) um 9mm.

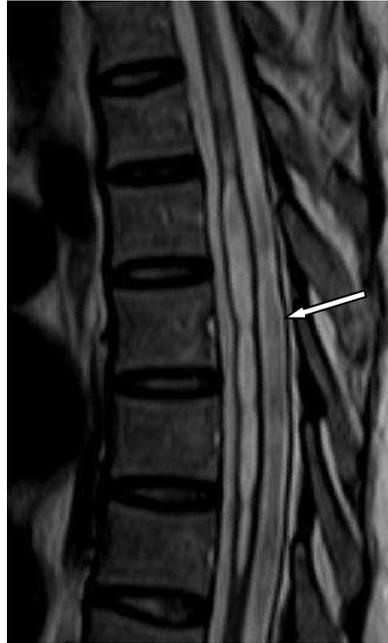


Abbildung 2: Sagittales T2 Bild mit Darstellung einer Syringomyelie dorsal des Brustwirbelkörpers 4 bis 8 bei dorsalen arachnoidalen Adhäsionen mit erkennbaren Liquorpulsationsartefakten (Pfeil).

Arachnoidale Zysten können nach Holly in drei große Kategorien eingeteilt werden: extradurale Zysten ohne Spinalnervenzwurzelanteile (Typ I) mit Unterteilung in arachnoidale Zysten (Typ IA) und sacrale Meningocelen (Typ IB), extradurale Zysten mit Spinalnervenzwurzelanteilen (Typ II) und intradurale Zysten (Typ III) (32, 33, 56).

Patienten mit spinalen intraduralen arachnoidalen Zysten und Septen beklagen eine Vielzahl von unspezifischen neurologischen Symptomen, wie Ganganomalien, Rückenschmerzen, Sensibilitätsstörungen, Störungen der Darm- und Blasenfunktion bei Kompression des Myelons (39).

1.2. Bildgebung der arachnoidalen Adhäsionen

Konventionelle Standard-MRT-Untersuchungen zeigen nötige Informationen zu anatomischen Gegebenheiten, wie die Hernierung der Kleinhirntonsillen, den Grad der Obstruktion des Foramen magnum, Größe und Lage der Syringomyelie sowie weitere anatomische Besonderheiten oder Pathologien. Mit zunehmendem Einsatz des MRT wird eine Vielzahl von neuroradiologischen Krankheitsbildern gesehen, welche klinisch oft nicht in Erscheinung treten. Zusätzliche Informationen liefern die dynamischen Untersuchungen der Liquorpulsation. Zeichen einer sattgehabten Arachnoiditis sind im Standard-MRT schwer zu erkennen. Meist zeigen sich eine Distorsion oder Verlagerung des Myelons und eine Erweiterung des subarachnoidalen Raums. Neuere 3-dimensionale Untersuchungsmethoden im MR zeigen topographische Informationen von intra- und extraduralen Pathologien (70). Dynamische prospektiv EKG-getriggerte oder retrograd EKG-gegatete MRT-Untersuchungen zeigen die Beziehungen zwischen Herzschlag, Kreislaufzyklus, Atemexkursionen und der spinalen Liquorpulsation (48). Vor der Ära der dynamischen Phasen-Kontrast-Messungen der Liquorpulsation wurden häufig konventionelle Myelographien teilweise in Kombination mit CT-Myelographien zur Darstellung der subarachnoidalen Adhäsionen in Ergänzung zum konventionellen Standard-Wirbelsäulen-MRT durchgeführt. Patienten wurden also lumbal punktiert. Mittels Durchleuchtung und Röntgenstrahlenexposition erfolgte eine Myelographie. Diese invasiven Liquorraumuntersuchungen werden nun durch die Phasen-Kontrast-Untersuchungen im MRT ersetzt (49).

Im MR können strukturelle Veränderungen des Myelons, der Nervenwurzeln, eine Kompression oder Verlagerung derer, Syringomyelien, arachnoidale Adhäsionen und Zysten oder angeborene Veränderungen dargestellt werden. Sich bewegende feinste Strukturen können nicht sehr gut mit den Standard-MR-Methoden dargestellt werden. So beschreibt beispielsweise Paramore intraoperativ gefundene arachnoidale Netze, welche nicht im MRT erkennbar waren (60). Neurochirurgische Beobachtungen verweisen auf intraoperativ gesehene pulssynchrone Bewegungen sowohl der Hirn- als auch Rückenmarksanteile wie auch von arachnoidalen Adhäsionen. Bisher ist es bildgebend zwar gelungen, diese Strukturen zu visualisieren, jedoch eher statisch und nicht als sich bewegende Strukturen.

Mittels dynamischer Phasen-Kontrast-MRT besteht die Möglichkeit einer nichtinvasiven dynamischen Untersuchung. Dabei können normale und pathologische Liquorpulsationsphänomene dargestellt werden (18, 58, 65, 66). Abbildung 3 zeigt das Bild einer normalen Liquorpulsation harmonisch in Graustufen ohne Unterbrechungen bei Betrachtung der Phasen-Kontrast-MRT.



Abbildung 3: Sagittales T2 Bild der oberen Brustwirbelsäule mit normal dargestelltem Myelon (links) und korrelierende Phasen-Kontrast-Studie der spinalen Liquorpulsation mit regelrechtem Liquorpulsationsbild (rechts).

Bei pathologischer Liquorpulsation finden sich Unterbrechungen in der Darstellung mit plötzlichem Wechsel von Schwarz zu Weiß und umgekehrt. Daneben zeigt sich manchmal die heftige Beschleunigung der Pulsation in Engstellen als Aliasing (Abbildung 4).



Abbildung 4: Sagittales T2 Bild der mittleren Brustwirbelsäule mit Darstellung einer Syringomyelie dorsal des Brustwirbelkörpers 4 bis 8 (links) mit unscharfen grau imponierenden Liquorpulsationsartefakten dorsal (weißer Pfeil) und korrelierende Phasen-Kontrast-Studie der spinalen Liquorpulsation (rechts) mit Behinderung dorsal der Brustwirbelkörper 5/6/7 (schwarze Pfeile: oben Aliasing, unten Phasen-Umkehr).

Mit zunehmendem Verständnis der Pathophysiologie der Syringomyelie wird die Anwendung spezieller MR-Sequenzen zur Darstellung von pathologischen Veränderungen des Subarachnoidalraumes nötig. Das Hauptproblem besteht in der Anfälligkeit der T2 TSE gewichteten Untersuchungen für Artefakte im Liquorraum (Abbildung 4). Liquorbewegungen können bereits im „normalen“ MRT durch flow-void-Phänomene bei Signalverlust zu sehen sein. Jedoch können diese Artefakte strukturelle Veränderungen auch vortäuschen. Die Entwicklung des Phasen-Kontrast-MRT in den letzten Jahren hat entscheidend zum Verständnis der Pathophysiologie der Liquorpulsation beigetragen (26, 70). 1993 wurden durch Casselmann 3D CISS Sequenzen während der Untersuchung angewandt (13).

Weiterführende transversale BFFE-Sequenzen zeigen in Kombination mit dem Phasen-Kontrast-MRT sehr gut, in welcher Höhe arachnoidale Adhäsionen und Zysten zur Störung der Liquorpulsation führen.

EKG-getriggerte oder EKG-gegate Methoden stellen die arachnoidalen Netze ansatzweise dar (36). Eine Messung ist dann EKG-getriggert/-gegate, wenn der Untersuchungsablauf mit dem EKG des Patienten synchronisiert wird. Beim Gating werden EKG und Bildakquisition parallel erfasst und die Bilder des bewegungsarmen Herzzykluszeitraumes zur Datenrekonstruktion verwendet. Bei der Triggerung wird die Datenaufnahme nach einer definierten Zeit (250-350ms) auf die R-Zacke des EKG durchgeführt. Eine Aufnahme der Sequenz wird zwischen zwei Herzschläge gelegt und dann werden die verschiedenen Bilder hintereinander gereiht. So entsteht ein Film der sich bewegenden Strukturen, wie z.B. die Herzpulsation (46, 59).

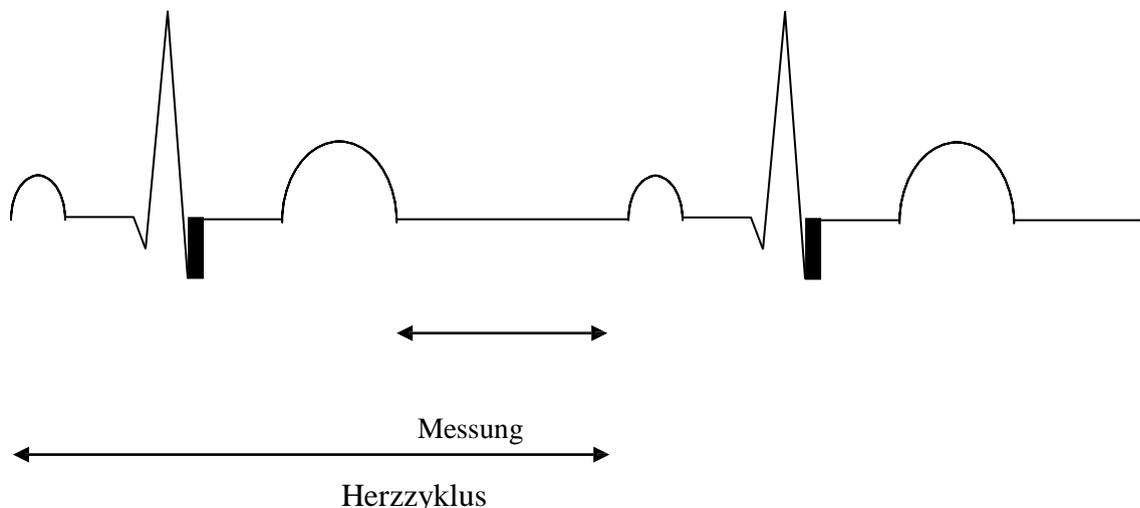


Abbildung 5: Graphische Darstellung eines Messzyklus bei der Herzpulsation.

Ganz neu ist die Erprobung einer cardiac-gated cine-balanced fast field echo (BFFE)-Sequenz zur anatomischen Information der pulsierenden arachnoidalen Septen. Es gelingt somit eine filmische Darstellung bewegter Strukturen als Echtzeit-MRT. Diese BFFE-Sequenz zeigt ein hohes Signal der Strukturen des Liquorraumes und eine sehr gute anatomische Auflösung feinsten arachnoidaler Septen neben der Unterdrückung der umgebenden Hirn-, Myelon-, Knochen- und Nervenstrukturen. Die Detektion fokaler arachnoidaler Adhäsionen bei Syringomyelie ist entscheidend für eine neurochirurgische

Intervention. Langzeitergebnisse nach operativer Lösung stehen noch aus (14).

1.3. Ziel und Fragestellung der Dissertation

Arachnoidale Adhäsionen lassen sich zunehmend besser bildgebend darstellen. Deren Ausdehnung zeigt sich vielfältig und von Patient zu Patient sehr variabel. Ob die klinischen Beschwerden mit den gefundenen Läsionen im Subarachnoidalraum und im Myelon tatsächlich einhergehen, ist bildgebend schwer zu detektieren. Oft ist die Ursache der ausgebildeten Adhäsionen nicht bestimmbar. Das Ziel einer Therapie sollte die Behebung der Ursache der Syringomyelie sein. Daher ist es nötig, eine Syringomyelie exakt in der Größenausdehnung darzustellen und Adhäsionen sowie deren Höhenlokalisation aufzuzeigen. Aus den vorangegangenen Ausführungen ergeben sich somit folgende Fragen:

- Ist es möglich, arachnoidale Adhäsionen nicht nur statisch sondern auch dynamisch mittels MRT darzustellen?
- Können die Untersuchungssequenzen in der täglichen Routinediagnostik Anwendung finden?
- Ergibt sich aus den gewonnenen Informationen eine klinische und therapeutische Relevanz für die Patientenbehandlung?

Ziel dieser Arbeit ist es nicht, die Interaktionen zwischen pulsierendem Liquor und vielen anderen Faktoren (systolischer und diastolischer Blutdruck, totales intraspinales und intracranielles Liquorvolumen, intravasales Blutvolumen und Atemdruck) sowie deren mögliche Änderungen aufzuzeigen. Anhand neuer EKG-getriggter/-gegateter dynamischer Sequenzen werden die arachnoidalen Adhäsionen bildgebend dargestellt und die pulssynchronen Bewegungen visualisiert.

2 Material und Methoden

2.1. Patientenkollektiv

Ausgewertet wurden Daten aus spinalen 1T und 1,5T MRT-Untersuchungen von 4652 Patienten, welche im Zeitraum vom 01.01.2008 bis 31.12.2009 im Bundeswehrkrankenhaus Ulm in der Abteilung Radiologie im MRT waren. Untersucht wurden einerseits Patienten mit einer Syringomyelie und entsprechenden Beschwerden. Andererseits auch Patienten mit klinischen Beschwerden einer Syringomyelie jedoch ohne bildgebenden Nachweis einer Zentralkanalerweiterung wohl aber ausgeprägten Liquorpulsationsstörungen in der Phasen-Kontrast-Messung und mit sichtbaren Adhäsionen in den statischen transversalen BFFE-Untersuchungen. Des Weiteren wurden arachnoidale Adhäsionen bei vielen Patienten als Zufallsbefund ohne klinische Beschwerden erhoben. Bei allen Patienten lagen auswertbare Phasen-Kontrast-MRT cervicothorakal vor. Insgesamt fanden sich bei 414 Patienten Syringomyelien mit intraspinalen Adhäsionen unterschiedlicher Ausprägung und 15 Patienten mit alleinigen Adhäsionen ohne eine Syringomyelie.

Die Gruppe der Patienten mit einer Syringomyelie umfasste n=414 Patienten. Davon waren n=284 (68,5%) männlich und n=130 (31,6%) weiblich. Das Patientenalter lag zwischen 4 und 73 Jahren, der Altersmedian lag bei 48.

Die Gruppe der Patienten ohne Syringomyelie bestand aus n=15 (3,5%) Patienten. Hier waren 9 (60%) Patienten Männer und 6 (40%) Patienten Frauen. Das Patientenalter lag zwischen 25 und 64 Jahren, das mittlere Alter betrug 40 Jahre.

Bei n=75 (17,5%) Patienten wurden im 1,5T MRT dynamische EKG-getriggerte BFFE-Sequenzen durchgeführt.

Ein Patientenkollektiv von n=9 (2,1%) wurde dann im Rahmen der geplanten operativen Adhäsiolektomie im 3T MRT mit dynamischen EKG-gateten BFFE-Sequenzen untersucht. Diese Gruppe bestand aus 6 (66,6%) Männern und 3 (33,3%) Frauen.

2.2. Untersuchungstechnik und Auswertung

Alle Patienten wurden nach dem entsprechenden Standard-MRT-Untersuchungsprotokoll für Wirbelsäulen in der Abteilung Radiologie des Bundeswehrkrankenhauses Ulm untersucht. Die Protokolle der Standarduntersuchungen als primäres Routine-MRT der gesamten Wirbelsäule wurden an 2 Untersuchungstagen gefahren und beinhaltete die Untersuchung der HWS/BWS beginnend vom craniocervikalen Übergang bis ca. BWK 6/7 und die Untersuchung der BWS/LWS beginnend vom BWK 5 bis mindestens zum SWK3. Nur bei Erstuntersuchungen erfolgte eine Kontrastmittelapplikation, um entzündliche oder tumoröse Veränderungen zu detektieren. Die Patienten wurden entweder im 1,5T Scanner (ACS INTERA, Power Track 6000, Software Release 12.1.1.2., Philips, Netherlands) oder im 1T Scanner (MAGNETOM HARMONY, Software Release Syngo, Siemens, Deutschland) mittels spine coil untersucht.

Standarduntersuchungsprotokoll:

- T2 TSE 3 mm sagittal
- T1 TSE 3 mm sagittal
- T2 TSE 3 mm coronar
- T2 TSE 4 mm transversal
- BFFE 4 mm transversal
- Myelo-Sequenz sagittal
- T1 TSE 3 mm sagittal nach KM-Applikation
- Phasen-Kontrast-MRT zur Messung der Liquorpulsation mit 3, 5 und 8 cm/sec
- dynamische BFFE F-H phasenkodiert sagittal (1,5T Scanner)

Die Phasen-Kontrast-Messung wurde dabei mit Triggerung durch ein Pulsoxymeter durchgeführt. Bei 75 Patienten wurden im 1,5T Scanner prospektiv EKG-getriggerte cine-BFFE-Sequenzen angefertigt. Das bedeutet, die Messung wurde durch einen EKG abgeleiteten Triggerpuls, üblicherweise der R-Zacke, ausgelöst und die Bildakquisition mit einer Verzögerung von 250-350ms erstellt.

Untersuchungsparameter der dynamischen Messung des 1,5T MRT (sagittale Ebene):

<input type="checkbox"/> Field of View (FOV):	160x160mm ²
<input type="checkbox"/> Heart phases:	75
<input type="checkbox"/> Slice thickness:	3mm
<input type="checkbox"/> Slices:	1
<input type="checkbox"/> Echozeit (TE):	2,9msec
<input type="checkbox"/> Relaxationszeit (TR):	5,8msec
<input type="checkbox"/> Flip-angle:	60°
<input type="checkbox"/> Voxel size:	1,0mm(AP)x1,0mm(FH)
<input type="checkbox"/> Time:	3:33min

Die Befunderhebung erfolgte am zur Radiologischen Diagnostik zugelassenen Betrachtungsmonitor der Firma Barco unter Verwendung des Cine-Modus. Zur Detektion spinaler Adhäsionen wurden die sagittalen T2 TSE, die Phasen-Kontrast-MRT und die statischen transversalen BFFE-Sequenzen korreliert. Daraus ist dann eine Höhenlokalisierung der arachnoidalen Adhäsionen erfolgt.

Bei 9 Patienten wurden in der Auswertung der primären MRT Adhäsionen gesehen, die wegen ausgeprägter klinischer Beschwerden operativ gelöst werden sollten. Daher erfolgte eine weitere Untersuchung zur Vervollständigung der präoperativen Diagnostik an einem 3T Scanner (Achieva, Software Release 2.6.1.0, Philips, Netherlands, Radiologie der Universitätsklinik Ulm) mittels torso cardiac posterior coil (Philips). Ein Radiologe mit Kenntnis der vermuteten Höhenlokalisierung der Adhäsionen begleitete die Patienten bei örtlich disloziertem 3T Gerät und erstellte dann zusammen mit der am Gerät arbeitenden Röntgenassistentin die dynamische Untersuchung.

Von insgesamt 16 quadratisch angeordneten Kanälen der Spule wurden zur Anpassung an den Wirbelsäulenverlauf nur die inneren 8 zur Signalauslesung aktiviert. Zur Vermeidung einer Überlagerung des Spinalkanals durch Pulsationsartefakte der Aorta bzw. des Herzens wurde als Phasenkodierrichtung feet-head bei der sagittalen und coronalen Sequenz, anterior-posterior bei der transversalen Sequenz gewählt. Die dynamischen cine-BFFE-Sequenzen wurden mittels retrograder EKG-gegateter Technik erstellt. Dabei wurden

Bilddaten und EKG-Signale parallel ermittelt und die Bildrekonstruktion erfolgte aus bewegungsarmen Herzzyklusphasen.

Untersuchungsparameter der dynamischen Messung im 3T MRT (sagittale, transversale und coronare Sequenz):

- T2 TSE 3 mm sagittal und coronar (zur Planung)
- Field of View (FOV): 150x120mm²
- Heart phases: 30
- Slice thickness: 3mm
- Slices: 3
- Echozeit (TE): 3,1msec
- Relaxationszeit (TR): 6,2msec
- Flip-angle: 50°
- Voxel size: 0,5mm(AP)x0,25mm(FH)
- Time: 4:09min

Die mikrochirurgische operative Adhäsiolyse der Patienten erfolgte mit Hilfe eines Operationsmikroskopes (Penetero, Zeiss) und wurde videodokumentiert. Nach erfolgter operativer Lösung der die Liquorpulsation behindernden Adhäsionen wurde zeitnah (bis 7 Tage nach der Operation) eine erneute MRT sowohl im 1,5T als auch 3T Gerät durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1. Untersuchungsergebnisse

4652 Patienten mit unterschiedlichsten Beschwerden der Wirbelsäule wurden im Zeitraum vom 01.01.2008 bis 31.12.2009 im Bundeswehrkrankenhaus Ulm in der Abteilung Radiologie im 1,5T Philips oder 1T Siemens MRT untersucht. Bei 414 Patienten und somit fast 10% dieses Patientenkollektives zeigten sich arachnoidale Adhäsionen mit einer Syringomyelie. Davon wiesen 87 (20,3%) Patienten eine Syringomyelie bei Chiari-Malformation auf. Bei 197 (45,9%) Patienten wurden neben einer unterschiedlich ausgedehnten Syringomyelie arachnoidale Adhäsionen mit Beeinträchtigung der Liquorpulsion gesehen. 130 (30,3%) Patienten zeigten eine Syringomyelie mit und ohne arachnoidale Adhäsionen anderer Ursachen (posttraumatisch, tumorbedingt oder wegen degenerativer Wirbelsäulenveränderungen). Zusätzlich fanden sich bei 15 (3,5%) Patienten, davon 7 mit Chiari-Malformation, arachnoidale Verklebungen ohne Erweiterung des Zentralkanals.

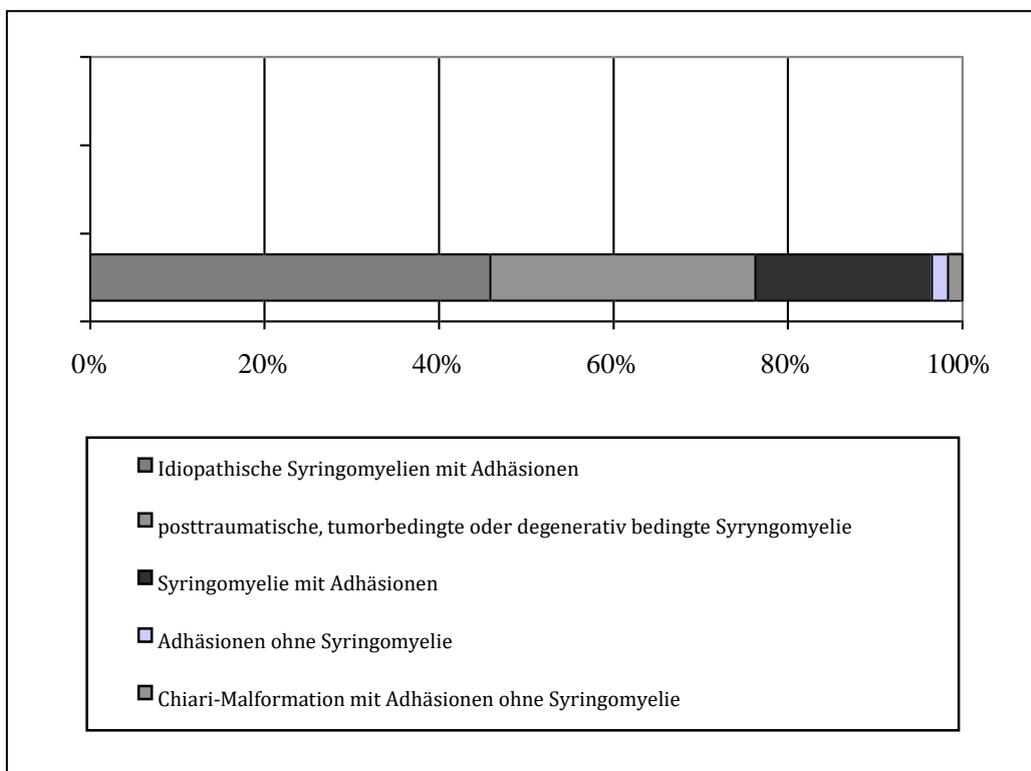


Abbildung 6: Auswertung des Patientenkollektivs mit Darstellung der Verteilung der Läsionen.

Die Selektion des ursprünglichen Patientenkollektives von 4652 Patienten bis zur letztendlichen Durchführung der dynamischen Untersuchung im 3T MRT bei 9 Patienten soll durch das nachfolgende Flussdiagramm verdeutlicht werden:

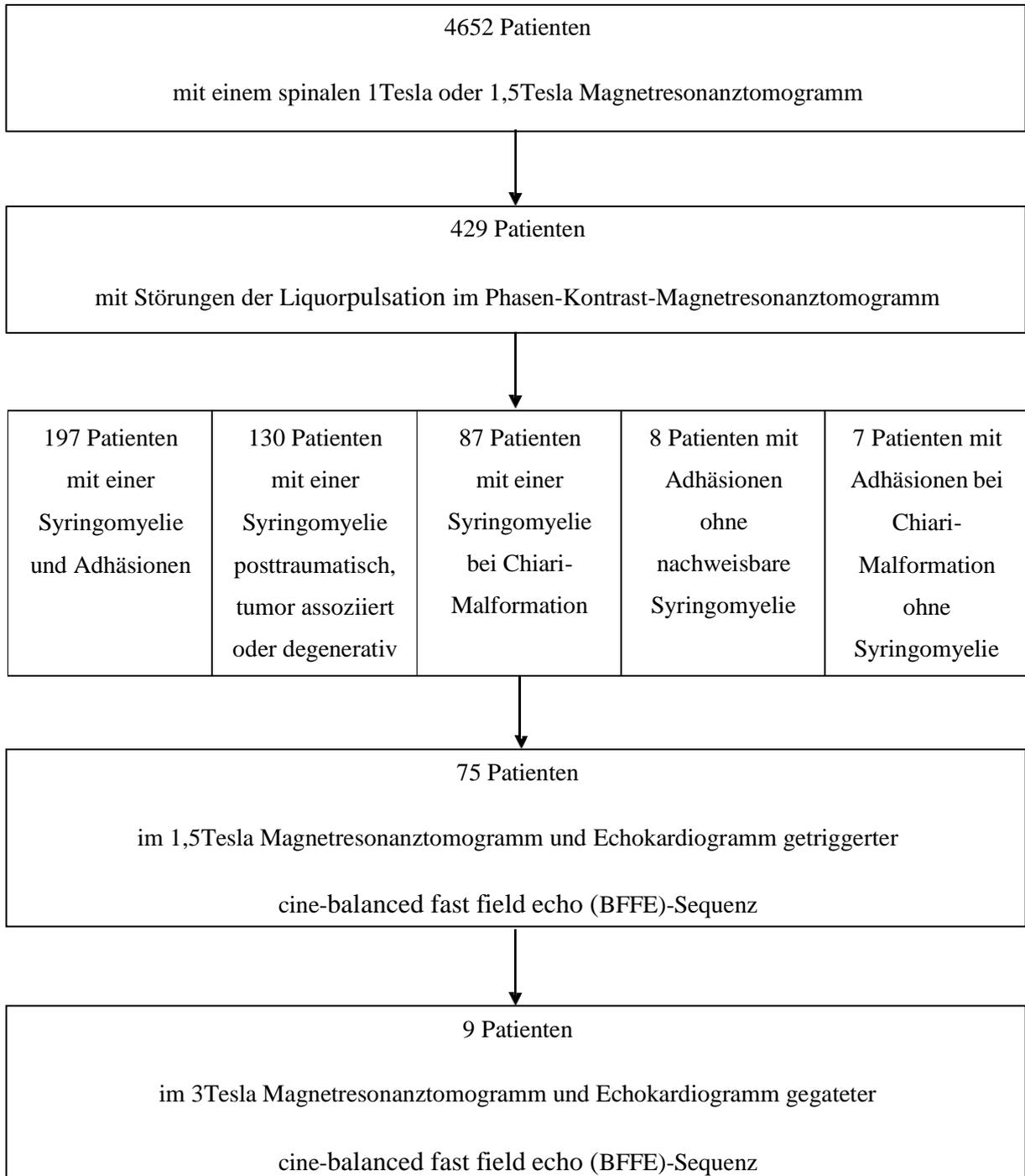


Abbildung 7: Aufteilung des im Bundeswehrkrankenhaus Ulm untersuchten Patientenkollektives mit diffusen Rückenschmerzen und unspezifischen Symptomen (2008/2009).

Das Ziel dieser Arbeit und Hauptaugenmerk der Diagnostik war die bildgebende zeitlich und räumlich aufgelöste dynamische Darstellung von arachnoidalen Adhäsionen. Während der Befunderhebung am Betrachtungsmonitor wurden insbesondere die sagittalen T2 TSE Sequenzen mit hier schon erkennbaren Liquorpulsationsartefakten und die sagittalen Phasen-Kontrast-MRT verglichen. Die Artefakte sind als graue unscharfe wolkige Areale im dorsalen Liquorraum erkennbar und als indirekte Hinweise auf mögliche arachnoidale Verklebungen zu werten. Dabei können ausgedehnte langstreckige Artefaktbildungen (bereits in Abbildung 4 dargestellt) oder kurzstreckige Artefaktanteile (Abbildung 8) dargestellt sein. Arachnoidale Septen im dorsalen Liquorraum konnten korrelierend zu den Unregelmäßigkeiten der Liquorpulsation als Ursache derer in der transversalen BFFE dargestellt werden und eine Höhenlokalisation erfolgen. Es zeigten sich im dorsalen und lateralen Subarachnoidalraum zarte strichförmige dunkle Segel und Membranen, die zusammenhängend ein Netz und Zysten ausbildeten. Nicht alle Artefakte in der T2 TSE korrelieren mit Störungen in der Phasen-Kontrast-Messung. Eine Übereinstimmung findet sich nur dann, wenn eine Adhäsion genau in der Mittellinie liegt oder diese kreuzt. Lateral gelegene Adhäsionen oder Netzzügel können jedoch auch zu Beeinträchtigungen der Liquorpulsation führen.

Bereits während der MRT-Untersuchung im 1T Siemens und 1,5T Philips Gerät konnten in den Phasen-Kontrast-MRT Unregelmäßigkeiten der Liquorpulsation vermutet werden. Bei 75 Patienten wurden als Ergänzung dynamische, EKG-getriggerte BFFE-Sequenzen aus der Kardiagnostik im 1,5T MRT durchgeführt. Diese ließen die netzartigen Septen im dorsalen Subarachnoidalraum erahnen. Im Cine-Modus betrachtet konnte eine pulssynchrone Bewegung der arachnoidalen Adhäsionen flau dargestellt werden. Aufgrund der Technik mittels 1,5T MR und fehlender Kanableitungen war die Bildqualität jedoch nicht sehr gut. Zeigten sich langstreckige Adhäsionen und Netze bei zusätzlich noch relativ weitem Liquorraum, so waren die pulssynchronen Bewegungen deutlich besser zu visualisieren. Bei kurzstreckigen Adhäsionen und engen Liquorräumen waren die septalen Bewegungen lediglich erahnbar oder teilweise gar nicht dargestellt. Lediglich bei 14 Patienten, also knapp 20% der 75 Patienten, waren die Septen erkennbar.

Durch die Kollegen der Neurochirurgie wurde in Abhängigkeit der klinischen Beschwerden der Patienten die Indikation zur Operation mit Lösung bzw. Durchtrennung der arachnoidalen Membranen gestellt. Dabei sollten jedoch nur die Membrananteile minimal invasiv operativ versorgt werden, welche direkt zur Störung der Zirkulation des

Liquors beitragen. Daher wurden bei 9 Patienten zur besseren Verifizierung und unter Abstützung auf den schon vorliegenden MRT-Befund und insbesondere der dargestellten Adhäsionen auf einzelnen Wirbelkörperhöhen weitere Phasen-Kontrast-MRT durchgeführt. Die Patienten wurden in einem 3T MRT mittels neuer EKG-gegateter 3D-cine-BFFE-Sequenzen aus der dynamischen kardialen Bildgebung untersucht, wobei das Augenmerk auf die Regionen der vermuteten arachnoidalen Verklebungen gerichtet wurde. Entgegen der dynamischen Phasen-Kontrast-MRT mit einem Schnitt in der sagittalen Mittellinie des Spinalkanals im 1,5T MRT konnten nun 3 parallele Schnitte dynamisch angefertigt werden. Ein weiterer Vorteil war die Möglichkeit der Darstellung und Untersuchung in allen 3 Raumebenen, welche im 1,5T bei Einzeluntersuchungsdauern von ca. 8 min pro Sequenzmessung den Patienten nicht zugemutet werden konnte. So konnten teilweise komplexe Netze im dorsalen und lateralen Liquorraum zeitlich und räumlich dargestellt werden. Die Beurteilbarkeit und Bildqualität der dynamischen Untersuchungen des 3T Gerätes waren exzellent. Überraschender Weise fanden sich komplexeste arachnoidale intradurale Netze und Zysten. Bei der Betrachtung der Sequenzen im Cine-Modus zeigte sich bei allen 9 Patienten im 3T MRT eine deutliche pulssynchrone Beweglichkeit der arachnoidalen Septen und Zystenmembranen, welche letztendlich zur Störung der Liquorzirkulation und zur Ausbildung einer Syringomyelie führten. Bei diesen Patienten korrelierten die Artefakte im T2 TSE mit den Störungen der Phasen-Kontrast-Messung exakt mit den dargestellten Adhäsionen in der cine-BFFE Sequenz. Aufgrund der komplexen Netz- und Septenbildung sowie der individuellen Ausprägung war eine quantitative Ausmessung der Bewegungen nicht möglich. Die beschriebenen Septenbewegungen können in dieser Arbeit nur bedingt und beispielhaft dargestellt werden, da eine Videodarstellung nicht möglich ist. Der Bewegungsumfang liegt im Millimeter und Submillimeterbereich. Als Film betrachtet sind die septalen Bewegungen sehr gut zu sehen.

Die Patienten zeigten im 3T MRT eine unterschiedliche Ausprägung der Septierungen in unterschiedlicher craniocaudaler Ausdehnung und Lokalisation im cervicalen und thorakalen Liquorraum. Dazu korrelierend fanden sich intraoperativ eindrucksvolle komplexe Netze, welche sich pulssynchron bewegten und Zysten, die sich mit Liquor füllten und wieder entleerten. Die pulssynchronen Bewegungen der arachnoidalen Septen wurden intraoperativ mittels Mikroskopievideoaufnahmen dokumentiert. Die festgestellten Liquorpulsationsbehinderungen wurden mikrochirurgisch gelöst.

Bei jedem der im 3T MRT untersuchten und operierten 9 Patienten erfolgte postoperativ eine Kontrolluntersuchung im 1,5T und 3T MRT. Dabei zeigten sich geänderte Liquorpulsationsverhältnisse ohne weitere Behinderungen der Liquorpulsation. Die komplexen arachnoidalen Netze waren nach Lösung bzw. Durchtrennung in sich zusammengefallen oder auch nach lateral verlagert. Ähnlich einem Segel im Wind, welches zusammenfällt, wenn der Wind nachlässt, konnten die netzartigen Verklebungen lateral im Liquorraum liegend und sich pulssynchron bewegend dargestellt werden. Bisher wurde nur eine Patientin der Kontrolle mindestens 1 Jahr nach der Operation zugeführt. Die Kontrollen der anderen 8 Patienten stehen noch aus oder sind anderenorts erfolgt, da die Patienten größtenteils nicht in unmittelbarer Nähe von Ulm ortsansässig sind. Langzeitergebnisse und Verlaufskontrollen sowohl des klinischen Beschwerdebildes als auch mittels MR-Bildgebung erfolgen in den nächsten Jahren.

3.2. Darstellung arachnoidaler Adhäsionen ohne Syringomyelie

Im Folgenden wird exemplarisch der Verlauf einer Erkrankung eines 45-jährigen männlichen Patienten mit klinischen Beschwerden wie bei einer Syringomyelie dokumentiert. Praktisch schon als Kind hatte er Probleme mit dem Rücken, hat erst spät das Laufen gelernt und immer schon beim Gehen auf die Beine sehen müssen. In den letzten Jahren hatte die Kraft im rechten Bein abgenommen, insbesondere das Treppensteigen fiel schwer. Nach einer Herpes Zoster Infektion 2008 am Rücken bestanden nächtliche Schmerzen der rechten Körperhälfte. Daneben bestanden Schmerzen der Brustwirbelsäule mit Ausstrahlung zum Kopf und nach kaudal sowie eine erhöhte Berührungsempfindlichkeit im Bereich der BWS. Auch klagte der Patient subjektiv über eine Einschränkung der Atmung und Schluckprobleme. Gefühlsstörungen bestanden in der rechten Gesichtshälfte, dem Gesäß und den Zehen D IV und V. Seit 2006 beklagte der Patient einen zeitweisen Sensibilitätsausfall der gesamten rechten Körperhälfte. Die klinisch neurologische Untersuchung zeigte bei dem wachen und kooperativen sowie allseitig orientierten Patienten einen unauffälligen Hirnnervenstatus, eine Hypästhesie der rechten Gesichtshälfte (v.a. im Versorgungsgebiet des 2. Trigeminusastes), eine diskrete Fußheberschwäche links und eine extrem druckempfindliche linke Brustseite. Die Muskeleigenreflexe zeigten sich mittellebhaft. Die restlichen neurologischen klinischen Untersuchungen waren normal.

In der durchgeführten Kernspintomographie des Schädels fand sich ein altersentsprechender Befund ohne Hinweise auf Raumforderungen, entzündliche oder vaskuläre pathologische Veränderungen. Die Phasen-Kontrast-MRT der Liquorpulsation des craniocervikalen Übergangs zeigte sich regelrecht ohne Störungen.

Die MRT Untersuchung der HWS und BWS mit i.v. Kontrastmittelgabe konnte eine Syringomyelie ausschließen. In der vorliegenden sagittalen T2 TSE Aufnahmen fanden sich keine Störungen des craniocervikalen Übergangs, jedoch war ein deutliches Jetphänomen dorsal des BWK3/4 erkennbar. In den sagittalen Phasen-Kontrast-MRT zeigten sich dann Behinderungen der Liquorpulsation mit raschem Wechsel der Grauwertstufen in den jeweiligen Artefaktarealen (Abbildung 8).

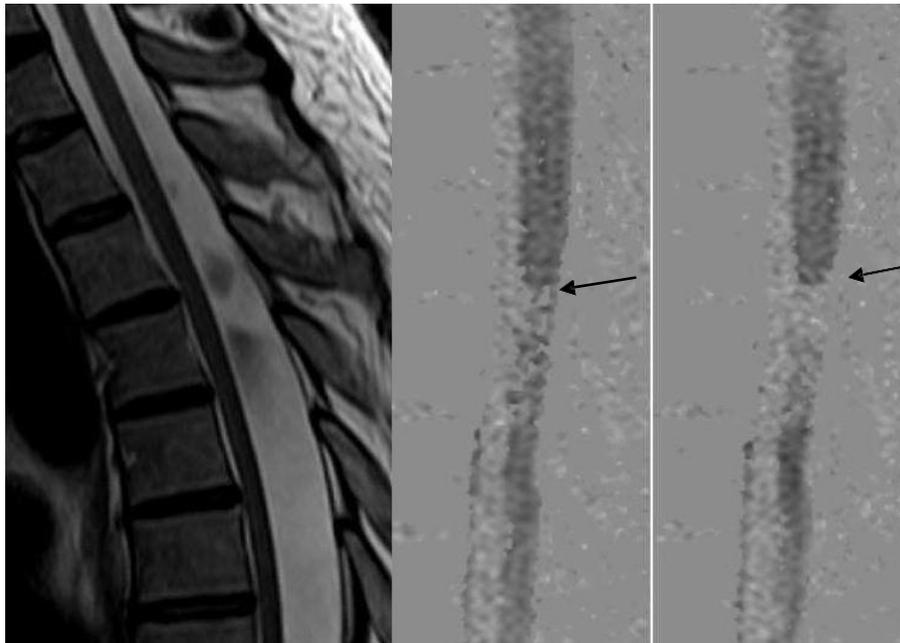


Abbildung 8: Sagittales T2 Bild (links) mit Liquorpulsationsartefakten dorsal auf Höhe des Brustwirbelkörpers 3/4, das Myelon wirkt abgeplattet und leicht atroph. Korrelierende Phasenkontrastmessung (rechts) mit Liquorpulsationsunterbrechung, welche am Umschlagen von Dunkelgrau in Hellgrau erkennbar ist (schwarze Pfeile).

Unter Verwendung der transversalen statischen BFFE-Sequenzen wurden bei dem Patienten die sagittalen T2 TSE Aufnahmen und die Phasen-Kontrast-MRT miteinander verkoppelt. Im dorsalen Liquorraum korrelierend zu den Liquorpulsationsunregelmäßigkeiten zeigte sich in Höhe des BWK 3/4 zarte strichförmige Membran (Abbildung 9).

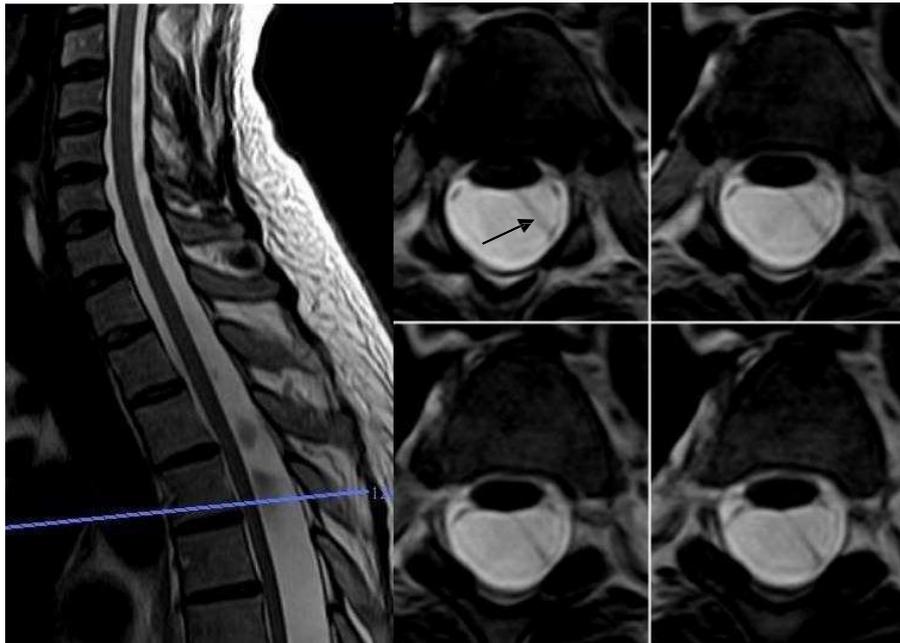


Abbildung 9: Sagittales T2 Bild (links) mit korrelierenden transversalen Sequenzen (rechts) in 3mm Abstand zueinander. Der Pfeil zeigt auf einen schräg verlaufenden zarten Streifen, welcher lateral und dorsal im Subarachnoidalraum links verläuft und einer membranartigen Adhäsion entspricht.

Zur ergänzenden Darstellung der vermuteten Adhäsionen in der MRT-Untersuchung im 1,5T Philips Gerät wurden dynamische, EKG-getriggerte BFFE-Sequenzen aus der Kardiagnostik durchgeführt. Diese ließen die netzartigen Septen im dorsalen Subarachnoidalraum erahnen. Im Cine-Modus betrachtet konnte eine pulssynchrone Bewegung der zeitlich und örtlich aufgelösten arachnoidalen Adhäsionen flau dargestellt werden. Einen optischen Eindruck soll ein einzelnes Sequenzbild des oben geschilderten Patienten ohne die Darstellung der dynamischen Aspekte der BFFE-Sequenz in folgender Abbildung vermitteln.



Abbildung 10: Sagittales T2 Bild mit dorsalem Liquorpulsationsartefakt (links) und dynamische Herzzyklus getriggerte Sequenz des 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen (rechts) mit langstreckigem geschwungenem netzartigem Segel dorsal des Myelons. Dies ist als wellig geschwungen verlaufender dunkler Streifen erkennbar (weißer Pfeil).

Wegen der bestehenden klinischen Beschwerden des Patienten wurde durch die Kollegen der Neurochirurgie die Indikation zur operativen Durchtrennung der arachnoidalen Adhäsionen gestellt. Der Patient wurde zusätzlich im 3T MRT mittels EKG-gegateter 3D-cine-BFFE-Sequenzen aus der dynamischen Kardiobildgebung untersucht, wobei das Augenmerk auf die Region dorsal des BWK 3 und 4 gerichtet wurde. Die Auswertung der dynamischen Bildgebung zeigte ein komplexes Netz im dorsalen und lateralen Liquorraum, welches bei Betrachtung im Cine-Modus eine deutliche pulssynchrone Beweglichkeit zeigte. Abbildung 10 und 11 zeigen den Vorteil der Untersuchung im 3T MRT mit der Möglichkeit der Darstellung der arachnoidalen Adhäsionen sowohl in der sagitalen, coronaren als auch der transversalen Raumebene in Multi-Slice-Technik.

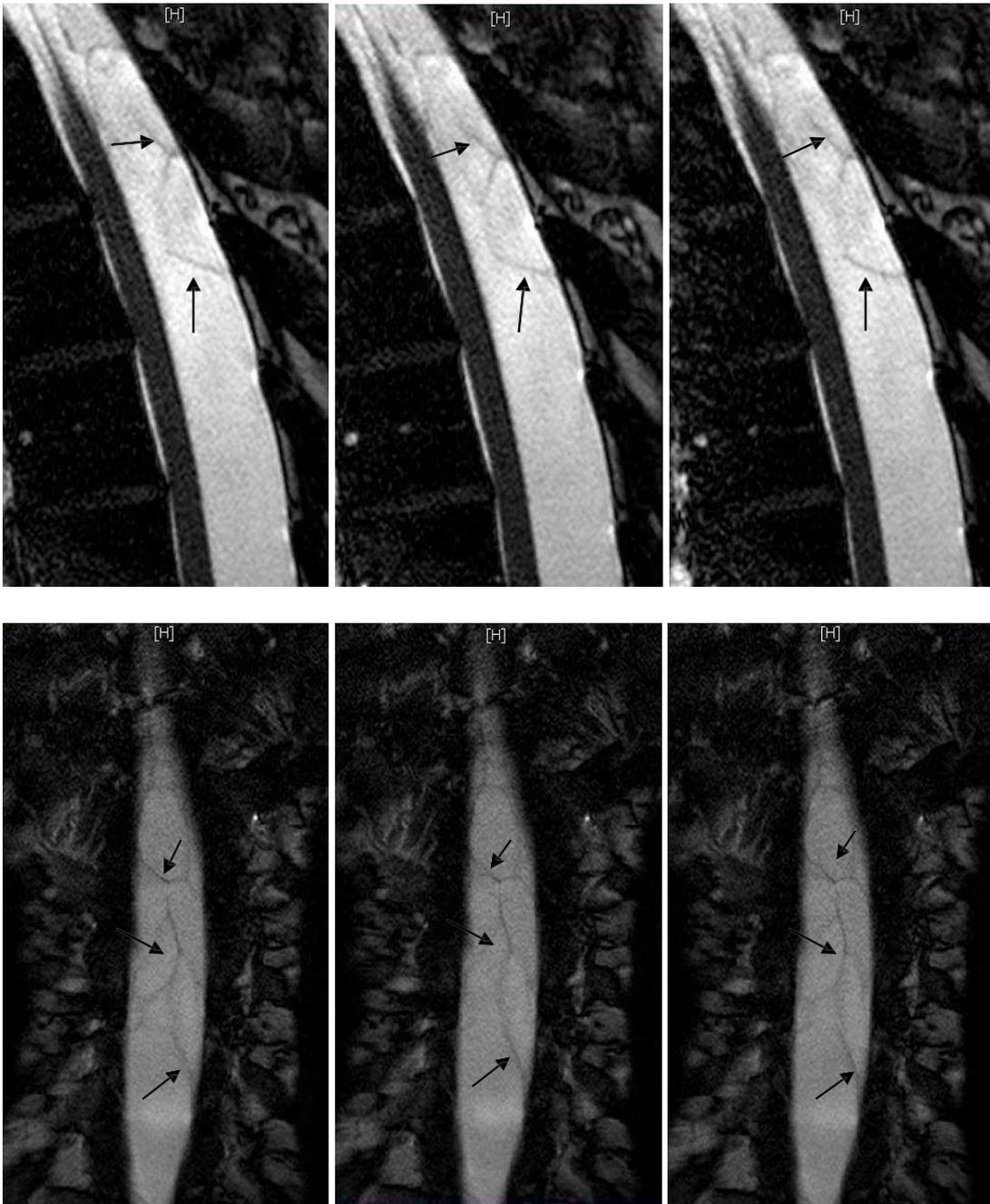


Abbildung 11: Sagittale (oben) und coronare (unten) dynamische Balanced Fast Field Echo des 3 Tesla Magnetresonanztomographen in identischer Untersuchungsebene mit gut erkennbaren beweglichem Netz, welches sich von geradlinig in eine leicht geschwungene Konfiguration während eines Herzzyklus verändert.

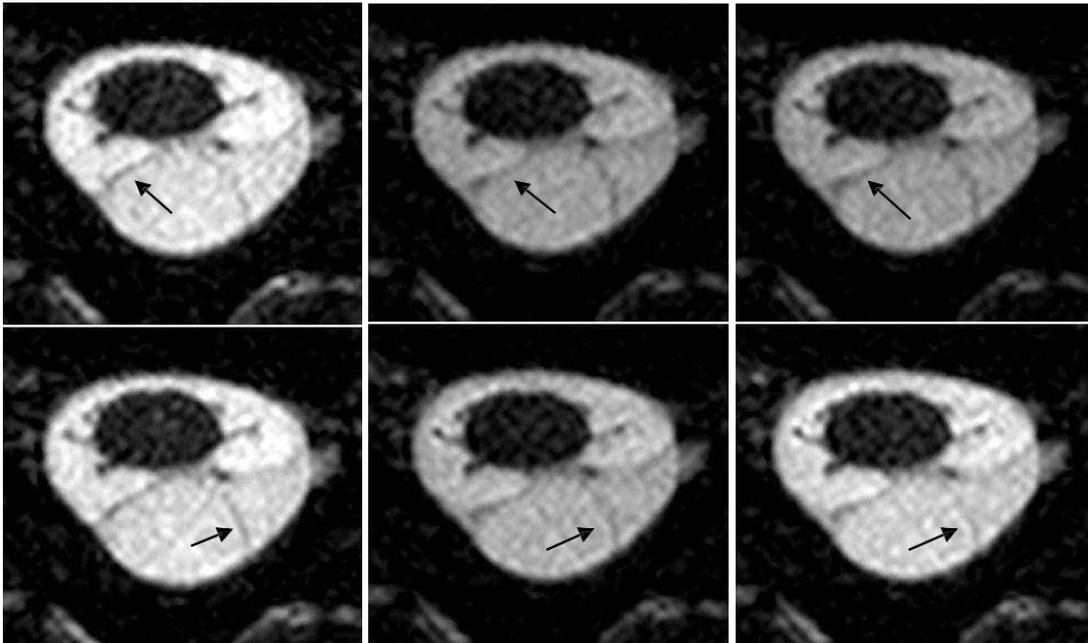


Abbildung 12: Transversale dynamische Balanced Fast Field Echo des 3 Tesla Magnetresonanztomographen in identischer Untersuchungsebene mit Darstellung der netzartigen Septen im dorsalen Subarachnoidalraum. Darstellung der Beweglichkeit bei Änderung der Netzanteile von geschwungenem zu getrecktem Verlauf während eines Herzzyklus.

Intraoperativ fand sich eindrucksvolles komplexes Netz, welches mikrochirurgisch dorsal des BWK 3/4 durchtrennt wurde.

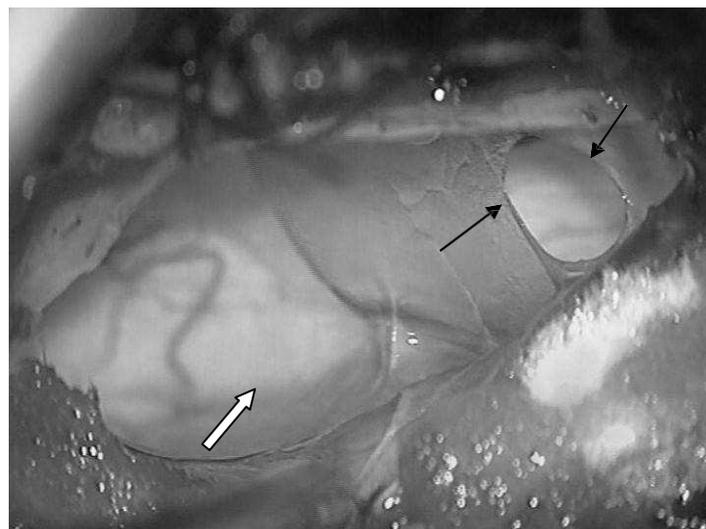


Abbildung 13: Intraoperativ fanden sich nach Eröffnung der Dura multiple Septen (schwarze Pfeile) im dorsalen Liquorraum. Am linken Bildrand sind ballionierte Zystenanteile erkennbar (weißer Pfeil). In der Tiefe schimmert das Myelon mit versorgenden Gefäßen.

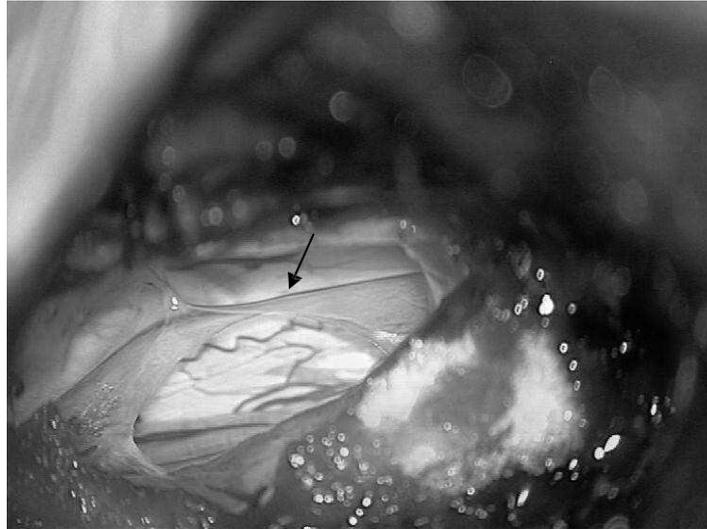


Abbildung 14: Nach Durchtrennung der Zystenwand fällt diese in sich zusammen, verbleibt jedoch in Resten (Pfeil) und behindert nun nicht mehr die Liquorpulsation. Es sind keine liquorgefüllten ballonierten Anteile mehr nachweisbar. Das Myelon ist scharf erkennbar dargestellt.

7 Tage nach der durchgeführten Operation fand sich im 1,5T MRT eine ungehinderte Liquorpulsation im dorsalen Subarachnoidalraum. Die Untersuchung im 3T MRT zeigte die Adhäsionen in sich zusammengefallenen und nach lateral verlagert.

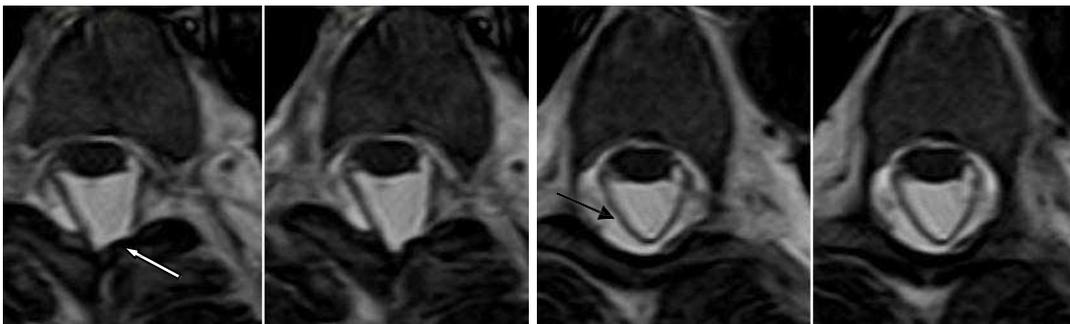


Abbildung 15: Transversale statische Balanced Fast Field Echo (BFFE) in Höhe Brustwirbelkörpers 3/4 mit regelrechtem dorsalen Liquorraum ohne Adhäsionen. Erkennbare Duranaht dorsal (weißer Pfeil) und postoperativ extradurale Liquoransammlung (schwarzer Pfeil).

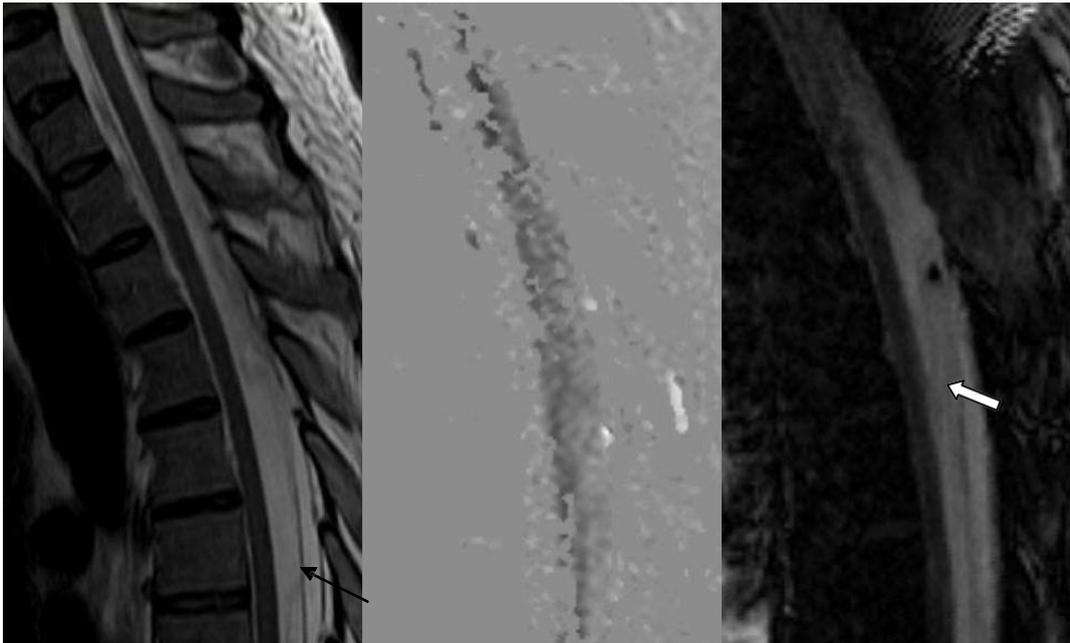


Abbildung 16: Postoperatives 1,5 Tesla Magnetresonanztomogramm nach Adhäsiolyse: Sagittales T2 Bild (links) ohne erkennbare Liquorpulsationsartefakte, postoperative Duraabhebung mit extraduralem Liquor (schwarzer Pfeil). Phasen-Kontrast-Bild (Mitte) ohne Behinderung der Liquorpulsation. Dynamische Balanced Fast Field Echo (rechts) mit zusammengefallenen arachnoidalen Septen (weißer Pfeil) gestreckt im dorsalen Arachnoidalraum verlaufend.

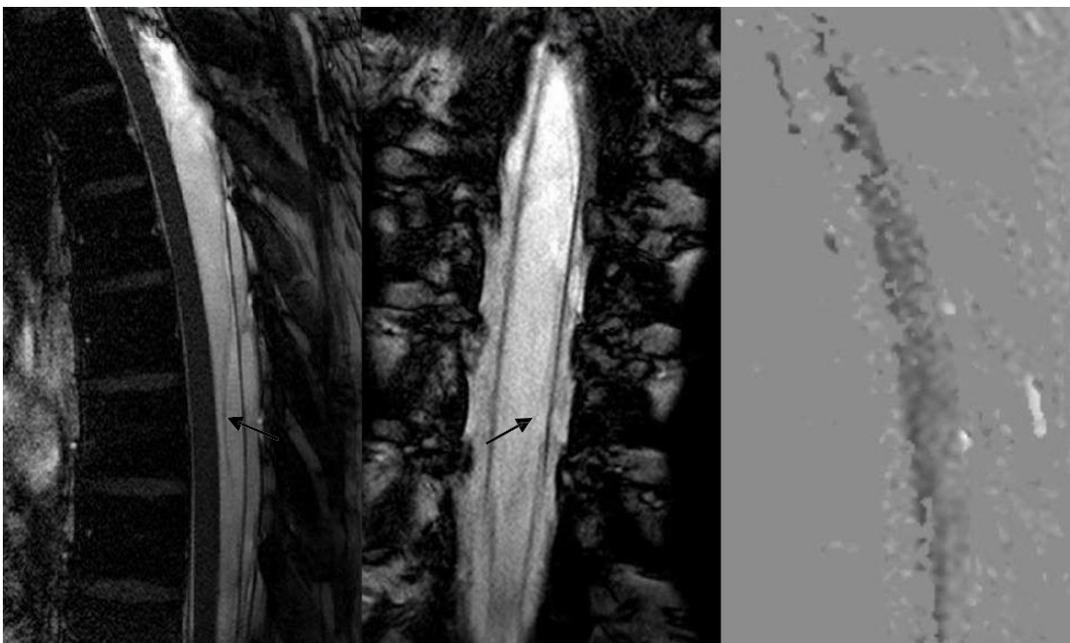


Abbildung 17: Postoperative dynamische Balanced Fast Field Echo des 3 Tesla Gerätes (links und Mitte) mit sichtbaren zusammengefallenen Adhäsionen, welche strichförmig hellgrau dargestellt sind (Pfeile) und in craniocaudaler Richtung zu keiner Liquorpulsationsbeeinträchtigung (rechts) führen.

Für den geschilderten Patienten kann folgendes ausgesagt werden: Der 45-jährige männliche Patient hat die Adhäsiolyse dorsal der BWK 3/4 sehr gut überstanden. Die Behinderung der Liquorpulsation wurde trotz ausgedehnter arachnoidaler Adhäsionen und einer komplexen Netzbildung lediglich dorsal der Höhe BWK 3/4 gesehen. Bereits die erste postoperative MRT Kontrolle zeigte wieder eine reguläre Liquorpulsation bei Darstellung der verbliebenden Netzanteile lateral im Liquorraum. Die Kompression des Myelons von dorsal zeigte sich nicht mehr. Der Patient berichtete über eine deutliche Besserung seiner klinischen Beschwerden. Das Laufen fiel ihm viel leichter, die Schwäche v.a. des rechten Beines war nicht mehr so ausgeprägt. Die Gefühlsstörungen und Schmerzen im Rückenbereich waren ebenso rückläufig.

3.3. Darstellung arachnoidaler Adhäsionen bei bestehender Syringomyelie

Die vorangegangenen Ausführungen haben einen Patienten mit arachnoidalen Adhäsionen ohne Ausbildung einer Syrinx aufgezeigt. Im Folgenden wird der Fall einer Syringomyelie mit arachnoidalen Adhäsionen aufgezeigt.

Es handelt sich um eine 40 Jahre alte, weibliche Patientin mit seit einigen Jahren bestehenden Kopfschmerzen, beidseitigen Schulterschmerzen mit Ausstrahlung in die Oberarme sowie an die Innenseite des rechten Unterarmes und einer Taubheit der Hände. Bei der Erstvorstellung 07/2006 fand sich klinisch neurologisch eine Hypästhesie im TH 8-Dermatom beidseits, sonst völlig regelhafte Befunde. Die Patientin bot anamnestisch keinerlei stattgehabte spinale Traumata oder Infektionen.

Die MR-Untersuchung der Neuroachse zeigte eine langstreckige thorakale Syringomyelie von BWK 2 bis BWK 7 reichend. Zusätzlich fanden sich dorsale Adhäsionen in Höhe BWK2/3, 3/4 sowie BWK 7 und 10. Der craniocervikale Übergang zeigte eine regelrechte Anatomie.

Nach 6 Monaten konservativer Therapie klagte die Patientin über aufsteigende Dysästhesien der Handinnenflächen bis zur Unterarmmitte, dabei war die rechte Seite deutlich mehr betroffen als links. Zusätzlich zeigten sich Feinmotorikstörungen der Hände. Neue Dysästhesien beider Füße fanden sich ebenfalls. Die klinisch neurologische Untersuchung hinsichtlich Motorik sowie der Reflexstatus war unauffällig. Im weiteren Verlauf von 6 Monaten zeigte sich eine deutliche Progredienz der klinischen Beschwerden

beider Hände und Unterarme mit zunehmenden Sensibilitätsstörungen. Zusätzlich beklagte die Patientin zunehmende Blasenentleerungsstörungen bei unauffälliger urologischer Untersuchung. Aufgrund der progredienten Beschwerden der Patientin wurde die Indikation zur mikrochirurgischen Adhäsiolyse gestellt. Die Kontrolluntersuchungen im MR nach 6 und 12 Monaten zeigten die thorakale Syrinx mit dorsalen arachnoidalen Adhäsionen unverändert.

Die präoperativen MR Untersuchungen wiesen ausgeprägte Liquorpulsationsartefakte im dorsalen Subarchnoidalraum auf. Die dynamischen Sequenzen des 3T Gerätes zeigten eine ausgeprägte Netz- und Septenbildung mit pulssynchroner Beweglichkeit. Diese führten zur Liquorpulsationsbehinderung im dorsalen Liquorraum (Abbildung 18-20).

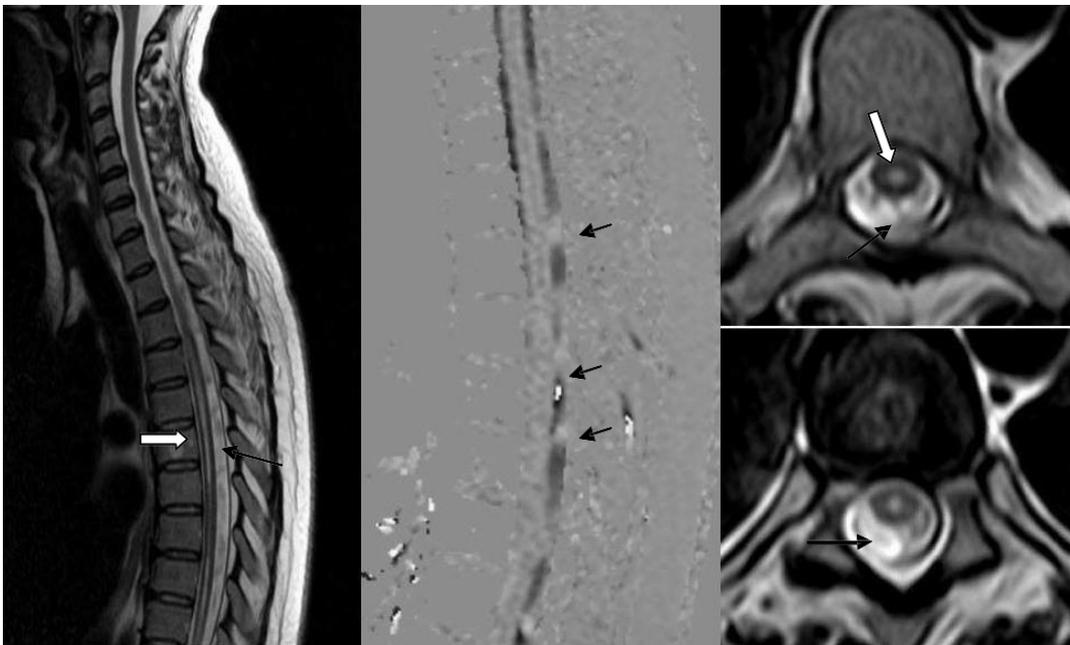


Abbildung 18: Sagittales T2 Bild (links) mit Darstellung einer Syrinxomyelie (weißer Pfeil) in Höhe des Brustwirbelkörpers 2 bis 10 und ausgeprägten wolkeig grau imponierenden Liquorpulsationsartefakten (schwarzer Pfeil) dorsal. Entsprechend finden sich Störungen der Liquorpulsation in der Phasen-Kontrast-Messung (Mitte) auf mehreren Höhen mit Umschlagen von grau nach weiss (kurze Pfeile). In den transversalen statischen Balanced Fast Field Echo (rechts) sind dorsale Septen und Zysten erkennbar (schwarze Pfeile) sowie die Syrinxomyelie des Myelons (weißer Pfeil).

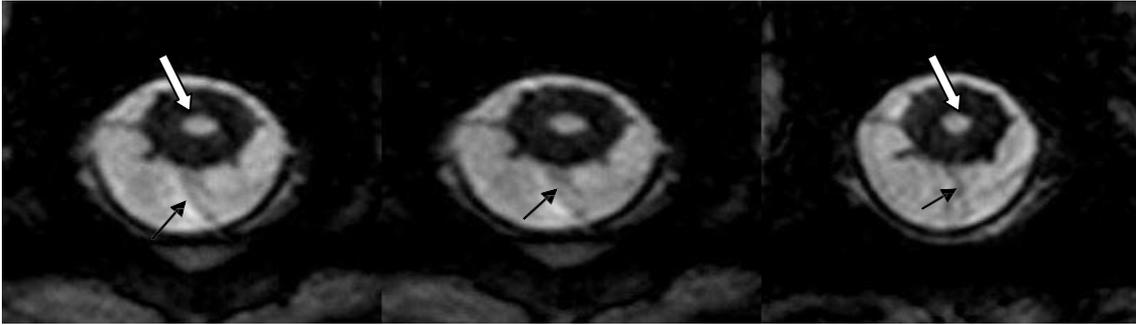


Abbildung 19: Transversale dynamische Balanced Fast Field Echo mit Bewegung der dorsalen Adhäsionen (schwarze Pfeile) und Änderung des Lumens der Syringomyelie (weißer Pfeil) während eines Herzzyklus bei Untersuchung auf identischer Höhe.



Abbildung 20: Sagittale dynamische Balanced Fast Field Echo mit Bewegung der dorsalen Septen, welche als zarte graue Striche dargestellt sind (schwarze Pfeile).

Die Operation erfolgte entsprechend der gesehenen Adhäsionen von dorsal links in Höhe des BWK 3 mit partieller Wirbelbogenresektion. Während der Operation wurden multiple Septenanteile durchtrennt, vom Myelon gelöst und teilweise entfernt.

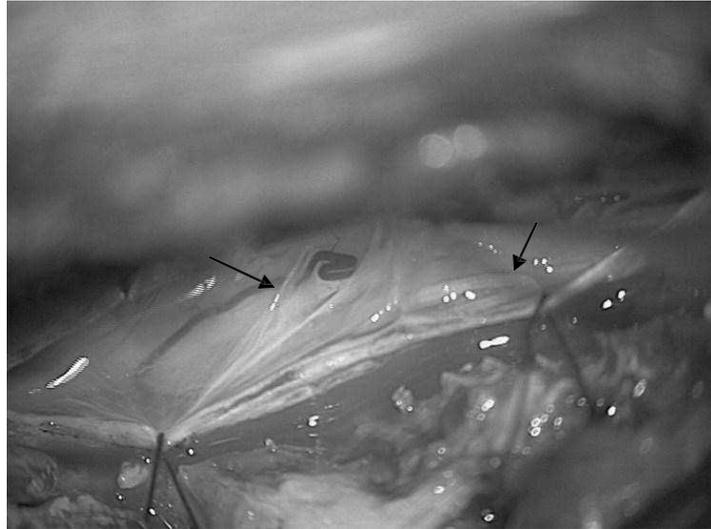


Abbildung 21: Nach Längsschlitzung und Auseinanderklappen der Dura ballonieren sich Zystenanteile nach dorsal und füllen sich pulssynchron auf. Teilweise kommt es zu Einschnürungen durch narbige Anteile (Pfeile). Das Myelon liegt unter den Adhäsionen unscharf dargestellt.

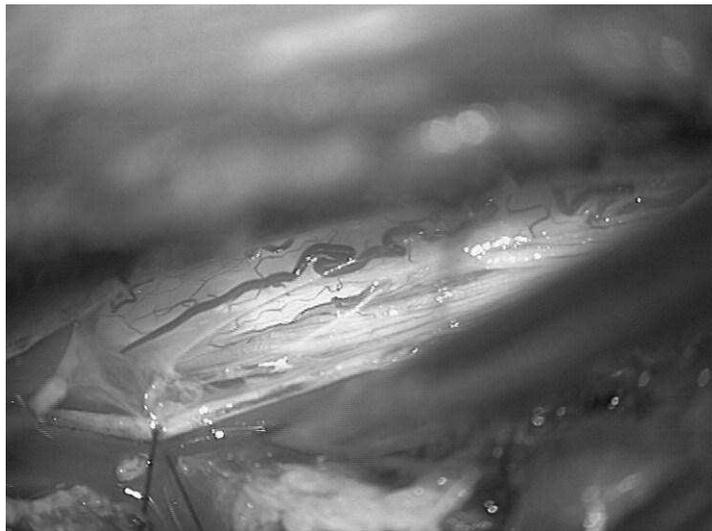


Abbildung 22: Die Durchtrennung von Zystenwandanteilen bewirkt eine Normalisierung der Liquorpulsation und die ballonierten Zystenanteile fallen in sich zusammen.

Am 6. postoperativen Tag erfolgte eine erneute MRT Untersuchung. Die Patientin hatte operationsbedingt lokale Beschwerden bei ansonsten gutem Allgemeinbefinden.

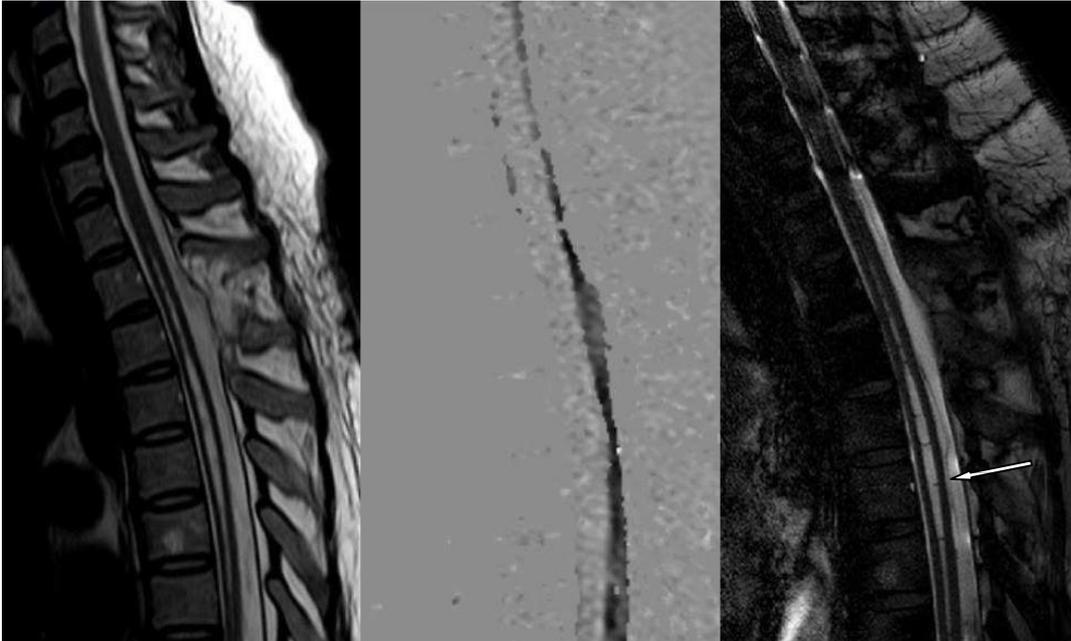


Abbildung 23: Sagittales T2 Bild (links) mit Operationsdefekt dorsal des Brustwirbelkörpers 3 bei unveränderter Syringomyelie. Die Liquorpulsation zeigte sich in der Phasen-Kontrast-Messung (Mitte) jedoch wieder regelrecht dargestellt. Die Balanced Fast Field Echo Sequenz (rechts) zeigt die arachnoidalen Septen verlagert und zusammengefallen (Pfeil).



Abbildung 24: Postoperative korrelierte transversale statische Balanced Fast Field Echo in Höhe der thorakalen Operation mit erkennbarer dorsaler Duranaht (weißer Pfeil) und dorsal des Brustwirbelkörpers 4/5 dargestellte zusammengefallene, nicht mehr aufgespannt imponierende Adhäsionen im Liquorraum (schwarzer Pfeil).

Der geschilderte Verlauf zeigt eine 40 jährige Patientin mit einer langstreckigen thorakalen Syringomyelie von BWK 2 bis BWK 7 und zusätzlich dorsalen Adhäsionen in Höhe BWK2/3, 3/4 sowie BWK 7 und 10. Die Adhäsiolyse erfolgte hier weit ausgedehnt und es musste eine partielle Resektion von Zystenanteilen erfolgen, um wieder für eine ungehinderte Liquorpulsation sorgen zu können. Unmittelbar postoperativ zeigte sich leider keine Besserung der klinischen Symptomatik der Patientin. Die bestehende Syrinx in der Größenausdehnung war unverändert. Die Phasen-Kontrast-Messung zeigte eine ungehinderte Pulsation des Liquors im dorsalen Subarachnoidalraum. Auch die Verlaufskontrolle ein Jahr nach der Operation zeigte keine Änderung der Ausdehnung der Syringomyelie. Klinisch berichtet die Patientin über unveränderte Beschwerden mit Dysästhesien beider Unterarme jedoch über eine Besserung der Blasenentleerungsstörung. Bei präoperativ progredientem Verlauf ist nun postoperativ wenigstens ein stabiler Zustand hergestellt worden.

Durch die vorangegangenen Ausführungen mit Darstellung der einzelnen Krankheitsverläufe können die eingangs gestellten Fragen wie folgt beantwortet werden:

- Es ist möglich, arachnoidale Adhäsionen nicht nur statisch sondern auch dynamisch mittels MRT darzustellen.
- Die angewandten Untersuchungssequenzen sind in der täglichen Routinediagnostik nur eingeschränkt nutzbar.
- Aus den gewonnen Informationen ergibt sich eine klinische und therapeutische Relevanz für die Patientenbehandlung.

4 Diskussion

4.1. Diskussion des Patientenkollektives und der Methodik

In den letzten beiden Jahrzehnten sind immer häufiger Patienten mit unspezifischen Symptomen im Bereich der Wirbelsäule sowohl neurologisch, neurochirurgisch als auch radiologisch zur Untersuchung und Behandlung vorstellig. Zwar lassen sich keine exakten Zahlen belegen, jedoch ist eine scheinbare Häufigkeitszunahme an den steigenden medizinischen Ausgaben in diesem Leistungsbereich zu sehen. Rückenschmerzen sind ein sehr häufiges Krankheitsbild. Ca. 80% der Bevölkerung berichten von Rückenschmerzen, welche sie bereits hatten oder haben (68). Die Magnetresonanztomographie hat sich aufgrund seiner technischen Charakteristika als bestes Verfahren zur bildgebenden Darstellung der Wirbelsäule und der spinalen Strukturen herausgestellt. Somit ist das MR mittlerweile ein Standardverfahren in der neuroradiologischen Diagnostik (47). Mit der Verbesserung der bildgebenden Methoden und breitflächigem Einsatz finden sich zunehmende Möglichkeiten der Darstellung von Normalbefunden und Pathologien der Spinalkanals und Myelons. Nicht nur anatomische Bildinformationen werden heute darstellt. Die Diagnose der Syringomyelie kann ausschließlich mit Hilfe der MRT gestellt werden.

Die häufigste Ursache einer idiopathischen Syringomyelie ist in arachnoidalen Adhäsionen zu sehen, welche zur Behinderung der freien Liquorzirkulation führen (27). Das Problem besteht jedoch darin, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen der Lage der Syringomyelie und der Lage von arachnoidalen Membranen gibt. Die Adhäsionen können also in Höhe der Syringomyelie, jedoch auch darunter oder darüber ausgebildet sein (26).

Bisher gelang der Nachweis arachnoidaler Membranen meist nur indirekt durch Nachweis von Liquorzirkulationsstörungen in den Phasen-Kontrast-Messungen und erahnbare Septen in der statischen transversalen BFFE-Sequenz in Korrelation zur sagittalen T2 TSE Sequenz (49, 50). Mit zunehmendem Einsatz EKG-getriggelter/-gegateter dynamischer Sequenzen besteht die Möglichkeit, die Liquorpulsation sowohl normal als auch pathologisch verändert darzustellen.

Wenn auch nur mit bisher kleinen Fallzahlen von 9 Patienten in dieser Arbeit ist mit der Erprobung einer cardiac-gated cine-balanced fast field echo (BFFE)-Sequenz im 3T MRT erstmals die Darstellung arachnoidaler Septen und Zysten gelungen, welche indirekt durch die Behinderung der Liquorpulsion im Standard-MRT erkennbar waren. Zeitgleich ist hier nicht nur eine rein anatomische Darstellung möglich, sondern durch die zeitlich auflösenden Untersuchungssequenzen wird eine dynamische Darstellung erreicht. Anhand dieser neuen EKG-getriggerten/-gegateten dynamischen Sequenzen aus der Herzbildgebung ist es gelungen, die arachnoidalen Adhäsionen örtlich und zeitlich aufgelöst darzustellen und die pulssynchrone Bewegung zu visualisieren.

Für diese Arbeit fanden sich im untersuchten Zeitraum von 2 Jahren bei 429 Patienten von mehr als 4600 Patienten, welche eine MRT des cervikalen und thorakalen Myelons erhielten, dorsale Adhäsionen. Bei 414 Fällen war eine Erweiterung des Zentralkanals zu sehen, lediglich bei einer geringen Anzahl von 15 lagen alleinige Adhäsionen ohne eine Syringomyelie vor. Vergleicht man die gängige Literatur, so scheint die erreichte prozentuale Anzahl von fast 10% der Patienten mit Ausbildung dorsaler Adhäsionen mit Vergesellschaftung einer Syringomyelie auf den ersten Blick recht hoch. So gab es in Amerika 1999 eine Studie, die ein 0,0084 prozentiges Auftreten einer Syringomyelie beschreibt (29). Kritisch anzumerken ist, dass sicher eine relativ hohe Anzahl an Syringomyeliepatienten bereits vordiagnostiziert in das Bundeswehrkrankenhaus Ulm eingewiesen wurden, um in einem von wenigen Zentren deutschlandweit eine Phasen-Kontrast-MRT der Liquorraumes durchzuführen.

Eine Darstellung der Adhäsionen mit zeitlicher und räumlicher Auflösung und der damit verbundenen pulssynchronen Bewegungen lassen sich nur schwer erreichen. Ziel der Arbeit war die Erprobung einer cardiac-gated cine-balanced fast field echo (BFFE)-Sequenz zur prä- und postoperativen Darstellung arachnoidaler Membranen im Spinalkanal. Unter Verwendung EKG-gegateter 3D-cine-BFFE-Sequenzen aus der dynamischen Kardiobildgebung wurde versucht, diese sich bewegenden sehr dünnen Strukturen, darzustellen. Bisher erfolgte in der Abteilung für Radiologie mittels der Standard MRT des 1,5T Gerätes die Diagnostik der arachnoidalen Adhäsionen mittels Korrelation der durchgeführten Phasen-Kontrast-Messung des Liquorflusses, der sagittalen T2 TSE Sequenzen und den korrespondierenden transversalen statischen BFFE. Die neu angewendeten dynamischen cine-BFFE Sequenzen lassen eine genauere Aussage hinsichtlich arachnoialer Adhäsionen zu.

Die Standard MRT Sequenzen im 1T und 1,5T MR (hier vor allem die sagittalen T2 TSE und transversalen BFFE) werden mit 3 mm in der Schichtdicke erstellt und es entstehen zwischen 8 und 20 Schichten pro Untersuchung. Die Phasen-Kontrast-Messung des Liquorflusses und dynamische BFFE erfolgen in der Mittellinie und werden somit nur in einer Schicht gemessen. Die Bildqualität der dynamischen EKG-getriggerten Sequenzen im 1,5T MRT war bei hohem zeitlichem Messaufwand von gut 4 min pro Schicht nicht sehr befriedigend und schlecht. Lediglich bei einem weiten Liquorraum und einzelner Septen bzw. langstreckig ausgedehnten Adhäsionen waren diese selbst und ihre pulssynchrone Beweglichkeit erkennbar. Im Gegensatz dazu war die Bildqualität des 3T MRT deutlich besser und die Septen konnten sehr gut in ihrer Dynamik dargestellt werden. Im 3T Gerät besteht mit der cardiac-gated cine-balanced fast field echo (BFFE)-Sequenz die Möglichkeit einer Multislice-Untersuchung. Diese dynamischen Sequenzen können in 3 nebeneinander liegenden Blöcken zu je 3 mm und in allen 3 Raumebenen erstellt werden, wobei ein Untersuchungsblock gerade eben 4 min dauert. Neben einer zeitlichen und räumlichen Auflösung sind so teilweise komplexe Netzbildungen erkennbar, welche jedoch nur partiell zur Behinderung der Liquorpulsation führen und somit ursächlich für die Ausbildung der Syringomyelie sind.

Wie in den vorangegangenen Ausführungen erkennbar, hat sich ein Hauptproblem der dynamischen Bildgebung hinsichtlich der Magnetfeldstärke ergeben. Bei Untersuchungen im 1,5T MR sind vor den dynamischen Messungen Planungssequenzen sagittal, coronar und transversal nötig, welche insgesamt ca. 10 min benötigen. Die Erstellung einer einzelnen 3D-cine-BFFE Sequenz dauert mindestens 8-10 min und es entsteht ein einzelne Schicht zur dynamischen Darstellung. Wünschenswert ist aber die Darstellung von mindestens 3 parallelen Darstellungsfenstern sowohl in der coronaren als auch sagittalen Untersuchungsebene. Transversal sollte eine Abbildung der Adhäsionen über eine Länge von mindestens 3 Wirbelkörperhöhen oder mehr erfolgen. Das bedeutet für mehrere Höhen von Adhäsionen und bei angestrebter Darstellung von allen 3 Raumebenen eine Scanzeit von 3 Ebenen x 3 Schichten x 8 Minuten. Zusammen mit den Planungssequenzen ergibt sich somit eine Mindestuntersuchungsdauer von 1,0-1,5 Stunden. Dies ist den Patienten nicht zuzumuten. Erschwerend kommt hinzu, dass die Darstellung der arachnoidalen Septen nur sehr schlecht gelingt. Die pulssynchronen Bewegungen der Septen sind nur selten gut zu erkennen. Für die routinemäßige Anwendung sind diese Sequenzen nicht praktikabel und ungeeignet.

Besser geeignet sind die Sequenzen im 3T MRT. Durch Anwendung schnellerer Sequenzen mit Dauer von 4-5min und der zeitgleichen Entstehung von 3 Parallelschichten ist die dynamische Bilddarstellung wesentlich praktikabler. Jedoch ist es zwingend notwendig, die zu untersuchenden Höhen mit den vermuteten arachnoidalen Adhäsionen vorher zu detektieren, um die entsprechende Höhe dann selektiv untersuchen zu können. Dies geschah während der Befundung der Standard-MRT-Untersuchungen des 1T und 1,5T Gerätes.

Generell schwierig gestalteten sich die einzelnen Untersuchungen je nach Erkrankungsschwere der Patienten, die jedoch nicht als krankheitsspezifisch anzusehen ist. Manche Patienten waren bereits präoperativ stark in ihrer Mobilität eingeschränkt. Postoperativ ergaben sich ähnliche Probleme, da die Untersuchungen bis 7 Tage nach der Operation erfolgten. Für die Untersuchungen im 1,5T Gerät konnten nicht gehfähige Patienten auf einer fahrbaren Untersuchungsliege vor dem eigentlichen Untersuchungsraum gelagert werden. Problematischer waren die Untersuchungen im 3T MRT. Hier ist baubedingt und bei primärer Anwendung des MR zur kardialen Bildgebung bei klinisch nicht eingeschränkter Mobilität der Patienten kein beweglicher Untersuchungstisch vorhanden. Die Patienten mussten also mit eigener Kraft, möglichst gehfähig und mit stützender Hilfe weiterer Personen selbst auf den ca. 90 cm hohen Untersuchungstisch aufsteigen. Besonders frisch postoperativ war dies eine große Herausforderung für alle Beteiligten.

4.2. Diskussion der Ergebnisse

Arachnoidale Zysten und Adhäsionen treten im gesamten Spinalkanal, jedoch am häufigsten im thorakalen Anteil, auf und führen zu unspezifischen Beschwerden. Der exakte pathophysiologische Mechanismus ihrer Entstehung ist unklar. Multiple Faktoren scheinen eine Rolle zu spielen. Zwei Theorien haben sich etabliert (60): So wird eine Dilatation des Septum posticum im dorsalen Subarachnoidalraum diskutiert und an einen congenitalen Defekt mit „Divertikeln“ der Arachnoidea und Dura gedacht (62). Diese Theorie kann jedoch für Zysten im lateralen und anterioren Subarachnoidalraum nicht angewandt werden. Hier sind Traumata, Infektionen, Blutungen und Chirurgische Eingriffe als offensichtlich ursächlich anzusehen (12).

Die adhäsive intraspinale Arachnoiditis ist ein chronischer entzündlicher Prozess, teilweise vergesellschaftet mit stattgehabten Operationen, Myelographien oder Meningitiden. Im lumbalen Bereich finden sich radikuläre Beschwerden bei Einbeziehung der Fasern der Cauda equina (16, 17). Im Gegensatz dazu zeigt die Arachnoiditis cervicothorakal eine langsam progrediente Myelopathie mit Myelondegenerationen und Entwicklung einer Syringomyelie bei Änderung des normalen Liquorflusses (37, 38).

Die Behebung der relevanten Blockaden wurde neurochirurgisch versucht. Bei Patienten mit Hydrocephalus wurde ein ventrikuloperitonealer Shunt eingebracht. Implantierte syringo-peritoneale oder syringo-subarachnoidale Shuntsysteme zeigten eine hohe Rate der Dys- und Fehlfunktion. Teilweise fand sich ein deutlicher Progress der Adhäsionen (41). Zu Beginn der operativen Versorgung wurde versucht, die gesamten arachnoidalen Adhäsionen zu lösen und zu entfernen. Langzeitbeobachtungen zeigten jedoch eine hohe Rezidivrate und progrediente klinische Beschwerden. In den letzten Jahren scheint die bessere neurochirurgische Methode die mikrochirurgische Adhäsiolyse, um so wenig als möglich neue Reize einer Narbenbildung zu schaffen. Bei fokalen Läsionen ist eine Verbesserung der klinischen Beschwerden eher zu erwarten als bei ausgedehnteren Veränderungen (3). An erster Stelle anzustreben sind lokale Resektionen. Nur wenn keine anderen Optionen bestehen, kann ein Shuntsystem platziert werden. Das Augenmerk sollte jedoch immer auf die bestehenden klinischen Beschwerden der Patienten und Abwägen der Therapie der erhobenen Befundes und einer eventuellen Verbesserung der Lebensqualität gelegt werden. Eine relevante Auswirkung der Syringomyeliegröße auf die klinischen Beschwerden der Patienten scheint nicht zu existieren (80).

In der vorliegenden Arbeit zeigten sich bei fast 50% (n=197) der 429 untersuchten Syringomyeliepatienten arachnoidale Adhäsionen und Zysten, während in der Literatur die Syringomyelie mehrheitlich mit dem Auftreten einer Chiari-Malformation gesehen wird (76). Diese Arbeit zeigt jedoch lediglich 20% (n=87) der Syringomyeliepatienten mit einer Chiari-Malformation. Der Untersuchungszeitraum umfasst zwei Jahre vom 01.01.2008 bis zum 31.12.2009, wobei insgesamt 4652 Patienten untersucht wurden. Es fanden sich bei 429 Patienten und somit bei fast 10% aller Patienten eine mit arachnoidalen Verklebungen vergesellschaftete Syringomyelie, selten jedoch mit der Darstellung einer Chiari-Malformation. Die Patienten mit nachgewiesenen arachnoidalen Adhäsionen wurden zum Zeitpunkt der stationären Aufnahme ausführlich neurologisch untersucht. Dabei fanden sich eine Vielzahl unspezifischer Veränderungen wie Dys- und Hypästhesien, subjektivem

Kraftverlust, Sensibilitätsverlust, Blasenentleerungsstörungen, Ataxie, lokalen oder diffusen Schmerzen. Entsprechend der einzelnen Untersuchungsergebnisse wurde dann ein therapeutisches Konzept aufgestellt. Die Patienten wurden im halbjährlichen Intervall oder bei Beschwerdeprogredienz wieder einbestellt. Lediglich eine geringe Zahl von nicht einmal 10 Patienten wurde nach mehrmaligen stationären Aufenthalten und bei deutlicher Progredienz ihrer klinischen Beschwerden einer operativen Therapie zugeführt. Dies erfolgte in Abwägen des therapeutischen Erfolges, der Heftigkeit der klinischen Beschwerden und des doch nicht ganz geringen Operationsrisikos sowie der nicht abzuschätzenden Rezidivrate einer Neubildung von Adhäsionen.

Zum Verständnis der kausalen Zusammenhänge der Entwicklung einer Syringomyelie ist die Darstellung und Quantifizierung der Liquorpulsationstörungen entscheidend. Dazu erfolgte bei den 9 ausgewählten Patienten die Verlaufsuntersuchung mit Durchführung einer cranialen, cervicothorakalen sowie einer thorakolumbalen Kernspinuntersuchung. Nach Detektion der arachnoidalen Adhäsionen mittels T2 gewichteter sagittaler, statischer transversaler BFFE-Sequenz und Phasen-Kontrast-Messung erfolgte die ergänzende Untersuchung mittels EKG-getriggter dynamischer Sequenz im 1,5T MRT. In einem weiteren Untersuchungsgang des Folgetages wurden die Patienten mit ärztlicher Begleitung durch einen Radiologen dann an die Universitätsklinik Ulm zur Untersuchung im 3T Gerät gebracht.

Die Beurteilbarkeit und Bildqualität der dynamischen Untersuchungen des 3T Gerätes waren exzellent. Überraschender Weise fanden sich komplexeste arachnoidale intradurale Netze und Zysten mit einer pulssynchronen Bewegung. Diese bildgebende Darstellung deckte sich mit den intraoperativen Videoaufnahmen der Neurochirurgen. Pulssynchron wurden sich ballonierende zystische Anteile mit Liquor gefüllt und wieder geleert, nachdem die verdickte Arachnoidea längs eröffnet wurde. Die Operation erfolgte dabei mikrochirurgisch unter Verwendung eines Operationsmikroskopes, meist mit einer Wirbelbogenteilresektion in Höhe der mittels MRT detektierten, die Liquorpulsation behindernden Adhäsionen. Per Videodokumentation wurden intraoperativ die Zysten mit der durchgeführten Bildgebung verglichen und es ergab sich eine klare Korrelation. Nach operativer Durchtrennung der Adhäsionsanteile fielen die Netze teilweise in sich zusammen. Da aus den letzten Jahrzehnten die Kenntnis der hohen Rezidivrate nach Entfernung der Adhäsionen besteht, wurden die Septenanteile lediglich durchtrennt oder gefensternt, so dass der Liquor wieder ungehindert zirkulieren konnte. Eine absolut

vollständige Resektion erfolgte nicht. Die postoperativen Kontrolluntersuchungen zeigten dann im 3T MRT die in sich zusammengefallenen Netze, welche sich nach lateral verlagert hatten. Ähnlich dem Effekt eines zusammenfallenden Segels, welches aus dem Wind genommen wird. Entscheidend jedoch war nun ein ungehinderter Liquorfluss im dorsalen Subarachnoidalraum. Die teilweise vorliegenden raumfordernden Effekte und kompressionsbedingten Veränderungen des Myelons waren bereits unmittelbar postoperativ verschwunden und im MRT nicht mehr darstellbar.

Erstmals führte 1938 Adelstein die Arachnolyse zur Wiederherstellung der normalen Liquorpulsation mit zufriedenstellenden Ergebnissen durch (1). In den letzten Jahren beschreiben Studien z.B. von Nakamura 2009 Ergebnisse von operierten Patienten mit teilweise Besserung oder gleichbleibenden Beschwerden (57). Die Universität Heidelberg überblickt bei 34 Syringomyeliepatienten postoperativ einen Zeitraum von 19 Jahren. Dabei sind 74% als Erfolg im Sinne einer Besserung oder stabilen Verhältnissen gewertet. Bei 26 % der Patienten ist eher eine Verschlechterung eingetreten (2).

Für die geschilderten beiden Patienten kann folgendes ausgesagt werden: Der 45-jährige männliche Patient hat die Adhäsiolyse dorsal der BWK 3/4 sehr gut überstanden. Die klinischen Beschwerden des Patienten waren deutlich gebessert.

Der zweite geschilderte Verlauf einer 40 jährigen Patientin mit einer langstreckigen thorakalen Syringomyelie von BWK 2 bis BWK 7 und zusätzlich dorsalen Adhäsionen in Höhe BWK2/3, 3/4 sowie BWK 7 und 10 zeigte klinisch einen stabilen Zustand ohne weiteren Progress der präoperativ bestandenen Beschwerden mit Dysästhesien.

Die Beispiele der aufgezeigten Patienten scheinen auch den Beobachtungen von Batzdorf zu entsprechen, wonach bei fokalen Läsionen eine Verbesserung der klinischen Beschwerden eher zu erwarten als bei ausgedehnteren Adhäsionen (3). Strategien für die Behandlungen müssen noch entwickelt werden, zumal es wohl 2 Gruppen der idiopathischen Syringomyelie zu unterscheiden gilt: die relativ lokalisierte Syringomyelie und die ausgedehnte, langstreckige Erweiterung des Zentralkanals, welche meist zu ausgeprägteren neurologischen Defiziten führen (57). Für die Therapie einer Syringomyelie mit arachnoidalen Adhäsionen unterschiedlicher Ätiologie ist die Kenntnis der Höhenlokalisation immens wichtig. Zusätzlich ist eine medikamentöse Therapie bei Spastik und neuropathischen Schmerzen bei einigen Patienten nötig.

4.3. Idiopathische Syringomyelie und arachnoidale Adhäsionen

In den letzten Jahren hat sich das Verständnis der Pathophysiologie einer Syringomyelie weiter verändert und neue Methoden der verbesserten Bildgebung kommen zum Tragen. Über die Entwicklung einer Syringomyelie gibt es eine Vielzahl an Theorien und Hypothesen, welche in den letzten beiden Jahrhunderten veröffentlicht wurden (35, 36). Leider gibt es keine suffiziente Basis für Behandlungskonzepte der an einer Syringomyelie erkrankten Patienten. Viele Autoren der 80-er und 90-er Jahre sehen mehrheitlich eine Störung der Liquorpulsion des dorsalen Anteils des craniocervikalen Übergangs ursächlich für die Ausbildung einer Syringomyelie (53, 54, 65, 66, 81). So berichten Logue oder auch Vaquero über langjährige Beobachtungen von Syringomyeliepatienten, welche z.B. wegen einer Chari-Malformation occipital dekomprimiert wurden. Die bestehenden Erweiterungen des Zentralkanals waren dann bei regulierter und normalisierter dorsaler Liquorpulsion rückläufig (45, 80). Zusätzlich zu operativen Dekompressionen des Spinalkanals wurden und werden seit über 100 Jahren Shunt drainagen angelegt, welche erstmals von Abbe und Coley beschrieben wurden (72). Dabei gibt es zwei verschiedene Arten der Entlastung der Syringomyelie: die Einbringung eines syringo-pleuralen Shuntsystems oder der syringo-peritoneale Shunt sowie der häufig angewendete syringo-subarachnoidale Shunt. Williams beschrieb 1990 jedoch einen nicht unerheblichen Anteil an Problemen während einer solchen Entlastungsoperation (81). Das Myelon im Bereich der Syringomyelie kann erheblich geschädigt sein und somit anfällig für ausgedehnte Verletzungen mit entsprechend bleibenden neurologischen Schäden. Die Beobachtungen in der Vergangenheit belegen kurzzeitig die Entlastung der Syringomyelie durch solche Shuntsysteme. Langzeitbeobachtungen sind selten dokumentiert. In einer Studie, welche 1995 durch Sgouros veröffentlicht wurde, zeigen sich im 10 Jahresverlauf gerade eben 50% der 70 beobachteten und mittels Shuntsystem versorgten Patienten in einem klinisch stabilen und unveränderten Status zur präoperativen Situation (4, 72). Andere Autoren, wie z.B. Tator, berichten über exzellente Ergebnisse unmittelbar postoperativ nach Entlastung posttraumatischer und idiopathischer Syringomyelien mit Verbesserung der neurologischen Symptome (78).

Die Syringomyelie ist eine komplexe Erkrankung hervorgerufen durch verschiedenste pathophysiologische Veränderungen und somit sind für die Behandlung verschiedenste Strategien anwendbar. In den späten 90-er Jahren zu Anfang des 2. Jahrtausends fanden sich zunehmende Theorien zur Ausbildung einer spinalen Arachnoiditis und damit eine

neue Erklärung der Veränderungen der Liquorpulsation und der möglichen Ausbildung einer Syringomyelie. Brodbelt berichtet im Zusammenhang mit posttraumatisch aufgetretenen Syringomyelien über reaktiv entzündliche Veränderungen im extramedullären Liquorraum. Im Tierexperiment hatten sich nachweislich arachnoidale Adhäsionen ausgebildet, welche ursächlich für die Entwicklung einer Syringomyelie waren. Daraus resultiert die Annahme, dass arachnoidale Adhäsionen und initiale Zysten die Ausbildung einer Syringomyelie begünstigen (8, 10, 11).

Der exakte Mechanismus der Ausbildung und Grund von Adhäsionen durch eine Arachnoiditis ist noch völlig unklar (38). Es resultiert jedoch die Behinderung der Liquorpulsation und spielt somit eine immense Rolle bei der Entwicklung einer Syringomyelie. Eine Veröffentlichung von Langston 2006 beschreibt Patienten mit dorsalen arachnoidalen Zysten und ausgebildeten Syringomyelien, ohne dass bei den 8 beschriebenen Patienten eine Anamnese hinsichtlich Trauma, Entzündung oder stattgehabte Operationen in Höhe der Syringomyelie vorlag. Die Patienten zeigten keine Fehlbildung des craniocervikalen Übergangs oder tumoröse kontrastmittelaufnehmende Veränderungen des Myelons. Aus solchen Beobachtungen ergeben sich neue Überlegungen zur Behandlung der Syringomyelie statt der operativen Entlastung mittels verschiedener Shuntsysteme (40). In den letzten Jahren wird über Dekompressionsverfahren des Subarachnoidalraums als Alternative der primären Entlastung der Syringomyelie nachgedacht.

Um die behinderte Liquorpulsation wieder zu normalisieren werden die Adhäsionen operativ gelöst, reseziert und die Patienten mittels Duraplastik versorgt. Patienten, welche zusätzlich eine Chiari-1-Malformation zeigen, erhalten eine occipitale Dekompression (82).

Ein Problem der angestrebten operativen Lösung der Adhäsionen ist die bildgebende Darstellung der vermuteten Höhe. Mittels Standard-MRT durchgeführte Untersuchungen lassen die Adhäsionen zunächst nur vermuten. In einer Veröffentlichung von Sridharan 2009 wurde lediglich anhand des abrupten Stoppens der Syringomyelie eine Verklebung vermutet, welche sich intraoperativ bestätigte (73). Hier ist sehr gut dargestellt, welches Problem sich hinsichtlich der bildgebenden Diagnostik besteht. In der Vergangenheit wurde zur bildgebenden Darstellung neben den MRT-Untersuchungen häufig auch die invasive und wenig sensitive Methode mittels Myelographie und anschließender CT-

Diagnostik angewandt, oft auch die Kombination aller bildgebenden Entitäten (64). Teilweise gelang bei einzelnen Patienten die Darstellung von Zysten im Subarchnoidalraum mit entsprechender komprimierender Wirkung auf das angrenzende Myelon (55, 63). Die gesehenen Verklebungen und Zystenmembranen wurden sämtlich reseziert, was auf den ersten Blick die logische Folge ist. Haben sich doch die Zysten als Ursache der Syringomyelie gezeigt. Die Kontrollen nach der Entlastung unmittelbar postoperativ hat bei vielen Patienten eine klinische Besserung gezeigt und bildgebend teilweise auch eine rückläufige Ausdehnung der Syringomyelie. Soweit derzeit schon aussagbar, zeigen diese Patienten jedoch auch ausgeprägte Rezidivraten der Adhäsionen und im weiteren Verlauf dann eine klinische und auch bildgebende Verschlechterung mit Progredienz der Syringomyelie und Myelomalazie (22, 78). Die zunehmende Entwicklung der minimal invasiven Operationstechniken und endoskopischen Verfahren wird immer wichtiger für die Adhäsiolyse oder Zystenresektion (19).

Mit der Verwendung und Erprobung dynamischer BFFE-Sequenzen aus der kardialen Bildgebung ist es letztlich gelungen, bei 9 Patienten die räumliche und zeitliche Auflösung der pulssynchronen Beweglichkeit der Adhäsionen zu visualisieren. Überraschender Weise zeigten sich bei den untersuchten Patienten komplexeste Netzbildungen und Zystenanteile, welche wie ein Spinnennetz miteinander verbunden waren und sich pulssynchron bewegten. Diese neue Art der Darstellung ist ein großer Schritt in der MRT Diagnostik. In den folgenden Jahren wird die zunehmende Anwendung solcher dynamischer Sequenzen die Diagnostik mittels invasiver Methoden weiter in den Hintergrund drängen. Ein Problem wird die notwendige Anwendung höher energetischer MRT-Geräte von mindestens 3T sein, da im MRT von 1,5T Feldstärke (und niedriger) eine qualitativ hochwertige Darstellung in angemessener Untersuchungsdauer für den Patienten nicht möglich ist.

5 Zusammenfassung

Fragestellung: Folgende Fragen sollten mit dieser Arbeit beantwortet werden:

- Ist es möglich, arachnoidale Adhäsionen nicht nur statisch sondern auch dynamisch mittels Magnetresonanztomographie (MRT) darzustellen?
- Können die Untersuchungssequenzen in der täglichen Routinediagnostik Anwendung finden?
- Ergibt sich aus den gewonnenen Informationen eine klinische und therapeutische Relevanz für die Patientenbehandlung?

Material und Methodik: Quantitativ und qualitativ ausgewertet wurden Daten aus 4652 spinalen MRT-Untersuchungen im Zeitraum vom 01.01.2008 bis 31.12.2009. Es fanden sich 429 Syringomyeliepatienten, welche im Bundeswehrkrankenhaus Ulm in der Abteilung Neurochirurgie zur Behandlung und in der Abteilung Radiologie im MRT waren. Die Patienten zeigten idiopathische Syringomyelien und/oder klinische Beschwerden einer Syringomyelie ohne bildgebenden Nachweis einer Zentralkanalerweiterung, wohl aber ausgeprägte Liquorpulsationsstörungen in der Phasen-Kontrast-Messung und mit sichtbaren Adhäsionen in der statischen transversalen balanced fast field echo (BFFE)-Sequenz. Bei 75 Patienten wurde eine dynamische mittels Echokardiogramm (EKG) getriggerte (BFFE)-Sequenz im 1,5Tesla Scanner erstellt. Zur präoperativen Diagnostik wurden 9 Patienten an einem 3Tesla Scanner mit EKG-gegateten (BFFE)-Sequenzen untersucht. Nach operativer Lösung von Adhäsionen wurde zeitnah eine erneute MRT sowohl mit im 1,5Tesla als auch 3Tesla durchgeführt.

Ergebnisse: Bei fast 50% (n=197) der 429 untersuchten Syringomyeliepatienten zeigten sich in der vorliegenden Arbeit arachnoidale Adhäsionen und Zysten, während in der Literatur die Syringomyelie mehrheitlich mit dem Auftreten einer Chiari-Malformation gesehen wird. Lediglich 20% (n=87) der Syringomyeliepatienten zeigten eine Chiari-Malformation. 30,3% (n=130) Patienten zeigten eine Syringomyelie anderer Ursachen (posttraumatisch, tumorbedingt, degenerativ). Bei 3,5% (n=15) Patienten, davon 7 mit Chiari-Malformation, fanden sich arachnoidale Verklebungen ohne Erweiterung des Zentralkanals. 9 Patienten, welche einer operativen Adhäsiolyse unterzogen werden sollten, wurden in einem 3T MRT mittels EKG gegateter cine-BFFE-Sequenzen aus der dynamischen kardialen Bildgebung untersucht, wobei das Augenmerk auf die Regionen

der vermuteten arachnoidalen Verklebungen gerichtet wurde. Entgegen der dynamischen Phasen-Kontrast-Messung mit einer Darstellung in der sagittalen Mittellinie des Spinalkanals im 1,5T MRT konnten im 3T Gerät 3 parallele Schnitte in allen 3 Raumebenen dynamisch angefertigt werden. Es konnten teilweise komplexe Netze meist im dorsalen Liquorraum zeitlich und räumlich dargestellt werden. Bei der Betrachtung der Sequenzen im Cine-Modus zeigte sich bei allen 9 Patienten eine deutliche pulssynchrone Beweglichkeit der arachnoidalen Septen und Zystenmembranen, welche letztendlich zur Störung der Liquorzirkulation und dann zur Ausbildung einer Syringomyelie führten. Postoperativ waren die komplexen arachnoidalen Netze nach Lösung in sich zusammengefallen oder auch nach lateral verlagert. Ähnlich einem Segel im Wind, welches zusammenfällt, wenn der Wind nachlässt.

Diskussion: Arachnoidale Zysten und Adhäsionen treten im gesamten Spinalkanal, am häufigsten im thorakalen dorsalen Anteil, auf und führen zu unspezifischen Beschwerden. Der exakte pathophysiologische Mechanismus ihrer Entstehung ist unklar. Für das therapeutische Vorgehen einer Syringomyelie mit arachnoidalen Adhäsionen ist die Kenntnis der Höhenlokalisation immens wichtig. Zusätzlich ist eine medikamentöse Therapie bei Spastik und neuropathischen Schmerzen nötig. Mit der Verbesserung der bildgebenden Methoden und breitflächigem Einsatz v.a. der Kernspintomographie finden sich zunehmende Möglichkeiten der Darstellung von Normalbefunden und Pathologien der Spinalkanals und Myelons. Mit zunehmendem Einsatz EKG-getriggelter/-gegateter dynamischer Sequenzen besteht die Möglichkeit, die Liquorpulsation darzustellen. Wenn auch nur mit bisher kleinen Fallzahlen von 9 Patienten in dieser Arbeit ist mit der Erprobung einer cardiac-gated cine-balanced fast field echo (BFFE)-Sequenz mittels 3T MRT erstmals die zeitlich und räumlich aufgelöste Darstellung sich pulssynchron bewegender arachnoidaler Adhäsionen gelungen, welche indirekt durch die Behinderung der Liquorpulsation im Standard-MRT erkennbar waren. Für eine exzellente und exakte Darstellung der arachnoidalen Adhäsionen besteht die Notwendigkeit der Bildgebung mittels 3T MRT. Hier scheint die größte Herausforderung für die angewandten Untersuchungssequenzen zu liegen, da ein breitflächiger Einsatz dieser Geräte im Moment nur auf einige Zentren und wenige Praxen beschränkt ist. Daher sind diese speziellen Untersuchungen in der täglichen Routinediagnostik nur eingeschränkt nutzbar. Syringomyeliepatienten sollten diesen Untersuchungsmethoden zugeführt werden, um die bestmögliche Diagnostik und anschließende Therapieoptionen nutzen zu können.

6 Literaturverzeichnis

1. Adelsstein L: Surgical treatment of syringomyelia. *American Journal of Surgery* 40: 384-395 (1938)
2. Aschoff A: 1050 Syringomyelien und Chiari Malformationen. Klinische und operative Erfahrungen aus 25 Jahren. Tagung der Selbsthilfegruppe Arbeitsgemeinschaft Spina bifida und Hydrocephalus (ASBH) Nov 2009
3. Batzdorf U, Klekamp J, Johnson JP: A critical appraisal of syrinx cavity shunting procedures. *Journal of Neurosurgery* 89: 382-388 (1998)
4. Batzdorf U: Primary spinal syringomyelia. *Journal of Neurosurgery Spine* 3: 429-435 (2005)
5. Batzdorf U: Primary spinal syringomyelia: a personal perspective. *Neurosurgery Focus* 8: 1-4 (2000)
6. Bhadella RA, Bogan AR, Kaplan RF, Wolpert SM: Cerebrospinal fluid pulsation amplitude and its quantitative relationship to cerebral blood flow pulsation: a phase-contrast MR flow imaging study. *Neuroradiology*: 39: 258-264 (1997)
7. Brodbelt A, Stoodley M: CSF pathways: a review. *British Journal of Neurosurgery* 21: 510-520 (2007)
8. Brodbelt AR, Stoodley MA, Watling A, Rogan C, Tu J, Brown CJ, Burke S, Jones NR: The role of excitotoxic injury in post-traumatic syringomyelia. *Journal of Neurotrauma* 20: 883-893 (2003)
9. Brodbelt AR, Stoodley MA, Bertram CD: The Origins of Syringomyelia: Numerical Models of Fluid/Structure Interactions in the spinal cord. *Journal of biomechanical Engineering* 127: 1099-1109 (2005)
10. Brodbelt AR, Stoodley MA, Watling AM, Tu J, Burke S, Jones NR: Altered subarachnoid space compliance and fluid flow in an animal model of posttraumatic syringomyelia. *Spine* 28: E413-419 (2003)
11. Brodbelt AR, Stoodley MA: Syringomyelia and the arachnoid web. *Acta Neurochirurgica* 145: 707-711 (2003)
12. Caplan LR, Norohna AB, Amico LL: Syringomyelia and arachnoiditis. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 53: 106-113 (1990)

13. Casselmann JW, Kuhweide R, Deimling M, Ampe W: Constructive interference in steady state-3DFT MR imaging of the inner ear and cerebellopontine angle. *American Journal of Neuroradiology* 14: 47-57 (1993)
14. Chang HS, Nakagawa H: Theroretical analysis of the pathophysiology of syringomyelia associated with adhesive arachnoiditis. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 75: 754-757 (2004)
15. Colak A, Boran BO, Kutlay M, Demirican N: A modified technique for syringo-subarachnoid shunt for treatment of syringomyelia. *Journal of Clinical Neuroscience* 12: 677-679 (2005)
16. Dolan RA: Spinal adhesive arachnoiditis. *Surgical Neurology* 39: 479-484 (1993)
17. Dolar M, Haughton V, Iskandar B, Quigley M: Effect of craniocervical decompression on peak CSF Velocities in symptomatic patients with Chiari I Malformation. *American Journal of Neuroradiology* 25: 142-145 (2004)
18. Edelman RR, Wedeen VJ, Davis KR, et al: Multiphasic MR imaging: a new method for direct imaging of pulsatile CSF flow. *Radiology* 161: 779-783 (1986)
19. Endo T, Takahashi T, Jokura H, Tominaga T: Surgical treatment of spinal intradural arachnoidal cysts using endoscopy: clinical article. *Journal of Neurosurgery Spine* 12: 641-646 (2010)
20. Enzmann DR, Pelc NJ: Cerebrospinal fluid flow measured by phase-contrast cine MR. *American Journal of Neuroradiology* 14: 1301- 1310 (1993)
21. Enzmann DR, Rubin J, Pelc NJ: Cine phase contrast maps of cervical cerebrospinal fluid motion. Presented at the 75th Annual Meeting of the Radiological Society of North America (Paper #425), Chicago IL (1989)
22. Ergun T, Lakadamyali H: Multiple extradural spinal arachnoid cysts causing diffuse myelomalacia of the spinal cord. *Neurologist* 15: 347-350 (2009)
23. Fischbein N, Dillon WD, Cobbs C, Weinstein PR: The „presyrinx“ state: is there a reversible myelopathic condition that may precede syringomyelia? *Neurosurgery Focus* 8: 1-19 (2000)
24. Fischbein NJ, Dillon WP, Cobbs C, Weinstein PR: The "presyrinx" state: a reversible myelopathic condition that may precede syringomyelia. *American Journal of Neuroradiology* 20: 7-20 (1999)

25. Friese S, Klose U, Voigt K: Zur Pulsation des Liquor cerebrospinalis. *Klinische Neuroradiologie* 12: 67-75 (2002)
26. Geiger A: MRT Liquorflussmessungen bei Syringomyelie und intraduralen Zysten. *Med. Dissertation, Universität Ulm* (2009)
27. Gottschalk A, Schmitz B, Mauer UM, Bornstedt A, Steinhoff S, Danz B, Schlötzer W, Rasche V: Dynamic visualization of arachnoid adhesions in a patient with idiopathic syringomyelia using high-resolution cine magnetic resonance imaging at 3T. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 32: 218-222 (2010)
28. Greitz D: Unraveling the riddle of syringomyelia. *Neurosurgical Review* 10: 1-12 (2006)
29. Heiss J, Patronas N, DeVroom H, Shawker T, Ennis R, Kammerer W, Edisath A, Talbot T, Morris J, Eskioglu E, Oldfield E. Elucidating the pathophysiology of syringomyelia. *Journal of Neurosurgery* 91: 553-562 (1999)
30. Henry-Feugeas MC, Idy-Peretti I, Baledent O, Poncelet-Didon A, Zannoli G, Bittoun J, Schouman-Claeys E: Origin of subarachnoid cerebrospinal fluid pulsations: a phase-contrast MR analysis. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 18: 387-395 (2000)
31. Hofmann E, Warmuth-Metz M, Bendszus M, Solymosi L: Phase contrast MR Imaging of the cervicel CSF and Spinal cord: volumetric motion analysis in patients with Chiari I malformation. *American Journal of Neuroradiology* 21: 151-158 (2000)
32. Holly LT, Batzdorf U: Slitlike syrinx cavities: a persistent central canal. *Journal of Neurosurgery* 97: 161-165 (2002)
33. Holly LT, Batzdorf U: Syringomyelia associated with intradural arachnoid cysts. *Journal of Neurosurgery Spine* 5: 111-116 (2006)
34. Inoue Y, Nemoto Y, Ohata K et al: Syringomyelia associated with adhesive spinal arachnoiditis: MRI. *Neuroradiology* 43: 325-30 (2001)
35. Klekamp J, Volkel K, Bartels CJ et al: Disturbances of cerebrospinal fluid flow attributable to arachnoid scarring cause interstitial edema of the cat spinal cord. *Neurosurgery* 48: 174-186 (2001)
36. Klekamp J: The pathophysiology of syringomyelia- Historical overview and current concept. *Acta Neurochirurgica* 144: 649-664 (2002)

37. Koyanagi I, Houkin K: Pathogenesis of syringomyelia associated with Chiari type 1 malformation: review of evidences and proposal of a new hypothesis. *Neurosurgery Review* 8: 271-285 (2010)
38. Koyanagi I, Iwasaki Y, Hida K, Houkin K: Clinical features and pathomechanisms of syringomyelia associated with spinal arachnoiditis. *Surgical Neurology* 63: 350-356 (2005)
39. Kumar K, Malik S, Schulte PA. Symptomatic spinal arachnoid cysts: report of two cases with review of the literature. *Spine* 28: E25-29 (2003)
40. Langston T Holly, Batzdorf U: Syringomyelia associated with intradural arachnoid cysts. *Journal of Neurosurgery Spine* 5: 111-116 (2006)
41. Lee TT, Arias JM, Andrus HL, et al: Progressive posttraumatic myelomalacic myelopathy: treatment with untethering and expansive duraplasty. *Journal of Neurosurgery* 86: 624-628 (1997)
42. Levine D: The pathogenesis of syringomyelia associated with lesions at the foramen magnum: a critical review of existing theories and proposal of a new hypothesis. *Journal of the Neurological Sciences* 220: 3-21 (2004)
43. Levy LM: Toward an understanding of syringomyelia: MR Imaging of CSF Flow an neuraxis motion. *American Journal of Neuroradiology* 21: 45-46 (2000)
44. Logue V, Edwards: Syringomyelia and its surgical treatment--an analysis of 75 patients. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 44: 273-284 (1981)
45. Loth F, Yardimci MA, Alperin N: Hydrodynamic modeling of cerebrospinal fluid motion within the spinal cavity. *Journal of Biomechanical Engineering*; Vol. 123: 71-79 (2001)
46. Lotz J, Meier C, Leppert a, Galanski M: Cardiovascular flow measurment with phase-contrast MR imaging: basic facts and implementation. *Radiographics* 22: 651-671 (2002)
47. Lühmann D: Stellenwert der MRT im Rahmen der Versorgung von Patienten mit Rückenschmerzen. *Kurz-HTA: Update einer Best-Evidence-Synthese* (2003)
48. Mallucci C: The enigma of syringomyelia. *British Journal of Neurosurgery* 21: 423-424 (2007)

49. Mauer UM, Freude G, Danz B, et al: Cardiac-gated phase-contrastmagnetic resonance imaging of cerebrospinal fluid flow in the diagnosis of idiopathic syringomyelia. *Neurosurgery* 6: 1139-1144 (2008)
50. Mauer UM, Geiger A, Kunz U: Intradural spinal arachnoid cysts in the absence of syringomyelia-an easily missed giagnosis. *European Spine Journal* 17: 1589-90 (2008)
51. Milhorat T, Bolognese PA, Black C, Woldenberg R: Acute Syringomyelia: case report. *Neurosurgery* 53: 1220-1222 (2003)
52. Milhorat T, Capocellei A, Anzil A et al: Pathological basis of spinal cord cavitation in syringomyelia: analysis of 105 autopsy cases. *Journal of Neurosurgery* 82: 802-812 (1995)
53. Milhorat TH, Chou MW, Trinidad EM, Kula RW, Mandell M, Wolpert C, Speer MC: Chiari I malformation redefined: clinical and radiographic findings for 364 symptomatic patients. *Neurosurgery* 44: 1005-17 (1999)
54. Milhorat TH, Johnson WD, Miller JI, Bergland RM, Hollenberg-Sher J: Surgical treatment of syringomyelia based on magnetic resonance imaging criteria. *Neurosurgery* 31: 231-244 (1992)
55. Min-Su K, Seong-Ho K: Syringomyelia associated with a spinal arachnoid cyst. *Journal of Korean Neurosurgical Society* 45: 315-317 (2009)
56. Nabors MW, Pait TG, Byrd EB et al: Updated assessment and current classification of spinal meningeal cysts. *Journal of Neurosurgery* 68: 366-377 (1988)
57. Nakamura M, Ishii K, Watanabe K, Tsuji T, Matsumoto M, Toyama Y, Chiba K. Clinical significance and prognosis of idiopathic syringomyelia. *Journal of Spinal Disorders and Techniques* 22: 372-375 (2009)
58. Nitz WR, Bradley WG Jr, Watanabe AS, et al: Flow dynamics of cerebrospinal fluid: assessment with phase control velocity MR imaging performed with retrospective cardiac gating. *Radiology* 183: 395-405 (1992)
59. Ohnesorge B, Flohr T, Becker C, Knez A, Kopp AF, Fukunda K, Reiser MF: Herzbildgebung mit schneller, retrospektiv EKG-synchronisierter Mehrschichtspiral-CT. *Der Radiologe* 40: 111-117 (2000)
60. Paramore CG: Dorsal arachnoid web with spinal cord compression: variant of an arachnoid cyst? *Journal of Neurosurgery* 93: 287-290 (2000)

61. Pelc N, Herfkens R, Shimakawa A, Enzmann D: Phase contrast cine magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Quarterly* 7: 229-254 (1991)
62. Perret G, Green D, Keller J: Diagnosis and treatment of intradural cysts of the thoracic spine. *Radiology* 79: 425-429 (1962)
63. Peruzzotti-Jametti L, Ferrari S, Politi LS, Snider S, Mammi S, Comi G, Comola M: Giant Anterior Arachnoid Cyst Associated With Syringomyelia: Implications for Treatment and Follow-up. *Spine* 35: E322-E324 (2010)
64. Petridis A, Doukas A, Barth H, Mehdorn H: Spinal cord compression caused by idiopathic intradural arachnoid cysts of the spine: review of the literature and illustrated case. *European Spine Journal* 2: 124-128 (2009)
65. Pinna G, Alessandrini F, Alfieri A, Rossi M, Bricolo A: Cerebrospinal fluid flow dynamics study in Chiari I malformation: implications for syrinx formation. *Neurosurgery Focus* 8: E3 (2000)
66. Quencer RM, Donovan Post MJ, Hinks RS: Cine MR in the evaluation of normal and abnormal CSF flow: intracranial and intraspinal studies. *Neuroradiology* 32: 371-391 (1990)
67. Quencer RM: the presyringomyelic myelopathic state: a plausible hypothesis. *American Journal of Neuroradiology* 20: 1-2 (1999)
68. Raspe HH, Kohlmann T: Die aktuelle Rückenschmerzepidemie. *Therapeutische Umschau* 51: 367-374 (1994)
69. Reubelt D, Small LC, Hoffmann MH, Kapapa T, Schmitz BL: MR imaging and quantification of the movement of the lamina terminalis depending on the CSF dynamics. *American Journal of Neuroradiology* 30: 199-202 (2009)
70. Roser F, Ebner F, Danz S, Riether F et al: Three-dimensional constructive interference in study-state magnetic resonance imaging in syringomyelia: advantages over conventional imaging. *Journal of Neurosurgery Spine* 8: 429-435 (2008)
71. Schroth G, Klose U: Cerebrospinal fluid flow. *Neuroradiology* 35:1-9 (1992)
72. Sgouros S, Williams B: A critical appraisal of drainage in syringomyelia. *Journal of Neurosurgery* 82: 1-10 (1995)

73. Sridharan A, Heilman C: Transverse Dorsal Arachnoid Web And Syringomyelia: Case Report. *Neurosurgery* 65: E216-E217 (2009)
74. Stivaros SM, Jackson A: Changing concepts of cerebrospinal fluid hydrodynamics: role of phase-contrast MRI and implications of cerebral microvascular disease. *The American Society for Experimental Neurological Therapeutics* 4: 511-522 (2007)
75. Stoodley MA, Jones NR, Yang LC, brown CJ: Mechanism underlying the formation and enlargement of noncommunicating syringomyelia: experimental studies. *Neurosurgery Focus* 8: 1-7 (2000)
76. Sung WS, ChenY, Dubey A, Hunn A: Spontaneous regression of syringomyelia-review of the current aetiological theories and implications for surgery. *Journal of Clinical Neuroscience* 15: 1191-1193 (2008)
77. Takeuchi A, Miyamoto K, Sugiyama S, Saitou M, Hosoe H. Spinal arachnoid cysts associated with syringomyelia. *Journal of Spinal Disorders and Techniques* 16: 207-211 (2003)
78. Tator CH, Briceno C: Treatment of syringomyelia with a syringosubarachnoid shunt. *Canadian Journal Neurological Sciences* 15: 48-57 (1988)
79. Tureyen K, Senol N, Sahin B, Karahan N: Spinal extradural arachnoid cyst. *Journal of Spine* 9: 619-710 (2009)
80. Vaquero J, Martínez R, Arias A: Syringomyelia-Chiari complex: magnetic resonance imaging and clinical evaluation of surgical treatment. *Journal of Neurosurgery* 73: 64-68 (1990)
81. Williams B. Syringomyelia. *Neurosurgery Clinics of North America* 1: 653-685 (1990)
82. Yanni DS, Mammis A, Ebersole K, Roonprapunt C, Sen C, Perin NI: Revision of Chiari decompression for patients with recurrent syrinx. *Journal of Clinical Neuroscience* 17: 1076-1079 (2010)

Lebenslauf aus Gründen des Datenschutzes entfernt