

Aus der Klinik für Neurochirurgie mit Arbeitsbereich Pädiatrische
Neurochirurgie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Die minimal invasive Renaissance einer klassischen
Operationsmethode:
Ergebnisse der ersten europäischen Anwendung der minimal
invasiven selektiven dorsalen Rhizotomie nach T.S. Park**

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

Vorgelegt der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin
Berlin

von

Tarik Alp Sargut

aus Berlin, Deutschland

Datum der Promotion: 16.Juni 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Kurzzusammenfassung	4
Abstract.....	6
1. Einleitung.....	8
1.1. Infantile Zerebralparese (CP) und Spastik.....	9
1.1.1. Ätiologie und Pathogenese der CP	10
1.1.2. Klinisches Bild und Klassifikation der CP	12
1.1.3. Spastik als Folge der CP	13
1.2. Therapiemöglichkeiten der Spastik.....	13
1.2.1. Medikamentöse Verfahren	14
1.2.2. Chirurgische Therapiemöglichkeiten	15
1.3. Selektive Dorsale Rhizotomie.....	17
1.3.1. Geschichte und Entwicklung der SDR	18
1.3.2. Grundprinzipien.....	22
1.3.3. Bisherige Indikationsstellung und Evaluation	22
1.3.4. OP-Technik der SDR: State of the Art.....	24
1.3.5. Minimal invasive Technik der SDR nach T.S. Park	26
1.3.5.1. Operationsmethode	26
1.3.5.2. Intraoperatives Neuromonitoring und Rhizotomie.....	28
1.3.6. Modifikation der minimal invasiven SDR nach Haberl.....	30
2. Methoden und Patienten.....	35
2.1. Patientenpopulation und Datenerfassung.....	35
2.2. Methoden.....	35
2.3. Studiendesign	36
2.4. Evaluationsinstrumente	37
2.5. Statistik	40
3. Ergebnisse.....	41
3.1. Patientenkollektiv.....	41
3.2. Ergebnisse im Vergleich zur langstreckigen Operationsmethode.....	41
3.3. GMFCS.....	43
3.4. Spastikreduktion nach MAS.....	45
3.5. GMFM.....	54
3.6. Manuelle Muskelkraft Testung	57

4.	Diskussion	66
4.1.	SDR Technik.....	66
4.2.	Untersuchungen und Ergebnisse.....	67
4.3.	Ergebnisse im Vergleich zur langstreckigen Operationsmethode der SDR	68
4.4.	GMFCS.....	69
4.5.	MAS	70
4.6.	MFT	72
4.7.	GMFM.....	75
4.8.	Behandlungskonzept und Physiotherapie.....	76
4.9.	Limitationen	77
4.10.	Zusammenfassung und Ausblick.....	78
5.	Literaturverzeichnis.....	80
	Abbildungsverzeichnis	87
	Abkürzungsverzeichnis	90
	Eidesstattliche Versicherung.....	91
	Lebenslauf	92
	Danksagung.....	93

Kurzzusammenfassung

Hintergrund: Die selektive dorsale Rhizotomie (SDR) führt bei Patienten mit einer infantilen Zerebralparese (CP) zu einer dauerhaften Reduktion der Spastik.

Sie wurde Anfang des 20. Jahrhunderts von Otfrid Foerster in Europa eingeführt. Aufgrund der von ausgeprägter Morbidität begleiteten Eingriffe wurde die Methode vorübergehend verlassen. Erst in den 60er Jahren kam es zu einer sukzessiven Modifikation durch französische und italienische Neurochirurgen. Die SDR etablierte sich schließlich in den USA als sichere und effektive Methode zur Reduktion der Spastik. Die klassische Operationstechnik mit einem multisegmentalen Zugang in mindestens 5 Höhen wurde zuletzt von T.S. Park soweit modifiziert, dass die vollständige Rhizotomie über eine monosegmentale Laminektomie sicher durchführbar ist. E.J. Haberl hat die minimal invasive Technik nach Park um die neue Zugangsmodifikation einer speziellen Laminoplastie-Technik erweitert, bei welcher der interspinosale durch einen transspinalen Zugang ersetzt wird und damit die Integrität der dorsalen Zuggurtung der Wirbelsäule erhalten bleibt.

In Europa hat sich bis heute eine historische Skepsis gegenüber der operativen Unterbrechung des spinalen Reflexbogens erhalten. Mit der Publikation der ersten Ergebnisse nach Wiedereinführung der Methode in Deutschland wollen wir zeigen, dass die SDR eine effektive Reduktion der Spastik erzielt, ohne eine Muskelschwäche zu erzeugen.

Methoden: 150 Kinder unterzogen sich von 01/2007 bis 04/2015 am selbstständigen Arbeitsbereich Pädiatrische Neurochirurgie der Charité der minimal invasiven SDR nach Haberl. In dieser prospektiven, klinischen Studie erfolgten Untersuchungen durch multidisziplinäre Teams präoperativ sowie 12 und 24 Monate postoperativ. Für die Evaluation der Operationsergebnisse wurden standardisierte Untersuchungsparameter verwendet: Die Beurteilung der Spastik der unteren Extremitäten erfolgte mit Hilfe der modifizierten Ashworth Skala (MAS). Funktionelle Veränderungen wurden durch die Gross Motor Function Measure (GMFM-88) erfasst. Zusätzlich erfolgte eine manuelle Testung der maximalen Muskelkraft (MFT).

Ergebnisse: Die vollständige Evaluation der MAS der Adduktoren erfolgte bei 85 bzw. 59 Patienten, der ischiocruralen Muskulatur bei 85 bzw. 58 Patienten und der Wadenmuskulatur bei 59 bzw. 36 Patienten nach 12 bzw. 24 Monaten postoperativ. Bei den Adduktoren und der ischiocruralen Muskulatur kam es 24 Monate nach SDR zu einer signifikanten ($p < 0,00625$) Reduktion der Spastik. Die Untersuchung der MFT zeigte keine klinisch relevante Schwächung der Muskulatur. Die Dorsalextension der Sprunggelenke und die Extension der Kniegelenke zeigten signifikante ($p < 0,00625$) Verbesserungen im Verlauf über zwei Jahre. Bei 77 bzw. 56 Patienten erfolgte eine vollständige Evaluation der GMFM-88 nach 12 bzw. 24 Monaten postoperativ. Diese zeigte eine Verbesserung um 7,17% nach 24 Monaten.

Schlussfolgerung: Die minimal invasive SDR führt zu einer signifikanten Reduktion der Spastik, ohne dabei eine relevante Muskelschwäche zu erzeugen. Die Ergebnisse gehen mit einer Verbesserung der motorischen Funktion einher. Diese Ergebnisse bedürfen einer Bestätigung im Langzeitverlauf.

Abstract

Background: Selective dorsal rhizotomy (SDR) leads to a permanent reduction in spasticity in patients with cerebral palsy.

The treatment was introduced to Europe by Otfried Foerster at the beginning of the 20th century, but was temporarily abandoned due to high morbidity rates associated with the procedure. It was not until the 1960s that successive modifications were made by French and Italian neurosurgeons. SDR eventually established itself in the U.S.A. as a safe and effective method for the reduction of spasticity. The original operative technique, that required a multilevel approach over at least 5 segments, was finally modified by T.S. Park such that the entire rhizotomy could be carried out safely over a single-level laminectomy. E.J. Haberl further developed Park's minimally invasive SDR with a novel technique of laminoplasty in which the interspinous approach was replaced with a transspinous approach, achieving complete restoration of the dorsal column.

To this day in Europe, some historical scepticism remains about the surgical interruption of the spinal reflex arc. Our publication of initial results of a reintroduction of the method to Germany aims to contribute to the reinstatement of the surgical procedure.

Methods: From January 2007 until April 2015, 150 children underwent Haberl's minimally invasive SDR at the division of pediatric neurosurgery of the Charité in Berlin. As part of this clinical study, preoperative and postoperative (after 12 and 24 months) examinations were carried out by multidisciplinary teams. Standardised examination parameters were used for the evaluation of the surgical results: characterisation of spasticity in the lower extremities was achieved with help of the Modified Ashworth Scale (MAS). Changes in functional performance were documented against the Gross Motor Function Measure (GMFM-88). In addition, a manual testing of maximum muscle strength (MFT) was carried out.

Results: At 12 and 24 months postoperatively, a complete evaluation of MAS results was produced for the following: hip adductors – 85 and 59 patients; hamstring muscles – 85 and 58 patients; plantar flexors – 59 and 36 patients, respectively. For adductors and hamstring muscles we observed a significant ($p < 0.00625$) reduction in spasticity over the first two years. Examination of the MFT showed no clinically relevant

deterioration of muscle strength. Ankle dorsiflexion and extension of the knee joint showed significant improvements over the two year period. At 12 and 24 months postoperatively, a complete evaluation of the GMFM-88 was completed for 77 and 56 patients, respectively. An improvement of 7,17% was observed after 24 months.

Conclusions: Minimally invasive SDR leads to a significant reduction in spasticity without causing muscle deterioration. Our results are accompanied by an equally improvement in motor function. Future work should confirm these results over a longer time period.

1. Einleitung

Die selektiven dorsalen Rhizotomie (SDR) geht auf bahnbrechende experimentelle Vorarbeiten des späteren Nobelpreisträger Sir Charles Scott Sherrington zurück. Weltbekannte Neurologen, wie der Präsidenten der American Neurological Society Charles L. Dana forderte Ende des 19. Jahrhunderts die Umsetzung dieser Erkenntnisse für Patienten mit schweren spastischen Bewegungsstörungen. 1888 wurden von Robert Abbe in New York und W.G. Bennet in London die ersten Eingriffe durchgeführt. Der spätere Star der deutschen Neurologie, Karl Otfrid Foerster, war zu diesem Zeitpunkt 15 Jahre alt. Nach seiner Etablierung in Breslau ließ er ab 1908 die erste Operationsserie nach eigener Idee durchführen, übernahm später selbst das Skalpell und publizierte schließlich die Ergebnisse von 159 bezüglich ihrer Zielsetzung sehr erfolgreichen, aber ebenso komplikationsreichen bzw. nebenwirkungsbeladenen Eingriffen, die letztlich dazu führte, dass die Operation für die nächsten 40 Jahre aufgrund ihrer Unzumutbarkeit von der Bildfläche verschwand.

Die Rehabilitation der Operationsmethode zu einer sicheren, effektiven und nebenwirkungsarmen Therapieform begann in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts in Frankreich mit den Arbeiten von Claude Gros. Sie wurde von Fasano in Italien fortgesetzt. Die SDR wurde von Peacock in Südafrika und - nach seinem Wechsel nach Los Angeles - in den USA etabliert und gehört dort seit 30 Jahren zu den unumstrittenen Therapieoptionen der Spastikbehandlung. Trotz der mittlerweile eindeutigen Studienlage mit einer - für eine Operationsmethode selten hohen Anzahl prospektiver, randomisierter und kontrollierter Belege der guten Ergebnisse und des günstigen Risikoprofils (42-44, 58, 78) - hat sich in Europa bis heute eine unbegründete Skepsis gegenüber der operativen Unterbrechung des spinalen Reflexbogens erhalten. Ihr werden weiterhin unzutreffende Risiken wie schwerwiegende Lähmungen und Gefühlsstörungen nachgesagt. Das Potential der einzigen Therapiemethode, welche die destruktive Dynamik einer schweren Spastik dauerhaft bremst, bleibt deshalb auch im Lande eines der bekanntesten Pioniere dieser Operationstechnik weiterhin vielen Patienten vorenthalten. Mit der Publikation der Ergebnisse der Wiedereinführung der Methode in Deutschland möchten wir einen Beitrag zur europäischen Rehabilitation der Operationstechnik leisten.

Da sich die Ergebnisse der meisten langfristigen Studien zwangsläufig auf die klassische Operationsmethode beziehen, die SDR heute aber dank der Arbeiten von T.S. Park über einen reduzierten monosegmentalen Zugang durchgeführt werden kann, wollen wir an unserer ersten großen Serie von 150 Operationen konkret zeigen, dass sich auch über den gewählten minimal invasiven Zugang eine effektive Reduktion der Spastik ohne das Risiko einer Muskelschwäche erzielen lässt.

1.1. Infantile Zerebralparese (CP) und Spastik

Vor dem Hintergrund der raschen Entwicklung der Geburtsmedizin und des damit verbundenen Rückganges der perinatalen und neonatalen Sterblichkeit in den letzten Jahrzehnten (Abb. 1), gewinnt die Behandlung der Komplikationen Überlebender an Bedeutung. Eine der häufigsten Komplikationen ist die Infantile Zerebralparese (1), eine spastische Bewegungsstörung unterschiedlichen Ausmaßes als Folge einer Hypoxie während der frühkindlichen Hirnentwicklung (2, 3).

Aufgrund ihrer steigenden Prävalenz sollte der frühzeitigen Diagnose und Therapie besondere Aufmerksamkeit in der postnatalen Betreuung Frühgeborener gelten.

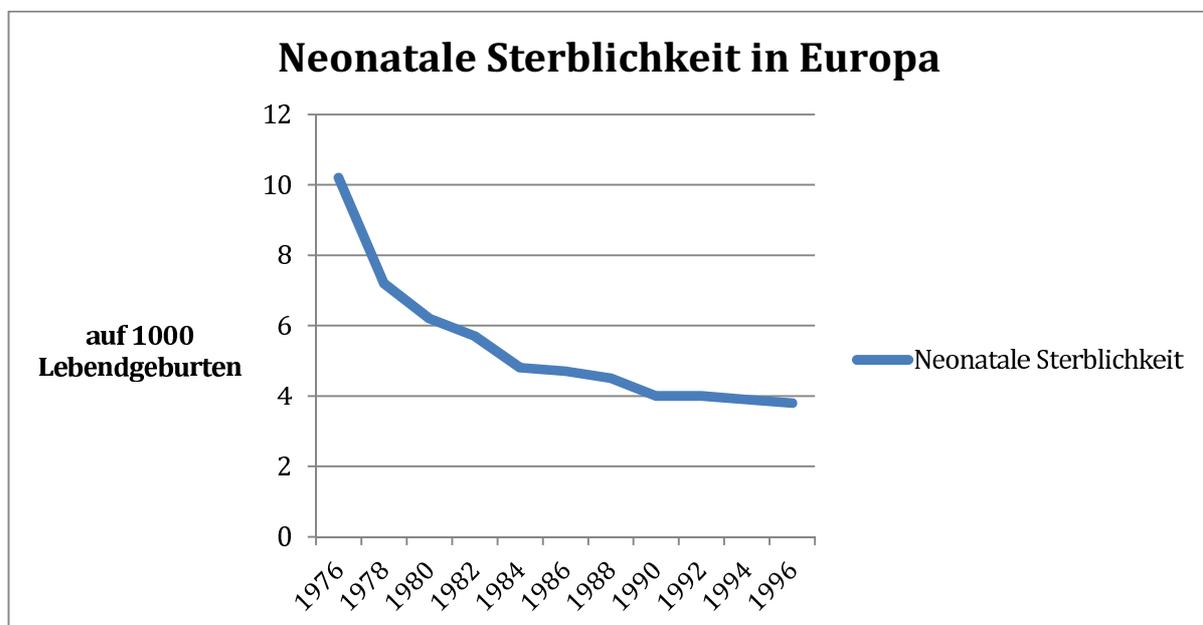


Abb. 1: Entwicklung der neonatalen Sterblichkeit in Europa 1976-1996 (4, 5)

1.1.1. Ätiologie und Pathogenese der CP

Die Infantile Zerebralparese (in Anlehnung an die englische Bezeichnung „Cerebral Palsy“ mit CP abgekürzt) ist mit einer Inzidenz von 2-4 auf 1000 Lebendgeburten weltweit die häufigste Ursache für neurologische Störungen im Kindesalter (6), oft einhergehend mit einer umfassenden Entwicklungsstörung, gelegentlich auch mit einer Disposition zu epileptischen Anfällen (1, 4).

Während man die CP Mitte des 19. Jahrhunderts noch als Resultat übermäßiger körperlicher Arbeit interpretierte, entwickelte Sigmund Freud das Konzept der - möglicherweise schon perinatalen - zerebralen Schädigung als Ursache der Symptome (1, 7, 8).

Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Arbeitshypothesen zur Pathogenese des Krankheitsbildes der CP entwickelt.

Die aktuell international am häufigsten verwendete Definition stammt von der Arbeitsgruppe um den britischen Pädiater Martin Bax und beschreibt die CP als „Gruppe von Entwicklungsstörungen der Bewegung und Haltung infolge einer nicht-progredienten Schädigung des Gehirns während der fetalen oder frühkindlichen Entwicklungsphase“ (9).

Eine australische Studie, die sich mit der Epidemiologie der CP bei seit 1960 geborenen Kindern beschäftigt, unterstreicht die Frühgeburtlichkeit als Risikofaktor. Bei Frühgeborenen mit einem Gestationsalter zwischen 28-31 Wochen erhöht sich die Prävalenz der CP im Vergleich zu reif Geborenen von 1,7 auf 34 pro 1000 Lebendgeburten (4, 10). Neuere Studien im europäischen Raum zeigen für Frühgeburten zwischen der 28.-31. Woche eine Prävalenz von über 50 auf 1000 Lebendgeburten (4, 11) (Abb. 2). Die Divergenz lässt sich auf die Risikoerhöhung durch sinkende perinatale Sterblichkeit zurückführen.

Neben dem Gestationsalter ist vor allem das Geburtsgewicht ein - gleichsinniger - prädiktiver Parameter für die Entwicklung einer CP. Der europäische Perinatale Gesundheitsbericht von 2008 zeigt bei Neugeborenen unter 1500g eine Prävalenz der CP von 48,8%, verglichen mit 1,1% bei Neugeborenen über 2500g (11).

Neben der Frühgeburtlichkeit spielen alle anderen komplikativen Trigger eines

Sauerstoffmangels oder eines Gewebeunterganges, wie Infektionen, peripartale Hypoxien, Hypoglyämien, neonatale Traumata, sowie Geburtskomplikationen wie z.B. plazentale Abnormalitäten, Mekoniumaspiration und Atemnotsyndrom des Frühgeborenen eine Rolle in der Pathogenese (12).

Ebenso stellen Mehrlingsschwangerschaften ein vierfach erhöhtes Risiko dar, und gewinnen in Zeiten zunehmender in-vitro Fertilisation als Risikogruppe an Bedeutung (4, 13).

Neuropathologisch wird die CP durch eine fast immer hypoxisch bedingte Läsion ausgelöst. Sie findet ihr radiologisches Korrelat in 50% der Fälle in einer periventrikulären Leukomalazie (PVL) als Ausdruck eines Zerfalles der zellulären Strukturen in periventrikulärer Lage, sowie einer diffusen Veränderung der glialen Zellen (2). Weitere neuropathologische Korrelate der Schädigung sind Blutungen in Parenchym und Ventrikel-System (2, 14).

In 85 % der Patienten mit einer CP lässt sich in der zerebralen MRT ein Korrelat erkennen (3). Die hohe „Dunkelziffer“ unauffälliger MRT's unterstreicht die Bedeutung der klinischen Früherkennung.

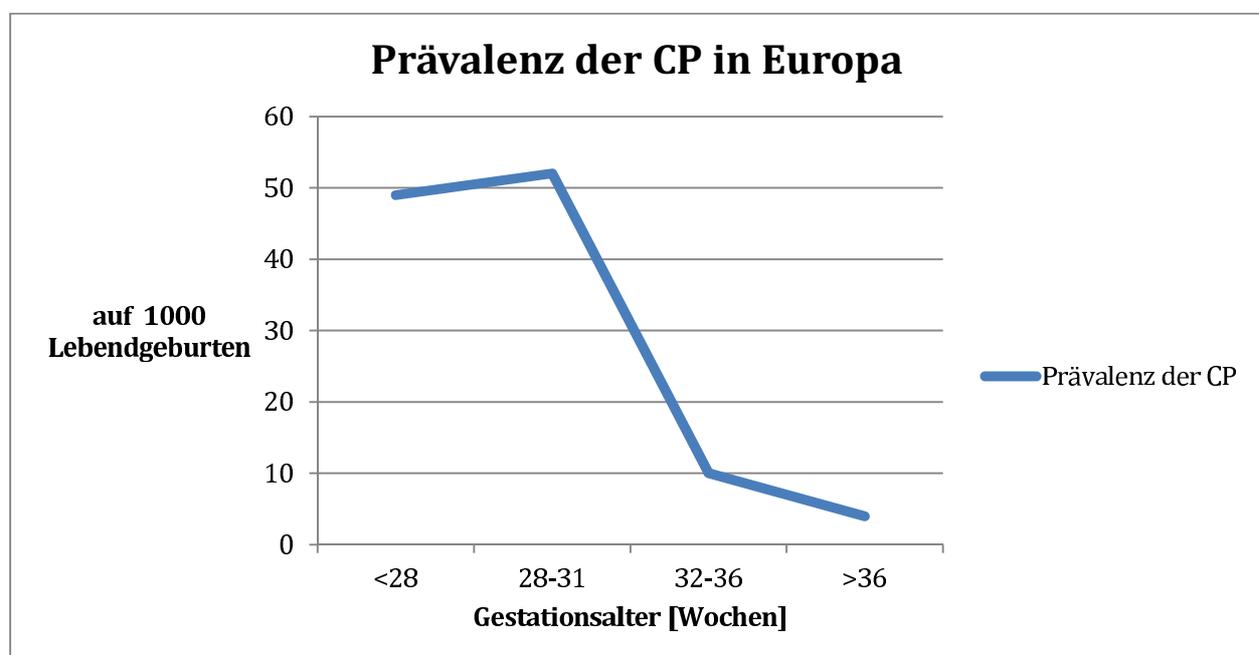


Abb. 2: Prävalenz der CP 1990-1998 an sechs europäischen Zentren - Darstellung nach Kate Himmelmann (4, 5)

1.1.2. Klinisches Bild und Klassifikation der CP

Das Schädigungsmuster der Pyramidenbahn und des extrapyramidalen Systems entscheiden über das klinische Erscheinungsbild. Pyramidale Schädigungen führen zu erhöhten Muskeleigenreflexen sowie einer Spastik, wohingegen extrapyramidale Schädigungen eher Dystonien und koordinative Probleme verursachen (36). Der Muskeltonus von CP Patienten kann analog eingeteilt werden in spastisch, dyston, sowie gemischt spastisch-dyston (6, 15).

Als Spastik wird eine geschwindigkeitsabhängige Steigerung des Dehnungswiderstandes bei passiver Bewegung bezeichnet (16, 17). Die Dystonie dagegen ist charakterisiert durch eine unwillkürliche, anhaltende Muskelkontraktion, welche stereotype Bewegungsmuster verursacht und zu einer gestörten Körperhaltung führt (6).

Die Bewegungsstörung kann Arme und Beine in unterschiedlichem Ausmaß betreffen und asymmetrisch ausgeprägt sein. Die häufigste klinische Form ist die beinbetonte, überwiegend spastische Tetraparese.

Das zerebrale Schädigungsmuster bestimmt auch über das Ausmaß kognitiver Entwicklungsstörungen (4). Als langfristige Folge der muskulären Kontrakturen und damit verbundenen Fehlhaltungen entstehen Sehnen- und Muskelverkürzungen, Gelenkdeformationen und Versteifungen, sowie spinale Deformationen (18-20).

Klassifikation

Das klinisch am häufigsten verwendete Klassifikationssystem zur Beschreibung der motorischen Beeinträchtigungen ist das GMFCS (Gross Motor Function Classification System). Die von der Arbeitsgruppe um Robert J. Palisano entwickelte Einteilung orientiert sich an der Mobilität unter Berücksichtigung des Einsatzes von Hilfsmitteln. Die Klassifikation spiegelt die Einschränkungen im täglichen Leben wider (21). Das GMFCS ist standardisiert und in vielen Ländern validiert (22, 23). Es wird deshalb in vielen Studien zur Beschreibung der Therapieergebnisse verwendet.

1.1.3. Spastik als Folge der CP

Die häufigste Ausprägung der CP ist die beinbetonte spastische Tetraparese (15, 24, 25). Fast 80% der Patienten sind betroffen. Da die zugrundeliegende zerebrale Schädigung irreversibel ist, kann eine spontane Besserung ausgeschlossen werden (26).

Die chronische Spastik ist Auslöser zahlreicher Sekundäreffekte, wie z.B. chronischer Schmerzen, sekundärer Deformitäten von Gelenken, spinaler Deformitäten (vor allem Skoliosen), sowie der Verkürzung von Sehnen und Muskeln, die ebenfalls in funktionellen Verlusten münden (1, 20, 27). Diese sekundär zunehmenden Einschränkungen können sich negativ auf die Therapieerfolge auswirken.

Im Hinblick auf therapeutische Konzepte muss das Schädigungsmuster einschließlich seiner Sekundäreffekte exakt analysiert werden. Die SDR ist aus dieser komplexeren Sicht einer von vielen möglichen Therapiebausteinen, deren sinnvolle Anordnung erst über die langfristige Prognose des Patienten entscheiden.

1.2. Therapiemöglichkeiten der Spastik

Im Folgenden werden die häufigsten Therapiemethoden und ihre Indikationen beschrieben.

Grundsätzlich wird dabei zwischen fokal (regional) und systemisch wirksamen, reversiblen und irreversiblen Methoden unterschieden (27) (Abb. 3).

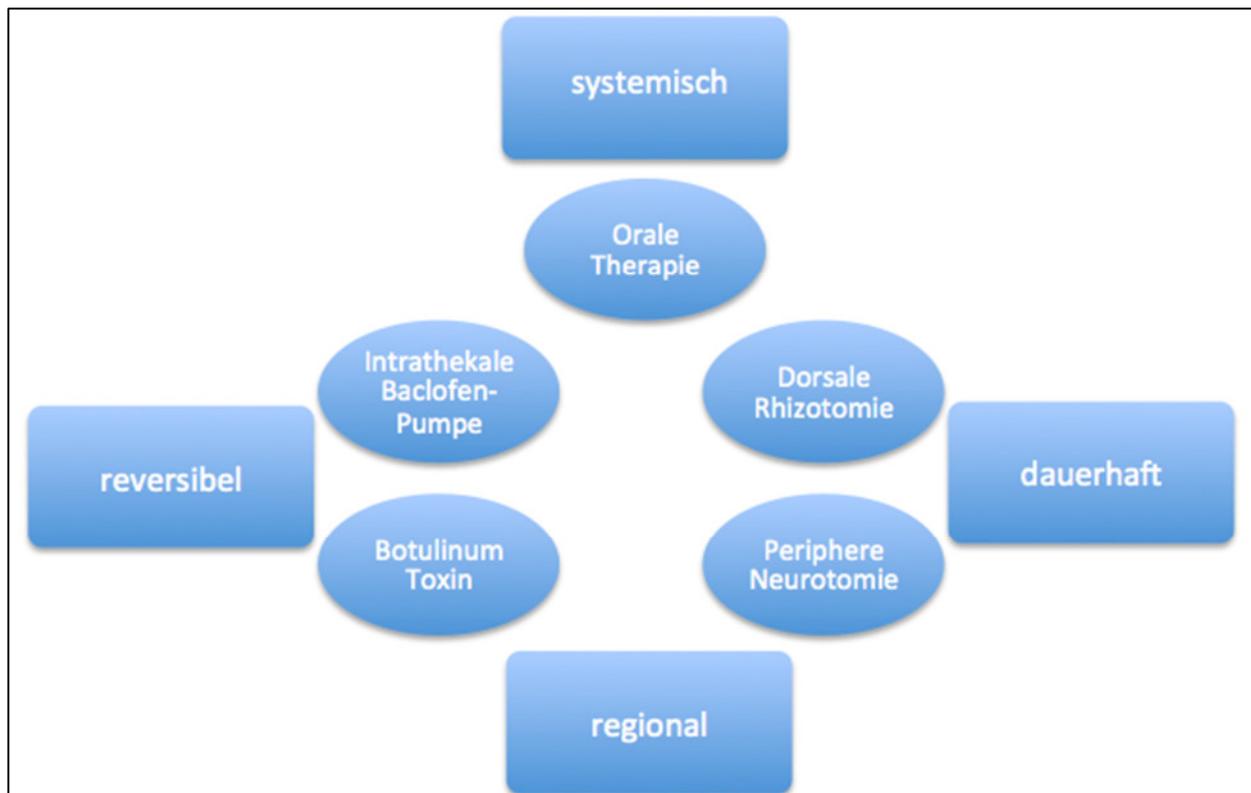


Abb. 3: Einteilung der Therapiemöglichkeiten der Spastik – Darstellung nach Patrick Mertens (27).

1.2.1. Medikamentöse Verfahren

Ist das primäre Ziel die generalisierte Reduktion der Spastik (Abb. 3), sind medikamentöse Therapieansätze indiziert. Zu den gängigen oralen Medikamenten zählen Diazepam, Tizanidin, Dantrolen und Baclofen. Mit Diazepam und Tizanidin kann eine kurz wirksame Reduktion der Spastik erreicht werden. Es besteht jedoch keine Evidenz für einen dauerhaften Effekt auf motorische Funktionen des Körpers. Des Weiteren birgt die langfristige Therapie mit Benzodiazepinen wie Diazepam das Risiko einer körperlichen Abhängigkeit. Die Substanzen können nicht abrupt abgesetzt werden (28). Die Evidenz für eine erfolgreiche Reduktion der Spastik mit oralem Dantrolen fehlt (29).

Das am häufigsten verwendete Baclofen bewirkt eine signifikante Spastikreduktion und verbessert die passive und aktive Beweglichkeit nachweislich (30). Es ist das am häufigsten bei der CP verwendete Muskelrelaxans und wirkt als Gamma-Aminobuttersäure (GABA)-Agonist hemmend auf die postsynaptische Freisetzung exzitatorischer Neurotransmitter. Als lipophiles Medikament passiert es jedoch schlecht die Blut-Hirn-Schranke. Das Erreichen therapeutisch wirksamer Konzentrationen am

zentralen Nervensystem geht deshalb oft mit dosisabhängigen Nebenwirkungen, wie Sedierung, Hypoventilation und Krampfanfällen einher (3).

Aus diesem Grund hat sich die Anwendung von intrathekalen Baclofenpumpen etabliert, welche eine direkte Gabe in den Liquorraum und damit eine Reduktion der täglichen Dosis von 10-90 mg auf 20-800 µg ermöglicht (27).

Die Injektion von Botulinumtoxin Typ A ist als sichere und effektive Behandlungsmethode für die Reduktion der fokalen Spastik in den oberen und unteren Extremitäten etabliert (29). Botulinumtoxin wirkt im Gegensatz zur oralen Medikation lokal, indem es die Freisetzung von Acetylcholin an der muskulären Endplatte blockiert. Besonders bei Kindern, die aufgrund einer Spastik der Hüftbeuger-Muskulatur an Schmerzen leiden, stellt die Injektion eine sinnvolle Therapieoption dar (3, 31).

1.2.2. Chirurgische Therapiemöglichkeiten

Intrathekale Baclofen-Pumpe

1985 fand die intrathekale Gabe von Baclofen nach mehreren Versuchen am Tiermodell ihre erste Anwendung am Menschen durch die beiden Neurochirurgen Jeffrey Koin und Richard Penn (27, 32). Sie implantierten sechs Patienten mit schwerwiegenden Schädigungen am Rückenmark eine Pumpe, welche die kontinuierliche Gabe von Baclofen in den lumbalen Subarachnoidalraum ermöglichte. Die Ursachen der Schädigung waren Traumen oder Multiple Sklerose. Keiner der Patienten war von einer CP betroffen. Durch die intraspinale Gabe ließ sich eine sofortige Reduktion des Muskeltonus und spontaner Spasmen erreichen (32).

Heute wird ein Titan-Reservoir im Bereich des Abdomens subkutan oder subfaszial implantiert. Es enthält eine transkutan über einen Port befüllbare Medikamentenkammer sowie den batteriebetriebenen Motor, der je nach Laufgeschwindigkeit zwischen fünf und acht Jahren in Betrieb bleibt. Danach muss die Pumpe ausgetauscht werden. Das Reservoir wird subkutan mit einem intrathekal liegenden Katheter verbunden und gibt das Medikament kontinuierlich in von außen einstellbarer Dosierung in den Liquorraum ab.

Der Einsatz von intrathekalen Baclofenpumpen für Patienten mit einer CP wurde in mehreren Studien beschrieben und hat sich für schwerst betroffene Patienten (GMFC IV und V) etabliert (33, 34).

Selektive Periphere Neurotomie (SPN)

Die SPN in ihrer heutigen Form wurde 1972 von Claude Gros vorgestellt und ist bei fokalen spastischen Problemen indiziert (35) (Abb. 3). Ziel der Operationsmethode ist die Durchtrennung rein afferenter Anteile von Nerven, welche für den Dehnungsreflex betroffener Muskeln verantwortlich sind, sowie rein efferenter Anteile zur Minderung der Muskelkraft. Nervenäste mit gemischten Fasern aus sensiblen und motorischen Anteilen dürfen keinesfalls geschädigt werden, da sonst eine Deafferenzierung mit Phantomschmerzen droht (27).

In den ersten operativen Anwendungen der SPN wurden die Nervenäste des Nervus Tibialis freigelegt. Nach bipolarer Stimulation und Identifikation mittels EMG (Elektromyographie) wurden ausgewählte Nervenäste zu einem Anteil von etwa 2/3 unter dem Operationsmikroskop durchtrennt. Eine Reduktion der spastischen Komponente sowie der Schmerzsymptomatik wurde erzielt (27, 36).

Die SPN birgt die Gefahr eine relevante Muskelschwäche zu erzeugen. Die Indikationsstellung sollte deshalb zurückhaltend getroffen werden. Bei der fokalen Spastik ist die Injektion von Botulinum A zu bevorzugen. Erst bei Wirkungslosigkeit und positiven Ergebnissen nach testweiser Blockierung der Nervenäste sollte die SPN in Betracht gezogen werden. Der französische Neurochirurg Marc Sindou entwickelte zusammen mit Isabelle Hodgkinson einen entsprechenden Algorithmus für die Entscheidungsfindung (37).

„Dorsal Root Entry Zone“(DREZ)-Operation

Die DREZ-Operation, auch DREZ-otomie genannt, wurde 1972 von Marc Sindou vorgestellt und basiert auf anatomischen Erkenntnissen zur DREZ („Dorsal Root Entry Zone“ = Eintrittsstelle der Hinterwurzel in das Rückenmark): Die DREZ ermöglicht eine topografische Unterscheidung der afferenten Nervenfasern-Anteile entsprechend ihrer Größe und Funktion. Die Wurzeln treten über den pialen Ring an der dorsolateralen

Seite in das Rückenmark. Es werden drei Faserqualitäten unterschieden: Die feinen Fasern, bestehend aus nozizeptiven Anteilen, verlaufen über die ventrolaterale Seite der DREZ in das Hinterhorn. In der Mitte der DREZ verlaufen die großen myotatischen Fasern, dorsomedial die großen lemniskalen Fasern (38, 39).

Ziel der DREZ-otomie ist die Läsion der nozizeptiven und für den Dehnungsreflex verantwortlichen myotatischen Fasern. Über eine zervikale (C4-C7) oder thorakolumbale (Th11-L2) Laminektomie wird das Rückenmarkssegment mit Hilfe von bipolarer Stimulation identifiziert. Anschließend werden die lateralen Anteile der DREZ freigelegt. Die Läsion erfolgt mittels schwacher, bipolarer Koagulation, 3mm tief, in einem Winkel von 35-45 Grad im ventrolateralen Teil der Eintrittsstelle der Wurzel in den dorsolateralen Sulcus des Rückenmarks (27).

Ursprünglich diente die Operation der Verbesserung chronischer Schmerzzustände. Nachdem es jedoch als häufige Nebenwirkung zu einer Muskelschwäche kam, führte Sindou sie auch bei Patienten mit einer schweren Spastik durch. Die DREZ-otomie ist sowohl für die unteren wie auch für die oberen Extremitäten möglich (27, 40, 41).

Aufgrund der konsequenten Weiterentwicklung und Verbesserung der selektiven dorsalen Rhizotomie, hat die DREZ-otomie heute ihren Schwerpunkt eher bei der Therapie chronischer Schmerzleiden.

1.3. Selektive Dorsale Rhizotomie

Die SDR wird heute, über 100 Jahre nach ihrer Erstanwendung durch Otfried Foerster, an verschiedenen hochspezialisierten Zentren weltweit durchgeführt. Nach ersten erfolgreichen, aber von ausgeprägter Morbidität begleiteten Ergebnissen, kam es zu einer sukzessiven Modifikation der Operationsmethode. Sie etablierte sich schließlich als sichere und effektive Methode zur Reduktion der Spastik mit gut belegten Langzeiterfolgen (42-44).

Zuletzt wurde die klassische und immer noch vielerorts übliche Operationstechnik mit einem multisegmentalen Zugang in mindestens fünf Höhen von Tae Sung Park, dem Leiter der neurochirurgischen Klinik des St. Louis Children's Hospital, soweit modifiziert, dass über eine monosegmentale Laminektomie exakt über dem Conus medullaris die

vollständige Rhizotomie aller lumbaler und des ausgewählten Teils der sakralen Wurzeln sicher durchführbar ist. Wir haben diese Technik durch eine neue Variante der Laminoplastie ergänzt und in den vergangenen acht Jahren über 150 Patienten operiert. Dabei konnten die erwarteten Ergebnisse ohne relevante Komplikationen erzielt werden.

1.3.1. Geschichte und Entwicklung der SDR

Die Geschichte der SDR beginnt 1898, als der Neurophysiologe Sir Charles Sherrington in Versuchen am Tiermodell den Zustand der erhöhten Muskelsteifigkeit nach Resektion der Großhirnhemisphären beschreibt. Er erkannte, dass sich dieser Zustand nach Durchtrennung der Hinterwurzeln aufheben ließ (45).

Daraus ergab sich erstmals die Annahme, dass spastische Muskelaktivität ein Resultat der Schädigung zentraler Neuronen ist. Heute wissen wir, dass die zerebral bedingte Minderung der Aktivität des ersten Motoneurons Ursache der Spastik bei Patienten mit einer CP ist (46).

Eine Schädigung der absteigenden Leitungsbahn des oberen Motorneurons resultiert in einem verminderten inhibitorischen Einfluss auf den spinalen Reflexbogen (27). Über sogenannte Interneurone steht das erste Motorneuron auf spinaler Ebene mit dem alpha-Motorneuron, welches im Vorderhorn des Rückenmarks liegt und die Muskulatur innerviert, in Verbindung. Fällt die hemmende Aktivität über die Interneurone aufgrund einer zerebral bedingten Schädigung des ersten Motorneurons aus, kommt es durch die ungehemmte Aktivität der Vorderhornzellen zu einer Übererregbarkeit des Reflexbogens (47, 48).

Als therapeutische Konsequenz ergibt sich die Unterbrechung des Reflexbogens an einem beliebigen Punkt. Im Falle der SDR geschieht dies auf Höhe der sensorischen Nervenwurzeln, welche über Muskelspindeln und den Golgi-Sehnenapparat eine Rückmeldung über den Zustand der Muskelspannung transportieren (48) (Abb. 4).

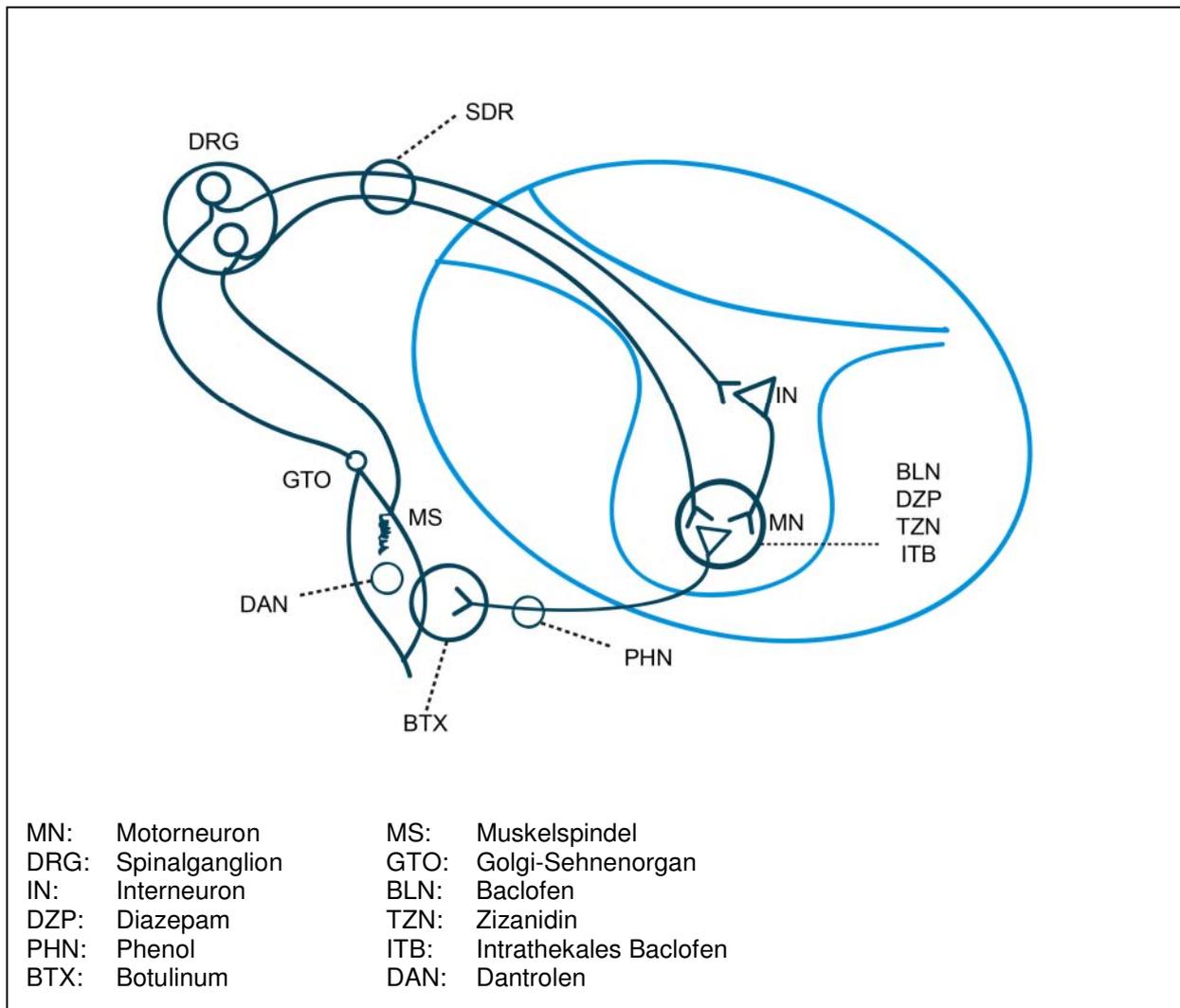


Abb. 4: Reflexbogen und Möglichkeiten der Unterbrechung zur Therapie der Spastik – Darstellung nach Edward M. Goldstein (48)

Sherringtons Erkenntnisse waren die Grundlage sowohl der von dem Neurologen Charles Loomis Dana (Abb. 5) in einem Brief an den Chirurgen Robert Abbe (Abb. 6) vorgeschlagenen OP, welche dieser daraufhin im Jahre 1888 erstmals in New York durchführte (49), als auch der von dem deutschen Neurologen Karl Otfried Foerster entwickelten Technik, die 1908 erstmals in Europa durchgeführt wurde. Fünf Jahre später veröffentlichte Foerster die Ergebnisse seiner Serie von 159 Patienten. Seine radikale OP-Technik beinhaltete die Durchtrennung aller sensorischen Hinterwurzeln L2 bis S1 mit Ausnahme der Wurzel L4 (50, 51).

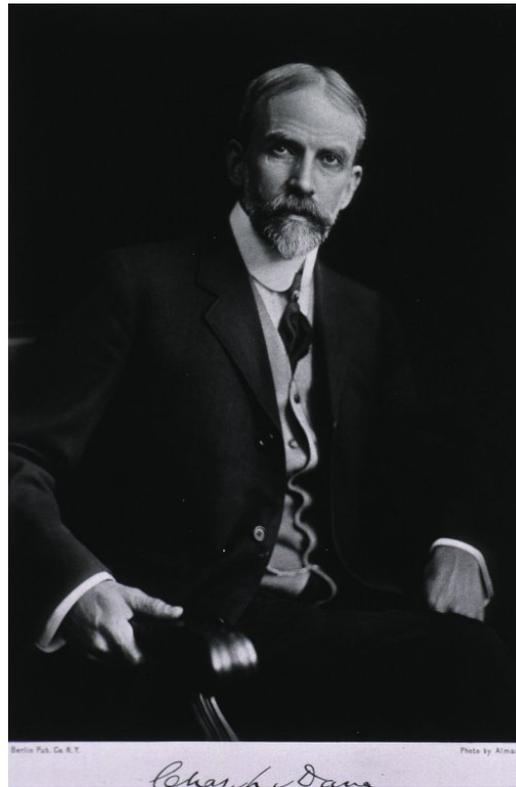


Abb. 5: Charles Loomis Dana (1852-1935) – Bild aus U.S. National Library of Medicine



Abb. 6: Robert Abbe (1851-1928) – Bild aus U.S. National Library of Medicine

Nach ersten erfolgreichen, aber von ausgeprägter Morbidität und erheblicher Muskelschwäche begleiteten Ergebnissen kam es zu einer sukzessiven Modifikation der Operationsmethode: Die Arbeitsgruppe um den aus Montpellier stammenden

Neurochirurgen Claude Gros beschrieb 1967 das Konzept der „hilfreichen“ und „behindernden“ Hinterwurzeln. In einem ersten Schritt wurden die einzelnen Nervenwurzeln in fünf kleinere Stränge (rootlets) in Längsrichtung gespalten. Im Unterschied zur ursprünglichen Technik bewahrte man einen dieser Stränge und konnte so bei 70% der Patienten die Sensibilität in den unteren Extremitäten erhalten (46, 52).

Allerdings gelang es auch der Arbeitsgruppe um Claude Gros initial nicht, eine postoperative Muskelschwäche zu vermeiden. Daher entwickelte er die Technik der „Sektoriellen Posterioeren Rhizotomie“, heute auch noch vielfach als „taylored Rhizotomy“ in Verwendung. Hierbei wurden die Hinterwurzeln auf Höhe des Conus medullaris freigelegt. Mittels elektrischer Stimulation und EMG-Ableitung wurden anschließend die zu den Nervenwurzeln zugehörigen Muskelgruppen identifiziert. Ziel war es die sogenannten „hilfreichen“ Muskelgruppen, wie Gluteal-Muskulatur zu schützen und nur Hinterwurzeln der „behindernden“ Muskelgruppen, wie Hüft-Beuger und Adduktoren, als Verursacher der Spastik zu ca. 80% zu durchtrennen (27, 46, 53).

Auf dieser Grundlage stellte Victor Aldo Fasano 1976 die „Funktionelle Dorsale Rhizotomie“ vor. Er stellte fest, dass bei der intraoperativen Stimulation mit bipolaren Elektroden die einzelnen Nervenwurzelanteile einer Hinterwurzel qualitativ und quantitativ unterschiedliche Muskelkontraktion provozierten. Chirurgisch wurde eine entsprechende Selektion getroffen und bevorzugt rootlets durchtrennt, die in ihrer Intensität und Dauer überschießende Antworten in den EMG-Ableitungen hervorriefen (27, 54).

Zwischen 1975 und 1977 wurde die SDR in Italien durch die Neurochirurgen Bernardo Fraioli und Beniamino Guidetti technisch verfeinert, indem sie die rootlets erst unmittelbar vor ihrem Eintritt in den dorsolateralen Sulcus des Rückenmarks durchtrennten, um so postoperative sensorische Defizite weiter zu vermindern (55).

Die Arbeitsgruppe um den Neurochirurgen Warwick J. Peacock variierte die Technik der SDR um einen wichtigen anatomischen Aspekt. Das operative Arbeitsfeld bewegte sich – um den Preis einer erweiterten Freilegung und der damit verbundenen Erhöhung des Risikos der Instabilität – weg vom Conus medullaris hin zur Cauda equina. Dies bot den Vorteil der besseren Identifizierung der unteren sakralen Hinterwurzeln und machte

die SDR sicherer im Hinblick auf gefürchtete Störungen des Darm- sowie Blasensphinktertonus (16, 56).

Die Operationsmethode der SDR kam auf ihrem Weg der Modifikation von Deutschland über Frankreich, Italien und Südafrika schließlich in den USA an. Zu diesem Zeitpunkt beinhaltete die Standard OP-Technik einen Zugangsweg über eine langstreckige Laminektomie der Wirbelbögen L1 bis S1.

T.S. Park entwickelte am St. Louis Childrens Hospital einen schonenderen Zugang über eine monosegmentale Laminektomie auf Höhe des Conus medullaris (26, 57). 2007 wurde diese Technik durch E.J. Haberl nach Europa reimportiert und modifiziert. Eine detaillierte Beschreibung der aktuellen Operationstechnik folgt in den weiteren Kapiteln.

1.3.2. Grundprinzipien

Spastik als Folge einer CP verursacht Muskelkontraktionen, behindert motorische Aktivitäten im Alltag und führt häufig zu orthopädischen Deformitäten bei heranwachsenden Kindern. Die Reduktion der Spastik durch die SDR erhöht die Funktionalität vorwiegend der unteren, geringer aber auch der oberen Extremitäten, wenn die Reduktion des Muskeltonus physiotherapeutisch entsprechend instrumentalisiert wird. Eine SDR sollte daher nicht empfohlen werden, wenn keine anschließende Therapie möglich ist (6, 58).

1.3.3. Bisherige Indikationsstellung und Evaluation

Die SDR ist eine etablierte Methode zur Reduktion des Muskeltonus bei Patienten mit einer CP (58, 59). Sie verbessert das Gangbild. Von ihr profitieren deshalb vor allem gehfähige Kinder mit der Diagnose einer spastischen Diplegie der Stufen GMFCS II und III (26), welche eine der häufigsten Unterformen der CP darstellt. Sie betrifft die unteren Extremitäten mit geringerer Beteiligung der oberen Extremitäten. Patienten mit einer stärkeren spastischen Tetraparese können – nach neueren Studienergebnissen (60) – ebenfalls von einer Operation profitieren. Nach T.S. Park ist die SDR auch bei hemispastischen Konstellationen erfolgreich anwendbar (persönliche Kommunikation).

Nach ersten Berichten aus St. Louis können auch Patienten im Erwachsenenalter von der Operation profitieren. Es liegen dazu aber noch keine belastbaren Ergebnisse vor (61). Bei Patienten mit einer überwiegend dystonen Bewegungsstörung ist die Rhizotomie nicht indiziert (6).

Evaluation

Die präoperative Evaluation sollte zunächst die Diagnose bestätigen. Die typischen klinischen Kriterien sind Frühgeburtlichkeit oder ein bekanntes perinatales Ereignis, das eine Hypoxie zur Folge hatte. In etwa 50 % der Fälle kann die Diagnose radiologisch über typische MRT Zeichen der PVL abgesichert werden (2).

Die körperliche Untersuchung sollte interdisziplinär pädiatrisch, neurochirurgisch, orthopädisch und physiotherapeutisch erfolgen um das meist komplexe Bild entwicklungsneurologischer Defizite, orthopädischer Deformitäten und funktioneller Einschränkungen genau zu erfassen und einen Konsens aller Fachrichtungen bezüglich eines Behandlungsplans herzustellen.

Grundsätzlich gilt, dass die Rhizotomie einen sehr frühen Platz im Therapiekonzept haben sollte, da die SDR die einzige therapeutische Maßnahme ist, die aufgrund der dauerhaften Reduktion der Spastik die Dynamik der Erkrankung und damit auch der Sekundärfolgen reduziert. Ihr Erfolg hängt von einer konsequenten physiotherapeutischen rehabilitativen Begleitung ab. Da Kinder mit einer angeborenen spastischen Bewegungsstörung erst deutlich später gehfähig werden, ist die SDR für Kinder vor dem zweiten Lebensjahr nicht empfohlen.

Umgekehrt stellen fortgeschrittene strukturelle Veränderungen wie Muskel- und Sehnenverkürzungen, Fehlstellungen der Beinachse, Hüftdysplasie, und Patella-Hochstand die Indikation zur SDR insofern zur Disposition, als die damit verbundenen Bewegungseinschränkungen den Patienten daran hindern, den durch eine SDR erzielten Gewinn an Bewegungsfreiheit tatsächlich umzusetzen.

Multiple orthopädische Voroperationen als Indikator für strukturelle Veränderungen sind deshalb ein ungünstiger prognostischer Faktor (26). Im Einzelfall muss aber im Team abgeklärt werden welche Ergebnisspielräume bestehen und in welcher Reihenfolge Therapiemaßnahmen angesetzt werden sollen. Die Skoliose als gefürchtete

Komplikation der SDR scheidet bei der monosegmentalen OP-Technik als Risikofaktor aus.

Eine Bildgebung mittels MRT ist präoperativ wünschenswert, da Patienten mit einer CP in etwa 85 % der Fälle ein morphologisches Korrelat für die diagnostizierte Schädigung aufweisen (3, 62). Schwerwiegende Schädigungen der Basalganglien zählen zu den Kontraindikation einer SDR wegen der hohen Wahrscheinlichkeit einer begleitenden Rigidität (26). Vorläufig gelten intrauterine Infektionen, Hydrozephalus und Trauma als Ursache der Spastik als Ausschlusskriterien (26).

Die Auswertung der ersten Serie unserer Patienten unter einer anderen Fragestellung zeigt, dass Patienten im Alter zwischen 4 und 7 Jahren die besten Ergebnisse aufweisen (63).

1.3.4. OP-Technik der SDR: State of the Art

Es bestehen deutliche Unterschiede in der operativen Technik zwischen den verschiedenen Zentren. Die Wurzelunterbrechung wird entweder auf Höhe des Conus medullaris oder auf Höhe der Ausgänge der Nervenwurzeln durch ihre zugehörigen Foramina intervertebralia durchgeführt (26, 64).

Die klassische und vielerorts immer noch durchgeführte Operationsmethode beinhaltet eine langstreckige Laminektomie oder Laminoplastie der Segmente L1 – S1. Dieser ursprünglich von Peacock beschriebene Zugangsweg erlaubt die sichere Zuordnung der Wurzeln anhand der jeweiligen Foramina (18, 65). Die Menge der zu durchtrennenden rootlets kann jederzeit angepasst werden.

Nachteile der langstreckigen SDR bestehen in der längeren Operationsdauer, dem längeren Hautschnitt, der ausgedehnten Muskelpräparation, erheblichen postoperativen Schmerzen, vor allem aber im erhöhten Risiko spinaler Deformitäten im weiteren Verlauf (64). Zusätzlich geht sie mit einem längeren Krankenhausaufenthalt einher (66). Die Durchtrennung der rootlets im Bereich der Foramina führt auch zu einer unterschiedlichen Distanz der Schnittstelle zum Konus. Je tiefer die Wurzel gelegen ist, umso peripherer erfolgt die Durchtrennung. Ein Einfluss dieser Variation auf das Ergebnis ist bisher noch nicht untersucht.

Mit dem Ziel der Reduktion postoperativer Komplikationsquellen wird von einigen Chirurgen eine spezielle Technik der Laminoplastie mehrerer Segmente angewandt: Hierbei werden die einzelnen resezierten Laminae nach der Rhizotomie wieder in ihrer ursprünglichen Lage mittels Metallplatten oder Nähten befestigt. Allerdings kann bei dieser Methode der Bandapparat nicht erhalten werden.

Um das Risiko postoperativer Adhäsionen, Schmerzen und spinaler Deformationen weiter zu reduzieren, etablierten Douglas Cochrane und Paul Steinbok schließlich die Methode der gestielten Laminotomie für die SDR: Bei dieser Methode muss der dorsale Bandapparat jedoch weiterhin an einer Stelle unterbrochen werden. Nach dem Hautschnitt werden paramediane Inzisionen in der dorsolumbalen Muskelfaszie gemacht, um die Verbindung zwischen dem Lig. supraspinale (Dornfortsatzband) und den Dornfortsätzen zu bewahren. Anschließend werden die Mm. multifidi und Mm. interspinales von den Dornfortsätzen und Laminae stumpf freipräpariert. Das Lig. Flavum wird von der Unterfläche der untersten zu entfernenden Lamina mit einem Adson Elevatorium stumpf abgestreift während die Dornfortsatzbänder intakt bleiben (65). Die Laminotomien werden anschließend beidseitig von kaudal nach kranial durch einen Bohrer mit Fußplatte zum Schutz der Dura durchgeführt (67). Im nächsten Schritt wird das Lig. supraspinale am kaudalen Pol der Präparation mit einem Skalpell durchtrennt. Das entstandene gestielte Laminotomiepräparat wird dann nach kranial ausgelenkt und hängt während der Operation verbunden am intakten dorsalen Bandapparat. Im Anschluss an die Rhizotomie wird dieses Präparat reponiert und segmentweise über das Lig. Flavum medial und lateral eingenäht (65).

Die Identifikation der Nervenwurzeln und ihrer zugehörigen Muskelgruppen mittels EMG-Ableitung ist für alle Methoden identisch und wird im nächsten Kapitel für unsere minimal invasive Technik beschrieben.

Unabhängig vom verwendeten Zugangsweg werden von den genannten Autoren zwischen 20 und 70 % der Hinterwurzel-Anteile der Nervenwurzeln von L2 – S1 durchtrennt.

Von L4 wird üblicherweise ein kleinerer Anteil durchtrennt, um die Funktion der Quadrizeps Muskulatur aufrecht zu erhalten. Ist die Plantarflexion der Zehen beeinträchtigt sowie eine Innenrotation der Füße erkennbar, werden zusätzlich Anteile

von S2 durchtrennt. Hierbei ist vor allem die Identifikation und Schonung der neuralen Versorgung der kontinenzhaltenden Muskulatur notwendig, um Blasendysfunktionen zu vermeiden (64, 68).

Mehrere Autoren weisen in heterogenen Kohorten auf das erhöhte Skoliose-Risiko der multisegmentalen SDR Technik hin (19, 20, 69, 70). Die Arbeitsgruppe um Paul Steinbok beschreibt in ihrer Langzeitstudie eine Inzidenz der Skoliose von bis zu 55% (19). Das Risiko für die Entwicklung spinaler Deformationen steigt signifikant wenn mehr als zwei Bögen (Laminae) entfernt werden (20, 71).

In den vorliegenden Studien senkten beide Operationstechniken – die klassische Laminoplastietechnik mit der rein knöchernen Rekonstruktion mehrerer Laminae und die von Cochrane und Steinbok etablierte gestielte Laminotomietechnik – das Risiko spinaler Deformationen nicht (20, 72).

Augrund dieser Problematik entwickelte T.S. Park den minimal invasiven monosegmentalen Zugang auf Höhe des Conus medullaris (26). Bisher gibt es keine Studie, die monosegmentale und multisegmentale OP Techniken hinsichtlich des Risikos spinaler Deformitäten vergleicht (20). Die erste von Park nach monosegmentaler SDR operierte Serie von Patienten, benötigte bisher jedoch keine Behandlung postoperativer spinaler Deformitäten (26).

1.3.5. Minimal invasive Technik der SDR nach T.S. Park

1.3.5.1. Operationsmethode

1993 wurde die minimal invasive Technik der SDR erstmals von T.S. Park beschrieben. 66 Patienten mit einer spastischen CP hatten sich zu diesem Zeitpunkt dieser Operationsmethode unterzogen. Dabei konnte eine Reduktion der Spastik analog zur klassischen Methode erreicht werden, ohne relevante Komplikationen wie Muskelschwäche, Blasendysfunktion oder Sensibilitätsverlust (57).

Nach langjähriger Erfahrung mit guten Langzeitergebnissen (58) veröffentlichte T.S. Park zusammen mit J.M. Johnston 2006 eine detaillierte technische Beschreibung seiner Operationsmethode (26).

Nach Induktion der Allgemeinanästhesie werden Nadel-Elektroden in M. peroneus, M. vastus lateralis, M. gastrocnemius, M. tibialis anterior, M. adductor longus, sowie der ischiocruralen Muskulatur platziert.

Der Patient wird auf dem Bauch liegend in Trendelenburg-Lagerung (Beckenhochlagerung) gebracht, um den Liquorverlust nach Eröffnung der Dura zu minimieren. Der Dornfortsatz von L1 wird durch Injektion von Indigokarmin in lateraler Sicht radiographisch lokalisiert.

Der Conus medullaris ist üblicherweise zwischen Th12 und L3 lokalisiert (73). Für die Durchführung der monosegmentalen Laminektomie muss vorher in mehreren Arbeitsschritten die genaue Höhe des Konus bestimmt werden.

Bei Kindern vor dem 10. Lebensjahr wird die Lage des Conus medullaris und der Cauda equina sonographisch im axialen Schnittbild bestimmt. Der Schallkopf wird hierbei neben den Dornfortsätzen positioniert, sodass der Operateur auf mehreren Höhen eine oblique Ansicht intraduraler Strukturen erhält. Auf der bestimmten Höhe des Konus erfolgt die Hautinzision. Kochsalzlosung und Epinephrin (Konzentration 1:400000) werden anschließend in die paraspinale Muskulatur injiziert. Die Lamina wird freigelegt und das Lig. Interspinalis, sowie das Lig. flavum entfernt. Die Konuslage wird vor der Laminektomie noch einmal sonographisch axial und sagittal bestätigt. Der Conus medullaris imponiert im sagittalen Schnittbild als spitz zulaufende Doppelkontur, die Cauda equina hyperechogen mit pulsatilen Bewegungen. Axial stellt sich der Konus als kreisförmige, hypoechogene Struktur dar. Bei schlechter Sicht besteht die Möglichkeit eine kleine Schlüsseloch-Foraminotomie am unteren Drittel der Lamina durchzuführen und den Schallkopf über der Dura zu platzieren. Ist die Lokalisation des Konus weiter rostral oder kaudal, besteht die Möglichkeit die Hautinzision zu erweitern und die angrenzende Lamina freizulegen (26, 57). Nun erfolgt die Laminektomie mit einem Midias Rex Kraniotom mit B5 Aufsatz. Nach letztmaliger sonographischer Bestätigung erfolgt die Duraeröffnung.

Bei Kindern, die älter sind als 10 Jahre gelingt die sonographische Lagebestimmung des Konus durch die Haut in der Regel nicht mehr. Der Dornfortsatz von L1 wird wie beschrieben mit der Injektion von Indigokarmin radiographisch bestimmt. Erst nach Flavotomie zwischen Th12 und L1 wird die Lage des Konus und der Cauda equina

sonographisch bestimmt und die erforderliche Laminektomie festgelegt. Das weitere Prozedere ist identisch (26).

Nachdem Blutungen aus epiduralen Venen und Knochen mit Knochenwachs und bipolarer Koagulation gestoppt wurden, erfolgt die Eröffnung der Dura unter dem Operationsmikroskop. Nach diesem Arbeitsschritt wird keine Spülung mit Kochsalzlösung mehr verwendet um die EMG Untersuchung nicht zu beeinflussen. Für die Dissektion der kontralateralen Nervenwurzeln kann der OP-Tisch zur Verbesserung der Sichtachse zur Seite geneigt werden. Nachdem die Arachnoidea entfernt ist, wird das Filum terminale identifiziert (57). Ab diesem Zeitpunkt erfolgt eine kontinuierliche Überwachung der EMG-Aktivität. Bereits geringfügige mechanische Manipulationen der ventralen Wurzeln rufen eine EMG-Reaktion hervor. Das vorsichtige Beklopfen („tapping“) einer nicht sicher zuzuordnenden Wurzel mit einem Instrument kann im Zweifelsfall zur Diskriminierung ventraler und dorsaler Wurzeln verwendet werden (26). Das Nervenwurzelpaar im Niveau der Laminektomie kann anhand des darstellbaren Verlaufes zu den Foramina intervertebralia optisch sicher identifiziert werden. Im nächsten Schritt werden die Hinterwurzeln von L2 bis S1 vorsichtig angehoben (57) und nach medial gehalten, um die nun exponierten ventralen Wurzeln mit einem Watteplättchen abzudecken. Darauffolgend wird der Übergangsbereich des Conus medullaris in das Filum terminale eingestellt und die Nervenwurzeln S2 – S5 identifiziert. S2 ist üblicherweise kleiner als S1 und größer als S3 und ermöglicht eine gute Orientierung. Im Anschluss wird ein 5mm breites Silastic-Blättchen unter das vorsichtig isolierte Bündel der Hinterwurzeln von L2 bis S2 geschoben (26). Der Neurochirurg sollte im nächsten Arbeitsschritt noch einmal folgende drei anatomische Strukturen zur Orientierung nachprüfen: L1 oder wahlweise Th12 oder L2 bei entsprechender Laminektomie und das jeweils zugehörige Neuroforamen, die Wurzeln S3 – S5 und die sichere Abdeckung der ventralen Nervenwurzeln (57).

1.3.5.2. Intraoperatives Neuromonitoring und Rhizotomie

Verglichen mit der langstreckigen Operationsmethode, ist bei der minimal invasiven Technik besonders die anatomische Orientierung und Identifikation von L3 – S2 erschwert. Deshalb werden die Wurzeln möglichst wenig manipuliert und in der vorgegebenen chronologischen Reihenfolge, beginnend mit L2, auf dem Silastic-

Blättchen ausgebreitet. Die Hinterwurzeln L3 und L4 bestehen natürlicherweise aus zwei bis drei rootlets. L5 und S1 aus drei bis vier getrennten rootlets, während S2 aus einem einzelnen Faszikel besteht. Vor der Unterteilung der Nervenwurzeln in mehrere Anteile wird das Innervationsmuster jeder Nervenwurzel mit Hilfe der EMG Untersuchung geprüft. Dies geschieht mit zwei Haken-Sonden, auf welche die Nervenwurzeln gelegt und anschließend elektrisch stimuliert werden (26).

Nach der EMG Prüfung werden die dorsalen Nervenwurzeln mit einer Scheer-Nadel in Längsrichtung in drei bis fünf Faszikel aufgespießt. Die entstandenen rootlets werden mit einer Frequenz 0,5 Hz durch Rechteckwellen von 0,1 ms Dauer stimuliert (26). Die Methode stammt von der Arbeitsgruppe um Victor Aldo Fasano (74).

Die Reflex-Antworten werden nach den in Abb. 7 beschriebenen Kriterien von 0 bis 4+ eingeteilt. Sie liegen mehrheitlich zwischen den Werten 1+ und 4+ (26).

Im Weiteren werden mindestens 50, höchstens jedoch 70% der rootlets einer Wurzel durchtrennt. Rootlets mit einer Antwort von 3+ oder 4+ sind bevorzugt zu durchtrennen. Ist aufgrund der Messung kein quantitativ entsprechender Anteil an rootlets zu identifizieren, werden die nächst besseren Faserbündel durchtrennt. Sind die Messungen für alle rootlets gleich, erfolgt die Auswahl zufällig (26).

Dieser Ablauf gilt für die Hinterwurzeln von L2 – S2. Bei den Wurzeln S1, S2 und S3 wird zusätzlich die Verteilung der Pudendus-Aktivität gemessen. Insbesondere bei der Wurzel S2 entscheidet dieses Kriterium über die Auswahl des zu durchtrennenden Faszikels. L1 wird ohne EMG Ableitung zu 50% durchtrennt, da kein Kennmuskel abgeleitet werden kann (57). Nach den beschriebenen Kriterien werden ungefähr 60 bis 65 % aller Faserbündel jeder sensorischen Wurzel durchtrennt (26).

Die gesamte Prozedur wird anschließend analog auf der kontralateralen Seite durchgeführt.

0	Nicht anhaltende oder einmalige Entladung auf eine Folge von Stimulationen
1+	Anhaltende Entladung von Muskeln, die durch das ipsilateral stimulierte Segment innerviert sind
2+	Anhaltende Entladung von Muskeln, die durch das stimulierte und direkt benachbarte Segment innerviert sind
3+	Anhaltende Entladung von Muskeln, die durch das stimulierte Segment und weiter entfernte Segmente innerviert sind
4+	Anhaltende Entladung der kontralateralen Muskeln mit oder ohne Entladung der ipsilateralen Muskeln

Abb. 7: Reflexantworten der intraoperativen EMG Messung – Tabelle nach T.S. Park und J.M. Johnston (26).

Nach der Rhizotomie erfolgt eine intrathekale Spülung mit physiologischer Kochsalzlösung. Die Dura wird mit einer fortlaufenden monofilen Naht der Stärke 5-0 verschlossen (57). Vor einer Reposition der ossären Elemente wird ein Epiduralkatheter eingelegt und unter Sicht etwa zwei Höhen nach kranial in den Spinalkanal vorgeschoben. Anschließend wird die Trendelenburg-Lagerung aufgehoben und die Wunde in Schichten verschlossen. Der Epiduralkatheter wird mit Morphin in einer Dosierung von 15 µg pro kg gemischt mit Clonidin in einer Dosierung von 2 µg pro kg bei Kindern bis zum 7. Lebensjahr und 1 µg pro kg ab dem 8. Lebensjahr unter anästhesiologischer Kontrolle bestückt und später an eine verstellbare Pumpe angeschlossen.

Die Komplikationspalette erstreckt sich wie bei jedem spinalen mikrochirurgischen Eingriff im Konusbereich über alle bekannten Folgen einer Wurzelverletzung, einer Ischämie oder einer Infektion (26).

1.3.6. Modifikation der minimal invasiven SDR nach Haberl

100 Jahre nach ihrer Erstanwendung durch Otfried Foerster wurde die SDR 2007 von unserer Arbeitsgruppe um E.J. Haberl in modifizierter Form erstmals wieder in Deutschland durchgeführt.

E.J. Haberl hat die minimal invasive Technik von Park um eine neue Zugangsmodifikation einer speziellen Laminoplastie-Technik erweitert, bei der die

dorsale Zuggurtung über den Bandapparat wiederhergestellt wird und somit die Integrität der Wirbelsäule weitestgehend erhalten bleibt. Die Besonderheit dieser Modifikation liegt im vollständigen Erhalt der bei konventioneller Technik irreparabel durchtrennten Ligamenta interspinosa und supraspinosa durch den Ersatz des interspinosalen Zugangs mit einem transspinosaalen Zugang. Die erfolgreiche Fusion der gesplitteten Dornfortsätze ist radiologisch belegt (20, 63).

Präoperativ wird die Höhe des Conus medullaris, anders als bei T.S. Park, nach Induktion der Allgemeinanästhesie mit Hilfe der intraoperativen MRT Bildgebung unter Einsatz leuchtender Hautmarkierungen bestimmt.

Danach werden für die EMG Messungen Nadel-Elektroden über den Kennmuskeln von L2 – S2 fixiert. Der Patient wird in Bauchlage in Trendelenburg-Position gelagert. Nach dem Hautschnitt auf Höhe des Konus wird die Muskelfaszie mittig über dem zu resezierenden Dornfortsatz und beiden benachbarten Dornfortsätzen (Abb. 8) eröffnet und vorsichtig nach lateral abpräpariert. Die Muskulatur wird nach lateral abgeschoben und mit Spreizern gehalten. Nun erfolgt eine punktuelle Eröffnung der Lig. Flava in den kaudalen gegenüberliegenden Foramina intervertebralia. Der Schuh des Kraniotoms wird durch die Flavotomie geschoben und der Bogen nach kranial herausgesägt. Im nächsten Schritt erfolgt die diagonale nach zentral gerichtete Spaltung der Dornfortsätze ober- und unterhalb der diskonnektierten Lamina (Abb. 9) mit einer knochenspaltenden Schere mit langen Klingen (RUSKIN Bone Splitting Forceps). Der nun vollständig diskonnektierte Komplex besteht aus einer Lamina, ihrem Dornfortsatz sowie den durch die unversehrten Ligamenta interspinosa gehaltenen benachbarten Dornfortsatzfragmenten. Er wird während der weiteren Prozedur in feuchten Tüchern gelagert (20).

Duraeröffnung, Freilegung sowie Identifikation der Hinterwurzeln und EMG Messung mit anschließender Durchtrennung von ca. 60% der Hinterwurzel-Anteile verlaufen analog zu der von T.S. Park beschriebenen minimal invasiven SDR Methode (26).

Nach durchgeführter Rhizotomie wird ein Periduralkatheter unter Sicht eingelegt und transkutan ausgeleitet. Die Lamina wird mit einer dornfortsatzübergreifenden 8-10-Loch-Platte (MatrixNEURO™, DePuy Synthes, Zuchwil, Switzerland) mittels 7 mm Schrauben auf beiden Seiten befestigt. Die diagonal durchtrennten Dornfortsätze

werden durch Kompressionsnähte (Ethibond 0) mit ihrem jeweiligen Pendant mittels Kompressionsnaht verbunden (Abb. 10). Bei jüngeren Patienten kann diese Naht direkt durch die knorpeligen Dornfortsätze gestochen werden. Bei älteren Kindern wird die Naht zweifach um die Dornfortsatz-Fragmente durch das Lig. interspinale geführt und fest verschlossen. Zum Abschluss wird die Muskelfaszie sowohl mit einer Einzelknopfnahnt als auch mit einer darübergerlegten fortlaufenden Naht der äußeren Faszien-schicht verschlossen und mittig mit dem Lig. interspinale bzw. supraspinale vernäht. Der weitere Wundverschluss erfolgt in Schichten, die Epidermis wird mit Dermabond Hautkleber verschlossen (20).

Postoperativ erfolgt eine kombinierte intravenöse und peridurale Schmerztherapie während einer dreitägigen Bettruhe. Präoperativ angepasste, leichte Nachtschienen halten je nach Bedarf die Füße in 90° Position oder die Knie in Streckstellung. In dieser Zeit beginnt die Rehabilitation in Form von passiven Bewegungsübungen. Anschließend wird eine schnelle Mobilisation der Patienten angestrebt. Nach einer Woche werden die Patienten idealerweise in eine Rehabilitationsklinik verlegt. Der Schwerpunkt liegt hier unter Berücksichtigung der Ausgangssituation über einen Zeitraum von durchschnittlich 6 Wochen auf der Revertikalisierung, der Kräftigung der Muskulatur und der beginnenden Verbesserung des Gangbildes. Der krankengymnastisch unterstützte Besserungsprozess erstreckt sich über 24 Monate postoperativ und wird nach 3, 6, 12 und 24 Monaten evaluiert.

Um einen guten Heilungsprozess der durchgeführten Laminoplastie sicherzustellen, sind Rotationsbelastungen, starke Vibrationen (Galileo) und ruckartige Beschleunigungen (Kontaktsport) zu vermeiden. Alltägliche Aktivitäten hingegen sind nicht eingeschränkt. Der postoperative Rehabilitationsplan ist altersunabhängig (20).

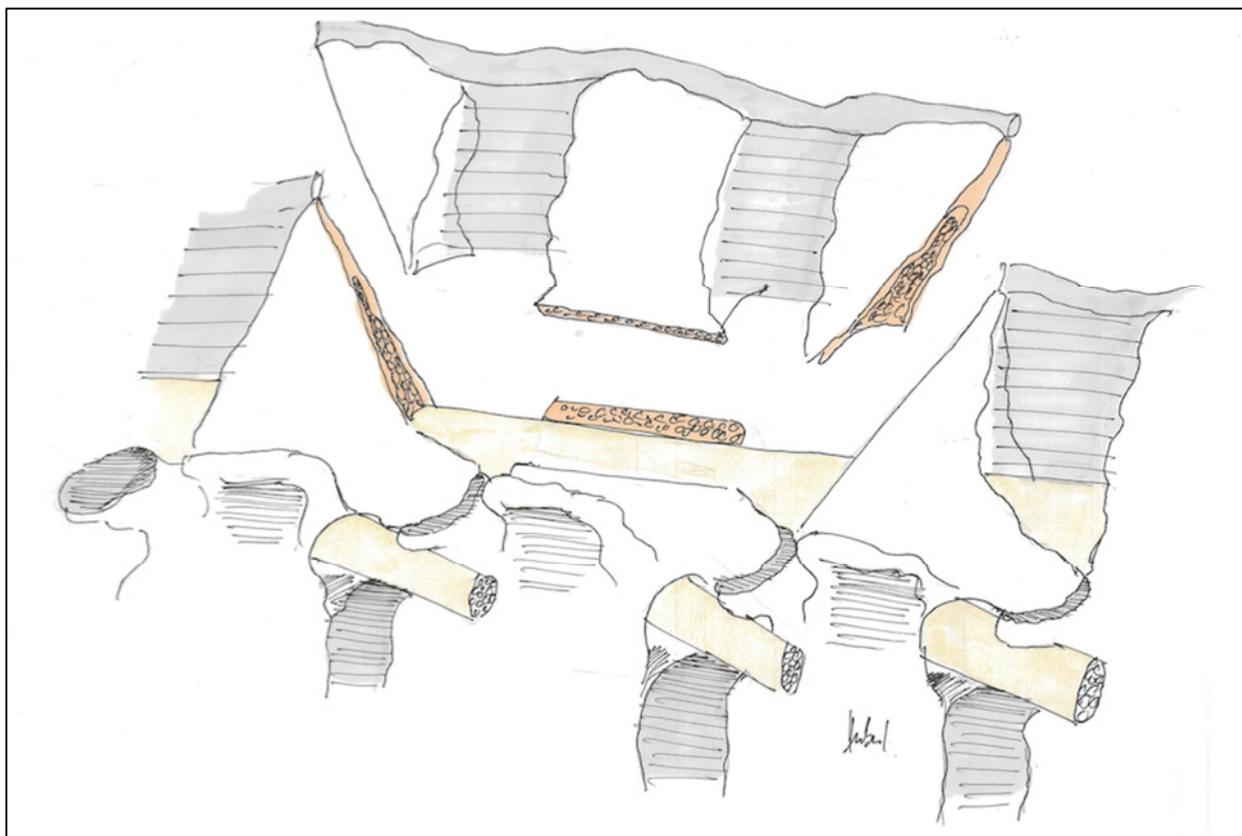


Abb. 9: Laminektomie-Technik nach Haberl mit der diagonalen, nach zentral gerichteten Spaltung der Dornfortsätze

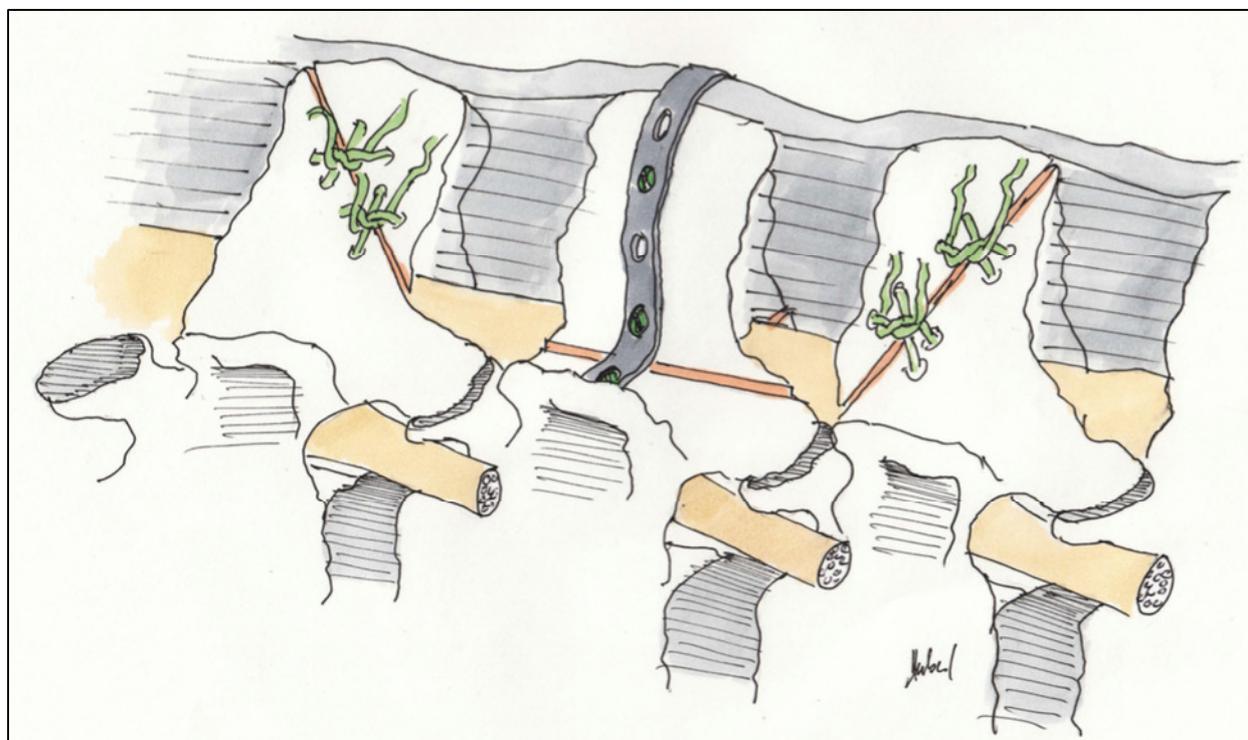


Abb. 10: Laminoplastie – Befestigung der Lamina mittels Loch-Platte und Schrauben sowie Kompressionsnaht der Dornfortsätze

2. Methoden und Patienten

2.1. Patientenpopulation und Datenerfassung

Für diese Studie untersuchten wir die Daten von 150 Patienten mit der Hauptdiagnose einer bilateralen spastischen CP, die sich in dem Zeitraum von 01/2007 bis 04/2015 einer SDR unterzogen. Die Diagnose der CP wurde auf der Basis einer ausführlichen klinischen Untersuchung gestellt.

Die Operationen wurden am selbstständigen Arbeitsbereich Pädiatrische Neurochirurgie der Charité – Universitätsmedizin Berlin durch dessen Leiter E.J. Haberl durchgeführt.

Die Daten wurden prospektiv von einem unabhängigen und nicht in die Therapie involvierten Team des Sozialpädiatrischen Zentrums (SPZ) der Charité erfasst und in einem zentralen Archiv des SPZ gesammelt.

Die Rekrutierung der Patienten erfolgt über eine wöchentlich stattfindende Sprechstunde des sozialpädiatrischen Zentrums der Charité durch ein interdisziplinäres Team aus Neurochirurgen, Neuropädiatern, Orthopäden und Physiotherapeuten (63).

2.2. Methoden

Unsere Arbeit wurde als prospektive, klinische Studie angelegt. Sie basiert auf standardisierten Untersuchungen, die durch ein Team von erfahrenen Medizinern und Physiotherapeuten an einem spezialisierten, sozialpädiatrischen Zentrum in enger Zusammenarbeit mit den Neurochirurgen durchgeführt wurde. Die Untersuchungen erfolgten unmittelbar präoperativ sowie 12 und 24 Monate postoperativ und wurden durchgehend von denselben Untersucher-Teams durchgeführt. Eine Verblindung war nicht möglich. Die Untersuchungen wurden von einem Team durchgeführt, das nicht in die Rekrutierung oder Behandlung der Patienten eingebunden war. Die Untersuchungsergebnisse wurden ohne Kenntnis unserer Fragestellungen erhoben. Die erhobenen Daten wurden im Anschluss anonymisiert und von Mitarbeitern, die zu keinem Zeitpunkt in die klinische Untersuchung eingebunden waren, weiterverarbeitet.

Für diese Arbeit wurden die Daten in einer gezielten Archiv Recherche gesammelt und ausgewertet.

2.3. Studiendesign

Für die präoperative Evaluation der Patienten verwendeten wir von Warwick J. Peacock und Loretta A. Staudt definierte Einschlusskriterien. Voraussetzung für die Eignung zur Operation ist eine beinbetonte und überwiegend spastische, bilaterale Form der CP. Die Kinder müssen Gehfähigkeit nach GMFCS (I-III) aufweisen und ausreichende kognitive Fähigkeiten für eine aktive Teilnahme der Nachbehandlung besitzen. Ausschlusskriterien sind funktionslimitierende Deformitäten und Kontrakturen des Skelettsystems und vorhergegangene Operationen der Wirbelsäule über mehrere Segmente (63, 75).

Die Eingriffe wurden alle von einem Neurochirurgen, dem Leiter des Arbeitsbereichs Pädiatrische Neurochirurgie (E.J. Haberl), nach der minimal invasiven Technik von T.S. Park (26) durchgeführt und um die eingehend beschriebene Zugangsmodifikation nach Haberl erweitert (20). Das intraoperative Neuromonitoring zur Auswahl der zu durchtrennenden rootlets erfolgte analog zu dem beschriebenen Vorgehen von T.S. Park und J.M. Johnston (26).

Ab der zweiten postoperativen Woche erhielten die Kinder ein umfangreiches stationäres Rehabilitationsprogramm. Uns liegt eine schriftliche Einverständniserklärung der Eltern aller Patienten für die Teilnahme an dieser Studie und die Veröffentlichung ihrer Daten vor. Ein positives Votum durch die Ethikkommission ist erfolgt (EA1/138/11).

Spezifisches Ziel unserer Arbeit ist es, die effektive Reduktion der Spastik bei Patienten mit einer CP durch die minimal invasive SDR unter Einschluss der speziellen Technik der Laminoplastie nach Haberl (20) zu belegen. Wir wollen zusätzlich zeigen, dass die Operationsmethode dabei keinerlei Muskelschwäche erzeugt.

2.4. Evaluationsinstrumente

Für die Evaluation unserer Operationsergebnisse verwenden wir international standardisierte und validierte Parameter. Die durchgeführten Untersuchungen dienen der Beurteilung motorischer selbst initiiertes Bewegungsmöglichkeiten sowie der Aktivität und Teilnahme am alltäglichen Leben. Die im Folgenden beschriebenen Evaluationsinstrumente wurden von einem konstanten Team von Physiotherapeuten mit langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der Bewegungsstörungen angewendet.

Modifizierte Ashworth Skala (MAS)

Für die Evaluation der Spastik verwenden wir die MAS. Der britische Neurologe Bryan Ashworth stellte 1964 eine Klassifikation vor, um die Wirkung von Muskelrelaxanzien bei Patienten mit einer Multiplen Sklerose zu beschreiben. Sie erfasst den Widerstand verschiedener Muskelgruppen bei passiver Bewegung in Abhängigkeit vom Bewegungsausmaß. Die Einteilung erfolgt von Null bis Vier, wobei der Wert Null einen normalen Muskeltonus und Vier eine maximale bewegungslimitierende Steifheit beschreibt (76). Richard W. Bohannon und Melissa B. Smith veröffentlichten 1986 eine modifizierte Form der Ashworth Skala, um eine bessere Trennschärfe bei Patienten mit einer geringeren Ausprägung der spastischen Bewegungseinschränkung zu erzielen. Hierfür wurde die ursprüngliche Klassifikation von Ashworth um den Wert 1+ ergänzt, der einen leichten Widerstand in weniger als 50% des Bewegungsausmaßes beschreibt (77) (Abb. 11).

0	Keine Steigerung des Muskeltonus
1	Leichte Steigerung des Muskeltonus am Anfang, mit erneutem Nachlassen des Widerstandes (= „Catch“) oder am Ende des Bewegungsausmaßes
1+	Leichter „Catch“ gefolgt von leichter Steigerung des Muskeltonus bei <50% des Bewegungsausmaßes
2	Deutliche Steigerung des Muskeltonus bei >50% des Bewegungsausmaßes, die Bewegung über das Bewegungsausmaß ist möglich
3	Erhebliche Steigerung des Muskeltonus, passive Bewegung erschwert
4	Betroffene Körperteile sind starr in Flexion oder Extension

Abb. 11: Modifizierte Ashworth Skala für die Klassifikation der Spastik – Tabelle nach Richard Bohannon und Melissa Smith (76, 77)

Die MAS wurde bei unseren Patienten von erfahrenen Physiotherapeuten auf dem Gebiet kindlicher Entwicklungsstörungen durchgeführt. Es wurden beidseits die Adduktoren, Wadenmuskulatur und ischiocrurale Muskulatur untersucht.

Gross Motor Function Measure (GMFM - 88)

Die GMFM–88 ist ein Messinstrument für die Evaluation der motorischen Funktionen des gesamten Körpers. Es wurde erstmals 1989 von der Arbeitsgruppe um die Rehabilitationsmedizinerin Dianne Russell vorgestellt und dient der Messung grober motorischer Funktionen und ihrer Veränderungen über die Zeit bei Kindern mit einer CP (78, 79). Für diese Patientengruppe ist er ein standardisiertes, gut validiertes Instrument (21).

Durch Beobachtung der Patienten wird bei der Untersuchung die Bewältigung von 88 Aufgaben beurteilt und auf einer vier Punkte Skala (0 bis 3 Punkte) in fünf Untergruppen, den motorischen Dimensionen, bestehend aus A, Liegen und Rollen; B, Sitzen; C, Krabbeln und Knien; D, Stehen; E, Laufen, Rennen und Springen, bewertet (78). Dimension A besteht aus 17, B aus 20, C aus 14, D aus 13, und E aus 24 Aufgaben. Diese Aufgaben entsprechen Meilensteinen der kindlichen Entwicklung. Wir legten zusätzlich eine Zieldimension – bestehend aus dem Bereich D oder E – fest, bei denen individuell die größten postoperativen Veränderungen zu erwarten waren. Die Einheit der GMFM wird in Prozent angegeben. Zur Berechnung der Prozentzahlen wird die erreichte Punktzahl für Dimension A durch 51, B durch 60, C durch 42, D durch 39 und E durch 72 geteilt und mit 100 multipliziert. Anschließend wird der Mittelwert aus allen Dimensionen berechnet.

Gross Motor Function Classification System (GMFCS)

Das eingehend beschriebene GMFCS wurde zusätzlich bei allen Patienten erfasst. Es dient der Einteilung der Mobilität von CP-Patienten unter der Berücksichtigung von benötigten Hilfsmitteln und wird in Abhängigkeit des Alters angepasst. Die Einteilung in Level I erfolgt, wenn sich das Kind frei und ohne den Einsatz von Hilfsmitteln fortbewegen kann. Level II beschreibt Kinder, die sich in einer an ihre Behinderung angepassten Umgebung frei fortbewegen können, jedoch außerhalb ihres häuslichen

Umfeldes, z.B. bei ungerader Gehfläche oder auf engerem Raum, auf Hilfe angewiesen sind. Rennen und Springen sind nur eingeschränkt möglich. Level III beschreibt Patienten, die sich nur unter dem Einsatz von Hilfsmitteln selbstständig fortbewegen können. In Abgrenzung dazu ist die Fortbewegung bei Level IV Patienten selbst mit Hilfsmitteln nicht möglich. Sie benötigen daher assistierende Technologien, wie elektrisch betriebene Rollstühle oder sind vollständig auf die Hilfe anderer angewiesen. Level V beschreibt Patienten, die selbst unter Einsatz assistierender Technologien keine selbstständige Fortbewegung erreichen (21).

Das GMFCS spielt eine Rolle bei der Indikationsstellung zur SDR. Es konnte in vorherigen Studien gezeigt werden, dass Kinder mit einer starken Einschränkung der willkürlichen Körperkontrolle (GMFCS V) selbst bei einer erfolgreichen Reduktion der Spastik nicht von der Operation profitieren (44). In Kontrast hierzu berichtet die Arbeitsgruppe aus Nottingham um die Kinderneurochirurgen Michael H. Vloeberghs und Harshal Ingale in ihrer Publikation von 2016 über sehr gute Erfahrungen mit der SDR bei schwer betroffenen Patienten (GMFCS IV-V) als Alternative zu einer Auswechslung einer bereits implantierten ITP (60).

Manuelle Muskelkraft Testung

Um eine mögliche Muskelschwäche, die vor allem in der frühen Phase der SDR-Historie als gefürchtete Komplikation galt, zu erfassen, wurde eine manuelle Testung der Muskelkraft durchgeführt. Mit Hilfe der manuellen maximalen Muskelkraft-Prüfung (MFT, aus dem englischen Manual Maximal Force Test) nach Daniels und Worthingham (63, 80) werden für die Kraftgrade fünf Punkte vergeben. Die Kraftgrade 0-5 beschreiben die Effektivität der Muskelaktion gegen Widerstand bzw. gegen Schwerkraft und reichen von der normalen maximalen Kraft gegen manuellen Widerstand im gesamten Bewegungsausmaß bis zu keiner Bewegung oder sichtbaren Aktivität der Muskulatur (Abb. 12). Bei unseren Patienten wurden alle relevanten Muskelgruppen der unteren Extremitäten untersucht.

0	keine Bewegung oder sichtbare Aktivität der Muskulatur
1	sichtbare Muskelaktivität ohne relevante Bewegung
2	Bewegung im gesamten Bewegungsausmaß unter Aufhebung der Schwerkraft
3	Bewegung im gesamten Bewegungsausmaß gegen die Schwerkraft
4	volle Kraft, die jedoch vor dem Erreichen des maximalen Bewegungsausmaßes nachlässt;
5	normale maximale Kraft gegen manuellen Widerstand im gesamten Bewegungsausmaß

Abb. 12: Klassifikation der manuellen Muskelkraft Testung (MFT)

2.5. Statistik

Stetige Variablen wurden mit Hilfe von Mittelwerten und zugehörigen Standardabweichungen beschrieben. Für kategoriale Variablen berechneten wir absolute und relative Häufigkeiten. Werte von gepaarten Stichproben der MAS und MFT zu unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten wurden durch den Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest analysiert (Abb. 29). Veränderungen der GMFM wurden mit Hilfe des Einstichproben-t-Tests untersucht. Primäre Endpunkte der Arbeit sind für die Testung der Spastik nach MAS: Veränderungen der Adduktoren sowie der ischiocruralen Muskulatur (Hamstring Muskulatur), jeweils für die linke und rechte Seite. Primäre Endpunkte für die Testung der Muskelkraft nach MFT sind: Dorsalextension im Sprunggelenk sowie Extension im Kniegelenk, jeweils für die linke und rechte Seite.

Es werden damit acht primäre Tests zu einem Gesamtniveau von 0.05 durchgeführt. Nach Bonferronie-Korrektur des Signifikanzniveaus wird jeweils zu einem Niveau von 0,00625 getestet.

Alle anderen Tests sind rein deskriptiv zu interpretieren. Untersuchungsergebnisse im Verlauf über verschiedene Zeitpunkte präsentierten wir in Kreuztabellen und Kastengrafiken. Für den Vergleich mit bereits publizierten Daten postoperativer MAS-Ergebnisse wurden 95%-Konfidenzintervalle berechnet.

3. Ergebnisse

3.1. Patientenkollektiv

150 Patienten unterzogen sich in dem Zeitraum zwischen 01/2007 und 04/2015 einer SDR an unserem Zentrum. Von **109** Patienten, davon 48 weiblich (44%) und 61 männlich (56%), standen Daten der präoperativen Untersuchung zur Verfügung. Bei 41 Patienten lagen uns keine präoperativen Untersuchungsdaten vor, da die Kinder entweder nicht in der Lage waren die Tests durchzuführen, eine präoperative Evaluation im Ausland erfolgte oder die Patientenakten im Archiv des SPZ nicht hinterlegt waren. Die Datenlücken konzentrieren sich wesentlich auf die ersten, noch nicht systematisch durchuntersuchten Patienten von 01/2007 bis 03/2008 und verteilen sich zu einem geringeren Teil aus den oben genannten Gründen über den gesamten Untersuchungszeitraum. Die aktuellsten Ergebnisse unserer Studie stammen von einem Patienten zum Operationszeitpunkt 10/2014.

Das mittlere Alter zum Zeitpunkt der Operation betrug 6 Jahre (bei einer Standardabweichung von 2,73 Jahren), wobei das jüngste Kind zwei und das älteste 17 Jahre alt waren.

83 (76,1%) der Kinder waren Frühgeborene mit einer Geburt vor Vollendung der 37. Schwangerschaftswoche. Bei 20 (18,3%) lag die gesicherte Diagnose einer PVL vor. Bei 9 (8,3%) Patienten konnte auf Grund der Datenlage keine eindeutige Aussage zu Frühgeburtlichkeit und der Diagnose einer PVL getroffen werden.

3.2. Ergebnisse im Vergleich zur langstreckigen Operationsmethode

Wir beschreiben die Ergebnisse der ersten europäischen Anwendung der minimal invasiven SDR mit der Erweiterung einer speziellen Technik der Laminoplastie nach Haberl. Die klassische, an den meisten Zentren durchgeführte Operationsmethode der SDR über einen multisegmentalen Zugang zeigt trotz der häufigen sekundären Deformitäten der Wirbelsäule gute Langzeitergebnisse mit einer effektiven Reduktion der Spastik (42, 43, 78, 81, 82). Die Arbeitsgruppe um die Neurochirurgen Paul Steinbok und Tamir Ailon veröffentlichte 2015 eine Arbeit zu den Langzeitergebnissen

der SDR am British Columbia Children's Hospital. Trotz einer Umstellung von der langstreckigen auf die minimal invasive SDR im Untersuchungszeitraum im Jahre 2005, erhielten wir nach Rücksprache mit Paul Steinbok die Information, dass in dieser Studie nur Ergebnisse der multisegmentalen SDR Technik analysiert wurden.

Aufgrund der großen Fallzahl von 44 Patienten und der untersuchten Outcome Parameter entschieden wir uns diese Studie für einen unkontrollierten Vergleich unserer Ergebnisse mit der klassischen, langstreckigen Technik zu verwenden.

In der Veröffentlichung der Arbeitsgruppe wurde als Evaluationsinstrument zur Reduktion der Spastik die MAS erfasst. Positive postoperative Ergebnisse wurden vor allem bei den Adduktoren erreicht. Im frühen postoperativen Verlauf wurde hier eine hoch signifikante Verbesserung erreicht ($p < 0,001$). Die MAS verringerte sich um 1,5 (mit einem 95%-Konfidenzintervall [1,3; 1,7]) (58).

Analog hierzu präsentieren wir unsere frühen postoperativen Ergebnisse in Abb. 13.

Bei 85 Patienten standen die Ergebnisse der postoperativen MAS Untersuchungen zur Verfügung. Die MAS der Adduktoren der linken Körperhälfte verringerte sich um 1,306. Damit liegen unsere postoperativen Ergebnisse im 95%-Konfidenzintervall [1,3; 1,7] der von Steinbok veröffentlichten Studie. Wir konnten mit diesem unkontrollierten Vergleich beweisen, dass unsere minimal invasive SDR Technik der langstreckigen Operationsmethode hinsichtlich einer Spastikreduktion nicht unterlegen ist.

Auch die Adduktoren der rechten Körperhälfte verbesserten sich um 1,224 im frühen postoperativen Verlauf. Die Vergleichbarkeit der postoperativen Ergebnisse stellt die Grundvoraussetzung und Legitimation für die weitere Durchführung des schonenderen, monosegmentalen Zugangsweges dar.

Paired Samples Test				
		Paired Differences		
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	prae-Add-li - 12-Add-li	1,306	1,244	,135
Pair 2	prae-Add-re - 12-Add-re	1,224	1,199	,130

Test Statistics ^b	
	12-Add-li - prae-Add-li
Z	-6,673 ^a
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000
a. Based on positive ranks.	
b. Wilcoxon Signed Ranks Test	

Abb. 13: Veränderung der Spastik in den Adduktoren nach MAS im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

3.3. GMFCS

Bei 82 der Patienten erfolgte eine präoperative, sowie ein Jahr postoperativ durchgeführte Klassifizierung nach dem GMFCS.

Aus den bisher vorliegenden Erfahrungen wissen wir, dass die SDR in der Regel eine funktionelle Verbesserung innerhalb des eingangs festgestellten GMFCS Levels erreicht. Ein Wechsel des Levels gelingt selten (43, 83-85).

Präoperativ wurden 17 Patienten Level I; 34 Patienten Level II; 28 Patienten Level III und III Patienten Level IV eingestuft. Bei Patienten des Levels V ist eine SDR nicht indiziert und wurde an unserem Zentrum nicht durchgeführt.

Abbildung 14 zeigt die Veränderungen der initialen GMFCS Level 12 Monate postoperativ. Der Großteil der Patienten blieb unverändert (89%) oder verbesserte sich in der Klassifikation (8,5%). Nur 2 (2,4%) der Patienten verschlechterten sich im ersten Jahr nach der SDR.

Abbildung 15 zeigt die Veränderungen in der Einteilung nach GMFCS im Langzeit Follow-up. Die Daten von 64 Patienten wurden bisher zwei Jahre postoperativ

vollständig erfasst. Für alle anderen Patienten war das Datum der Nachuntersuchung zum Zeitpunkt der Datenerfassung noch nicht erreicht, oder die Familien nahmen den Termin zwei Jahre nach der Operation nicht mehr wahr.

Der Großteil der Patienten blieb bei der Nachuntersuchung zwei Jahre postoperativ erwartungsgemäß auf einem unveränderten GMFCS Level (78,1%). Die Zahl der Patienten mit einem verbesserten GMFCS Level stieg allerdings an auf 20,3% verglichen mit den Ergebnissen im ersten Jahr nach der SDR (4,9%). Besonders Patienten mit einem GMFCS Level III profitierten im späteren Verlauf von der Operation (Abb. 16). Einer der Patienten (1,6%) verschlechterte sich in der Einteilung nach GMFCS zwei Jahre postoperativ.

prae GMFCS * 12 GMFCS Crosstabulation						
Count		12 GMFCS				Total
		1	2	3	4	
prae GMFCS	1	16	1	0	0	17
	2	2	32	0	0	34
	3	0	4	23	1	28
	4	0	0	1	2	3
Total		18	37	24	3	82

Abb. 14: Veränderungen der Verteilung nach GMFCS Level im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

prae GMFCS * 24 GMFCS Crosstabulation						
Count		24 GMFCS				Total
		1	2	3	4	
prae GMFCS	1	14	0	0	0	14
	2	7	21	0	0	28
	3	0	5	14	1	20
	4	0	0	1	1	2
Total		21	26	15	2	64

Abb. 15: Veränderungen der Verteilung nach GMFCS Level im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.

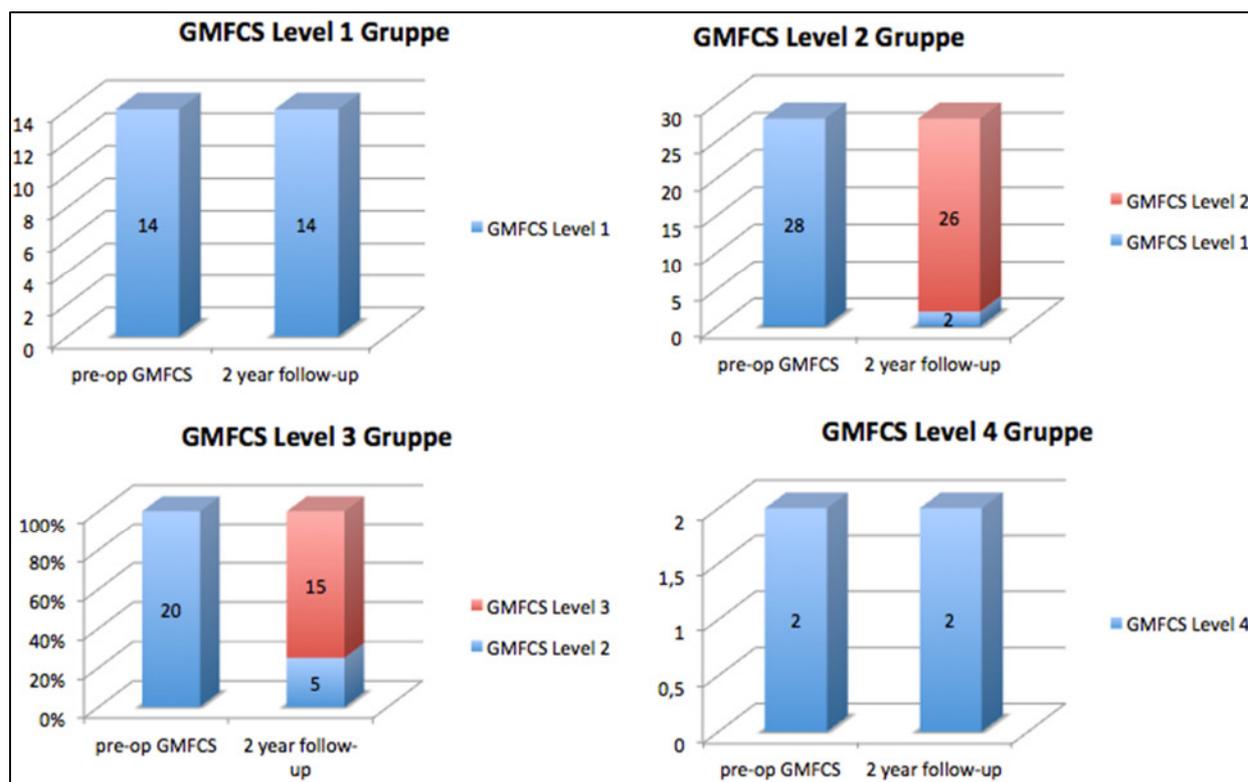


Abb. 16: Veränderungen in der Verteilung von GMFCS Gruppen 24 Monate postoperativ im Vergleich zum präoperativen Ausgangswert

3.4. Spastikreduktion nach MAS

Adduktoren

Bei 85 Patienten erfolgte eine vollständige prä- und postoperative Untersuchung der Spastik der Adduktoren beidseits nach MAS. Abb. 17 zeigt die Veränderungen der MAS im ersten postoperativen Jahr in einer Kreuztabelle.

Bei insgesamt 58 Patienten (68,23%) kam es zu einer Verbesserung der Bewertung nach MAS. Bei 24 Patienten (28,23%) wurde postoperativ derselbe Wert ermittelt. Nur 3 Patienten (3,53%) verschlechterten sich. 10 Patienten erhielten präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 12 Monate nach der SDR waren es 42, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Der Spitzenwert von drei lag präoperativ bei 12 Kindern vor und wurde nach der Operation nur noch bei 2 Patienten gemessen.

Ähnliche Ergebnisse ergeben sich bei der MAS der Adduktoren der linken Körperhälfte. Bei insgesamt bei 61 Patienten (71,76%) kam es zu einer Verbesserung der Einteilung

nach MAS. Bei 19 Patienten (22,35%) wurde postoperativ derselbe Wert ermittelt. Nur 5 Patienten (5,88%) wurden auf der MAS in eine höhere Stufe eingeteilt und verschlechterten sich damit. 8 Patienten erhielten präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 12 Monate nach der SDR waren es 45, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Der höchste erhobene Wert von drei lag präoperativ bei 13 Kindern vor, und wurde nach der Operation nur noch bei 2 Patienten gemessen.

In allen Kreuztabellen der MAS gilt folgende Legende: 0= 0; 1=1; 2= 1+; 3= 2; 4=3; 5=4

Count		Crosstab					Total
		12-Add-re					
		0	1	2	3	4	
prae-Add-re	0	10	0	0	0	0	10
	1	14	5	0	0	0	19
	2	8	5	3	2	1	19
	3	8	12	0	5	0	25
	4	2	3	2	4	1	12
Total		42	25	5	11	2	85

Abb. 17: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den rechten Adduktoren im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

Count		Crosstab					Total
		12-Add-li					
		0	1	2	3	4	
prae-Add-li	0	6	2	0	0	0	8
	1	19	4	0	0	0	23
	2	6	3	3	2	0	14
	3	11	9	1	5	1	27
	4	3	2	5	2	1	13
Total		45	20	9	9	2	85

Abb. 18: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den linken Adduktoren im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

Bei 59 Patienten erfolgte zwei Jahre postoperativ eine vollständige Untersuchung der Spastik nach MAS.

Abb. 19 zeigt die Veränderungen der MAS der rechten Körperhälfte nach zwei Jahren in einer Kreuztabelle. Insgesamt verbesserten sich 42 (71,1%) der Kinder. 12 (20,3%) blieben unverändert und nur 5 (8,47%) verschlechterten sich. 10 Patienten erhielten präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 24 Monate nach der SDR waren es 35, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Der höchste erhobene Wert von drei lag präoperativ bei 9 Kindern vor, und wurde nach der Operation nur noch bei einem Patienten gemessen.

Abb. 20 zeigt die Reduktion der Spastik der linken Körperhälfte nach zwei Jahren. Insgesamt verbesserten sich 45 (76,27%) der Kinder. 11 (18,64%) blieben unverändert und nur 3 (5%) verschlechterten sich. 7 Patienten erhielten präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 24 Monate nach der SDR waren es 36, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Der höchste erhobene Wert von drei lag präoperativ bei 10 Kindern vor, und wurde nach der Operation nur noch bei einem Patienten gemessen.

Die beschriebene Verbesserung der MAS nach 24 Monaten war für beide Körperhälften signifikant ($p < 0,00625$, nach Bonferroni-Korrektur der Signifikanzniveaus).

Crosstab							
Count		24-Add-re					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Add-re	0	8	2	0	0	0	10
	1	12	2	1	0	0	15
	2	6	4	0	2	0	12
	3	6	5	1	1	0	13
	4	3	2	1	2	1	9
Total		35	15	3	5	1	59

Abb. 19: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den rechten Adduktoren im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.

Crosstab							
Count		24-Add-li					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Add-li	0	5	2	0	0	0	7
	1	16	3	0	0	0	19
	2	5	2	0	1	0	8
	3	7	4	2	2	0	15
	4	3	3	2	1	1	10
Total		36	14	4	4	1	59

Abb. 20: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den linken Adduktoren im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.

Ischiocrurale Muskulatur (Hamstring Muskulatur)

85 Patienten erhielten eine vollständige präoperative sowie ein Jahr postoperative Evaluation der Spastik der Hamstring Muskulatur beidseits nach MAS. In Abb. 21 wird die Veränderung der MAS der rechten Körperhälfte im ersten postoperativen Jahr in einer Kreuztabelle dargestellt. 69 Patienten (81,18%) verbesserten sich nach MAS im ersten Jahr nach der SDR. Bei 15 Patienten (17,65) wurde postoperativ derselbe Wert ermittelt. Nur 1 Kind (1,17%) erhielt einen höheren Wert.

Präoperativ lag bei der ischiocruralen Muskulatur von nur 2 Kindern kein erhöhter

Muskeltonus und somit ein Wert von 0 auf der MAS vor. 12 Monate nach der SDR waren es 36, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Der schlechteste präoperative Wert von drei lag bei 15 Kindern vor. 12 Monate nach der Operation reduzierte sich die Spastik soweit, dass nur noch 2 Patienten einen Wert von drei erhielten.

Für die linke Körperhälfte ergaben sich nahezu identische Ergebnisse in der Reduktion der Spastik (Abb. 22). 71 Patienten (83,53%) verbesserten sich nach MAS im ersten Jahr nach der SDR. Bei 11 Patienten (12,94%) wurde postoperativ derselbe Wert ermittelt. Nur 3 Patienten (3,53%) verschlechterten sich auf der MAS. Es fällt auf, dass präoperativ nur bei 2 Kindern kein erhöhter Muskeltonus der linken Hamstring Muskulatur (MAS 0) festgestellt wurde. 12 Monate nach Durchführung der SDR waren es 35 Kinder, bei denen keine Spastik nach MAS vorlag.

		12-Isch-re					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Isch-re	0	2	0	0	0	0	2
	1	6	3	0	0	0	9
	2	13	8	6	0	1	28
	3	13	9	6	3	0	31
	4	2	6	5	1	1	15
Total		36	26	17	4	2	85

Abb. 21: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der rechten ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

		12-Isch-li					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Isch-li	0	2	0	0	0	0	2
	1	3	3	1	0	0	7
	2	18	10	5	0	0	33
	3	10	9	5	1	2	27
	4	2	7	4	3	0	16
Total		35	29	15	4	2	85

Abb. 22: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

Bei 58 Patienten erfolgte 24 Monate nach Durchführung der SDR eine vollständige postoperative Evaluation der Hamstring Muskulatur nach MAS.

Abb. 23 zeigt die Veränderungen der MAS der rechten Seite nach zwei Jahren in einer Kreuztabelle. Insgesamt verbesserten sich 47 (81,03%) der Kinder. 9 (15,52%) blieben unverändert und 2 (3,45%) verschlechterten sich. 2 Patienten erhielten präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 24 Monate nach der SDR waren es 34, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Der höchste erhobene Wert von drei lag präoperativ bei 10 Kindern vor, und wurde nach der Operation nur noch bei einem Patienten gemessen.

Ähnliche Ergebnisse wurden bei der Hamstring Muskulatur der linken Seite erzielt.

Bei der linken Hamstring Muskulatur ergibt sich ein ähnliches Bild wie auf der rechten Seite. Es verbesserten sich insgesamt 46 (79,31%) der Kinder. 9 (15,52%) blieben unverändert und nur 3 (5,17%) verschlechterten sich (Abb. 24). 2 Patienten erhielten präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 24 Monate nach der SDR waren es 32, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Der höchste erhobene Wert von drei lag präoperativ bei 10 Kindern vor, und wurde nach der Operation nur noch bei 2 Patienten gemessen.

Die beschriebene Verbesserung der ischiocruralen Muskulatur nach 24 Monaten war für beide Körperhälften signifikant ($p < 0,00625$, nach Bonferroni-Korrektur der Signifikanzniveaus).

		24-Isch-re					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Isch-re	0	2	0	0	0	0	2
	1	5	1	1	0	0	7
	2	9	3	2	1	0	15
	3	16	3	2	3	0	24
	4	2	4	2	1	1	10
Total		34	11	7	5	1	58

Abb. 23: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der rechten ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.

		24-Isch-li					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Isch-li	0	1	1	0	0	0	2
	1	1	3	1	0	0	5
	2	12	3	2	0	0	17
	3	15	4	2	2	1	24
	4	3	2	3	1	1	10
Total		32	13	8	3	2	58

Abb. 24: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.

Wadenmuskulatur (Musculus gastrocnemius)

Eine vollständige präoperative Evaluation der Spastik der Wadenmuskulatur nach MAS erfolgte bei 59 Patienten.

Abb. 25 zeigt die Entwicklung der MAS im ersten postoperativen Jahr nach SDR in einer Kreuztabelle.

Bei 50 Patienten (84,75%) verbesserte sich die Spastik der Wadenmuskulatur nach MAS im ersten Jahr nach Durchführung der SDR. Bei 4 Patienten (6,78%) wurde postoperativ derselbe Wert ermittelt. Nur 5 Kinder (8,47%) verschlechterten sich.

Es fällt auf, dass sich vor allem Kinder in den Gruppen 3 und 4 mit der größten spastischen Aktivität verbesserten. Präoperativ erhielten 24 Kinder einen Wert von drei oder vier. 12 Monate nach SDR waren es nur noch 2 Kinder in diesen Gruppen.

Für die linke Körperhälfte zeigten sich ähnliche Ergebnisse (Abb. 26).

47 Patienten (79,66%) verbesserten sich nach MAS im ersten Jahr nach der SDR. Bei 9 Patienten (15,25%) wurde postoperativ derselbe Wert ermittelt. Nur 3 Patienten (5,08%) verschlechterten sich auf der MAS.

		12-Gastroc-re					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Gastroc-re	0	1	0	0	0	0	1
	1	3	1	2	1	1	8
	2	4	3	0	1	0	8
	3	13	1	3	1	0	18
	4	8	8	3	2	1	22
	5	0	0	0	2	0	2
Total		29	13	8	7	2	59

Abb. 25: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der rechten Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

		12-Gastroc-li					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Gastroc-li	0	1	0	0	0	0	1
	1	5	3	1	2	0	11
	2	2	1	1	0	0	4
	3	7	6	0	3	0	16
	4	13	5	3	2	1	24
	5	1	1	1	0	0	3
Total		29	16	6	7	1	59

Abb. 26: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.

Zwei Jahre postoperativ blieb die Reduktion der Spastik in der Wadenmuskulatur weitestgehend bestehen. 24 Monate nach Durchführung der SDR wurde bei 36 Patienten die MAS der rechten und bei 35 Patienten der linken Körperhälfte erhoben.

Abb. 27 zeigt die Veränderungen der MAS nach zwei Jahren in einer Kreuztabelle. Insgesamt verbesserten sich rechtsseitig 30 (83,33%) der Kinder. 3 (8,33%) blieben unverändert und 3 (8,33%) verschlechterten sich. Keiner der Patienten erhielt präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 24 Monate nach der SDR waren es 19, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Den Wert mit der höchsten spastischen Aktivität von 3 oder 4 erhielten präoperativ 13 Patienten. Zwei Jahre nach der SDR war es nur noch ein Kind mit einem Wert von 3.

Für die linke Körperhälfte ergaben sich ähnliche Ergebnisse (Abb. 28). 26 Patienten

(74,29%) verbesserten sich nach MAS im ersten Jahr nach der SDR. Bei 5 Patienten (14,29%) wurde postoperativ derselbe Wert ermittelt. Nur 4 Patienten (11,11%) verschlechterten sich auf der MAS. Keiner der Patienten erhielt präoperativ den niedrigsten Wert von 0. 24 Monate nach der SDR waren es 15, bei denen keine Spastik zu ermitteln war. Den Wert mit der höchsten spastischen Aktivität von 3 oder 4 erhielten präoperativ 12 Patienten. Zwei Jahre nach der SDR waren es nur noch drei Kinder mit einem Wert von 3.

Count		24-Gastroc-re					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Gastroc-re	1	6	1	1	0	0	8
	2	1	1	1	1	0	4
	3	7	0	2	1	1	11
	4	5	5	0	2	0	12
	5	0	0	0	1	0	1
Total		19	7	4	5	1	36

Abb. 27: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.

Count		24-Gastroc-li					Total
		0	1	2	3	4	
prae-Gastroc-li	1	4	3	2	0	0	9
	2	0	3	0	0	0	3
	3	6	1	1	1	2	11
	4	5	3	1	1	1	11
	5	0	1	0	0	0	1
Total		15	11	4	2	3	35

Abb. 28: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.

Test Statistics ^b				
	12-Gastroc-re - prae-Gastroc-re	12-Gastroc-li - prae-Gastroc-li	24-Add-re - prae-Add-re	24-Add-li - prae- Add-li
Z	-5,855 ^a	-5,841 ^a	-5,409 ^a	-5,749 ^a
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000

Test Statistics ^b				
	24-Isch-re - prae-Isch-re	24-Isch-li - prae- Isch-li	24-Gastroc-re - prae-Gastroc-re	24-Gastroc-li - prae-Gastroc-li
Z	-6,034 ^a	-6,008 ^a	-4,682 ^a	-4,265 ^a
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000

a. Based on positive ranks.
b. Wilcoxon Signed Ranks Test

Abb. 29: Signifikanzniveaus für Veränderungen der MAS nach Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest

3.5. GMFM

Gesamt GMFM

Die vollständige präoperative, sowie die 12 Monate postoperative Evaluation der GMFM-88 erfolgte bei 77 Patienten. Ein Jahr nachdem sich die Kinder einer SDR unterzogen hatten, stieg die GMFM von durchschnittlich 79,3 um 3,69 (95%-Konfidenzintervall [2,019; 5,370]) auf 83,0.

24 Monate postoperativ lagen uns die Untersuchungsergebnisse von 56 Patienten vor. Die GMFM stieg um 7,17 (95%-Konfidenzintervall [4,937; 9,403]) von 78,93 auf 86,1. (Abb. 32)

Ein postoperativer Verlauf der GMFM Veränderungen über 12 und 24 Monate konnte bei 50 Patienten vollständig erfasst werden und ist in Abb. 30 dargestellt.

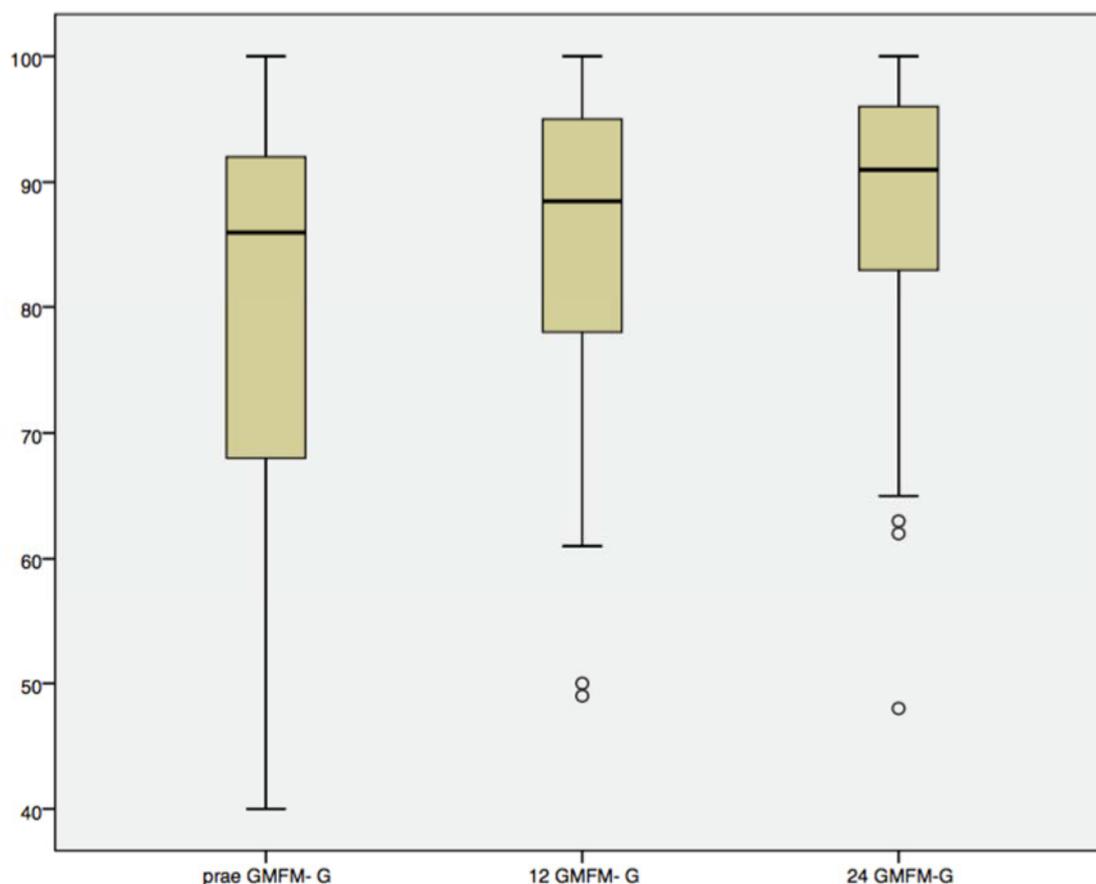


Abb. 30: Verlauf der GMFM Evaluation präoperativ, sowie 12 und 24 Monate postoperativ

Zieldimension der GMFM

Die festgelegte Zieldimension der GMFM wurde bei 78 Patienten präoperativ sowie 12 Monate postoperativ vollständig untersucht. Ein Jahr nach Durchführung der SDR stieg die GMFM-Zieldimension von durchschnittlich 57,5 um 8,45 (95%-Konfidenzintervall [5,878; 11,012]) auf 65,9.

24 Monate postoperativ erfolgte eine Evaluierung der GMFM-Zieldimension von 57 Patienten. Es kam zu einem Anstieg um 14,17 (95%-Konfidenzintervall [10,092; 18,241]) von 58,5 auf 72,67 (Abb. 32).

Ein postoperativer Verlauf über 12 und 24 Monate wurde bei 50 Patienten vollständig evaluiert und ist in Abb. 31 dargestellt.

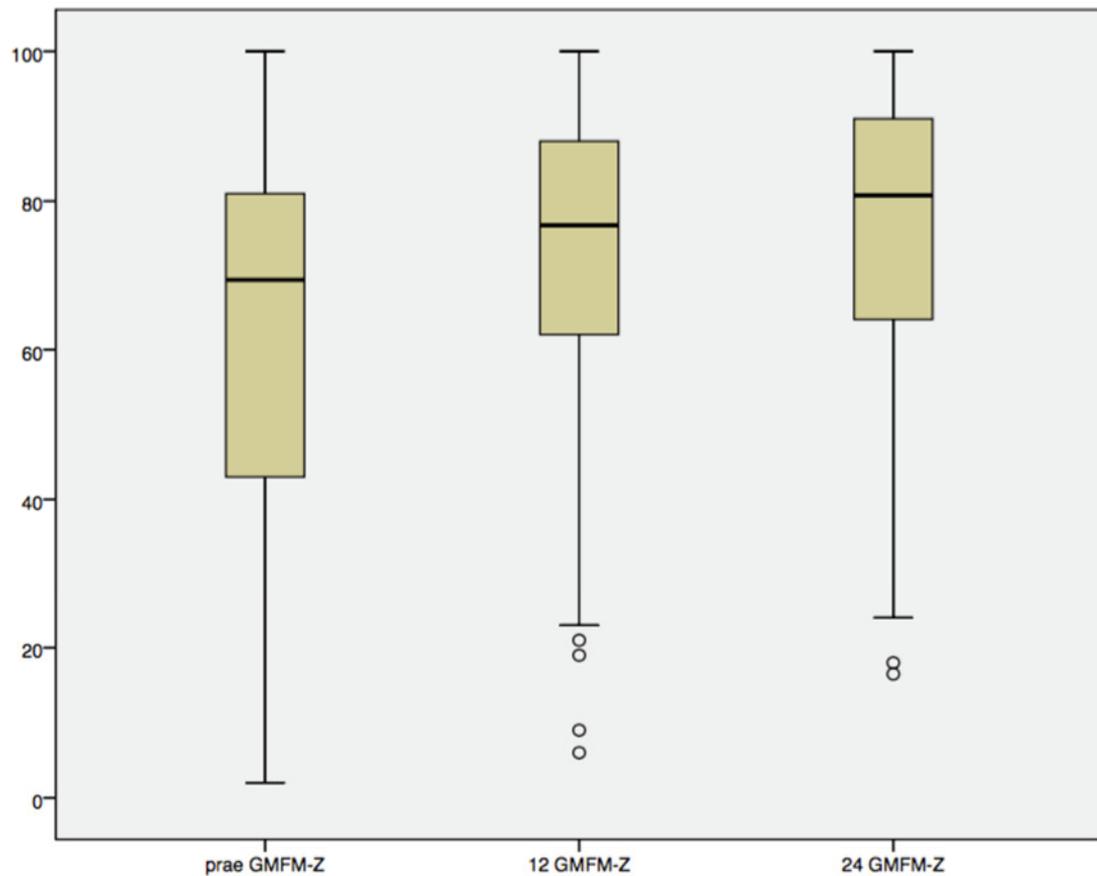


Abb. 31: Zieldimension der GMFM Evaluation im Verlauf präoperativ, sowie 12 und 24 Monate postoperativ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
diffGMFMGprae12	77	3,6948	7,38159	,84121
diffGMFMGprae24	56	7,1696	8,33900	1,11435
diffGMFMZprae12	78	8,4487	11,40335	1,29117
diffGMFMZprae24	57	14,1667	15,35628	2,03399
One-Sample Test				
	Test Value = 0			
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference
diffGMFMGprae12	4,392	76	,000	3,69481
diffGMFMGprae24	6,434	55	,000	7,16964
diffGMFMZprae12	6,543	77	,000	8,44872
diffGMFMZprae24	6,965	56	,000	14,16667

Abb. 32: Differenzen der GMFM Untersuchungen zu verschiedenen Zeitpunkten sowie Signifikanzniveaus

3.6. Manuelle Muskelkraft Testung

Sprunggelenk

Die Kraft der Dorsalextensoren im rechten Sprunggelenk profitierte von allen Muskelgruppen am stärksten von der SDR.

Bei 41 Kindern konnte präoperativ, sowie 24 Monate postoperativ eine vollständige Evaluierung der manuellen Muskelkraft der rechten Dorsalextension durchgeführt werden (Abb. 33). 23 (56,1%) der Patienten verbesserten sich nach der SDR. 14 (34,1%) erhielten denselben Wert. Nur 4 (9,8%) verschlechterten sich postoperativ. Den niedrigsten Wert von 1 erhielten präoperativ 8 Patienten. 2 Jahre nach SDR waren es nur noch 2. Den bestmöglichen Wert von 5 erreichten nach der Operation 6 Patienten im Vergleich zu nur einem Patienten vor Durchführung der SDR. Diese Verbesserung war statistisch signifikant ($p < 0,00625$, nach Bonferroni-Korrektur der Signifikanzniveaus).

Für die linke Körperhälfte lag bei 41 eine vollständige Evaluation der MFT nach 24 Monaten vor (Abb. 34). Es zeigte sich auch hier postoperativ eine Verbesserung: Bei 23 (56,1%) der Patienten nahm die Muskelkraft zu. 14 (34,1%) blieben unverändert. Nur 4 (9,8%) der Kinder erhielten nach SDR einen schlechteren Wert. Während die volle Muskelkraft gegen Widerstand - damit eine Bewertung von 5 - präoperativ bei keinem Patienten vorlag, konnte zwei Jahre nach der Operation bei 10 Patienten der höchste MFT Wert ermittelt werden. Die beschriebene Verbesserung war statistisch signifikant ($p < 0,00625$, nach Bonferroni-Korrektur der Signifikanzniveaus) (Abb. 45).

Count		24-DE re						Total
		0	1	2	3	4	5	
prae-DE re	1	1	0	2	0	5	0	8
	2	1	1	1	3	1	0	7
	3	0	0	0	7	6	2	15
	4	0	0	0	0	6	4	10
	5	0	0	0	0	1	0	1
Total		2	1	3	10	19	6	41

Abb. 33: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Sprunggelenk im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

Count		24-DE li						Total
		0	1	2	3	4	5	
prae-DE li	1	1	0	1	2	1	1	6
	2	0	2	1	1	3	3	10
	3	0	0	0	6	5	2	13
	4	0	0	0	1	7	4	12
Total		1	2	2	10	16	10	41

Abb. 34: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Sprunggelenk im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

Bei 33 Patienten lag 24 Monate postoperativ eine vollständige Evaluation der MFT der Plantarflexion beider Körperhälften vor (Abb.35). Rechtsseitig lag nach der SDR bei 15 (45,5%) Patienten ein besserer Wert vor. 7 (21,2%) Patienten blieben unverändert. Bei 11 (33,3%) wurde nach zwei Jahren ein schwächerer Wert dokumentiert.

Für die linke Körperhälfte ergab sich ein ähnliches Bild. Bei 13 (39,4%) Patienten lag postoperativ ein besserer Wert nach MFT vor. Zu einer Verschlechterung kam es bei ebenso vielen. 7 (21,2%) Kinder blieben zwei Jahre postoperativ unverändert.

prae-PF re * 24-PF re Crosstabulation							
Count		24-PF re					Total
		1	2	3	4	5	
prae-PF re	0	0	1	0	1	0	2
	1	2	3	1	1	0	7
	2	1	0	4	1	0	6
	3	0	2	1	3	0	6
	4	0	4	2	1	0	7
	5	0	0	1	1	3	5
Total		3	10	9	8	3	33

Abb. 35: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Sprunggelenk (Plantarflexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

prae-PF li * 24-PF li Crosstabulation							
Count		24-PF li					Total
		1	2	3	4	5	
prae-PF li	0	1	1	0	1	0	3
	1	1	1	1	1	0	4
	2	1	0	4	1	0	6
	3	0	4	2	2	0	8
	4	0	3	2	1	0	6
	5	0	0	2	1	3	6
Total		3	9	11	7	3	33

Abb. 36: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Sprunggelenk (Plantarflexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

Kniegelenk

Abb. 37 zeigt die Veränderungen der MFT der Extension im rechten Kniegelenk 24 Monate nach Durchführung der SDR. Eine vollständige Evaluation der rechten Körperhälfte erfolgte bei 46 Kindern. Eine Verbesserung der Muskelkraft konnte postoperativ bei 20 (43,5%) Patienten erzielt werden. 22 (47,8%) blieben unverändert und bei nur 4 (8,7%) kam es zu einer Verschlechterung der MFT. Die volle Muskelkraft gegen Widerstand, somit der Maximalwert von 5 lag präoperativ bei 13 Kindern vor.

Zwei Jahre nach SDR waren mit 27 Patienten mehr als doppelt so viele. Der schwächste gemessene Wert von 3 lag präoperativ bei 10 Patienten vor. Postoperativ waren es nur noch 6.

Für die linke Körperhälfte ergibt sich ein ähnliches Bild (Abb. 38). Eine vollständige Evaluation erfolgte bei 45 Patienten. Bei 18 (40%) der Kinder kam es zu einer Verbesserung der Bewertung nach MFT. 24 (53,3%) blieben unverändert und nur 3 (6,7%) erhielten 24 Monate nach SDR einen schlechteren Wert. Der Maximalwert von 5 lag präoperativ bei 14 Patienten vor und konnte zwei Jahre nach der Operation bei doppelt so vielen Patienten gemessen werden. Der schwächste erfasste Wert von 3 bei war präoperativ bei 8 Patienten zu ermitteln, 24 Monate später nur noch bei 4.

Die beschriebene Verbesserung der Extension im Kniegelenk beider Körperhälften war statistisch signifikant ($p < 0,00625$, nach Bonferroni-Korrektur der Signifikanzniveaus) (Abb.45).

prae-KG EX re * 24-KG-EX re Crosstabulation					
Count		24-KG-EX re			Total
		3	4	5	
prae-KG EX re	3	3	5	2	10
	4	3	7	13	23
	5	0	1	12	13
Total		6	13	27	46

Abb. 37: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Kniegelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

prae-KG EX li * 24-KG-EX li Crosstabulation					
Count		24-KG-EX li			Total
		3	4	5	
prae-KG EX li	3	1	4	3	8
	4	3	9	11	23
	5	0	0	14	14
Total		4	13	28	45

Abb. 38: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Kniegelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

Bei den Untersuchungen der Flexoren im Kniegelenk lagen uns 24 Monate postoperativ die vollständigen Daten von 46 Kindern vor (Abb.39).

Bei Betrachtung der rechten Seite zeigte sich postoperativ bei 13 (28,3%) eine Verbesserung der Muskelkraft nach MFT. 24 (52,2%) erhielten einen unveränderten Wert. Bei 9 (19,6%) Patienten kam es zwei Jahre nach SDR zu einer Verschlechterung.

Für die linke Seite ergab sich ein ähnliches Bild (Abb. 40). Bei 9 (19,6%) Patienten kam es zu einer Verbesserung nach 24 Monaten. 22 (47,8%) blieben unverändert und 10 (21,7%) erhielten postoperativ einen niedrigeren Wert.

prae-KG FLEX re * 24-KG-FLEX re Crosstabulation					
Count		24-KG-FLEX re			Total
		3	4	5	
prae-KG FLEX re	2	2	0	0	2
	3	7	8	0	15
	4	7	14	3	24
	5	1	1	3	5
Total		17	23	6	46

Abb. 39: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Kniegelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

prae-KG FLEX li * 24-KG-FLEX li Crosstabulation					
Count		24-KG-FLEX li			Total
		3	4	5	
prae-KG FLEX li	2	1	0	0	1
	3	10	6	0	16
	4	8	14	2	24
	5	2	0	3	5
Total		21	20	5	46

Abb. 40: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Kniegelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

Hüftgelenk

Die MFT der Hüftgelenksextension beider Körperhälften von insgesamt 37 Kindern wurde präoperativ, sowie 24 Monate postoperativ vollständig untersucht (Abb.41). Rechtsseitig kam es bei 17 (45,9%) zu einer Verbesserung der Muskelkraft. 11 (29,7%) der Patienten blieben unverändert und bei 9 (24,3%) kam es zu einer Verschlechterung des MFT Wertes.

Die MFT der linken Hüftgelenksextension zeigte bessere Ergebnisse (Abb.42). Sie stieg 24 Monate nach SDR bei 18 (48,6%) Patienten an. 15 (40,5%) blieben unverändert. Bei nur 4 (10,8%) lag postoperativ ein schwächerer Wert vor.

prae-HG EX re * 24-HG-EX re Crosstabulation						
Count		24-HG-EX re				Total
		2	3	4	5	
prae-HG EX re	1	1	0	0	0	1
	2	0	3	1	0	4
	3	2	7	6	3	18
	4	0	7	4	3	14
Total		3	17	11	6	37

Abb. 41: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Hüftgelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

prae-HG EX li * 24-HG-EX li Crosstabulation						
Count		24-HG-EX li				Total
		2	3	4	5	
prae-HG EX li	2	1	3	2	0	6
	3	1	9	5	4	19
	4	0	3	5	4	12
Total		2	15	12	8	37

Abb. 42: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Hüftgelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

Die MFT der Flexoren im Hüftgelenk beider Körperhälften von insgesamt 47 Kindern wurde präoperativ, sowie 24 Monate postoperativ vollständig untersucht (Abb.43). Rechtsseitig kam es bei 18 (38,3%) der Patienten zu einer Verbesserung der Muskelkraft. 19 (40,4%) blieben unverändert und 10 (21,3%) erhielten postoperativ einen schlechteren Wert.

Für die linke Körperhälfte zeigte sich bei 16 (34%) Patienten eine verbesserte Muskelkraft. Mit 22 (46,8%) blieb der Großteil der Kinder 24 Monate postoperativ unverändert. Bei 9 (19,1%) kam es zu einem schlechteren Wert (Abb. 44).

prae-HG FLEX re * 24-HG-FLEX re Crosstabulation						
Count		24-HG-FLEX re				Total
		2	3	4	5	
prae-HG FLEX re	3	0	4	4	1	9
	4	1	3	11	13	28
	5	0	1	5	4	10
Total		1	8	20	18	47

Abb. 43: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Hüftgelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

prae-HG FLEX li * 24-HG-FLEX li Crosstabulation						
Count		24-HG-FLEX li				Total
		2	3	4	5	
prae-HG FLEX li	3	0	3	5	1	9
	4	1	2	14	10	27
	5	0	1	5	5	11
Total		1	6	24	16	47

Abb. 44: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Hüftgelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ

Test Statistics ^c				
	24-KG-EX re - prae-KG EX re	prae-KG EX li - 24-KG-EX li	prae-DE re - 24-DE re	24-DE li - prae-DE li
Z	-3.283 ^a	-3.274 ^b	-3.492 ^b	-3.860 ^a
Asymp. Sig. (2- tailed)	.001	.001	.000	.000
a. Based on negative ranks. b. Based on positive ranks. c. Wilcoxon Signed Ranks Test				

Abb. 45: Signifikanzniveaus für Veränderungen der MFT nach Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest

4. Diskussion

4.1. SDR Technik

Die SDR ist die einzige Therapiemethode, welche eine schwere Spastik dauerhaft reduziert und damit der destruktiven Dynamik dieser Erkrankung entgegenwirkt. Außerhalb Europas ist die SDR als effektives und nebenwirkungsarmes Verfahren etabliert. (42-44) Vor dem Hintergrund des schwierigen Starts dieses 1907 in Deutschland durch Otfried Förster entwickelten Operationsverfahrens persistiert in Europa allerdings eine aus heutiger Sicht unbegründet anhaltende Skepsis gegenüber der SDR. Schwerwiegende Komplikationen wie Lähmungen und Gefühlsstörungen waren historisch die Folge der erst sehr rudimentär entwickelten makroskopischen Operationstechnik sowie der zu radikalen Durchtrennung ganzer sensorischer Wurzeln. Sie sind seit vielen Jahrzehnten durch die hochselektive, partielle Durchtrennung und eine gewebeschonendere (mikroskopische) Technik weitestgehend eliminiert.

Dies gilt mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für das Risiko postoperativer Deformitäten der Wirbelsäule, wenn die noch weithin angewandte mehrsegmentale Technik durch den hier vorgestellten monosegmentalen Zugang mit Rekonstruktion aller stabilitätsrelevanten Strukturen ersetzt wird. Es gibt derzeit keine Arbeit, die das Risiko spinaler Deformitäten nach SDR hinsichtlich der operativen Zugangsmethode vergleicht. Der multisegmentale Zugang mit einer Laminektomie über mindestens fünf Segmente (meist L1 – S1) ist allerdings auch im Zusammenhang mit anderen Diagnosen gut untersucht und zeigt ein deutliches Risiko für die Entstehung behandlungsbedürftiger Deformitäten der Wirbelsäule (19, 20, 69). Auch die konventionelle Laminoplastie-Technik mehrerer Segmente, bei der die resezierten Laminae wieder in ihrer ursprünglichen anatomischen Lage befestigt werden, senkt dieses Risiko nicht (20, 72). Steinbok beschreibt in seiner Langzeit-Studie eine Skolioseinzidenz von bis zu 55% bei Kindern, die sich einer langstreckigen SDR unterzogen (19). Die Arbeitsgruppe wechselte daraufhin ebenfalls von langstreckiger auf monosegmentale Technik - Langzeitergebnisse beider Patientenkollektive sind noch nicht publiziert. T.S. Park und J.M. Johnston beschreiben bei der ersten minimal invasiv operierten Serie von Patienten keine postoperativen Deformitäten (26). Bis zur Vorlage einer systematischen Untersuchung des Langzeitverlaufes darf von der Analogie zu anderen spinalen

Eingriffen ausgegangen werden, die oben geschilderte Erfahrungen bestätigen (71, 86, 87).

Die in unserer Arbeit beschriebene Modifikation nach E.J. Haberl hat das Ziel die Integrität der Wirbelsäule wiederherzustellen. Da das intradurale Vorgehen exakt der minimal invasiven SDR nach T.S. Park entspricht, sind keine Unterschiede hinsichtlich der funktionellen Ergebnisse zu erwarten. Die Zugangs-Modifikation hat somit keinen Einfluss auf die Zielparameter unserer Arbeit.

Unser Patientenkollektiv wurde in einer bereits veröffentlichten Studie unter der Fragestellung postoperativer spinaler Deformitäten untersucht. Dabei zeigten 10% im Verlauf die Entwicklung einer milden Skoliose, was der natürlichen Inzidenz bei Patienten mit einer spastischen CP entspricht und verglichen mit den Resultaten der multisegmentalen SDR deutlich niedriger erscheint (20, 88). Diese Ergebnisse sind aufgrund der Aktualität der Modifikation noch kurzfristig und bedürfen einer Bestätigung mit längerer Nachuntersuchungszeit.

In unserer Arbeit verzichteten wir auf die Erfassung chirurgischer Komplikationen. Der postoperativ entstandene Kontrollverlust durch die beschriebene Durchtrennung der Nervenwurzelanteile erlaubt es uns nicht festzustellen, ob bleibende Schäden als Folge der SDR entstanden sind. Funktionelle Störungen können sich auf Grund der Operationsmethode im stationären Setting oder bei Entlassung nicht feststellen lassen. Unmittelbare, offensichtliche Komplikationen wie Wundheilungsstörungen, Liquoristeln, Nachblutungen und Infektionen traten in keinem Fall auf. Die Frage nach langfristigen Folgen der Operation konnte mit dieser Arbeit beantwortet werden.

4.2. Untersuchungen und Ergebnisse

Für die Messung des Therapieerfolges nach einer SDR verwendeten wir mit MAS, MFT sowie GMFM gängige Evaluationsinstrumente, die in vielen Langzeitstudien Anwendung finden (42-44, 78).

MFT und MAS sind standardisierte und reproduzierbare Messmethoden. Sie bleiben allerdings als manuelle Testungen in gewisser Weise untersucherabhängig (63, 85). Aufgrund des wertvollen Informationsgehaltes sind sie weiterhin Bestandteil unseres

Untersuchungsstandards. Um eine Verzerrung zu minimieren wurden unsere Patienten alle sowohl präoperativ als auch 12 und 24 Monate postoperativ durch dieselben Teams im selben räumlichen Umfeld und zu ähnlichen Tageszeiten untersucht.

Die GMFM wird als objektives und sicher reproduzierbares Evaluationsinstrument beschrieben. Sie gilt aktuell als Goldstandard (89, 90) in der Beurteilung der motorischen Funktionen im Kindesalter und ist in vielen weiteren Publikationen validiert (20, 78, 83, 84).

Die vorliegende Arbeit bestätigt, dass unser Patientenkollektiv mit der Hauptdiagnose einer bilateralen, spastischen CP von der SDR profitiert: Die Operationsmethode bewirkt eine effektive und dauerhafte Reduktion der Spastik ohne dabei relevante Muskelschwäche zu erzeugen. Wir bestätigen damit die Ergebnisse vieler anderer Studien außerhalb Deutschlands (42-44, 58, 78).

4.3. Ergebnisse im Vergleich zur langstreckigen Operationsmethode der SDR

Ein Interesse unserer Untersuchung lag in der Vergleichbarkeit unserer funktionellen Ergebnisse mit denen der langstreckigen Operationsmethode. Hierfür war es nötig - analog zu bereits publizierten Ergebnissen der Arbeitsgruppe um Paul Steinbok - für die MAS als kategoriale, nicht kontinuierliche Variable Mittelwerte zu bilden. Diese Mittelwerte dienten dem Vergleich und spielten in der weiteren Auswertung unserer Ergebnisse keine weitere Rolle. Wir konnten in einem unkontrollierten Vergleich zeigen, dass die von uns erzielte Reduktion der MAS der linken Adduktoren mit 1,306 im 95%-Konfidenzintervall der 2015 veröffentlichten Ergebnisse von Steinbok liegt (43). Auch in den Adduktoren der rechten Körperhälfte konnten wir eine Reduktion der Spastik um 1,224 erreichen. Die Ergebnisse der rechten Körperhälfte verpassen das beschriebene 95%-Konfidenzintervall minimal um 0,076 und sind somit gut mit denen von Paul Steinbok zu vergleichen. Mit der Einschränkung, dass von der kanadischen Arbeitsgruppe nur Ergebnisse der Adduktoren zum Vergleich zur Verfügung stehen, werten wir dieses Ergebnis als ersten Hinweis auf die funktionelle Gleichwertigkeit der Methoden. Der Vergleich weiterer Muskelgruppen wäre wünschenswert. Die ausschließliche Untersuchung der Adduktoren begründet die Arbeitsgruppe mit der funktionellen Relevanz dieser Muskelgruppe und beschreibt sie, ähnlich wie andere

Publikationen, als repräsentativ für den Gesamtgrad der Spastik der unteren Extremitäten (43, 91). Diese Annahme konnten wir aufgrund unserer Ergebnisse mit variierenden MAS für die verschiedenen Muskelgruppen nicht bestätigen.

Aufgrund der Begrenztheit der Aussagekraft unkontrollierter Vergleiche an zwei unabhängigen Kliniken mit unterschiedlichen Nachuntersuchern wird eine Kooperation zwischen Zentren mit unterschiedlichen Zugangsmethoden angestrebt, um Evaluationsmethoden und Nachuntersuchungen präziser abzustimmen.

4.4. GMFCS

In unserer Kohorte kam es bei nur zwei der Kinder zu einer Verschlechterung des GMFCS. 8,5% der Patienten verbesserten sich im ersten Jahr postoperativ um ein Level. Nach 24 Monaten war eine Verbesserung bei 20,3% festzustellen. Besonders Kinder mit einem präoperativen GMFCS Level III profitierten von der Operation (Abb. 16). Ein Anstieg um mehr als ein Level gelang nicht. Unsere Ergebnisse entsprechen den bisher vorliegenden Erfahrungen mit der Operationsmethode. Die SDR bewirkt in der Regel eine Verbesserung innerhalb des präoperativ ermittelten GMFCS Levels. Ein Wechsel des Levels gelingt eher selten (78, 83, 84). Die chinesische Arbeitsgruppe um S.H. Chan zeigt bei ihrer Kohorte in Hong Kong im ersten Jahr postoperativ ein ähnliches Ergebnis. In ihrer Untersuchung verbesserten sich 4,8% der Patienten, während der Großteil stabil blieb (85).

Einige Publikationen berichten über Verbesserungen bei bis zu 34% der Patienten. Hierbei handelt es sich allerdings um Langzeitergebnisse mit einer Nachverfolgung über mindestens 10 Jahre nach Durchführung der SDR (43, 82). Für einen Vergleich können erst die Langzeituntersuchungen unserer Patienten herangezogen werden.

Patienten mit einem präoperativen GMFCS Level V operierten wir auf Grund der bisherigen Indikationskriterien nicht (44). Die aktuell publizierten Ergebnisse der Kinderneurochirurgen Michael H. Vloeberghs und Harshal Ingale mit guten Erfahrungen bei schwer betroffenen Patienten (GMFCS IV-V) (60) haben die Diskussion um einen Erweiterung der Indikation mit anderer Zielsetzung eröffnet. Aus der eigenen Erfahrung mit Patienten GMFCS Level IV und V halten wir den Bedarf für gegeben.

4.5. MAS

Die minimal invasive SDR bewirkte bei unseren Patienten eine Reduktion der Spastik aller untersuchten Muskelgruppen. Bei Adduktoren und der Hamstring Muskulatur als primärer Endpunkt unserer Arbeit war diese Reduktion nach 24 Monaten statistisch signifikant:

Adduktoren (Hüftgelenksadduktoren)

Im ersten Jahr nach der SDR kam es rechtsseitig bei 68,23% der Patienten zu einer Reduktion der Adduktoren-Spastik. Für die linke Körperhälfte waren es 71,76%. 24 Monaten nach SDR verbesserten sich die Ergebnisse der MAS signifikant ($p < 0,00625$). So kam es rechtsseitig bei 71,1% und linksseitig bei 76,27% zu einer Verbesserung im MAS Level. Beim beschriebenen Vergleich der Ergebnisse zwischen unserer minimal invasiven Technik und dem von Paul Steinbok verwendeten multisegmentalen Zugang (43) konnten wir bereits zeigen, dass unsere Ergebnisse hinsichtlich einer Reduktion der Spastik in den Adduktoren nicht unterlegen sind. Die Adduktoren gelten als Muskelgruppe mit guten Langzeiterfolgen im Hinblick auf die MAS. Die Arbeitsgruppe um Kristina Tedroff konnte bei der Analyse von 15 Patienten im 10-Jahres Verlauf eine andauernde Reduktion der Spastik zeigen (82). Die Veröffentlichung der Arbeitsgruppe um Shahid Gul in Vancouver bestätigt diese Ergebnisse mit einer Verbesserung auf der MAS um 2,0 im ersten Jahr postoperativ, welche nach 10 Jahren weiterhin bestand (91).

Die kontinuierliche Ergebnisverbesserung über zwei Jahre spricht für eine nachhaltige Reduktion der Spastik und unterstreicht den Stellenwert der Operationsmethode als einzige Therapieoption, welche die destruktive Dynamik einer schweren Spastik dauerhaft aufhalten kann.

Ischiocrurale Muskulatur (Hamstring Muskulatur)

12 Monate nach SDR zeigte sich rechtsseitig bei 81,2 Patienten und linksseitig bei 83,5% der Patienten eine Reduktion der Hamstring-Spastik nach MAS. Die Verbesserung von 81,03% rechtsseitig und 79,31% linksseitig zwei Jahre nach SDR

war signifikant ($p < 0,00625$). Aus einer früheren Veröffentlichung der Arbeitsgruppe um Shahid Gul, welche die MAS der Hamstring Muskulatur isoliert analysiert, geht eine signifikante Verbesserung im ersten Jahr nach Durchführung der SDR hervor. Anders als bei den Adduktoren kam es bei ihren Patienten im Langzeitverlauf nach fünf Jahren trotz bestehender signifikanter Reduktion der Spastik zu einem Anstieg der MAS (91). Eine Untersuchung am Karolinska Institut zeigte an einer sehr kleinen Kohorte von 15 Patienten einen ähnlichen Verlauf mit einer MAS Reduktion um 1,0 nach 12 Monaten und einer darauffolgenden Verschlechterung um 1,0 nach 10 Jahren (82).

Die beschriebenen Erkenntnisse der anderen Studien machen – trotz einer anhaltenden signifikanten Reduktion der Spastik in unserer Patientenkohorte über zwei Jahre – weitere Langzeituntersuchungen der einzelnen Muskelgruppen notwendig. Mögliche Ursachen der Verschlechterung ihrer Ergebnisse wurden bisher nicht diskutiert. Zeigt sich für unsere Patienten im Verlauf nach fünf Jahren widererwarten ein ähnlicher Anstieg der Spastik nach MAS, müssen weitere Fehlerquellen analysiert werden. Hierbei würde uns vor allem der postoperative Verlauf der Rehabilitation interessieren. Sollte ein Anstieg der Spastik in vereinzelt Muskelgruppen fünf Jahre postoperativ das Ergebnis mangelnder Trainingsmöglichkeiten oder krankengymnastischer Fehler sein, ist möglicherweise ein gezielteres postoperatives Behandlungskonzept nötig. Nicht rechtzeitig erkannte strukturelle Veränderungen, wie z.B. Sehnenverkürzungen oder Deformitäten als Ursache der Verschlechterung würden eine engmaschigere Kontrolle im Langzeitverlauf notwendig machen.

Wadenmuskulatur

Im ersten Jahr nach der SDR kam es rechtsseitig bei 84,6% der Patienten zu einer Spastikreduktion Wadenmuskulatur. Für die linke Körperhälfte waren es 79,7%. 24 Monaten postoperativ hatten sich weniger Patienten verbessert als noch im ersten Jahr. Für die rechte Körperhälfte lag bei 83,3% und für die linke Körperhälfte nur noch bei 74,3% der Patienten eine Verbesserung des MAS Levels vor.

Mit Vorsicht zu bewerten ist eine bei den Untersuchungen 24 Monate postoperativ im Vergleich zum ersten Jahr evaluierte Verschlechterung der MAS Level der Wadenmuskulatur beider Seiten. Bedauerlicherweise lagen uns mit 36 Patientendatensätzen hier nur etwa die Hälfte der verfügbaren Daten anderer

Muskelgruppen vor. Dies führen wir auf die schlechtere Kooperation der Kinder bei den Messungen der MAS speziell der Wadenmuskeln zurück. In weiteren Nachuntersuchungen erhoffen wir uns daher eine größere Anzahl an verwertbaren Daten. Frühere Publikationen von Arbeiten, in denen die MAS der Wadenmuskulatur als getrennter Teil erfasst wurde, zeigen ähnliche Verläufe (91). Die Veröffentlichung der Arbeitsgruppe um Kristina Tedroff beschreibt die größte Verbesserung der MAS nach SDR in der Wadenmuskulatur mit einer signifikanten Reduktion um 3,0 im ersten Jahr postoperativ. Im Langzeitverlauf kommt es hier, ähnlich wie bei der ischiocruralen Muskulatur, zu einer Verschlechterung um 1,0 nach 10 Jahren (82).

Unsere mit einem Nachuntersuchungszeitraum von zwei Jahren noch vergleichsweise limitierte Evaluation der MAS zeigt, dass die positiven Effekte der SDR sich nicht auf einzelne Muskelgruppen begrenzen, sondern eine effektive Reduktion der Spastik der gesamten unteren Extremitäten erzielt wird. Es sind selbstverständlich weitere Follow-up Ergebnisse nötig, um die langfristige Reduktion der Spastik zu bestätigen. Unsere unterschiedlichen Erfahrungen mit der MAS verschiedener Muskeln machen deutlich, dass neben Adduktoren auch die Veränderungen anderer Muskelgruppen, wie der ischiocruralen Muskulatur und Wadenmuskulatur erfasst werden sollten.

4.6. MFT

Seit der Veröffentlichung der ersten erfolgreichen, aber von erheblicher Muskelschwäche begleiteten Ergebnisse in Deutschland durch Otfried Foerster 1908 wird die SDR fälschlicherweise heute noch oft mit einer Schwächung der Muskulatur in Verbindung gebracht. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die erreichte Spastikreduktion nicht mit einer Schwächung der Muskulatur einhergeht. Die Meisten der untersuchten Muskelgruppen verbesserten sich postoperativ oder blieben stabil. Bei keinem der Patienten kam es nach SDR zu einer Plegie oder klinisch relevanten Reduktion der Muskelkraft. Die vorliegende Arbeit bestätigt damit die Ergebnisse unserer ersten veröffentlichten Patientenserie (63).

Sprunggelenke:

Dorsalextension (Dorsalflexion)

Die Untersuchung der MFT unserer Patienten wies im postoperativen Verlauf über 24 Monate eine signifikante ($p < 0,00625$) Verbesserung der Dorsalextension in den Sprunggelenken beider Körperhälften auf. 90,2% der Kinder profitierten von der SDR oder blieben stabil. Linksseitig waren es ebenfalls 90,2% mit einer postoperativ verbesserten oder unveränderten MFT. Damit bestätigen wir die Erfahrungen anderer Arbeitsgruppen, die eine Untersuchung der Dorsalextension veröffentlicht haben (58, 91). Die Arbeitsgruppe um Shahid Gul und T.S. Park berichtet zusätzlich über einen weiteren Anstieg der Kraft in den Dorsalextensoren nach fünf Jahren (91). Wir streben weitere Langzeituntersuchungen an, um die Entwicklung der maximalen Muskelkraft zu prüfen.

Plantarflexion

Die MFT der Plantarflexoren zeigte 24 Monate postoperativ bei 2/3 der Patienten keine Schwächung der Muskulatur der rechten Körperhälfte. 1/3 verschlechterte sich rechtsseitig. Linksseitig erhielten nach SDR 39,4% eine schlechtere Bewertung der MFT. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Plantarflexion mit nur 33 vollständig nachuntersuchten Patienten die am unvollständigsten dokumentierte Muskelgruppe darstellt. Die Plantarflexion zählte auf Grund ihrer geringen klinischen Relevanz in anderen Studien nicht zu den primären Endpunkten unserer Arbeit. Es muss dennoch in weiteren Nachuntersuchungen mit größeren Fallzahlen abgeklärt werden, warum sich hier verglichen mit anderen Muskelgruppen schlechtere Ergebnisse zeigen. Analog zu unseren Ergebnissen berichteten Jack Engsberg und T.S. Park bereits 1998 von einer Spastikreduktion in den Plantarflexoren nach SDR ohne Zunahme der maximalen Kraft. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Muskelkraft in dieser Studie anders als in unserer Testung maschinell evaluiert wurde (92). Die Arbeitsgruppe um Shahid Gul und Paul Steinbok veröffentlichte in ihrer Analyse der maximalen Muskelkraft keine Ergebnisse der Plantarflexion (91).

Kniegelenke:**Kniegelenksextension**

Die Kniegelenksextensoren als primärer Endpunkt unserer Arbeit war 24 Monate nach Durchführung der SDR signifikant ($p < 0,00625$) besser. Postoperativ blieben rechtsseitig 91,3% und linksseitig 93,3% der Patienten unverändert oder verbesserten sich. Damit bestätigen wir die Erfahrungen der Arbeitsgruppe um Paul Steinbok und Tamir Ailon, die einen signifikanten Anstieg der Kraft in den Kniegelenksextensoren für Patienten mit einem GMFCS Level I und II beschreiben (43). Weitere Arbeiten konnten bereits eine signifikante Verbesserung im postoperativen Verlauf zeigen (91, 92).

Hüftgelenke:**Hüftgelenksextension**

Bei der Untersuchung der Hüftgelenksextension kam es beidseits nicht zu einer relevanten Schwächung der Muskulatur. Postoperativ blieben rechtsseitig 75,7% und linksseitig 89,2% der Patienten unverändert oder verbesserten sich. Mit nur 37 vollständig nachuntersuchten Patienten müssen die beschriebenen Ergebnisse in zukünftigen Studien weiter geprüft werden. Die Arbeitsgruppe um S.A. Ross und T.S. Park konnte bereits in ihrer Veröffentlichung eine signifikante Verbesserung der Kraft der Hüftgelenksextensoren zeigen (93).

Hüftgelenksflexion

Die Untersuchung der Hüftgelenksflexion zeigte keine relevante Schwächung der Muskulatur nach SDR. Es zeigte sich rechtsseitig bei 78,7% ein stabiler Wert oder eine Verbesserung der MFT. Rechtsseitig waren es 80,8%.

Bei der MFT handelt es sich nur um eine Testung der maximalen Muskelkraft. Sie gilt als schlechter Prädiktor für die Funktionalität der Muskulatur, sowie für den Einsatz der Muskelkraft im Alltag der Kinder (63). Sie belegt jedoch, dass eine Muskelschwäche nach SDR nicht zu befürchten ist und damit die Effektivität der Physiotherapie in Synergie mit dem Gewinn an Bewegungskontrolle im Verlauf weiter gesteigert werden kann. Patienten, die sich einer SDR unterziehen, profitieren aufgrund des niedrigeren

Muskeltonus von einer intensiven physiotherapeutischen Betreuung. Park konnte in einer prospektiven Studie zeigen, dass Patienten mit SDR in Kombination mit einem ausgeprägten physiotherapeutischen Programm 20 Monate postoperativ ähnliche Therapieerfolge erzielen, wie Kinder in der Vergleichsgruppe ohne Behinderung mit Physiotherapie (58).

4.7. GMFM

Gesamt GMFM

Unsere Arbeit zeigt eine klinisch relevante Verbesserung der GMFM-88 um 3,7% im ersten Jahr nach SDR und weitere 3,41% (auf 7,17%) im zweiten Jahr. Die GMFM von 54 unserer Patienten wurde bereits in einer früheren Publikation von 2014 unter der Fragestellung positiver Prädiktoren für einen Therapieerfolg nach SDR erfasst. Hier zeigte sich ein Anstieg der GMFM von 5% im ersten und weiteren 2% im zweiten Jahr postoperativ (63). Unsere Ergebnisse der zweiten, erweiterten Serie von Patienten stimmen überein mit den Resultaten weiterer Veröffentlichungen (43, 78, 82). J.R. Engsborg und T.S. Park beschreiben in der Publikation ihrer Kurzzeitergebnisse der minimal invasiven Operationsmethode einen Anstieg um 5% in den ersten 20 Monaten (58). Diese Ergebnisse konnten wir mit einem Anstieg von 7,17 in den ersten 24 Monaten bestätigen.

Viele Arbeitsgruppen beschreiben die größte Verbesserung der GMFM zwischen drei und fünf Jahren postoperativ. Bei allen kam es nach 10 Jahren zu einem leichten Verlust. Dennoch war die GMFM-88 bei allen Arbeitsgruppen 10 Jahre nach SDR signifikant besser (43, 78, 82, 94). Die beschriebenen Publikationen zeigen im Vergleich mit unseren Daten etwas bessere Ergebnisse hinsichtlich der GMFM-88. Am Karolinska Institut wurde von Krisitina Tedroff und Mitarbeitern eine Verbesserung von 15% in den ersten 18 Monaten sowie 25% nach drei Jahren erzielt. Jedoch lag die Verbesserung im 10-Jahres Verlauf bei 11% und damit deutlich niedriger als noch in den ersten Jahren beschrieben (82). Die Arbeitsgruppe um R.W. Dudley beschreibt einen Anstieg von 9% im ersten Jahr nach SDR und 18% im Langzeitverlauf (78).

Die Literaturergebnisse lassen erwarten, dass auch in unserem Kollektiv mit weiteren

funktionellen Gewinnen zu rechnen ist.

Zieldimension der GMFM

Bei Betrachtung der Zieldimensionen „Stehen“ sowie „Gehen, Rennen, Springen“ erzielten unsere Patienten eine Verbesserung um 8,45% im ersten Jahr nach Durchführung der SDR. Bei der Untersuchung 24 Monate postoperativ liegt uns ein weiterer Anstieg auf 14,17% vor, was ebenfalls die Ergebnisse unserer früheren Publikation bestätigt (63). Für einen Vergleich der Zieldimension der GMFM liegen uns keine weiteren Arbeiten vor.

Die Testung der GMFM-88 ist sehr aufwendig. Viele Kinder haben während der zeitintensiven Untersuchung Konzentrationsprobleme, sodass ihre postoperativ erfassten Daten unvollständig sind und bei der Analyse der Ergebnisse fehlen. Ihr Vorzug liegt jedoch in der hohen Relevanz. Sie sollte trotz der immer wieder geforderten Rationalisierung der Untersuchung einen festen Stellenwert in der Untersuchung der Operationsergebnisse nach SDR behalten.

4.8. Behandlungskonzept und Physiotherapie

Die SDR ist ein erheblicher Eingriff in die Balance der spinalen Informationsverarbeitung. Sie ermöglicht mittelfristig durch die Reduktion der Spastik eine wesentlich flüssigere Frequenz von Muskelanspannung und Entspannung. Der Bewegungsablauf harmonisiert sich deutlich. Damit verbessern sich auch die physiotherapeutischen Trainingsmöglichkeiten. Die Schwächung des spinalen Reflexbogens erfordert aber unmittelbar postoperativ eine cerebrale Adaptationsphase, die altersabhängig zwischen 6 Wochen und drei Monate dauern kann und naturgemäß zunächst als Frustration erlebt wird. Der Erfolg der SDR hängt deshalb maßgeblich von einer konsequenten physiotherapeutischen rehabilitativen Begleitung in dieser Anfangsphase ab. Die postoperative Behandlung muss schon vor der Operation geplant und gesichert sein. Die dauerhafte Reduktion der Spastik ermöglicht auch langfristig die gezielte Muskelkontraktion mit einer höheren Frequenz als Grundlage für intensives Training und Muskelaufbau. Es konnte bereits gezeigt werden dass der funktionelle Gewinn durch die Kombination aus SDR und physiotherapeutischer

Nachbehandlung am höchsten ist (58). In der Konsequenz muss die operative Indikation infrage gestellt werden, wenn der Patient aufgrund schwerer genereller Entwicklungsstörungen für eine Rehabilitation nicht motivierbar erscheint oder wenn eine adäquate Nachbehandlung aus strukturellen Gründen nicht zur Verfügung steht (z.B. Frankreich, arabische Länder).

4.9. Limitationen

Durch das fehlende Monitoring während der Datenerhebung waren die Datenlücken durch versäumte Nachuntersuchungstermine oder inkomplette Datenerhebungen erhöht. Von 109 präoperativ evaluierten Patienten, standen uns im ersten Jahr postoperativ bei den Untersuchungen der MAS die Daten von 85 Patienten zur Verfügung. Bei der GMFM waren es nur 77 Patienten. Vollständige Daten von Nachuntersuchungen der MFT waren deutlich geringer und lagen bei 35 Patienten für die Dorsalextension, 31 für die Plantarflexion, 43 für die Kniegelenks-Extension, 40 für die Kniegelenks-Flexion, 32 für die Hüftgelenksexension und 43 für die Hüftgelenks-Flexion vor. Die Datenlücken resultieren teilweise aus den – unvermeidbaren – Kooperationsproblemen der Kinder bei den zeitaufwändigen und intensiven Nachuntersuchungen. Aus der Dokumentation der Untersucher geht hervor, dass neben der körperlichen Anstrengung ein primäres Problem in der Konzentrationsschwäche der Kinder besteht. Testungen konnten deshalb häufig nicht bis zum Ende durchgeführt werden. Weiterhin kamen viele der operierten Patienten aus dem Ausland und wurden daher an anderen Zentren nach anderen Kriterien weiterverfolgt. Unsere Veröffentlichung bildet trotz der beschriebenen Drop-outs die Arbeit mit der bisher größten Kohorte in Deutschland zu diesem Thema.

Eine wichtige Limitation stellt das – ethisch kaum vermeidbare – Fehlen einer Kontrollgruppe innerhalb unserer Kohorte dar. Damit konnten wir nur eine Auswertung im Sinne einer deskriptiven Statistik durchführen. Für die Steigerung der Aussagekraft hätte sich theoretisch eine Kontrollgruppe mit natürlichem Verlauf einer CP angeboten oder eine Gruppe von Kindern mit einem intensiven physiotherapeutischen Programm ohne SDR, analog zu der Veröffentlichung der Arbeitsgruppe von J.R. Engsborg und T.S. Park (58). Es erschien uns aber vor dem Hintergrund der bereits vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht vertretbar, Kindern mit einer schweren spastischen CP

diese in ihrer Wirkung alternativlose Therapiemöglichkeit vorzuenthalten. Eine Vergleichsgruppe mit medikamentös behandelten Kindern wäre nicht zielführend, da die Indikation nach anderen Kriterien erfolgt und damit die Vergleichbarkeit nicht gegeben ist.

In unserer Arbeit wurden die verschiedenen Untersuchungsergebnisse der MAS und MFT für beide Körperhälften getrennt analysiert. Es liegt bisher keine Arbeit vor, welche Ergebnisse der intraoperativen EMG Stimulation mit postoperativen funktionellen Verbesserungen der Patienten vergleicht. Unsere Arbeit könnte somit den Weg für eine detaillierte Analyse des Zusammenhanges zwischen intraoperativem Monitoring und klinischen Ergebnissen freimachen. Bei der deskriptiven Analyse unserer Ergebnisse fällt auf, dass bei Verbesserungen der MAS und MFT die linke Körperhälfte etwas mehr profitiert. Im weiteren Verlauf planen wir einen möglichen Zusammenhang zu untersuchen.

4.10. Zusammenfassung und Ausblick

International profitierten seit 50 Jahren viele Tausend Patienten von einer selektiven dorsalen Rhizotomie. Ausgerechnet in ihrem Ursprungsland stand die Operationsmethode aber aufgrund der oben geschilderten historischen Probleme bis 2007 nicht zur Verfügung. Ziel dieser Arbeit ist es, mit der ersten in Deutschland mit minimal invasiver Technik operierten Patientenkohorte die international längst sanktionierten Ergebnisse zu bestätigen und damit einen Beitrag zur Rehabilitation der SDR in Deutschland als unverzichtbarem Baustein einer zeitgemäßen Spastiktherapie zu leisten. Erwartungsgemäß und übereinstimmend mit den aktuellen Literaturergebnissen konnten wir eine effektive Reduktion der Spastik (42-44, 58, 78, 82) ohne Schwächung der Muskulatur (43, 58, 78, 91, 95) nachweisen.

Überraschend ergab sich bei der Untersuchung der Spastikreduktion und Kraft aller Muskelgruppen getrennt für beide Körperhälften, dass die linke Seite tendenziell mehr von dem Eingriff profitiert. Die Korrelation dieser klinischen Beobachtung mit den Ergebnissen des intraoperativen Monitorings steht noch aus. Eine Interpretation kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht erfolgen.

Nachdem einige Arbeitsgruppen bereits ermutigende Erfahrungen mit der Erweiterung der Indikationsstellung auf schwer betroffene Kinder (GMFCS IV-V) (60) sowie hemispastische Konstellationen (persönliche Kommunikation mit T.S. Park) gemacht haben, ist in nächster Zukunft eine Reevaluation der Indikationskriterien zu erwarten.

Durch die an unseren Patienten in Abweichung vom amerikanischen Protokoll durchgeführten Laminoplastietechnik kann die Integrität aller stabilitätsrelevanten spinalen Strukturen vollständig wiederhergestellt werden. Die komplikationsfreie Anwendbarkeit konnten wir mit dieser Arbeit belegen, die erhoffte funktionelle Überlegenheit bedarf naturgemäß einer längerfristigen Nachuntersuchung.

5. Literaturverzeichnis

1. Aisen ML, Kerkovich D, Mast J, Mulroy S, Wren TA, Kay RM, et al. Cerebral palsy: clinical care and neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*. 2011;10(9):844-52.
2. Babcock MA, Kostova FV, Ferriero DM, Johnston MV, Brunstrom JE, Hagberg H, et al. Injury to the preterm brain and cerebral palsy: clinical aspects, molecular mechanisms, unanswered questions, and future research directions. *Journal of child neurology*. 2009;24(9):1064-84.
3. Colver A, Fairhurst C, Pharoah PO. Cerebral palsy. *Lancet*. 2014;383(9924):1240-9.
4. Himmelmann K. Epidemiology of cerebral palsy. *Handbook of clinical neurology*. 2013;111:163-7.
5. Cans C, De-la-Cruz J, Mermet M-A. Epidemiology of cerebral palsy. *Paediatrics and Child Health*. 18(9):393-8.
6. Abbott R. Selective Dorsal Rhizotomy for the Treatment of Childhood Spasticity. In: Sindou M, editor. *Practical Handbook of Neurosurgery: From Leading Neurosurgeons*. Vienna: Springer Vienna; 2009. p. 1502-12.
7. Freud S. *Die infantile Cerebrallähmung*: A. Hölder; 1897.
8. Little WJ. On the influence of abnormal parturition, difficult labours, premature birth, and asphyxia neonatorum, on the mental and physical condition of the child, especially in relation to deformities. *Clinical orthopaedics and related research*. 1966;46:7-22.
9. Bax MC. Terminology and Classification of Cerebral Palsy. *Developmental medicine and child neurology*. 1964;6:295-7.
10. Watson L. Report of the Western Australian Cerebral Palsy Register - to birth year 1999.
11. European Perinatal Health Report. EuroPeristat project in collaboration with SCPE, EUROCAT&EURONEOSTAT [Internet]. 2008. Available from: <http://www.europeristat.com>.
12. McIntyre S, Taitz D, Keogh J, Goldsmith S, Badawi N, Blair E. A systematic review of risk factors for cerebral palsy in children born at term in developed countries. *Developmental medicine and child neurology*. 2013;55(6):499-508.
13. Scher AI, Petterson B, Blair E, Ellenberg JH, Grether JK, Haan E, et al. The risk of mortality or cerebral palsy in twins: a collaborative population-based study. *Pediatric research*. 2002;52(5):671-81.

14. Mercuri E, Cowan F. Cerebral infarction in the newborn infant: review of the literature and personal experience. *European journal of paediatric neurology : EJPN : official journal of the European Paediatric Neurology Society*. 1999;3(6):255-63.
15. Gorter JW, Rosenbaum PL, Hanna SE, Palisano RJ, Bartlett DJ, Russell DJ, et al. Limb distribution, motor impairment, and functional classification of cerebral palsy. *Developmental medicine and child neurology*. 2004;46(7):461-7.
16. Peacock WJ, Staudt LA. Spasticity in cerebral palsy and the selective posterior rhizotomy procedure. *Journal of child neurology*. 1990;5(3):179-85.
17. Feldman RG, Young RR, Koella WP, Corporation C-G, editors. *Spasticity, disordered motor control* 1980; Miami, FL; Chicago: Symposia Specialists ; Distributed by Year Book Medical Publishers.
18. Peacock WJ, Arens LJ. Selective posterior rhizotomy for the relief of spasticity in cerebral palsy. *S Afr Med J*. 1982;62(4):119-24.
19. Steinbok P, Hicdonmez T, Sawatzky B, Beauchamp R, Wickenheiser D. Spinal deformities after selective dorsal rhizotomy for spastic cerebral palsy. *Journal of neurosurgery*. 2005;102(4 Suppl):363-73.
20. Funk JF, Haberl H. Monosegmental laminoplasty for selective dorsal rhizotomy--operative technique and influence on the development of scoliosis in ambulatory children with cerebral palsy. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2016;32(5):819-25.
21. Palisano R, Rosenbaum P, Walter S, Russell D, Wood E, Galuppi B. Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. *Developmental medicine and child neurology*. 1997;39(4):214-23.
22. Rosenbaum PL, Palisano RJ, Bartlett DJ, Galuppi BE, Russell DJ. Development of the Gross Motor Function Classification System for cerebral palsy. *Developmental medicine and child neurology*. 2008;50(4):249-53.
23. Morris C, Bartlett D. Gross Motor Function Classification System: impact and utility. *Developmental medicine and child neurology*. 2004;46(1):60-5.
24. Stanley FJ. An epidemiological study of cerebral palsy in Western Australia, 1956-1975. I: Changes in total incidence of cerebral palsy and associated factors. *Developmental medicine and child neurology*. 1979;21(6):701-13.
25. Pharoah PO, Platt MJ, Cooke T. The changing epidemiology of cerebral palsy. *Archives of disease in childhood Fetal and neonatal edition*. 1996;75(3):F169-73.
26. Park TS, Johnston JM. Surgical techniques of selective dorsal rhizotomy for spastic cerebral palsy. Technical note. *Neurosurgical focus*. 2006;21(2):e7.
27. Mertens P. Neurosurgery for Spasticity. In: Sindou M, editor. *Practical Handbook of Neurosurgery: From Leading Neurosurgeons*. Vienna: Springer Vienna; 2009. p. 1480-501.

28. Verrotti A, Greco R, Spalice A, Chiarelli F, Iannetti P. Pharmacotherapy of spasticity in children with cerebral palsy. *Pediatric neurology*. 2006;34(1):1-6.
29. Quality Standards Subcommittee of the American Academy of N, the Practice Committee of the Child Neurology S, Delgado MR, Hirtz D, Aisen M, Ashwal S, et al. Practice parameter: pharmacologic treatment of spasticity in children and adolescents with cerebral palsy (an evidence-based review): report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology and the Practice Committee of the Child Neurology Society. *Neurology*. 2010;74(4):336-43.
30. Chung CY, Chen CL, Wong AM. Pharmacotherapy of spasticity in children with cerebral palsy. *J Formos Med Assoc*. 2011;110(4):215-22.
31. Lundy CT, Doherty GM, Fairhurst CB. Botulinum toxin type A injections can be an effective treatment for pain in children with hip spasms and cerebral palsy. *Developmental medicine and child neurology*. 2009;51(9):705-10.
32. Penn RD, Kroin JS. Continuous intrathecal baclofen for severe spasticity. *Lancet*. 1985;2(8447):125-7.
33. Albright AL, Cervi A, Singletary J. Intrathecal baclofen for spasticity in cerebral palsy. *JAMA*. 1991;265(11):1418-22.
34. Hoving MA, van Raak EP, Spincemaille GH, Palmans LJ, Becher JG, Vles JS, et al. Efficacy of intrathecal baclofen therapy in children with intractable spastic cerebral palsy: a randomised controlled trial. *European journal of paediatric neurology : EJPN : official journal of the European Paediatric Neurology Society*. 2009;13(3):240-6.
35. Sindou MP, Simon F, Mertens P, Decq P. Selective peripheral neurotomy (SPN) for spasticity in childhood. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2007;23(9):957-70.
36. Sindou M, Abdennebi B, Boisson D, Eyssette M, Goutelle A. [Treatment of spastic foot by selective neurotomy of the tibial nerve. Results of a series of 31 cases]. *Neuro-Chirurgie*. 1985;31(3):189-97.
37. Hodgkinson I, Sindou M. Decision-Making for Treatment of Disabling Spasticity in Children. *Operative Techniques in Neurosurgery*. 2004;7(3):120-3.
38. Mertens P, Sindou M. [Microsurgical drezotomy for the treatment of spasticity of the lower limbs]. *Neuro-Chirurgie*. 1998;44(3):209-18.
39. Sindou M. Neurosurgery for Neuropathic Pain. In: Sindou M, editor. *Practical Handbook of Neurosurgery: From Leading Neurosurgeons*. Vienna: Springer Vienna; 2009. p. 1408-31.
40. Mertens P, Sindou M. [Microsurgical drezotomy for spastic limbs]. *Neuro-Chirurgie*. 2003;49(2-3 Pt 2):325-38.
41. Sindou M, Jeanmonod D. Microsurgical DREZ-otomy for the treatment of spasticity and pain in the lower limbs. *Neurosurgery*. 1989;24(5):655-70.

42. Arens LJ, Peacock WJ, Peter J. Selective posterior rhizotomy: a long-term follow-up study. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 1989;5(3):148-52.
43. Ailon T, Beauchamp R, Miller S, Mortenson P, Kerr JM, Hengel AR, et al. Long-term outcome after selective dorsal rhizotomy in children with spastic cerebral palsy. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2015;31(3):415-23.
44. Langerak NG, Vaughan CL, Peter JC, Fieggen AG, Peacock WJ. Long-term outcomes of dorsal rhizotomy. *Journal of neurosurgery Pediatrics*. 2013;12(6):664-5.
45. Sherrington CS. Decerebrate Rigidity, and Reflex Coordination of Movements. *J Physiol*. 1898;22(4):319-32.
46. Gros C. Spasticity—Clinical Classification and Surgical Treatment. In: Krayenbühl H, Brihaye J, Loew F, Logue V, Mingrino S, Pertuiset B, et al., editors. *Advances and Technical Standards in Neurosurgery*. Vienna: Springer Vienna; 1979. p. 55-97.
47. Bleck EE. Posterior rootlet rhizotomy in cerebral palsy. *Archives of disease in childhood*. 1993;68(6):717-9.
48. Goldstein EM. Spasticity management: an overview. *Journal of child neurology*. 2001;16(1):16-23.
49. Lanska DJ. Dana, Charles Loomis. *Encyclopedia of the Neurological Sciences (Second Edition)*. Oxford: Academic Press; 2014. p. 930-4.
50. Foerster O. On the indications and results of the excision of posterior spinal nerve roots in men. *Surgery, Gynecology & Obstetrics*. 1913;16:463-74.
51. Landau WM. Rootless century: posterior rhizotomy for spastic cerebral palsy. *Journal of child neurology*. 2013;28(1):7-12.
52. Privat JM, Benezech J, Frerebeau P, Gros C. Sectorial posterior rhizotomy, a new technique of surgical treatment for spasticity. *Acta neurochirurgica*. 1976;35(1-3):181-95.
53. Gros C, Ouaknine G, Vlahovitch B, Frerebeau P. [Selective posterior radicotomy in the neurosurgical treatment of pyramidal hypertension]. *Neuro-Chirurgie*. 1967;13(4):505-18.
54. Fasano VA, Broggi G, Barolat-Romana G, Sguazzi A. Surgical treatment of spasticity in cerebral palsy. *Childs Brain*. 1978;4(5):289-305.
55. Fraioli B, Guidetti B. [Posterior partial rhizotomy and a new technique, posterior partial radicotomy, in the treatment of tonic spasticity (author's transl)]. *Riv Patol Nerv Ment*. 1975;96(2):65-81.
56. Peacock WJ, Arens LJ, Berman B. Cerebral palsy spasticity. Selective posterior rhizotomy. *Pediatr Neurosci*. 1987;13(2):61-6.

57. Park TS, Gaffney PE, Kaufman BA, Molleston MC. Selective lumbosacral dorsal rhizotomy immediately caudal to the conus medullaris for cerebral palsy spasticity. *Neurosurgery*. 1993;33(5):929-33; discussion 33-4.
58. Engsborg JR, Ross SA, Collins DR, Park TS. Effect of selective dorsal rhizotomy in the treatment of children with cerebral palsy. *Journal of neurosurgery*. 2006;105(1 Suppl):8-15.
59. Steinbok P. Outcomes after selective dorsal rhizotomy for spastic cerebral palsy. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2001;17(1-2):1-18.
60. Ingale H, Ughratdar I, Muquit S, Moussa AA, Vloeberghs MH. Selective dorsal rhizotomy as an alternative to intrathecal baclofen pump replacement in GMFCS grades 4 and 5 children. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2016;32(2):321-5.
61. Reynolds MR, Ray WZ, Strom RG, Blackburn SL, Lee A, Park TS. Clinical outcomes after selective dorsal rhizotomy in an adult population. *World neurosurgery*. 2011;75(1):138-44.
62. Krageloh-Mann I, Horber V. The role of magnetic resonance imaging in elucidating the pathogenesis of cerebral palsy: a systematic review. *Developmental medicine and child neurology*. 2007;49(2):144-51.
63. Funk JF, Panthen A, Bakir MS, Gruschke F, Sarpong A, Wagner C, et al. Predictors for the benefit of selective dorsal rhizotomy. *Research in developmental disabilities*. 2015;37:127-34.
64. Steinbok P. Selective dorsal rhizotomy for spastic cerebral palsy: a review. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2007;23(9):981-90.
65. Cochrane DD, Steinbok P. Laminotomy: a technical note. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 1992;8(4):226-8.
66. Ou C, Kent S, Miller S, Steinbok P. Selective dorsal rhizotomy in children: comparison of outcomes after single-level versus multi-level laminectomy technique. *Canadian journal of neuroscience nursing*. 2010;32(3):17-24.
67. Parker Mickle J. Selective dorsal rhizotomy of the lumbosacral spinal cord for spasticity in cerebral palsy. In: Fessler RG, Sekhar L, editors. *Atlas of Neurosurgical Techniques: Spine and Peripheral Nerves*: Thieme; 2006. p. 771-5.
68. Staudt LA, Nuwer MR, Peacock WJ. Intraoperative monitoring during selective posterior rhizotomy: technique and patient outcome. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1995;97(6):296-309.
69. Spiegel DA, Loder RT, Alley KA, Rowley S, Gutknecht S, Smith-Wright DL, et al. Spinal deformity following selective dorsal rhizotomy. *Journal of pediatric orthopedics*. 2004;24(1):30-6.

70. Golan JD, Hall JA, O'Gorman G, Poulin C, Benaroch TE, Cantin MA, et al. Spinal deformities following selective dorsal rhizotomy. *Journal of neurosurgery*. 2007;106(6 Suppl):441-9.
71. Yasuoka S, Peterson HA, MacCarty CS. Incidence of spinal column deformity after multilevel laminectomy in children and adults. *Journal of neurosurgery*. 1982;57(4):441-5.
72. Johnson MB, Goldstein L, Thomas SS, Piatt J, Aiona M, Sussman M. Spinal deformity after selective dorsal rhizotomy in ambulatory patients with cerebral palsy. *Journal of pediatric orthopedics*. 2004;24(5):529-36.
73. Wilson DA, Prince JR. John Caffey award. MR imaging determination of the location of the normal conus medullaris throughout childhood. *AJR American journal of roentgenology*. 1989;152(5):1029-32.
74. Fasano VA, Broggi G, Zeme S. Intraoperative electrical stimulation for functional posterior rhizotomy. *Scand J Rehabil Med Suppl*. 1988;17:149-54.
75. Peacock WJ, Staudt LA. Functional outcomes following selective posterior rhizotomy in children with cerebral palsy. *Journal of neurosurgery*. 1991;74(3):380-5.
76. Ashworth B. Preliminary Trial of Carisoprodol in Multiple Sclerosis. *Practitioner*. 1964;192:540-2.
77. Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Physical therapy*. 1987;67(2):206-7.
78. Dudley RW, Parolin M, Gagnon B, Saluja R, Yap R, Montpetit K, et al. Long-term functional benefits of selective dorsal rhizotomy for spastic cerebral palsy. *Journal of neurosurgery Pediatrics*. 2013;12(2):142-50.
79. Russell DJ, Rosenbaum PL, Cadman DT, Gowland C, Hardy S, Jarvis S. The gross motor function measure: a means to evaluate the effects of physical therapy. *Developmental medicine and child neurology*. 1989;31(3):341-52.
80. Hislop H, Avers D, Brown M. Daniels and Worthingham's muscle testing: Techniques of manual examination and performance testing: Elsevier Health Sciences; 2013.
81. Nordmark E, Josenby AL, Lagergren J, Andersson G, Stromblad LG, Westbom L. Long-term outcomes five years after selective dorsal rhizotomy. *BMC pediatrics*. 2008;8:54.
82. Tedroff K, Lowing K, Jacobson DN, Astrom E. Does loss of spasticity matter? A 10-year follow-up after selective dorsal rhizotomy in cerebral palsy. *Developmental medicine and child neurology*. 2011;53(8):724-9.
83. Josenby AL, Wagner P, Jarnlo GB, Westbom L, Nordmark E. Motor function after selective dorsal rhizotomy: a 10-year practice-based follow-up study. *Developmental medicine and child neurology*. 2012;54(5):429-35.

84. van Schie PE, Schothorst M, Dallmeijer AJ, Vermeulen RJ, van Ouwkerk WJ, Strijers RL, et al. Short- and long-term effects of selective dorsal rhizotomy on gross motor function in ambulatory children with spastic diplegia. *Journal of neurosurgery Pediatrics*. 2011;7(5):557-62.
85. Chan SH, Yam KY, Yiu-Lau BP, Poon CY, Chan NN, Cheung HM, et al. Selective dorsal rhizotomy in Hong Kong: multidimensional outcome measures. *Pediatric neurology*. 2008;39(1):22-32.
86. McGirt MJ, Chaichana KL, Atiba A, Bydon A, Witham TF, Yao KC, et al. Incidence of spinal deformity after resection of intramedullary spinal cord tumors in children who underwent laminectomy compared with laminoplasty. *Journal of neurosurgery Pediatrics*. 2008;1(1):57-62.
87. McGirt MJ, Garces-Ambrossi GL, Parker SL, Sciubba DM, Bydon A, Wolinsky JP, et al. Short-term progressive spinal deformity following laminoplasty versus laminectomy for resection of intradural spinal tumors: analysis of 238 patients. *Neurosurgery*. 2010;66(5):1005-12.
88. Grunt S, Becher JG, Vermeulen RJ. Long-term outcome and adverse effects of selective dorsal rhizotomy in children with cerebral palsy: a systematic review. *Developmental medicine and child neurology*. 2011;53(6):490-8.
89. Brunton LK, Bartlett DJ. Validity and reliability of two abbreviated versions of the Gross Motor Function Measure. *Physical therapy*. 2011;91(4):577-88.
90. Russell DJ, Rosenbaum PL, Avery LM, Lane M. Gross motor function measure (GMFM-66 and GMFM-88) user's manual: Cambridge University Press; 2002.
91. Gul SM, Steinbok P, McLeod K. Long-term outcome after selective posterior rhizotomy in children with spastic cerebral palsy. *Pediatric neurosurgery*. 1999;31(2):84-95.
92. Engsberg JR, Olree KS, Ross SA, Park TS. Spasticity and strength changes as a function of selective dorsal rhizotomy. *Neurosurgical focus*. 1998;4(1):e4.
93. Ross SA, Engsberg JR, Olree KS, Park TS. Quadriceps and hamstring strength changes as a function of selective dorsal rhizotomy surgery and rehabilitation. *Pediatric physical therapy : the official publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association*. 2001;13(1):2-9.
94. Bolster EA, van Schie PE, Becher JG, van Ouwkerk WJ, Strijers RL, Vermeulen RJ. Long-term effect of selective dorsal rhizotomy on gross motor function in ambulant children with spastic bilateral cerebral palsy, compared with reference centiles. *Developmental medicine and child neurology*. 2013;55(7):610-6.
95. Engsberg JR, Olree KS, Ross SA, Park TS. Spasticity and strength changes as a function of selective dorsal rhizotomy. *Journal of neurosurgery*. 1998;88(6):1020-6.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Entwicklung der neonatalen Sterblichkeit in Europa 1976-1996 (4, 5)	9
Abb. 2: Prävalenz der CP 1990-1998 an sechs europäischen Zentren - Darstellung nach Kate Himmelmann (4, 5).....	11
Abb. 3: Einteilung der Therapiemöglichkeiten der Spastik – Darstellung nach Patrick Mertens (27).	14
Abb. 4: Reflexbogen und Möglichkeiten der Unterbrechung zur Therapie der Spastik – Darstellung nach Edward M. Goldstein (48)	19
Abb. 5: Charles Loomis Dana (1852-1935) – Bild aus U.S. National Library of Medicine	20
Abb. 6: Robert Abbe (1851-1928) – Bild aus U.S. National Library of Medicine	20
Abb. 7: Reflexantworten der intraoperativen EMG Messung – Tabelle nach T.S. Park und J.M. Johnston (26).	30
Abb. 8: Schematische Darstellung der für die Laminektomie relevanten anatomischen Strukturen.....	33
Abb. 9: Laminektomie-Technik nach Haberl mit der diagonalen, nach zentral gerichteten Spaltung der Dornfortsätze.....	34
Abb. 10: Laminoplastie – Befestigung der Lamina mittels Loch-Platte und Schrauben sowie Kompressionsnaht der Dornfortsätze	34
Abb. 11: Modifizierte Ashworth Skala für die Klassifikation der Spastik – Tabelle nach Richard Bohannon und Melissa Smith (76, 77)	37
Abb. 12: Klassifikation der manuellen Muskelkraft Testung (MFT)	40
Abb. 13: Veränderung der Spastik in den Adduktoren nach MAS im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.....	43
Abb. 14: Veränderungen der Verteilung nach GMFCS Level im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.....	44
Abb. 15: Veränderungen der Verteilung nach GMFCS Level im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.....	44
Abb. 16: Veränderungen in der Verteilung von GMFCS Gruppen 24 Monate postoperativ im Vergleich zum präoperativen Ausgangswert	45
Abb. 17: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den rechten Adduktoren im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.	46
Abb. 18: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den linken Adduktoren im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.....	47
Abb. 19: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den rechten Adduktoren im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.	48
Abb. 20: Veränderungen der Verteilung nach MAS in den linken Adduktoren im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.....	48
Abb. 21: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der rechten ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.	49

Abb. 22: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.	49
Abb. 23: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der rechten ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.	50
Abb. 24: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken ischiocruralen Muskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.	51
Abb. 25: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der rechten Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.	52
Abb. 26: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 12 Monate postoperativ.	52
Abb. 27: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.	53
Abb. 28: Veränderungen der Verteilung nach MAS in der linken Wadenmuskulatur im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.	53
Abb. 29: Signifikanzniveaus für Veränderungen der MAS nach Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest	54
Abb. 30: Verlauf der GMFM Evaluation präoperativ, sowie 12 und 24 Monate postoperativ	55
Abb. 31: Zieldimension der GMFM Evaluation im Verlauf präoperativ, sowie 12 und 24 Monate postoperativ	56
Abb. 32: Differenzen der GMFM Untersuchungen zu verschiedenen Zeitpunkten sowie Signifikanzniveaus	56
Abb. 33: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Sprunggelenk im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.....	58
Abb. 34: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Sprunggelenk im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ.....	58
Abb. 35: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Sprunggelenk (Plantarflexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	59
Abb. 36: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Sprunggelenk (Plantarflexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	59
Abb. 37: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Kniegelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	60
Abb. 38: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Kniegelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	61
Abb. 39: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Kniegelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	62
Abb. 40: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Kniegelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	62
Abb. 41: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Hüftgelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	63
Abb. 42: Veränderungen der Verteilung nach MFT im linken Hüftgelenk (Extension) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	63

Abb. 43: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Hüftgelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	64
Abb. 44: Veränderungen der Verteilung nach MFT im rechten Hüftgelenk (Flexion) im Vergleich präoperativ und 24 Monate postoperativ	64
Abb. 45: Signifikanzniveaus für Veränderungen der MFT nach Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest	65

Abkürzungsverzeichnis

CP	Zerebralparese
DREZ	Dorsal Root Entry Zone
EMG	Elektromyographie
GMFCS	Gross Motor Function Classification System
GMFM	Gross Motor Function Measure
M.	Musculus
Mm.	Musculi
MAS	Modifizierte Ashworth Skala
MFT	Manual Maximal Force Test
MRT	Magnetresonanztomographie
PVL	Periventrikuläre Leukomalazie
SDR	Selektive Dorsale Rhizotomie
SPN	Selektive Periphere Neurotomie

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Tarik Alp SARGUT, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Die minimal invasive Renaissance einer klassischen Operationsmethode: Ergebnisse der ersten europäischen Anwendung der minimal invasiven selektiven dorsalen Rhizotomie nach T.S. Park“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Hannes Haberl für die motivierende und zuverlässige Betreuung dieser Dissertation. Seine intensive Unterstützung als Mentor während meines Studiums war für mich fachlich sowie menschlich sehr wertvoll.

Ich möchte mich außerdem bei Dr. Matthias Schulz für die Betreuung während der Durchführung der Operationen bedanken.

Dem Sozialpädiatrischen Zentrum der Charité und allen Mitarbeitern, die an den aufwändigen und zeitintensiven Nachuntersuchungen unserer Patienten mitgewirkt haben gebührt besonderer Dank für diese Arbeit.

Ich danke meinen Eltern Zeynep und Mengü Sargut von ganzem Herzen für die liebevolle und aufopfernde Begleitung durch Schule, Studium und die frühere Zeit im Leistungssport. Ihr Anteil an meiner Ausbildung wird in meinem Leben immer eine Sonderstellung behalten.