

**Aus der neurochirurgischen Klinik und Poliklinik
der Universität Würzburg**

Direktor: Professor Dr. med. Ralf-Ingo Ernestus

**Prospektive Evaluation der Verbesserung neurologischer Funktionsstörungen
nach operativer Dekompression bei zervikaler Myelopathie**

**Inauguraldissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

vorgelegt von

Lora Sutter

aus Kayl (L)

Würzburg, März 2019

Referent: apl. Prof. Dr. med. Thomas Westermaier

Korreferentin: Univ.-Prof. Dr. med. Claudia Sommer

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 12.02.2020

Die Promovendin ist Ärztin

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Hintergrund | 1 |
| 1.2 | Epidemiologie und Ätiologie der zervikalen Myelopathie | 2 |
| 1.3 | Klinische Symptome | 4 |
| 1.4 | Risikofaktoren für den Schweregrad..... | 6 |
| 1.5 | Diagnostik | 7 |
| 1.5.1 | Evaluation der neurologischen Funktionsstörungen | 7 |
| 1.5.2 | Neuroradiologische Untersuchung | 9 |
| 1.5.3 | Elektrophysiologische Untersuchung..... | 11 |
| 1.6 | Therapie..... | 12 |
| 1.6.1 | Konservative Therapie | 12 |
| 1.6.2 | Operative Therapie..... | 13 |
| 1.7 | Operative Komplikationen | 14 |
| 1.8 | Postoperatives Ergebnis | 15 |
| 1.9 | Prognosefaktoren für das postoperative Ergebnis | 16 |
| 1.10 | Fragestellung | 18 |
| 2 | Material und Methode | 19 |
| 2.1 | Studiendesign | 19 |
| 2.2 | Methodik | 21 |
| 2.2.1 | Evaluation der Feinmotorik..... | 21 |
| 2.2.2 | Evaluation des Gangbilds..... | 27 |
| 2.2.3 | Neuroradiologische Evaluation | 28 |
| 2.2.4 | Fragebogen | 29 |
| 2.2.4.1 | <i>Edinburgh Handedness Inventory</i> | 30 |
| 2.2.4.2 | <i>European Myelopathy Score (EMS)</i> | 30 |
| 2.2.4.3 | <i>Nurick-Score</i> | 30 |
| 2.2.4.4 | Numerische Rating-Skala (NRS) | 31 |
| 2.3 | Statistische Analyse..... | 31 |
| 2.3.1 | Querschnittsanalyse..... | 31 |
| 2.3.1.1 | Vergleich der funktionellen Parameter..... | 31 |
| 2.3.1.2 | Korrelation zwischen Funktion und Morphologie | 31 |
| 2.3.1.3 | Assoziierte Faktoren mit Funktion und Morphologie | 31 |
| 2.3.2 | Longitudinale Analyse | 32 |
| 2.3.2.1 | Postoperative Veränderungen der Parameter | 32 |
| 2.3.2.2 | Korrelation zwischen funktionellen und morphologischen Veränderungen ... | 32 |
| 2.3.2.3 | Assoziierte Faktoren mit Veränderungen der Funktion und Morphologie..... | 32 |
| 2.3.3 | Signifikanzniveau..... | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Ergebnisse | 34 |
| 3.1 | Patienten | 34 |
| 3.2 | Kontrollgruppe | 35 |
| 3.3 | Querschnittsanalyse | 35 |
| 3.3.1 | Kinematische Parameter | 35 |
| 3.3.2 | Gangparameter | 38 |
| 3.3.3 | Korrelation zwischen Funktion und Morphologie | 40 |
| 3.3.4 | Assoziierte Faktoren mit der Funktion und Morphologie | 41 |
| 3.3.4.1 | Beruf und Sport | 41 |
| 3.3.4.2 | Body-Mass-Index | 42 |
| 3.3.4.3 | Dauer der Symptome | 42 |
| 3.3.4.4 | Geschlecht | 42 |
| 3.4 | Longitudinale Analyse | 44 |
| 3.4.1 | Kinematische Parameter | 44 |
| 3.4.2 | Gangparameter | 49 |
| 3.4.3 | Kernspintomographische Parameter | 50 |
| 3.4.4 | Scores | 53 |
| 3.4.4.1 | <i>European Myelopathy Score</i> | 53 |
| 3.4.4.2 | <i>Nurick-Score</i> | 54 |
| 3.4.4.3 | Numerische Rating-Skala | 54 |
| 3.4.5 | Korrelation zwischen funktionellen und morphologischen Veränderungen | 56 |
| 3.4.5.1 | Korrelation zwischen Veränderungen der kinematischen Parametern und der Länge des pathologischen Signals | 56 |
| 3.4.5.2 | Korrelation zwischen Veränderungen der kinematischen Parametern und des Atrophiequotienten | 56 |
| 3.4.5.3 | Korrelation zwischen Veränderungen der Gangparameter und der kernspintomographischen Parameter | 57 |
| 3.4.6 | Assoziierte Faktoren mit Veränderungen der funktionellen und morphologischen Parameter | 58 |
| 3.4.6.1 | Alter | 58 |
| 3.4.6.2 | Body-Mass-Index | 60 |
| 3.4.6.3 | Dauer der Symptome | 61 |
| 3.4.6.4 | Anzahl der operierten Höhen der HWS | 62 |
| 3.4.6.5 | Operationszugang | 64 |
| 4 | Diskussion | 67 |
| 4.1.1 | Störungen der Feinmotorik | 67 |
| 4.1.2 | Störungen des Gangbilds | 70 |
| 4.1.3 | Korrelation zwischen Funktion und Morphologie | 71 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.1.4 | Assoziierte Faktoren mit der Funktion und Morphologie | 73 |
| 4.2 | Longitudinale Analyse | 74 |
| 4.2.1 | Postoperative Veränderung der kinematischen Parameter | 74 |
| 4.2.2 | Postoperative Veränderungen der Gangparameter | 76 |
| 4.2.3 | Veränderungen der kernspintomographischen Parameter | 77 |
| 4.2.4 | Postoperative Veränderungen der <i>Scores</i> | 78 |
| 4.2.5 | Korrelation zwischen funktionellen und morphologischen Veränderungen | 79 |
| 4.3 | Assoziierte Faktoren mit der Veränderung der Funktion und Morphologie | 80 |
| 4.3.1 | Alter | 80 |
| 4.3.2 | Dauer der Symptome | 82 |
| 4.3.3 | Anzahl der operierten Höhen der HWS | 83 |
| 4.3.4 | Art des Operationszugangs | 84 |
| 5 | Zusammenfassung | 86 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 88 |
| 7 | Appendix | 95 |

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die zervikale Myelopathie ist eine Schädigung des Myelons, die in den meisten Fällen durch eine Einengung des Spinalkanals entsteht. Die Symptome reichen von Kopf-, Nacken-, Arm- und Beinschmerzen, motorischen Ausfällen und Sensibilitätsstörungen der oberen und unteren Extremitäten bis zu Störungen der Blasen- und Mastdarmfunktion.

Symptome wie Störungen der Feinmotorik und des Gangs stellen für die Patienten ein Handicap nach der *ICIDH-Klassifikation (International Classification of Impairment, Disability and Handicap)* der WHO dar. Aktivitäten des alltäglichen Lebens, wie das Binden von Schuhen, Essen mit Messer und Gabel oder Schreiben werden dadurch erschwert. Eine mögliche Folge dieser Handicaps ist auch die Berufsunfähigkeit. Die operative Dekompression des Rückenmarks soll bei stenosebedingter Myelopathie ein Fortschreiten der neurologischen Symptome verhindern. Häufig kann eine postoperative Verbesserung der neurologischen Funktionsstörungen festgestellt werden.

Ziel dieser Studie ist die detaillierte Quantifizierung des Ausmaßes neurologischer Funktionsstörungen präoperativ sowie nach einem Intervall der Regeneration postoperativ. Der Fokus liegt auf den Veränderungen der feinmotorischen Funktionen und deren Regeneration, da diese in der Literatur bislang nicht detailliert beschrieben wurden.

Durch diese Evaluation mithilfe definierter quantitativer Analysemethoden kann der Nutzen einer operativen Dekompression bei zervikaler Myelopathie exakter evaluiert werden.

Des Weiteren sollen Risikofaktoren für den Schweregrad der neurologischen Funktionsstörung sowie prognostische Faktoren, die mit einer besseren oder schlechteren postoperativen Erholung einhergehen, bestimmt werden.

1.2 Epidemiologie und Ätiologie der zervikalen Myelopathie

Die stenosebedingte zervikale Myelopathie ist einer der häufigsten Myelonerkrankungen der über 55-Jährigen^{33,96} und eine häufige Ursache nichttraumatischer Paraparesen und Tetraparesen.⁵ Die genaue Inzidenz und Prävalenz der Erkrankung sind jedoch unklar.^{33,35}

Das durchschnittliche Erkrankungsalter liegt bei circa 64 Jahren.³³ Männer sind häufiger betroffen als Frauen (Tracy et al.⁸⁵ gaben ein Verhältnis von 3:2 an, Kalsi-Ryan et al.³³ ein Verhältnis von 2,7:1).^{33,35,85}

Das Auftreten der zervikalen Myelopathie hängt mit einer Verminderung des Diameters des Spinalkanals zusammen.^{15,33} Diese kann durch statische und dynamische Faktoren verursacht werden.^{15,20,33,35}

Die häufigste Ätiologie ist die Spinalkanalstenose durch eine verschleißbedingte Spondylose.¹⁵ Durch degenerative Prozesse kommt es initial zur Minderung der Bandscheibenhöhe und im weiteren Verlauf zur Bandscheibenprotrusion bzw. zu einem Bandscheibenprolaps, einer Hypertrophie der Facettengelenke und der Unkovertebralgelenke, Bildung von Osteophyten sowie Hypertrophie der Facettengelenkscapsel, des Ligamentum flavum und des posterioren longitudinalen Ligaments. Diese statischen Faktoren führen zu einer Verengung des Spinalkanals und somit zu einer Kompression des Myelons.^{15,33,35,85}

Durch die altersbezogene Degeneration der Wirbelsäule sind vor allem ältere Personen gefährdet an einer zervikalen Myelopathie zu erkranken.^{33,85,96}

Die Entwicklung einer vorzeitigen Spondylose kann begünstigt werden durch repetitive, triviale Traumata der Halswirbelsäule. Dies konnte bei Rugby Spielern beobachtet werden.^{33,85}

Auch kongenitale Anomalien der zervikalen Wirbelsäule, wie z.B. das Klippel-Feil Syndrom (Fusion von zwei Halswirbelkörpern) können ein Prädispositionsfaktor für die Entwicklung einer Spondylose und zervikale Myelopathie sein.⁸⁵

Patel et al.⁶⁸ konnten außerdem eine genetische Prädisposition für die Entstehung einer zervikalen Myelopathie durch Spondylose bei erst- und drittgradigen Verwandten beobachten.

Allerdings entwickeln nicht alle Personen mit einer radiologisch nachweisbaren Spondylose eine symptomatische Myelopathie.²³

Ein weiterer statischer Faktor ist ein kongenital enger Spinalkanal.^{15,36,56,69} Dieser vermindert die Schwelle bei der zusätzliche statische oder dynamische Faktoren das Myelon komprimieren und schädigen können.^{15,20,56}

Seltenere statische Faktoren, die eine Myelonkompression verursachen können, sind unter anderem die Ossifikation des Ligamentum longitudinale posterius, das Auftreten von Facettengelenkszysten und Arachnoidalzysten, intra- oder extramedulläre Primärtumoren, Metastasen und Abszesse.^{15,77,85,96}

Dynamische Faktoren können Flexions- und Extensionsbewegungen sein, die eine vorbestehende statische Spinalkanalstenose verstärken können.³⁶ So kann das Myelon bei Flexion ventral gegen Bandscheibenprotrusionen oder Osteophyten gedrückt werden.¹⁸ Bei Hyperextension kann sich das Ligamentum flavum in den Spinalkanal vorwölben und das Myelon von dorsal komprimieren.^{18,96}

Zudem können Spondylolisthesen zu einer Verminderung des Spinalkanaldiameters und zu einer Myelonkompression führen.²² Ursächlich für eine zervikale Hypermobilität sind in der Regel degenerative Prozesse z.B. im Rahmen einer Spondylose, aber auch entzündliche Geschehen wie rheumatoider Arthritis oder Spondylitis ankylosans.^{22,85} Flexions- und Extensionsbewegungen verstärken den Grad der Spondylolisthese.¹⁸ Bei Retrolisthese führt eine Hyperextension zur maximalen Myelonkompression, umgekehrt erfolgt bei Anterolisthese die maximale Kompression in Flexion.¹⁸

Die sagittale Anordnung der Wirbelkörper kann ebenfalls eine Rolle spielen bei der Entstehung einer zervikalen Myelopathie. Durch Verlust der Bandscheibenhöhe kann es zu einer Verminderung der physiologischen Lordose kommen. Wenn es zu einer

kyphotischen Fehlstellung kommt, kann das Myelon und seine versorgende Blutgefäße von anterior komprimiert werden.^{15,33}

Eine chronische Kompression des Myelons durch statische und dynamische Faktoren kann zu intrinsischen und vaskulären Veränderungen führen. So konnten inflammatorische Prozesse im Nervengewebe nachgewiesen werden sowie eine Abflachung, Dehnung und eine Rarefizierung von Blutgefäßen.^{3,33,36,97} Folglich kann es zu einer Demyelinisierung, Nevenzellschädigung und Apoptose kommen.^{15,35,36,97}

Andere Ursachen der zervikalen Myelopathie sind unter anderem neurodegenerative Veränderungen (Amyotrophe Lateralsklerose), Demyelinisierung (Multiple Sklerose oder Guillain-Barré Syndrom), Infektionen (HIV, Herpes zoster, Lyme-Borreliose, Syphilis), vaskuläre Ursachen (Infarkt des Myelons), hereditäre Ursachen (hereditäre spastische Paraplegie) oder toxische Ursachen (Vitamin B12-Mangel).^{85,96}

1.3 Klinische Symptome

Patienten mit zervikaler Myelopathie leiden häufig an einem Verlust der Fingerfertigkeit mit einer verminderten Kontrolle der Feinmotorik. Zwei Formen der „*myelopathischen Hand*“ sind beschrieben.^{10,67}

Bei der häufigeren Form der „*myelopathischen Hand*“ kommt es zu einer spastischen Funktionsstörung mit Verlust der Geschicklichkeit der Hand- und Fingerbewegungen. Die Extension und die Adduktion der ulnaren 2 oder 3 Finger sind abgeschwächt. Der schnelle, repetitive Faustschluss ist gestört. Des Weiteren ist das Schmerzempfinden vermindert.⁶⁷

Die seltenere amyotrophe Form der „*myelopathischen Hand*“ ist charakterisiert durch den Verlust der intrinsischen und extrinsischen Handmuskulatur und der Muskeln der ulnaren Seite des Unterarms. Es resultiert eine motorische Funktionsstörung mit Kraftlosigkeit. Im Gegensatz zur häufiger beobachteten Form, liegt hier keine spastische, sondern eine schlaffe Hand vor. Oft wird eine Schwäche der Fingerextension und -adduktion beobachtet. Zudem kommt es zu keinen oder nur leichten Sensibilitätsstörungen, wie Hypästhesie und Hypalgesie.¹⁰

Durch die Abnahme der Fingerfertigkeit haben Patienten mit zervikaler Myelopathie Schwierigkeiten kleine Objekte zu bedienen, wie Knöpfe oder Messer und Gabel.¹⁵ Hosono et al.²⁹ beobachteten eine reduzierte Geschwindigkeit der Fingerbewegung. Vor allem in der initialen Phase einer Bewegung fühlen sich die Finger für den Patienten „plump“ an, als ob sie gefroren wären.²⁹ Diese Beeinträchtigung der feinmotorischen Funktion kann zu einer verminderten Unabhängigkeit im Alltag und zu einer verminderten Lebensqualität führen.

Neben einer funktionellen Verschlechterung der oberen Extremität, kann es zu einer Beeinträchtigung der unteren Extremität kommen, bis hin zur Gehunfähigkeit. Patienten mit der klassischen Form der „*myelopathischen Hand*“ leiden häufig auch an Spastiken der unteren Extremität, sodass eine spastische Tetraparese vorliegt.⁶⁷ Dagegen scheint die amyotrophe Form der „*myelopathischen Hand*“ nicht mit einer Gangstörung assoziiert zu sein.¹⁰ Maezawa et al.⁴² haben das Gangbild bei zervikaler Myelopathie analysiert. Durch einen erhöhten Muskeltonus der Flexoren und Extensoren kommt es zu einer Ganginstabilität und das wechselseitige Treten und Schwingen der Beine ist erschwert. Die Dauer der Standphase ist verlängert. Die Schrittbasis ist verbreitert und die Schrittlänge verkürzt. Die Ganggeschwindigkeit ist reduziert. Es konnte eine verminderte Flexion im Kniegelenk während der Schwungphase und eine verminderte Plantarflexion im Sprunggelenk während der Standphase beobachtet werden.⁴²

Weitere Symptome der zervikalen Myelopathie sind Kraftlosigkeit, Muskelatrophien und gesteigerte Sehnenreflexe der oberen und unteren Extremitäten. Die Reflexe können jedoch auch abgeschwächt sein, da eine zervikale Myelopathie häufig mit einer Radikulopathie auftritt. Diese wird durch eine begleitende Stenose der Foramina intervertebralia bei fortgeschrittener zervikaler Spondylose verursacht. Der Bauchhautreflex kann nicht auslösbar sein. Faszikulationen und Pyramidenbahnzeichen, wie Klonus, der Trömner-Reflex, das Babinski-Zeichen, das Chaddock-Zeichen, das Lhermitte-Zeichen, umgekehrter Radiusperiostreflex und eine positive Plantarantwort, können auftreten.^{15,33,77,85}

Zudem kann es zu Sensibilitätsstörungen sowohl peripher als auch am Stamm kommen mit Verlust des Schmerz-, Temperatur-, und Berührungsempfinden.⁸⁵ Veränderungen

des Vibrationsempfindens oder der Propriozeption werden oft bei chronischer und schwerer zervikaler Myelopathie beobachtet.¹⁵

Zudem können Patienten mit zervikaler Myelopathie an Nacken- und Schulterschmerzen leiden.^{33,85,96} Häufig besteht ein verminderter Bewegungsumfang der zervikalen Wirbelsäule durch das Vorliegen einer fortgeschrittenen zervikalen Spondylose.⁷⁷ In schweren Fällen können die Patienten an einer erhöhten Miktionsfrequenz und Drangsymptomatik leiden.³³ Durch Sphinkterfunktionsstörungen kann es zur Stuhl- und Harninkontinenz kommen.^{33,78}

Die klinischen Symptome variieren je nach Lokalisation (Höhe der Myelonschädigung, Beteiligung von Nervenwurzeln) und Schweregrad.^{15,85}

Die Symptome beginnen in der Regel schleichend. Sie können aber auch akut auftreten, bspw. nach einem Kopf- oder Nackentrauma, wie einem Sturz oder einer Hyperextension.⁸⁵

Der Krankheitsverlauf ist variabel und für den individuellen Patienten nicht vorherzusagen.³⁵

Matz et al.⁴⁷ stellten fest, dass bei vielen Patienten eine Verschlechterung langsam und schrittweise eintrat. Jedoch sind auch lange Perioden ohne Progress nicht selten und einige Patienten gaben sogar wieder eine Verbesserung eines Teils der Symptome im Verlauf an.

1.4 Risikofaktoren für den Schweregrad

Das Vorhandensein von Risikofaktoren, welche mit dem Schweregrad der zervikalen Myelopathie assoziiert sind, wird in der Literatur kontrovers diskutiert.

Ein höheres Alter scheint ein Risikofaktor für eine schwerere funktionelle Beeinträchtigung bei zervikaler Myelopathie zu sein.^{37,90,94} Hierfür könnte die geringere muskuläre und koordinative Reservekapazität im Alter ursächlich sein. Des Weiteren berichteten Karpova et al.³⁷, dass bei Patienten mit einer kürzeren Symptombdauer die funktionelle Beeinträchtigung geringer war. Dies konnten Vitzthum et al.⁹⁰ jedoch nicht bestätigen.

Das Geschlecht, die Anzahl der komprimierten Segmente und die sagittale Anordnung der zervikalen Wirbelsäule scheinen keine Risikofaktoren für den Schweregrad der zervikalen Myelopathie zu sein.³⁷ Zudem konnten Vitzthum et al.⁹⁰ keinen Einfluss der Schwere der vom Patienten ausgeübten körperlichen Betätigung bei der Arbeit auf die neurologische Funktionsstörung finden.

1.5 Diagnostik

Zur primären Diagnostik der zervikalen Myelopathie zählen der klinische Befund mit Beurteilung der neurologischen Funktionsstörungen sowie der neuroradiologische Befund.

1.5.1 Evaluation der neurologischen Funktionsstörungen

Die Erfassung des neurologischen Status ist entscheidend zur Beurteilung des Schweregrads der zervikalen Myelopathie und zur Evaluierung des postoperativen Ergebnisses nach dekompressiver Therapie.

Die zwei in der Literatur am häufigsten angewandten Messmethoden zur Erfassung und Quantifizierung der neurologischen Funktionsstörungen sind der *Japanese Orthopaedic Association (JOA) Score*³⁴ und der *Nurick-Score*⁶². Ein krankheitsspezifischer *Score* ist der *European Myelopathy Score (EMS)*⁷⁷.

Der *Nurick-Score* (s. Appendix) ist der älteste dieser drei *Scores*⁹⁰ und hat eine gute *inter-* und *intra-rater* Reliabilität⁸⁰.

Er beurteilt den Gang und erfasst daher nur begrenzt das Ausmaß der funktionellen Beeinträchtigung bei zervikaler Myelopathie.¹⁵ Ein Vorteil des *Scores* ist allerdings die zusätzliche Ermittlung der ökonomischen Situation, indem die Patienten nach ihrer Fähigkeit gefragt werden eine Ganztagsarbeit auszuüben und die Hausarbeit zu bewältigen.⁹⁰

Der *JOA-Score* und der *EMS* (s. Appendix) erfassen motorische Funktionsstörungen der oberen und unteren Extremität, sensible Defizite, und Störungen der Sphinkterfunktion.⁹⁰ Der *EMS* erfasst zusätzlich die Schmerzintensität sowie die Propriozeption und Koordination.^{77,90} Da der *EMS* dadurch den funktionellen Status besser zu erfassen scheint, empfehlen Vitzthum et al.⁹⁰ den *EMS* dem *JOA-Score*

vorzuziehen. Durch die Analyse der Koordination und Propriozeption können zudem Schlüsse gezogen werden über die Arbeitsfähigkeit und die Bewältigung des Alltags.⁹⁰

Weitere Messmethoden des neurologischen Status sind u.a. der *Myelopathy Disability Index*, der *short form health survey (SF-36)* und die *Cooper Myelopathy Scale*.^{28,33,90}

Zur Erfassung der Schmerzen wird häufig die Visuelle Analog-Skala (VAS) benutzt.³⁴

Diese Messmethoden sind jedoch subjektiv, da sie auf einer Befragung des Patienten basieren. Sie können von psychischen Beschwerden der Patienten beeinflusst werden. Messmethoden, die die neurologischen Funktionen der Patienten direkt erfassen, sind dagegen objektiv und haben eine höhere Reliabilität als subjektive Messmethoden.⁸¹

Zudem werden zur Erhebung von *Scores* ordinale oder nominale Skalen verwendet. Objektive Messmethoden können dagegen den funktionellen Status quantitativ evaluieren und postoperative Veränderungen der Funktion akkurater erfassen. Dies ist wichtig, um den Nutzen einer operativen Therapie valide zu erfassen.⁸¹

In der Literatur sind nur wenige Methoden zur Quantifizierung der Handfunktion und des Gangbilds bei zervikaler Myelopathie beschrieben.

Ono et al.⁶⁷ und Hosono et al.²⁹ haben den *Grip and Release-Test* vorgeschlagen, bei dem die Finger wiederholt zu einer Faust geschlossen und wieder geöffnet werden sollten. Die Bewegungen sollten so schnell wie möglich während einer bestimmten Zeitspanne (10 bzw. 15 Sekunden) durchgeführt werden. Es wurde die Anzahl der Bewegungszyklen gezählt.

Der *Nine Hole Peg-Test*⁶⁶ ist ein weiterer Test zur Quantifizierung der Handfunktion. Hier wird die benötigte Zeit gemessen, um neun Dübel nacheinander in ein Loch in einem Brett zu setzen.

Daneben sind Tests beschrieben zur Untersuchung der Handfunktion bei Patienten mit traumatischer Schädigung des Myelons,⁴ wie der *Jebsen Hand Function Test*³² und der *Wolf Motor Function Test*⁵⁷. Bei diesen Tests wird die benötigte Zeit zur Durchführung diverser feinmotorischer Aufgaben oder die Greifkraft mittels Dynamometer gemessen.

Zur Quantifizierung der Gangstörung haben sich Gehtests als valides Mittel erwiesen.^{72,81} Hierbei werden die benötigte Zeit und die Anzahl der Schritte beim Zurücklegen einer definierten Strecke erfasst. Bei einer Verschlechterung der neurologischen Funktionsstörungen verlängert sich die Zeit und die Anzahl der benötigten Schritten wird größer, da die Patienten kleinere Schritte machen.⁴⁹ Der Gehtest ist eine leicht durchzuführende Messmethode und kann zur Beurteilung der Auswirkungen einer Therapie benutzt werden.⁸¹

1.5.2 Neuroradiologische Untersuchung

Die Rolle der bildgebenden Verfahren ist es, die strukturellen Ursachen der Myelopathie zu identifizieren, das Ausmaß der Kompression auf das Myelon zu erfassen sowie die Schädigung des Myelons selbst darzustellen.³³

Die Magnetresonanztomographie (MRT) wird häufig verwendet zur Diagnosestellung bei zervikaler Myelopathie.³⁸ Da mittels MRT das Weichteilgewebe gut dargestellt wird, können intramedulläre Signalveränderungen als Zeichen einer Druckschädigung des Rückenmarks bei zervikaler Myelopathie beurteilt werden und nicht-ossäre Ursachen einer Myelonkompression visualisiert werden, wie ein Bandscheibenvorfall, eine Hypertrophie des Ligamentum flavum oder Facettengelenkszysten.^{15,63}

Zudem ist die MRT hilfreich zur Bestimmung des Grads der Myelonkompression. Hierfür können die transversale Fläche des Myelons und der Kompressionsquotient (KQ = sagittaler Durchmesser/ transversaler Durchmesser x 100%) auf der Höhe der maximalen Myelonkompression benutzt werden. Die transversale Fläche scheint mit dem klinischen Schweregrad assoziiert zu sein.^{38,54,64}

Bei zervikaler Myelopathie können außerdem Veränderungen der Signalintensität in T1- und T2-gewichteten Sequenzen beobachtet werden.¹ Sie scheinen pathologische Veränderungen des Myelons durch die chronische Kompression widerzuspiegeln, wie Ödeme, vaskuläre Schädigung, Gliose, Infarzierung oder Atrophie.^{50,54} In einem experimentellen Tiermodell mit Ratten beschrieben Karadimas et al.³⁶ Veränderungen des Myelongewebes durch chronische Kompression: Verlust und Dysfunktion von

endothelialen Zellen, Alterationen der vaskulären Architektur, Störungen der Blut-Hirn-Schranke, Neuroinflammation durch Aktivierung von Mikroglia und Makrophagen sowie Apoptose.

Ob die Veränderungen der Signalintensität mit dem klinischen Schweregrad zusammenhängen, wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Singh et al.⁸² und Arvin et al.² konnten eine Korrelation beobachten, während andere Studien dies nicht nachweisen konnten.^{38,83,90,91}

Ferner scheint die MRT einen prognostischen Wert für das postoperative Ergebnis zu haben und kann somit die Entscheidung zur Indikation einer operativen Therapie beeinflussen.^{38,54,64,94} So fanden Karpova et al.³⁸, dass unter einem Grenzwert von 45 mm² (transversale Fläche) die Schäden des Myelons irreversibel sind.

Weitere bildgebende Verfahren zur Diagnostik der zervikalen Myelopathie sind konventionelle Röntgenaufnahmen und die Myelographie inklusive postmyelographischer Computertomographie (postmyelo CT).^{15,85}

Mittels konventioneller Röntgenaufnahmen in anterior-posteriorer und seitlicher Projektion können spondylotische Veränderungen, wie eine Verschmälerung des Intervertebralraums, Osteophyten oder Spondylolisthesen, eine Ossifikation des posterioren longitudinalen Ligaments, aber auch die sagittale Anordnung der zervikalen Wirbelsäule und der sagittale Diameter des Spinalkanal dargestellt werden. Röntgenaufnahmen in schräger Projektion können zur Darstellung einer Foramenstenose benutzt werden. Flexions- und Extensionsaufnahmen in seitlicher Projektion erlauben eine Beurteilung des Bewegungsumfangs und das Erfassen einer Instabilität.¹⁵

Die Myelographie mit Post-Myelo-CT kann verwendet werden, wenn eine Kontraindikation für die Durchführung einer MRT besteht. Allerdings ist dieses Verfahren invasiver als die MRT, da Kontrastmittel in den Spinalkanal injiziert wird. Mögliche Komplikationen, insbesondere Infektionen und ein Liquorunterdruck-Syndrom, können, wenn auch selten, auftreten. Dies führte dazu, dass die Myelographie heute nicht mehr die diagnostische Methode erster Wahl ist.⁸⁵ Die

computertomographische Untersuchung an sich gibt die knöchernen Verhältnisse exakter wider als die kernspintomographische Untersuchung.

1.5.3 Elektrophysiologische Untersuchung

Elektrophysiologische Untersuchungen können bei zervikaler Myelopathie eingesetzt werden, um die neurophysiologische Parameter zu bestimmen und genau zu quantifizieren. Hierzu zählen Motorisch und Somatosensibel Evozierte Potentiale (MEP bzw. SSEP) und die Elektromyographie. Mithilfe dieser Messmethoden kann zwischen Läsionen des Myelons, der Nervenwurzel, des Plexus brachialis und peripheren Nerven unterschieden werden.³⁹

Mittels MEPs kann die Funktion des Tractus corticospinalis erfasst werden. Nach Stimulation eines primär-motorischen Areals (des Arms oder Beins) kommt es zur Weiterleitung der elektrischen Erregung über die Pyramidenbahn und das Vorderhorn bis zur motorischen Einheit eines Zielmuskels, wo das Muskelsummenaktionspotential abgeleitet wird.

Mittels SSEPs kann die Funktion der Hinterstrangbahn beurteilt werden, indem nach Stimulation eines peripheren Nervens die Aktionspotentiale in Höhe des Nerveneintritts ins Rückenmark und über dem entsprechenden Hirnareal abgeleitet werden.

Bei Patienten mit zervikaler Myelopathie sind Veränderungen der MEPs beschrieben; Verlängerung der Latenz und zentralmotorische Leitungszeit sowie Fehlen der kortikalen Antwort.⁴¹ Die zentralmotorische Leitungszeit korreliert mit dem klinischen Schweregrad (*JOA-Score*, 10m-Gehtest, *Grip and Release-Test*, *Nine Hole Peg-Test*).^{49,59} Nakanishi et al.⁵⁹ beobachteten eine signifikante Verminderung der zentralmotorischen Leitungszeit 1 Jahr nach operativer Therapie. Der Tractus corticospinalis scheint sich also postoperativ zu erholen. Zudem fanden Nakanishi et al.⁵⁹ eine Korrelation zwischen der postoperativen Verbesserung der zentralmotorischen Leitungszeit und der klinischen Verbesserung (*JOA-Score*). Mazur et al.⁴⁹ beobachteten jedoch, dass es ab einem bestimmten Grenzwert der präoperativen zentralmotorischen Leitungszeit (7,2 ms) zu einer postoperativen Verschlechterung der Klinik kommt.

Frühere Studien zeigten, dass bei Patienten mit zervikaler Myelopathie die SSEPs des N. medianus und N. tibialis mit dem klinischen Schweregrad (*JOA-Score*)

korrelierten.^{31,41} Des Weiteren konnte in diesen Studien gezeigt werden, dass die SSEPs des N. medianus mit der postoperativen Erholung (*JOA-Score*) korrelierten.

Als weitere diagnostische Maßnahmen können Blutproben und Liquoruntersuchungen erforderlich sein, um andere Erkrankungen, wie Multiple Sklerose und andere inflammatorische demyelinisierende Erkrankungen, Infektionskrankheiten und Malignome, die die Hirnhäute betreffen, ausschließen zu können.⁸⁵

1.6 Therapie

Die Therapie der zervikalen Myelopathie kann konservativ oder chirurgisch erfolgen, je nach Art und Schweregrad der Symptome und je nach Geschwindigkeit der Verschlechterung.⁸⁵

1.6.1 Konservative Therapie

Bei milder zervikaler Myelopathie kann eine konservative Therapie versucht werden. Die Patienten sollen dabei engmaschig kontrolliert werden, um eine Progression oder Remission der Symptome zu erfassen. Des Weiteren werden Patienten, die eine operative Therapie ablehnen oder bei denen das allgemeine Operationsrisiko einen chirurgischen Eingriff als zu riskant erscheinen lässt, konservativ behandelt.¹⁵

Die konservative Therapie besteht aus physikalischer Therapie mit Gleichgewichts- und Gangübungen sowie Krafttraining, einer Nackenimmobilisation durch das Tragen einer Halskrause, die Gabe von nichtsteroidalen Antiphlogistika, epiduralen Steroidinjektionen und Nerven- oder Facettenblockade durch spinale Injektionen.^{15,35,78,85} Manipulationen im Sinne von chirotherapeutischen Maßnahmen sind kontraindiziert, da sie eine Verengung eines bereits engen Spinalkanals und bereits verengter Foramina verursachen.¹⁵ Leichte Traktionsbehandlungen und Massagen können unter allen Vorsichtsmaßnahmen durchgeführt werden, um lokale Beschwerden zu lindern.

Beim Vergleich von konservativ behandelten Patienten und operativ behandelten Patienten, beobachteten Sampath et al.⁷⁸ ein durchwegs besseres Ergebnis der operierten Patienten, obwohl diese initial mehr Symptome und schwerwiegendere neurologische Funktionsstörungen aufwiesen.

1.6.2 Operative Therapie

Patienten mit chronischen oder progressiven Symptomen und Patienten, die nicht auf die konservative Therapie ansprechen, sollten als Kandidaten für eine Operation angesehen werden.¹⁵ Aber auch Patienten mit einer milden zervikalen Myelopathie werden vermehrt operativ behandelt.³³

Die chirurgische Therapie besteht daraus, den Spinalkanal zu erweitern, um eine Dekompression des Rückenmarks und eine Verbesserung der Blutversorgung zu erreichen. Die Operationstechnik wird individuell angepasst und ist abhängig von klinischen und radiologischen Faktoren.^{15,33}

Die Wahl der Operationszugangs, ventral oder dorsal, ist von multiplen Faktoren abhängig: die Ursache der Kompression, die Anzahl der beteiligten Rückenmarkssegmenten, die Anordnung und das Alignment der Wirbel, die Intensität der Nackenschmerzen, die Komorbidität der Patienten und die Vertrautheit des Operateurs mit den verschiedenen Techniken.¹⁵

Zu den ventralen Dekompressionsverfahren zählen die anteriore zervikale Diskektomie mit Fusion (anterior cervical discectomy with fusion ACDF) und die anteriore zervikale Korporektomie mit Fusion (anterior cervical corpectomy with fusion, ACCF). Diese Methoden sind indiziert bei einer neutralen oder kyphotischen Stellung der zervikalen Wirbelsäule, da die physiologische Lordose über einen ventralen Zugang wieder hergestellt werden kann. Nach der Dekompression wird die Stabilität durch eine Arthrodesis wiederhergestellt. Diese kann den zusätzlichen Vorteil haben, dass sie die Schmerzen bei Bewegung des spondylotischen Bewegungssegments ausschaltet.¹⁵

Eine ventrale Dekompression wird bei Stenosen über ein bis zwei Höhen empfohlen.^{15,76} Bei einer Stenose über drei oder mehr Höhen und insbesondere bei Vorhandensein einer physiologischen zervikalen Lordose ist die Wahl des optimalen Operationsverfahrens umstritten. Die ventrale Dekompression ist hier mit einer höheren Komplikationsrate assoziiert, daher wird oft eine dorsale Dekompression empfohlen.^{13,15,40,95}

Dorsale Dekompressionsverfahren sind die Laminektomie und die Laminoplastie. Bei der Laminektomie werden die Processus spinosi, die Laminae und das Ligamentum flavum entfernt.⁹ Dies ermöglicht eine Verlagerung des Rückenmarks nach dorsal und somit eine Dekompression des Rückenmarks und eine Verbesserung der Vaskularisation.⁷⁵ Durch die Gefahr einer resultierenden Instabilität und den Verlust der physiologischen zervikalen Lordose wird heute bevorzugt eine Laminektomie mit anschließender Fusion durchgeführt.^{9,15} So ist eine ausgedehnte Dekompression möglich ohne die Stabilität zu gefährden und ohne die zervikale Lordose zu verlieren, was wiederum zu vermehrten lokalen Beschwerden führt.

Da die Laminektomie allerdings höhere Komplikationsraten aufwies, wie die Entwicklung einer narbigen Postlaminektomie-Membran um die Dura mater oder einer postoperativen kyphotischen Deformierung der zervikalen Wirbelsäule, wurde die Laminoplastie entwickelt.^{15,26,45,46} Bei dieser Methode der Dekompression wird die dorsale Abdeckung durch die Laminae beibehalten.⁴⁶ Es existieren zwei Formen der Laminoplastie: eine exzentrische Erweiterung bei der die Laminae vertebrales unilateral durchtrennt und aufgeklappt werden und anschließend in dieser Position mit Titanplättchen und Schrauben fixiert werden und eine symmetrische Erweiterung mit bilateraler Durchtrennung und Fixation der Laminae vertebrales.¹⁵

Eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung eines dorsalen Verfahrens ist allerdings das Vorhandensein einer lordotischen oder neutralen Anordnung der zervikalen Wirbel. Dies ist notwendig, um eine Migration des Myelons nach dorsal, weg von anterioren komprimierenden Elementen, zu ermöglichen.¹⁵

1.7 Operative Komplikationen

Allgemeine operative Komplikationen bei Operationen an der zervikalen Wirbelsäule sind Verletzungen des Rückenmarks und der Nervenwurzeln, Verletzung der *A. vertebralis*, Liquorverlust, Infektionen, Nackenschmerzen und Nackensteifigkeit sowie Progression der zervikalen Myelopathie.^{15,85}

Durch Erweiterung des Spinalkanals kann es zu einer segmentalen Instabilität kommen. Auf der anderen Seite kann eine prophylaktische Fusion zu Komplikationen führen, wie Bewegungseinschränkung, Fusionsfehler und ausbleibende Fusion (Pseudarthrose), Schraubenfehlstellung nach einer ventralen oder dorsalen Instrumentierung, Degeneration und Ankylose der benachbarten Segmente („Anschlussdegeneration“).^{13,15,26,85}

Beim ventralen Zugang kann es zudem zu Dysphagie, Heiserkeit, Verletzung des Ösophagus sowie zu einer Atemwegskompression kommen.^{13,85}

Komplikationen bei dorsalen Operationsverfahren sind der Verlust der zervikalen Lordose und axiale Symptome. Letztere beinhalten Nackenschmerzen, Nackensteifigkeit und Schulterschmerzen, was die Lebensqualität stark beeinträchtigen kann.^{26,30}

1.8 Postoperatives Ergebnis

Eine Reihe von Studien hat gezeigt, dass mit ventralen und dorsalen Operationstechniken die neurologischen Funktionsstörungen und die Symptome verbessert werden kann.^{6,9,13,14,26,46,48,59,60,78,92,93} Zur Erfassung der postoperativen Verbesserung werden in vielen Studien *Scores* benutzt, die auf subjektiven Einschätzungen basieren wie der *JOA-Score*, der *Nurick-Score* und der *VAS-Score*.^{6,9,13,14,26,46,48,49,59,60,92,93} Es konnte aber auch eine Verbesserung der Handfunktion mittels objektiver Tests festgestellt werden, wie beim *Grip and Release-Test* und beim *Nine Hole Peg-Test*.^{29,49} Auch bei der quantitativen Analyse des Gangbilds konnte eine postoperative Verbesserung erfasst werden.^{38,49}

Neben den Veränderungen klinischer Parameter wurde untersucht, welchen Einfluss eine dekompressive Operation auf MRT-Parameter hat und ob die postoperativen Veränderungen dieser Parameter mit den klinischen Veränderungen zusammenhängen.^{2,38,40,54,83} Morio et al.⁵⁴ und Karpova et al.³⁸ stellten fest, dass eine postoperative Vergrößerung der transversalen Fläche des Myelons einer Verbesserung von subjektiven *Scores* (*JOA-Score* und *Nurick-Score*) einhergeht. Zudem konnten Karpova et al.³⁸ einen Zusammenhang zwischen der postoperativen transversalen Fläche und dem postoperativen Gangbild beobachten. Eine postoperative Persistenz oder

Regression der intramedullären Signalveränderung scheint ebenfalls mit dem funktionellen Ergebnis assoziiert zu sein.^{2,83} Letzteres konnten Kumar et al.⁴⁰ allerdings nicht bestätigen.

1.9 Prognosefaktoren für das postoperative Ergebnis

Um vorhersagen zu können welche Patienten am meisten von einer operativen Therapie profitieren, müssen Prognosefaktoren bestimmt werden. In der Literatur wird kontrovers diskutiert, welche Faktoren prognostisch relevant sein könnten und somit die Entscheidung zur Operationsindikation beeinflussen können. Jedoch ist nicht ausreichend geklärt, welche klinischen, radiologischen oder elektrophysiologischen Parameter einen Einfluss auf das postoperative Ergebnis haben.^{11,31,37,38,40,41,54,55,64,94}

Kumar et al.⁴⁰ beobachteten, dass ein geringer klinischer Schweregrad mit einem besseren postoperativen Ergebnis assoziiert ist. Dagegen konnten Ebersold et al.¹¹ und Yamazaki et al.⁹⁴ den klinischen Schweregrad nicht als Prognosefaktor ausmachen.

In weiteren Studien konnte gezeigt werden, dass eine größere transversale Fläche des Myelons einen günstigen prognostischen Wert für das postoperative Ergebnis hat.^{21,38,64,94} Morio et al.⁵⁴ konnten jedoch keinen Zusammenhang zwischen der transversalen Fläche und der klinische Erholung finden.

Ob Veränderungen der Signalintensität in einer T1- oder T2-gewichteten MRT ein Prognosefaktor sind, wird ebenfalls kontrovers diskutiert.^{38,40,58,64,83,91,94,98} Morio et al.⁵⁴ und Suri et al.⁸³ schlussfolgerten, dass präoperative Veränderungen der Signalintensität in einer T2-gewichteten MRT auf ein breites Spektrum an Erholungspotentialen hinzudeuten scheint, während Veränderungen der Signalintensität in einer T1-gewichteten MRT mit einer schlechten Prognose assoziiert zu sein scheint.

Innerhalb der elektrophysiologischen Untersuchung könnte ein unauffälliges SSEP des N. medianus ein günstiger Prognosefaktor für das postoperative Ergebnis zu sein.^{31,41,55} Allerdings konnten Vitzthum et al.⁹⁰ dies nicht bestätigen.

Zudem ist der prognostische Wert von weiteren Faktoren in Studien untersucht worden. So wird diskutiert, ob das Alter ein Prognosefaktor für das postoperative Ergebnis ist. Einige Studien haben gezeigt, dass bei jüngeren Patienten die postoperative Besserung der neurologischen Funktion höher war als bei älteren Patienten.^{6,21,37,41,54,58,83,94} Dagegen schien in anderen Studien das Alter keinen Einfluss auf das postoperative Ergebnis zu haben.^{11,24,64,94}

Daneben wird die Dauer der Symptome bis zur operativen Therapie als prognostisch relevant angesehen.^{6,11,21,54,64,83} Karpova et al.³⁷, Kumar et al.⁴⁰ und Mehalic et al.⁵⁰ konnten dies allerdings wiederum nicht bestätigen. Handa et al.²⁴ und Yamazaki et al.⁹⁴, beobachteten, dass die Symptombdauer nur bei älteren Patienten (über 70 Jahre bzw. über 65 Jahre) ein Prognosefaktor für das postoperative Ergebnis ist.

Des Weiteren ist unklar, ob die Anzahl der komprimierten Rückenmarkssegmente oder die sagittale Anordnung der zervikalen Wirbel das postoperative Ergebnis beeinflussen.^{6,11,21,37,58,83}

Ob die Art des operativen Zugangs, ventral oder dorsal, prognostisch relevant ist, wurde ebenfalls in Studien untersucht.^{11,25,37,76,83,95} Während einige Studien keinen Unterschied der klinischen Erholung zwischen von ventral und von dorsal operierten Patienten ausmachen konnten,^{11,25,37,76,95} beobachtete Suri et al.⁸³ ein besseres Ergebnis bei einer ventralen Dekompression.

1.10 Fragestellung

Ziel dieser Studie ist es das Ausmaß neurologischer Funktionsstörungen vor der Operation sowie deren postoperativen Verlauf zu quantifizieren. So soll der Nutzen einer operativen Therapie bei zervikaler Myelopathie evaluiert werden. Veränderungen der feinmotorischen Funktion liegen im Fokus dieser Studie, da sie bisher nur ungenau in der Literatur beschrieben wurden.

Außerdem wird in dieser Studie der Zusammenhang zwischen der feinmotorischen Funktion, dem Gangbild und dem kernspintomographischen Befund untersucht. Ferner wird der Einfluss bestimmter Faktoren auf den Schweregrad der neurologischen Funktionsstörungen sowie auf das postoperative Ergebnis untersucht.

2 Material und Methode

2.1 Studiendesign

Für die prospektive Untersuchung wurden im Zeitraum zwischen August 2011 und September 2013 28 Patienten untersucht, die wegen einer degenerativ bedingten Stenose der Halswirbelsäule mit zervikaler Myelopathie an der Neurochirurgischen Klinik und Poliklinik des Universitätsklinikums Würzburg operativ mit einer Dekompression des Spinalkanals versorgt wurden. Sowohl Frauen als auch Männer zwischen 18 und 100 Jahren wurden eingeschlossen. Ausgeschlossen wurden Patienten mit relevanten peripheren Läsionen des Bewegungsapparates, traumatisch bedingten Stenosen der Halswirbelsäule oder einer Myelopathie ischämischer Genese.

Bei den eingeschlossenen Patienten (n = 28) wurden jeweils an drei Zeitpunkten Untersuchungen der feinmotorischen Funktionen und des Gangbilds, mit Erhebung des *ICARS-Scores (International Cooperative Ataxia Rating Scale)*,⁸⁶ durchgeführt. Des Weiteren wurden an allen Untersuchungszeitpunkten T2-gewichtete kernspintomographische Untersuchungen der Halswirbelsäule durchgeführt. Die Patienten bearbeiteten selbständig einen Fragebogen, in dem der *European Myelopathy Score (EMS)*, der *Nurick-Score* und eine Numerische Rating-Skala (NRS), zur Beurteilung der Schmerzintensität, integriert war (s. Appendix). Bei der ersten Untersuchung erhielten die Patienten zusammen mit dem Fragebogen eine schriftliche und mündliche Patienteninformation, in der der Verlauf sowie der Nutzen der Studie erklärt wurde. Die Patienten willigten schriftlich in die Teilnahme an der Studie ein. Es lag ein positives Votum der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Universität Würzburg vor (Aktenzeichen 83/11).

Der erste Untersuchungszeitpunkt lag präoperativ im Rahmen des stationären Aufenthaltes der Patienten. Der zweite und dritte Untersuchungszeitpunkt wurden postoperativ durchgeführt, in einem Abstand von 6 bzw. 12 Monaten zur operativen Dekompression. Diese Untersuchungen fanden ambulant im Rahmen der klinischen Nachsorge statt (Abbildung 1).

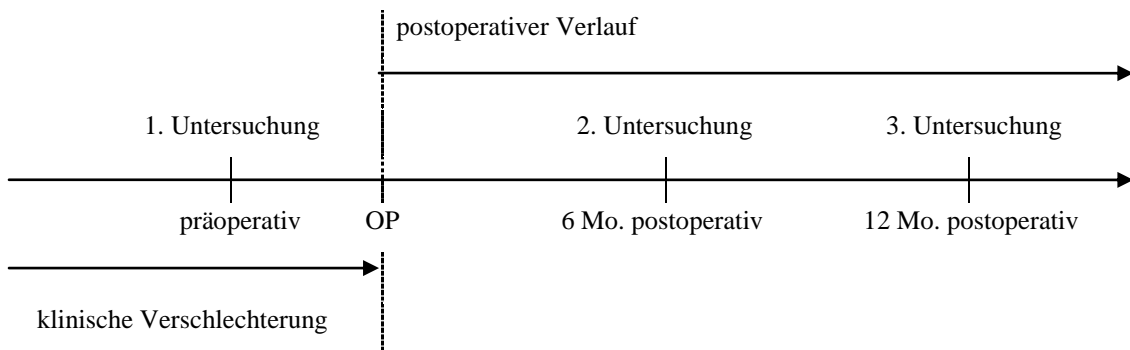


Abbildung 1: Flowchart mit Darstellung der Untersuchungszeitpunkte. Die Ausgangsuntersuchung erfolgte während des stationären Aufenthalts unmittelbar vor der Operation (in der Regel 1 oder 2 Tage präoperativ). Die postoperativen Kontrolluntersuchungen erfolgten 6 und 12 Monate nach der operativen Dekompression.

OP: Operation, Mo.: Monate

Bei einer gesunden Kontrollgruppe ($n = 23$) aus freiwilligen Probanden wurden die gleichen Untersuchungen zur Beurteilung der Feinmotorik und des Gangbilds (ohne Erhebung des *ICARS-Scores*) durchgeführt.

Die Altersverteilung der Kontrollgruppe sollte mit derer der Patienten vergleichbar sein. Ausschlusskriterium waren neurologische Erkrankungen, insbesondere Erkrankungen des Rückenmarks oder der Wirbelsäule.

Wie die Patienten erhielten auch die gesunden freiwilligen Probanden eine schriftliche und mündliche Information über die Studie. In dieser wurde der Verlauf und der Nutzen der Studie erklärt. Bei den gesunden Probanden wurden keine MRT-Untersuchungen durchgeführt.

2.2 Methodik

2.2.1 Evaluation der Feinmotorik



Abbildung 2: Feinmotorische Untersuchung. Digitales Schreibtablett (WACOM IV) mit Aufgabenblatt und kugelschreiberähnlichem Stift angeschlossen an Computer.

Ein digitales Graphiktablets des Modells WACOM IV (WACOM Europe GmbH, Düsseldorf, Deutschland) wurde verwendet, um Bewegungsabläufe zu messen und so die Feinmotorik zu untersuchen. Mit Hilfe dieses Tablets und des Programms CSWIN (Verlag Medcom, München, Deutschland) sollten die Studienteilnehmer Zeichen- und Schreibaufgaben durchführen. Die Analyse der erhobenen Daten erfolgte mittels SPSS 22 (IBM Analytics, Ehingen, Deutschland).

Dieses Messinstrument wurde bereits in anderen Studien verwendet, beispielsweise zur Analyse von Schreib- und Zeichenbewegungen,^{52,70,73} in der experimentellen Psychiatrie^{51,79,87} sowie bei Krankheitsbildern mit Beeinträchtigung der feinmotorischen Funktion, wie essentieller Tremor,¹⁷ Tremor bei Parkinson,^{16,71} Ataxie bei Multiple Sklerose¹⁹ sowie Ataxie bei cerebellären Tumoren im Kindes- und Jugendalter.⁷⁴ Hierbei stellte es sich als nützliches Messinstrument zur Diagnostik und Verlaufskontrolle heraus.⁸

Die feinmotorische Untersuchung dauerte ca. 20 min und erfolgte unter ungestörten Bedingungen in einem ruhigen Raum. Die Patienten und Probanden saßen auf einem Stuhl mit Rückenlehne, das digitale Graphiktablett lag vor ihnen auf einem Schreibtisch

und war an einen Computer angeschlossen. Der Untersucher saß neben den Studienteilnehmern vor dem Computerbildschirm. Dabei war der Bildschirm für die Studienteilnehmer nicht einsehbar (Abbildung 2).

Die Aufgaben wurden auf Papierblättern ausgeführt. Auf den Papierblättern stand eine kurze Angabe der durchzuführenden Aufgabe. Zudem wurden diese mündlich vom Untersucher erklärt.

Die Aufgabenblätter wurden unter eine transparente Kunststoffolie auf das digitale Graphiktablett gelegt. Durch die Kunststoffolie waren die Aufgabenblätter fixiert. Die Reibung der Kunststoffolie war vergleichbar mit der Reibung eines normalen Papierblatts (*WACOM Translucent Overlay*).

Mit einem kugelschreiberähnlichen Stift wurden die Zeichen- und Schreibaufgaben durchgeführt. Die Spitze des Stiftes produzierte keine Schriftspur, sodass das Geschriebene vom Studienteilnehmer nicht visuell wahrgenommen werden konnte. Auf dem Bildschirm wurden die Schreibbewegungen visualisiert, sodass der Untersucher kontrollieren konnte, ob die Aufgaben richtig durchgeführt wurden (Abbildung 3a-b).

Der Ort und der Druck der Stiftspitze wurden vom digitalen Schreibtablett mit einer räumlichen Auflösung von 0.05 mm und einer zeitlichen Auflösung von 200 Hz erfasst. Bewegungen der Stiftspitze konnten noch bis zu 1 cm oberhalb des Tablett registriert werden.⁷³

Die Positionen der Stiftspitze während den Schreib- und Zeichenbewegungen wurden mit einem X, Y, Z-Koordinatensystem dargestellt.^{52,79} Die X-Achse stellte die Zeit und die Z-Achse den axialen Druck beim Schreiben dar. Die Schreib- und Zeichenbewegungen wurden auf die Y-Achse projiziert und in Auf- und Abstriche segmentiert.^{52,73,79} Mittels nicht-parametrischer Kernel-Regression wurden die Geschwindigkeit (erste Ableitung) und die Beschleunigung (zweite Ableitung) errechnet und geglättet.⁵² Ein Auf- oder Abstrich erstreckte sich per Definition zwischen zwei sukzessiven Durchgängen durch die X-Achse ($y = 0$) auf dem Geschwindigkeitsprofil.⁵² Ein Auf- oder Abstrich begann und endete also mit einer

Geschwindigkeit, die Null war.⁵² Die Grenzen der Auf- und Abstriche entsprachen einem Richtungswechsel der Bewegung, zum Beispiel von einer Aufwärtsbewegung in eine Abwärtsbewegung.⁵²

Durch diese Segmentierung in Auf- und Abstriche konnten kinematische Parameter berechnet werden, mit denen die feinmotorischen Fertigkeiten bestimmt wurden (Abbildung 3c):^{52,73,74}

- der Druck (P) [N]
- die Frequenz (F) [Hz]
- die Maximalgeschwindigkeit (V) [m/s]
- die Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen (NIV)
- der Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche (VarkoV) [%]

P entsprach dem axialen Druck, der beim Schreiben oder Zeichnen auf das Schreibtablett ausgeübt wurde und spiegelte die Spannung beim Schreiben oder Zeichnen wieder.^{52,73,79}

Die Frequenz und die Maximalgeschwindigkeit beschrieben die Schreibgeschwindigkeit. Die Frequenz entsprach der Anzahl der Auf- und Abstriche, die pro Sekunde registriert wurde. Die Maximalgeschwindigkeit (V) entsprach dem arithmetischen Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche.^{73,74}

Die Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen (Number of Inversions in Velocity, NIV) gab die Anzahl der Richtungsänderungen der Geschwindigkeit innerhalb eines Auf- oder Abstrichs an (von Akzeleration zu Dezeleration und umgekehrt).^{52,73,74} Mittels NIV kann der Grad der Automatisierung einer Schreibebelegung bestimmt werden.^{73,74} Ein niedriger NIV deutet auf eine flüssigere Durchführung der Schreibebelegung hin.^{79,87,89} Bei einer vollständig automatisierten Bewegung liegt genau eine Richtungsänderung der Geschwindigkeit (NIV = 1) innerhalb eines Auf- oder Abstrichs vor.⁵²

Der Variationskoeffizient gab die Variabilität der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche an.^{52,73} Eine niedrige Variabilität ist wichtig für einen effizienten und

rhythmischen Bewegungsablauf.⁷³ Bei vollkommen identischen Bewegungsabläufen ist sein Wert null.⁵²

Für die Evaluierung der Feinmotorik wurden die kinematischen Parameter von sechs der 12 durchgeführten Aufgaben analysiert. Die Aufgaben sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1
Übersicht der sechs Schreib- und Zeichenaufgaben

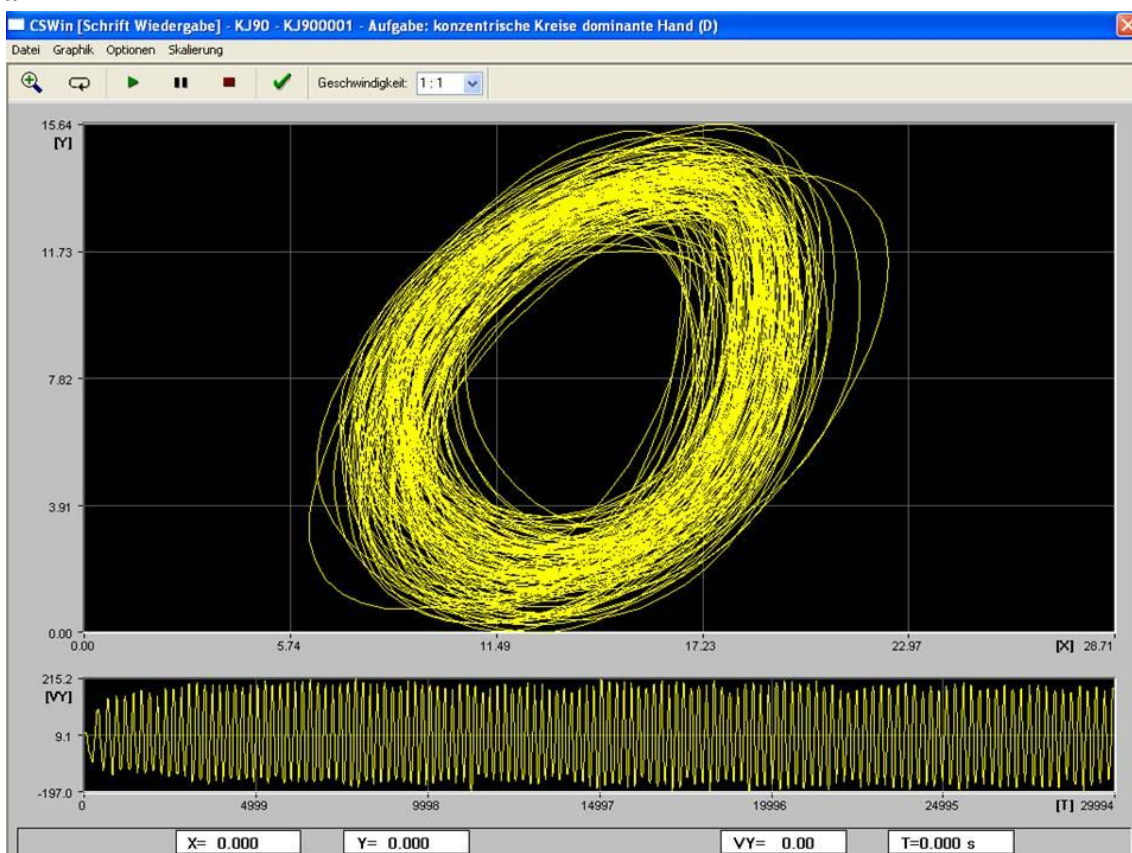
| Aufgaben | | Beschreibung |
|------------|---|---|
| Aufgabe 1 | Kreise Zeichnen dominante Hand (D) | Zwischen zwei vorgezeichneten Linien sollten mit der dominanten Hand fortlaufend Kreise übereinander gezeichnet werden. Diese kreisende Bewegung sollten so schnell wie möglich während 30 s durchgeführt werden. Die vorgezeichneten Linien sollten dabei berührt, aber nicht überschritten werden. |
| Aufgabe 3 | Spirale Zeichnen | Zwischen zwei vorgezeichneten Linien sollte eine archimedische Spirale gezeichnet werden. Die Spirale sollte von außen nach innen gezeichnet werden. Dabei sollte oben anfangen werden und die obere und untere vorgezeichnete Linie berührt werden. Bei dieser Aufgabe kam es nicht auf die Geschwindigkeit, sondern auf den Fluss und die Gleichmäßigkeit an. |
| Aufgabe 4 | Satz Schreiben | Auf eine vorgezeichnete Linie sollte der Satz „Der Ball rollt ins Tor“ geschrieben werden. Der Satz sollte in Schreibschrift geschrieben werden und der Stift sollte innerhalb eines Wortes möglichst nicht vom Blatt abgehoben werden. Der Satz sollte in der gewohnten Geschwindigkeit geschrieben werden. |
| Aufgabe 6 | kleine „a“s Schreiben | Bei dieser Aufgabe sollten zwischen zwei vorgezeichneten Linien kleine „a“s in Schreibschrift hintereinander geschrieben werden. Die „a“s sollten oben und unten die zwei Linien berühren. Dabei sollte der Stift nicht vom Blatt abgehoben werden. |
| Aufgabe 8 | Kreise Zeichnen nicht dominante Hand (ND) | Diese Aufgabe entsprach der Aufgabe 1, allerdings sollte hier die nicht dominante Hand benutzt werden. |
| Aufgabe 11 | Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen | Die Aufgabe 1 sollte hier mit geschlossenen Augen durchgeführt werden. |

Übersicht und Beschreibung der sechs Schreib- und Zeichenaufgaben.

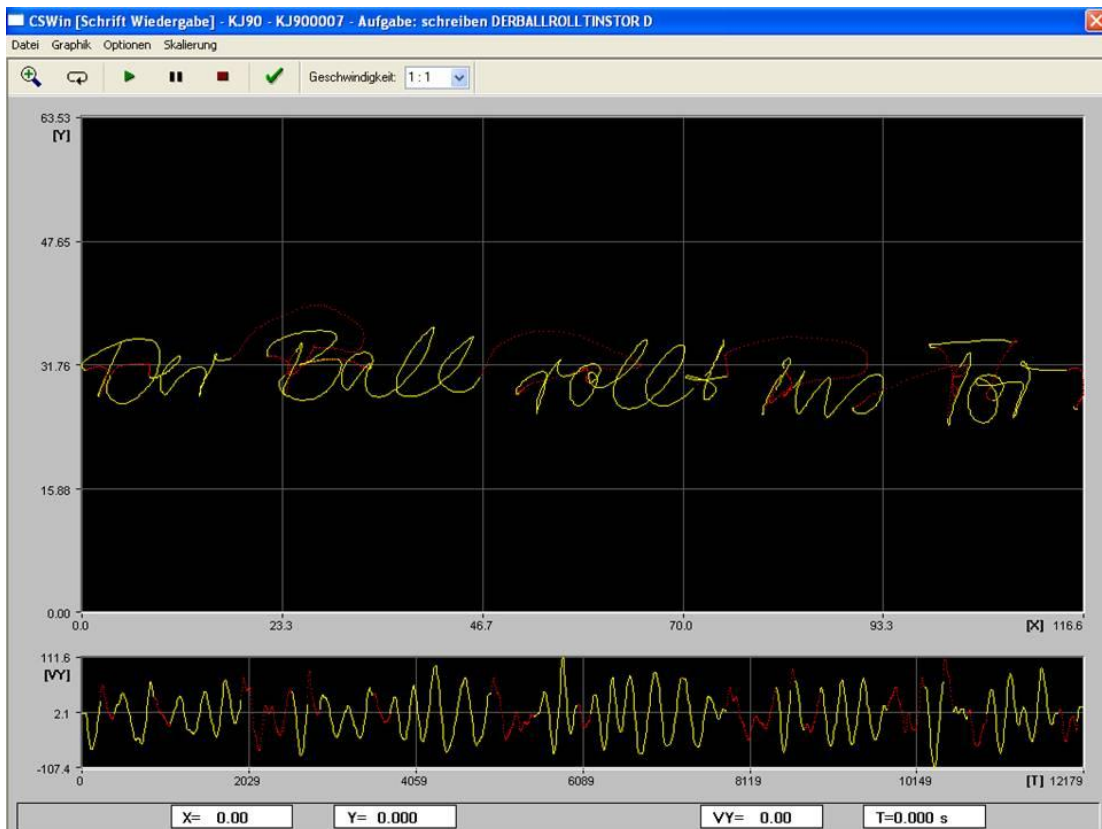
Die durchzuführenden Schreib- und Zeichenaufgaben ähneln Schreib- und Zeichenaufgaben im alltäglichen Leben.¹⁹ So kann mittels digitalen Schreibtablets gut die Beeinträchtigung im Alltag durch die feinmotorischen Funktionsstörungen beurteilt werden.

Die Aufgaben *Kreise Zeichnen dominante Hand* und *Spirale Zeichnen* entsprachen einfachen feinmotorischen Übungen, die vor allem die Gleichmäßigkeit und den Fluss der Bewegung beurteilen sollten. Die Aufgaben *Satz Schreiben* und *kleine „a“s Schreiben* zeigten die komplexeren feinmotorischen Fertigkeiten beim Schreiben. Die Aufgaben *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* entsprachen feinmotorischen Aufgaben, in denen die ungeübtere Hand benutzt wurde, beziehungsweise die visuelle Orientierung aufgehoben wurde.

a



b



c

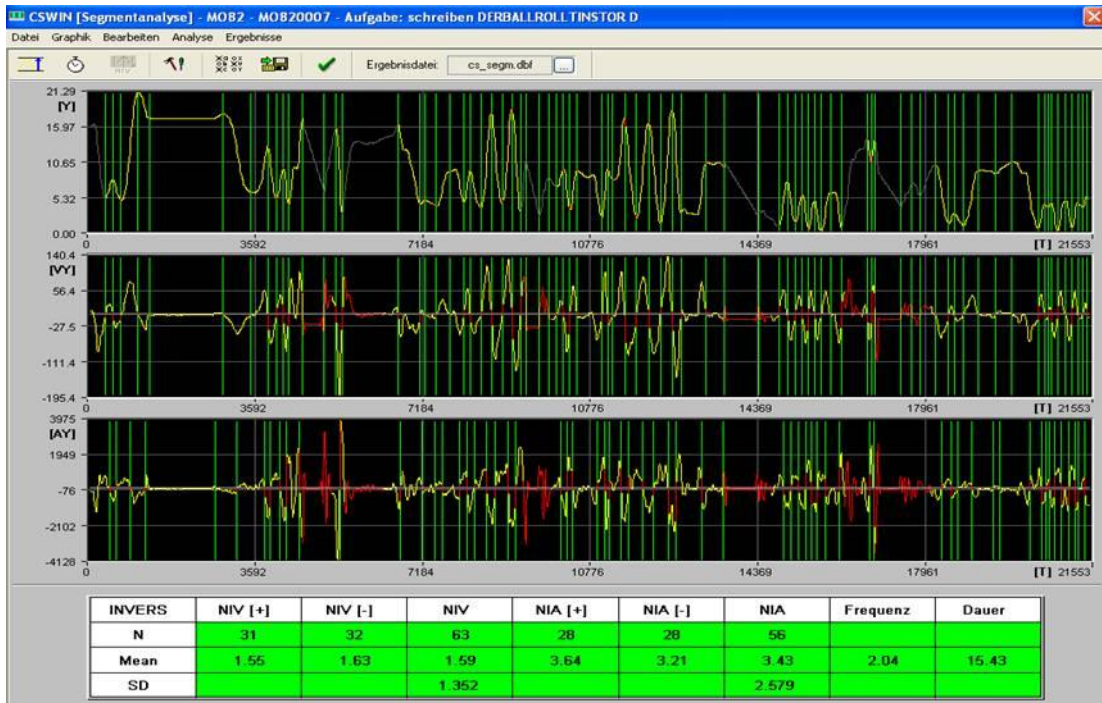


Abbildung 3a-c: Beispiele der Schreib- und Zeichenaufgaben im CSWIN Programm. (a) Aufgabe 1 Kreise Zeichnen dominante Hand, (b) Aufgabe 4 Satz Schreiben und (c) Kinematische Parameter der Aufgabe 4 Satz Schreiben.

2.2.2 Evaluation des Gangbilds

Die Patienten und Probanden sollten in ihrer gewohnten Ganggeschwindigkeit eine Strecke von 10 m auf ebenem Boden nahe einer Wand (ca. 1,5 m Abstand) zurücklegen (Abbildung 4). Dabei wurde die benötigte Zeit gemessen und die Anzahl der Schritte gezählt. Die Patienten sollten zusätzlich eine Halbdrehung an die 10m-Gehstrecke anschließen.



Abbildung 4: 10m-Gehstrecke.

Mittels der *International Cooperative Ataxia Rating Scale*⁸⁶ (ICARS) wurde der Grad der Gangataxie ermittelt. Hierfür sollten die Patienten die ersten drei Aufgaben der ICARS durchführen, in denen die Gehkapazität, die Ganggeschwindigkeit und die Standkapazität mit geöffneten Augen erfasst wurden (s. Appendix).

Die Gehkapazität und Ganggeschwindigkeit wurden während des oben beschriebenen Gehtests ermittelt. Für die Gehkapazität wurden zwischen 0 bis 8 Punkte vergeben, dabei entsprachen 0 Punkte einem normalen Gangbild, 4 Punkte einer Unfähigkeit autonom zu gehen und 8 Punkte einer kompletten Gehunfähigkeit.

Die Ganggeschwindigkeit wurde für die Patienten ermittelt, deren Gehkapazität zwischen 1-3 Punkten lag. Patienten mit 4 oder mehr Punkten bei der Gehkapazität erhielten für die Ganggeschwindigkeit 4 Punkte.

Bei der Prüfung der Standkapazität mit geöffneten Augen wurden die Patienten zunächst gebeten mindestens 10 Sekunden auf einem Bein zu stehen. Falls dies nicht möglich war, sollten sie versuchen in Tandem Position (ein Fuß direkt vor dem

anderen) mindestens 10 Sekunden stehen zu bleiben. Falls dies wiederum unmöglich war, wurden die Patienten gebeten mit nebeneinandergestellten Füßen stehen zu bleiben. Schließlich wurde die Patienten gebeten eine komfortable Standposition zu finden in der sie länger stehen konnte. Die Standkapazität wurde mit 0-6 Punkten bewertet. 0 Punkte entsprachen der Fähigkeit auf einem Bein länger als 10 Sekunden stehenzubleiben, 6 Punkte entsprachen der Stehufähigkeit, sogar mit Hilfe beider Arme.

Der *ICARS-Score* wurde aus der Summe der ermittelten Punkte der jeweiligen Komponenten (Gehkapazität, Ganggeschwindigkeit, Standkapazität mit geöffneten Augen) erfasst. Die Gangataxie aller Patienten wurde durch denselben Untersucher (L.S.) bewertet.

2.2.3 Neuroradiologische Evaluation

Es wurde bei allen Patienten eine präoperative T2-gewichtete MRT in zwei Ebenen (Sagittalebene, Transversalebene) durchgeführt. In der sagittalen Ebene wurde die Länge des pathologischen Signals bestimmt (Abbildung 5a). Zudem wurde ein Atrophiequotient auf der Höhe der stärksten Signalintensität bestimmt. Dieser entsprach dem Verhältnis des sagittalen Durchmessers zum transversalen Durchmesser des Myelons in der transversalen Ebene (sagittaler Durchmesser/ transversaler Durchmesser x 100%) (Abbildung 5b).

Postoperativ konnten bei 24 Patienten (85,7 %) MRT-Bildgebungen durchgeführt werden. Zehn dieser Patienten konnten eine MRT-Bildgebung sowohl am frühen als auch am späten postoperativen Untersuchungszeitpunkt erhalten, acht Patienten nur am frühen und sechs Patienten nur am späten postoperativen Untersuchungszeitpunkt. Bei vier Patienten konnte keine postoperative MRT-Bildgebung durchgeführt werden. Die hohe Drop-out-Rate der postoperativen MRT-Untersuchungen wurde im Wesentlichen durch die niedrige Akzeptanz der Patienten sich neuerlichen MRT-Untersuchungen zu Studienzwecken zu unterziehen verursacht.

Das Maximum des pathologischen Signals in der MRT lag bei den Patienten auf unterschiedlichen Höhen der Halswirbelsäule (HWS) (Tabelle 2).

Tabelle 2

Höhe des Maximums des pathologischen Signals

| Höhe | Anzahl Patienten |
|--------------|------------------|
| HWK 3/4 | 3 (10,7%) |
| HWK 4/5 | 11 (39,3%) |
| HWK 5/6 | 10 (35,7%) |
| HWK 6/7 | 2 (7,1%) |
| HWK 7/ BWK 1 | 2 (7,1%) |

Patientenverteilung nach Höhe des Maximums des pathologischen Signals.

HWK: Halswirbelkörper, BWK: Brustwirbelkörper.



Abbildung 5a-b: T2-gewichtete Magnetresonanztomographie (a) in sagittaler Ebene mit der Länge des pathologischen Signals (*) und (b) in transversaler Ebene mit dem sagittalen (s) und transversalen (t) Durchmesser.

2.2.4 Fragebogen

Der Fragebogen (s. Appendix) bestand aus persönlichen Angaben, wie Alter, Gewicht, Beruf, Hobbies und Fragen zur Krankheit, wie die Dauer der Symptome und krankheitsbedingte Beeinträchtigungen am Arbeitsplatz. Der *Edinburgh Handedness Inventory*⁶⁵ zur Beurteilung der Händigkeit war ebenfalls im Fragebogen enthalten sowie der *European Myelopathy Score*, der *Nurick-Score* und eine Numerische Rating-Skala (NRS). Tabelle 3 gibt einen Überblick über relevante Charakteristika der Patienten.

Tabelle 3
Patienten-Charakteristika

| | | Min. | Max. |
|----------------------------------|--------------|-------|--------|
| Total | 28 | | |
| Geschlecht | | | |
| männlich | 21 (75%) | | |
| weiblich | 7 (25%) | | |
| Alter [Jahre] | 62,5 (11,42) | | |
| BMI [kg/m ²] | 47,8 (13,54) | 27,10 | 106,25 |
| Händigkeit | | | |
| max. Rechtshändigkeit (LQ = 100) | 23 | | |
| max. Linkshändigkeit (LQ = -100) | 2 | | |
| Beidhändigkeit | 3 | | |
| Dauer der Symptome [Monate] | 46,7 (54,72) | 1 | 240 |
| Beruf | | | |
| körperlich anstrengend | 20 (71,4%) | | |
| körperlich nicht anstrengend | 8 (28,6%) | | |
| Sport | | | |
| ja | 13 (46,4%) | | |
| nein | 15 (53,6%) | | |

Anzahl der Patienten, die in die Studie eingeschlossen wurden, Anzahl der männlichen und weiblichen Patienten, Mittelwert und Standardabweichung des Alter zum präoperativen Zeitpunkt und des BMI (Body-Mass-Index) sowie BMI-Minimum und -Maximum, Anzahl der Rechtshänder, Linkshänder und Beidhänder, Mittelwert und Standardabweichung der Dauer der Symptome, Minimum und Maximum der Dauer der Symptome, Anzahl der Patienten, die einen körperlich anstrengenden bzw. nicht anstrengenden Beruf ausüben und Anzahl der Patienten, die Sport bzw. kein Sport treiben.

LQ: Lateralisierungsquotient.

2.2.4.1 *Edinburgh Handedness Inventory*

Zur Beurteilung der Händigkeit wurde der *Edinburgh Handedness Inventory*⁶⁵ mit Bestimmung des Lateralisierungsquotienten (LQ) verwendet (s. Appendix).

2.2.4.2 *European Myelopathy Score (EMS)*

Der *European Myelopathy Score* wurde bereits in vorhergehender Literatur bei Patienten mit zervikaler Myelopathie als *Outcome*-Parameter benutzt.^{77,90} und besteht aus 5 *Subscores*, welche jeweils ein funktionelles Kriterium bewerten (s. Appendix).

2.2.4.3 *Nurick-Score*

Der *Nurick-Score* erfasst die Myelopathie-bedingte Gangstörung und ist ebenfalls ein in der Literatur häufig verwendetes *Outcome*-Maß (s. Appendix).^{15,80,90}

2.2.4.4 Numerische Rating-Skala (NRS)

Mit Hilfe einer Numerischen Rating-Skala von 0 (keine Schmerzen) bis 10 (maximale Schmerzen) wurde die aktuelle subjektive Schmerzintensität der Patienten erfasst (s. Appendix).

2.3 Statistische Analyse

Kinematische Parameter wurden mittels der Analyse-Software CSWin bestimmt und mittels SPSS 22 exploratorisch analysiert.⁴⁴

2.3.1 Querschnittsanalyse

2.3.1.1 Vergleich der funktionellen Parameter

Die kinematischen Parameter und die beiden Gangparameter (Ganggeschwindigkeit und Anzahl der Schritte) der Patienten zum präoperativen Zeitpunkt und der gesunden Probanden wurden miteinander verglichen. Es wurde für den Vergleich der zwei Gruppen der nicht-parametrische Test für zwei unabhängige Variablen (Mann-Whitney-U-Test) benutzt.

Die Nullhypothese lautete dabei, dass sich die Parameter der Patientengruppe nicht von denen der Kontrollgruppe unterscheiden.

2.3.1.2 Korrelation zwischen Funktion und Morphologie

Zur Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen der klinischen Symptomatik und der Bildgebung, wurden die funktionellen Parameter (kinematische Parameter und Gangparameter) mit den morphologischen Parametern (Länge des pathologischen Signals und Atrophiequotient) der kernspintomographischen Untersuchung korreliert. Hierzu wurde die zweiseitige Spearman-Korrelation angewandt.

2.3.1.3 Assoziierte Faktoren mit Funktion und Morphologie

Um festzustellen, ob der Beruf, Sport oder das Geschlecht eine Assoziation mit dem Schweregrad der klinischen Symptomatik und des kernspintomographischen Befundes bei zervikaler Myelopathie haben, wurden die Patienten jeweils in zwei Gruppen unterteilt: Patienten mit körperlich anstrengender beruflicher Tätigkeit und körperlich nicht anstrengender beruflicher Tätigkeit; Patienten, die regelmäßig Sport treiben und Patienten, die keinen Sport treiben; männliche und weibliche Patienten. Die präoperativ erhobenen kinematischen Parameter, Gangparameter und kernspintomographischen

Parameter beider Gruppen wurden anschließend miteinander mittels Mann-Whitney-U-Test verglichen.

Ob es eine Assoziation zwischen dem Body-Mass-Index (BMI) oder der Dauer der Symptome und den präoperativen funktionellen und morphologischen Parametern gab, wurde mittels zweiseitiger Spearman-Korrelation berechnet.

2.3.2 Longitudinale Analyse

2.3.2.1 Postoperative Veränderungen der Parameter

Die erhobenen Parameter der Patienten (kinematische Parameter, Gangparameter, MRT-Parameter) zu den drei Untersuchungen (präoperativ, früh postoperativ, spät postoperativ) wurden miteinander verglichen. Dies wurde intraindividuell mittels nicht-parametrischer Tests für zwei abhängige Variablen (Wilcoxon-Rangsummentest) durchgeführt, da die Verteilung der Parameter nicht einer Gaußschen Verteilung folgte. Die Scores (*EMS*, *Nurick-Score*, *NRS-Score*) der drei Untersuchungszeitpunkte wurden ebenfalls mittels Wilcoxon-Test miteinander verglichen.

Getestet wurde die Nullhypothese, die lautete, dass die Parameter zu den drei Untersuchungszeitpunkten gleich bleiben.

2.3.2.2 Korrelation zwischen funktionellen und morphologischen Veränderungen

Ob es einen Zusammenhang zwischen den Veränderungen der funktionellen Parameter (kinematische Parameter, Gangparameter) und der morphologischen Parameter (MRT-Parameter) gibt, wurde mittels zweiseitiger Spearman-Rangkorrelation untersucht.

2.3.2.3 Assoziierte Faktoren mit Veränderungen der Funktion und Morphologie

Um mögliche Einflussfaktoren auf das postoperative Ergebnis aufzudecken, wurde untersucht, ob der Zusammenhang zwischen den Veränderungen der Parameter zu den drei Untersuchungszeitpunkten und den von uns ausgewählten Faktoren Alter, BMI, Dauer der Symptome, Anzahl der operierten Höhen der HWS, Art des Operationszugangs getestet.

Das Alter, der BMI und die Dauer der Symptome wurden mittels zweiseitiger Rangkorrelation nach Spearman mit der Differenz der kinematischen Parameter, der Gangparameter und der MRT-Parameter zwischen den Untersuchungszeitpunkten korreliert.

Ob das (funktionelle und morphologische) postoperative Ergebnis sich anhand der Operationshöhen und Art des Operationszugangs unterscheidet, wurde mittels Mann-Whitney-U-Test berechnet. Hierfür wurden die Patienten jeweils in zwei Gruppen aufgeteilt: Eine Gruppe von Patienten, die auf einer Höhe der HWS operiert wurden und eine Gruppe von Patienten, die auf mehreren Höhen operiert wurden sowie in eine Gruppe von Patienten, die von ventral operiert wurden und eine Gruppe von Patienten, die von dorsal operiert wurden.

2.3.3 Signifikanzniveau

Für alle statistische Tests wurde das Signifikanzniveau auf $p < 0,05$ festgelegt, um die Nullhypothesen zu verwerfen; p -Werte $< 0,05$ wurden als signifikant angesehen und p -Werte zwischen 0,05 und 0,1 als tendenziell signifikant.

Dies wurde im Rahmen der statistischen Beratung mit dem Institut für klinische Epidemiologie und Biometrie festgelegt.

3 Ergebnisse

3.1 Patienten

28 Patienten mit zervikaler Myelopathie wurden in die Studie eingeschlossen, davon 21 Männer und 7 Frauen. Die Altersverteilung zum präoperativen Zeitpunkt lag zwischen 39-80 Jahren, mit einem Altersmedian von 62,5 Jahren.

Die erste postoperative Untersuchung fand durchschnittlich nach 6,7 Monaten (Zeitspanne: 6-9 Monate), die zweite postoperative Untersuchung nach 13,3 Monaten (Zeitspanne: 12-18 Monate) statt.

22 Patienten (78,6%) kamen zur ersten und 17 Patienten (60,7%) zur zweiten Kontrolle. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Anzahl der Patienten, die über einen ventralen oder dorsalen Operationszugang operiert wurden sowie über die Anzahl der operierten Höhen der HWS.

Tabelle 4
Dekompressionsoperation
Operationszugang

| | |
|-----------------------------|------------|
| ventral | 22 (78,6%) |
| Diskektomie | 16 (57,1%) |
| Korporektomie | 6 (21,4%) |
| Anzahl der operierten Höhen | |
| 1 | 14 |
| 2 | 7 |
| 3 | 1 |
| dorsal | 6 (21,4%) |
| Laminektomie | 6 (21,4%) |
| Anzahl der operierten Höhen | |
| 1 | 0 |
| 2 | 1 |
| 3 | 4 |
| 4 | 1 |

Anzahl der ventralen und dorsalen Operationszugängen sowie Anzahl der operierten Höhen der Halswirbelsäule.

3.2 Kontrollgruppe

23 Probanden wurden in die Studie eingeschlossen. Das mediane Alter betrug 61 Jahre, das 25%-Quartil 51 Jahre und das 75%-Quartil 67 Jahre. Die Altersverteilung der Patienten war ähnlich, mit einem Altersmedian von 62,5 Jahren, einem 25%-Quartil von 53,75 Jahren und einem 75%-Quartil von 71,75 Jahren.

3.3 Querschnittsanalyse

Die kinematischen Parameter (Druck, Frequenz, Maximalgeschwindigkeit, Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen, Variationskoeffizient) für die sechs Schreib- und Zeichenaufgaben sowie die Gangparameter der Probanden und Patienten zum präoperativen Zeitpunkt sind in Tabelle 5 aufgeführt.

3.3.1 Kinematische Parameter

Zwischen den Patienten und Probanden wurden signifikante Unterschiede gefunden bei den Aufgaben *Satz Schreiben* (Abbildung 6), *kleine „a“s Schreiben*, *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* sowie *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* (Mann-Whitney-U-Test) (Tabelle 6).

Bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen dominante Hand* und *Spirale Zeichnen* war kein signifikanter Unterschied festzustellen.

Der Druck war bei den Patienten niedriger als bei den Probanden für die Aufgaben *Kreise Zeichnen dominante Hand*, *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand*, *Spirale Zeichnen* und *Satz Schreiben*. Der Unterschied war tendenziell signifikant bei der Aufgabe *Satz Schreiben* ($p = 0,056$) und *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* ($p = 0,065$).

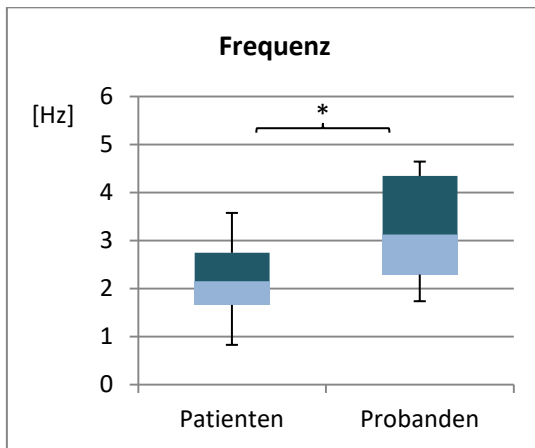
Die Frequenz war bei den Patienten niedriger als bei den Probanden bei den Aufgaben *Satz Schreiben*, *kleine „a“s Schreiben* und *Spirale Zeichnen*. Dieser Unterschied war bei der Aufgabe *Satz schreiben* signifikant ($p = 0,001$) und zeigte bei der Aufgabe *Spirale Zeichnen* eine Tendenz zur Signifikanz ($p = 0,090$).

Die Maximalgeschwindigkeit war bei den Patienten bei der Aufgabe *Satz Schreiben* signifikant niedriger ($p = 0,008$) als bei den Probanden. Des Weiteren war sie bei den Patienten niedriger bei den Aufgaben *Spirale Zeichnen* und *kleine „a“s Schreiben*. Die Unterschiede waren hier allerdings nicht signifikant. Bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* war die Maximalgeschwindigkeit dagegen tendenziell signifikant höher bei den Patienten als bei den Probanden (*Kreise ND*: $p = 0,043$; *Kreise Augen geschlossen*: $p = 0,096$). Auch bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand* war sie bei den Patienten höher.

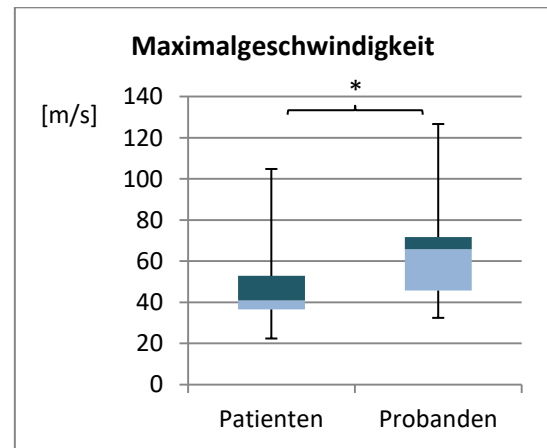
Die Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen (NIV) war signifikant höher bei den Patienten bei der Aufgabe *Satz Schreiben* ($p = 0,005$) sowie tendenziell signifikant höher bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* ($p = 0,096$). Daneben konnte ein höherer NIV bei den Patienten beobachtet werden bei der Aufgabe *Spirale Zeichnen*. Bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* war der NIV bei den Patienten allerdings niedriger als bei den Probanden. Der Unterschied zeigte bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* eine Tendenz zur Signifikanz ($p = 0,090$). Es gab keinen Unterschied zwischen dem NIV der Patienten und Probanden bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand*.

Der Variationskoeffizient war bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* signifikant höher bei den Patienten als bei den Probanden (*Kreise ND*: $p = 0,011$; *Kreise Augen geschlossen*: $p = 0,024$).

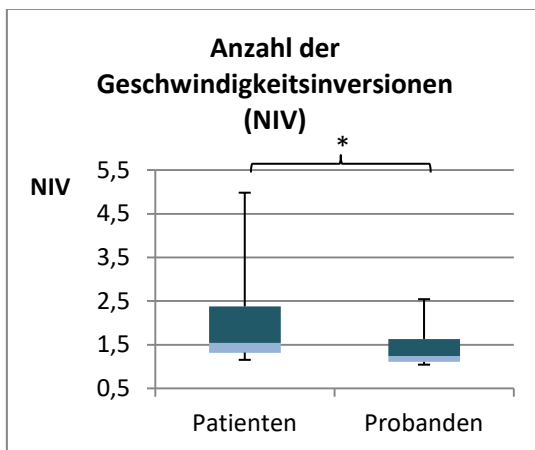
Satz Schreiben



* $p = 0,001$



* $p = 0,008$

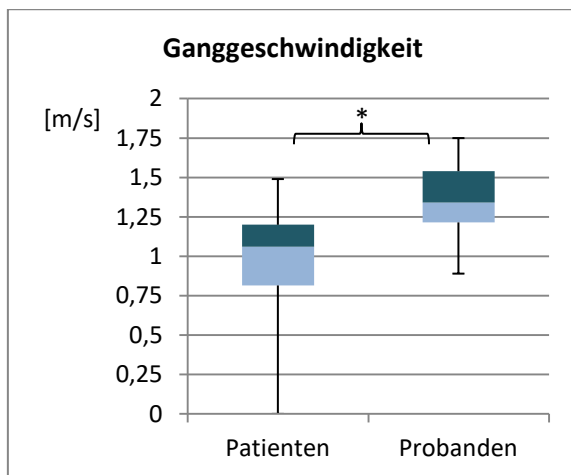


* $p = 0,005$

Abbildung 6: Aufgabe *Satz Schreiben* der Querschnittsanalyse. Signifikante Unterschiede der kinematischen Parameter (Frequenz, Maximalgeschwindigkeit, NIV) zwischen Patienten und Probanden bei der Aufgabe *Satz Schreiben*.

3.3.2 Gangparameter

Die Ganggeschwindigkeit war bei den Patienten hoch signifikant vermindert im Vergleich zu den Probanden ($p < 0,001$) (Abbildung 7). Die Patienten haben für die 10m-Gehstrecke mehr Schritte benötigt als die Probanden, wobei der Unterschied nicht signifikant war. Die Standardabweichung war bei den Patienten höher: die Anzahl der Schritte für die Strecke betrug zwischen 10 und 33 Schritte, während die Probanden zwischen 9 und 19 Schritte benötigten.



* $p < 0,001$

Abbildung 7: Ganggeschwindigkeit in der Querschnittsanalyse. Signifikanter Unterschied der Ganggeschwindigkeit zwischen Patienten und Probanden bei der 10m-Gehstrecke.

Tabelle 5

Kinematische Parameter der Patienten zum präoperativen Untersuchungszeitpunkt und der Probanden (= Kontrollgruppe)

| Aufgaben | kinematische Parameter | Patienten präoperativ n = 28 | Probanden n = 23 |
|---------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Kreise D | P | 2,97 (0,71) | 3,01 (0,82) |
| | F | 2,83 (0,90) | 2,77 (0,92) |
| | V | 106,56 (30,00) | 110,20 (41,55) |
| | NIV | 1,43 (0,81) | 1,35 (0,43) |
| | VarkoV | 16,26 (5,75) | 24,82 (41,43) |
| Spirale | P | 2,92 (0,83) | 3,11 (0,64) |
| | F | 0,67 (0,31) | 0,74 (0,32) |
| | V | 61,83 (20,86) | 73,51 (50,55) |
| | NIV | 8,79 (7,79) | 8,09 (5,73) |
| | VarkoV | 44,83 (10,55) | 51,69 (25,44) |
| Satz | P | 2,73 (0,75) | 3,13 (0,68) |
| | F | 2,26 (0,75) | 3,28 (1,04) |
| | V | 48,59 (20,21) | 64,25 (24,73) |
| | NIV | 1,93 (0,88) | 1,39 (0,38) |
| | VarkoV | 46,88 (9,70) | 47,51 (8,53) |
| kleine „a“s | P | 3,28 (0,84) | 3,24 (0,65) |
| | F | 1,31 (0,49) | 1,53 (0,46) |
| | V | 29,06 (7,53) | 31,64 (7,53) |
| | NIV | 4,23 (2,18) | 3,38 (1,76) |
| | VarkoV | 32,16 (9,15) | 30,51 (7,64) |
| Kreise ND | P | 2,32 (0,79) | 2,71 (0,71) |
| | F | 1,72 (0,46) | 1,48 (0,59) |
| | V | 89,90 (25,50) | 75,38 (29,87) |
| | NIV | 2,45 (0,93) | 3,39 (1,92) |
| | VarkoV | 24,00 (7,82) | 20,34 (7,83) |
| Kreise Augen geschlossen | P | 2,83 (0,77) | 3,02 (0,70) |
| | F | 2,43 (0,78) | 2,15 (0,88) |
| | V | 112,45 (41,27) | 87,55(35,82) |
| | NIV | 1,45 (0,84) | 2,02 (1,95) |
| | VarkoV | 18,30 (5,13) | 15,19 (3,36) |
| Gangparameter | | | |
| Ganggeschwindigkeit [m/s] | | 1,06 (0,27) | 1,36 (0,21) |
| Anzahl Schritte | | 15,96 / 15 (4,68) | 13,48 / 13 (2,04) |
| Gehunfähigkeit | | n = 2 | - |

Mittelwert und Standardabweichung, in Klammern, der kinematischen Parameter; Mittelwert/ Median und Standardabweichung, in Klammern, der Gangparameter.

n: Anzahl Patienten bzw. Probanden; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%]; D: dominante Hand; ND: nicht dominante Hand.

Tabelle 6

Signifikante Unterschiede zwischen den Parametern der Patienten zum präoperativen Untersuchungszeitpunkt und der Probanden (= Kontrollgruppe)

| kinematische Parameter | Aufgaben | Patienten vs. Probanden |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| P | Satz | $p = 0,056$ |
| | Kreise ND | $p = 0,065$ |
| F | Satz | $p = 0,001$ |
| | kleine „a“s | $p = 0,090$ |
| V | Satz | $p = 0,008$ |
| | Kreise ND | $p = 0,043$ |
| | Kreise Augen geschlossen | $p = 0,096$ |
| NIV | Satz | $p = 0,005$ |
| | kleine „a“s | $p = 0,096$ |
| | Kreise Augen geschlossen | $p = 0,090$ |
| VarkoV | Kreise ND | $p = 0,011$ |
| | Kreise Augen geschlossen | $p = 0,024$ |

Gangparameter

| | |
|---------------------|-------------|
| Ganggeschwindigkeit | $p < 0,001$ |
|---------------------|-------------|

Die präoperativ erhobenen kinematischen Parameter und Gangparameter der Patienten wurden mittels nicht-parametrischer Tests für zwei unabhängige Variablen (Mann-Whitney-U-Test) mit denen der Probanden (= Kontrollgruppe) verglichen.

ND: nicht dominante Hand; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%]; p : Signifikanzgrad.

3.3.3 Korrelation zwischen Funktion und Morphologie

Die Länge des pathologischen Signals in der MRT korrelierte positiv mit dem präoperativen NIV ($p = 0,009$, $r = 0,481$) und schwach negativ mit der Maximalgeschwindigkeit ($p = 0,067$, $r = -0,351$) bei der Aufgabe *Spirale Zeichnen*.

Es wurde nur eine tendenziell signifikante Korrelation zwischen dem Atrophiequotienten und dem NIV bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen dominante Hand* ($p = 0,096$, $r = 0,321$) und *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* beobachtet ($p = 0,093$, $r = 0,323$).

Zwischen den MRT-Parametern und den Gangparametern wurde keine Korrelation gefunden.

Tabelle 7

Signifikante Korrelation zwischen Funktion und Morphologie
funktionelle Parameter

| | Signallänge [mm] (MRT) |
|-----------|----------------------------|
| Spirale | |
| V | $p = 0,067, r = -0,351$ |
| NIV | $p = 0,009, r = 0,481$ |
| | Atrophiequotient [%] (MRT) |
| Kreise D | |
| NIV | $p = 0,096, r = 0,321$ |
| Kreise ND | |
| NIV | $p = 0,093, r = 0,323$ |

Die funktionellen Parameter (kinematische Parameter und Gangparameter) wurden mittels zweiseitiger Spearman-Rangkorrelation mit den morphologischen Parametern (MRT-Parameter) korreliert. Die Gangparameter (Ganggeschwindigkeit, Anzahl der Schritte, *ICARS-Score*) korrelierten nicht mit den MRT-Parametern.

MRT: Magnetresonanztomographie; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; D: dominante Hand; ND: nicht dominante Hand; *ICARS*: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*; *p*: Signifikanzgrad; *r*: Rangkorrelationskoeffizient.

3.3.4 Assoziierte Faktoren mit der Funktion und Morphologie

3.3.4.1 Beruf und Sport

Es wurde kein signifikanter Unterschied der kinematischen Parameter gefunden zwischen der Patientengruppe mit körperlich anstrengenden Berufen und derer mit körperlich nicht anstrengenden Berufen. Das Gleiche galt beim Vergleich der Patienten, die regelmäßig Sport trieben mit denen, die keinen Sport trieben. Es konnte nur ein tendenziell signifikanter Unterschied des Drucks bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand* je nach beruflicher Tätigkeit ($p = 0,055$) erfasst werden, dabei war der Druck bei der Patientengruppe mit körperlich nicht anstrengenden Berufen im Durchschnitt höher ($3,38 \pm 0,8$ N, $n = 8$) als bei den Patienten mit körperlich anstrengenden Berufen ($2,81 \pm 0,6$ N, $n = 20$). Der Druck bei den Aufgaben *Satz Schreiben* und *kleine „a“s Schreiben* war höher bei den Patienten, die Sport trieben (*Satz*: $P = 3,09 \pm 0,6$ N; *kleine „a“s*: $P = 3,09 \pm 0,6$ N, $n = 13$) als bei denen, die keinen Sport trieben (*Satz*: $P = 2,42 \pm 0,7$ N; *kleine „a“s*: $P = 2,60 \pm 0,9$, $n = 15$) (*Satz*: $p = 0,017$; *kleine „a“s*: $p = 0,088$). Des Weiteren war die Frequenz höher bei der Patientengruppe, die Sport trieb, bei der Aufgabe *Kreise zeichnen mit geschlossenen Augen* (Sport: $F = 2,47 \pm 0,6$ Hz, $n = 13$; kein Sport: $F = 2,39 \pm 0,9$ N, $n = 15$; $p = 0,070$).

Die berufliche Tätigkeit sowie Sport zeigten keinen Einfluss auf die Gangparameter und die MRT-Parameter.

3.3.4.2 Body-Mass-Index

Der BMI korrelierte negativ mit dem Variationskoeffizienten bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen dominante Hand* ($p = 0,066$, $r = -0,352$) und *Spirale Zeichnen* ($p = 0,033$, $r = -0,404$). Des Weiteren korrelierte die Maximalgeschwindigkeit bei der Aufgabe *Satz Schreiben* mit dem BMI ($p = 0,079$, $r = 0,338$). Es wurde zudem eine tendenzielle negative Korrelation mit dem Atrophiequotienten gefunden ($p = 0,056$, $r = -0,365$).

3.3.4.3 Dauer der Symptome

Die Dauer der Symptome korrelierte signifikant mit kinematischen Parametern: der Druck bei den Aufgaben *Spirale Zeichnen*, *Satz Schreiben* und *kleine „a“s Schreiben* (*Spirale*: $p = 0,040$, $r = 0,397$; *Satz*: $p = 0,019$, $r = 0,450$; *kleine „a“s*: $p = 0,013$, $r = 0,470$), die Frequenz und der NIV bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* (F: $p = 0,028$, $r = 0,423$; NIV: $p = 0,019$, $r = -0,447$).

Allerdings wurde keine signifikante Korrelation mit den Gangparametern und den MRT-Parametern (Signallänge und Atrophiequotient) ermittelt.

3.3.4.4 Geschlecht

Es konnten keine signifikanten Unterschiede der klinischen Symptome und Morphologie zwischen den Geschlechtern erfasst werden.

Tabelle 8

Assoziierte Faktoren mit der Funktion und Morphologie bei zervikaler Myelopathie

| Parameter | Beruf körperlich anstrengend: ja/nein | Sport ja/nein | BMI | Dauer der Symptome | Geschlecht m/w |
|-------------------------------|--|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| Kreise D | | | | | |
| P | $p = 0,055$ | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| VarkoV | n.s. | n.s. | $p = 0,066, r = -0,352$ | n.s. | n.s. |
| Spirale | | | | | |
| P | n.s. | n.s. | n.s. | $p = 0,040, r = 0,397$ | n.s. |
| VarkoV | n.s. | n.s. | $p = 0,033, r = -0,404$ | n.s. | n.s. |
| Satz | | | | | |
| P | n.s. | $p = 0,017$ | n.s. | $p = 0,019, r = 0,450$ | n.s. |
| V | n.s. | n.s. | $p = 0,079, r = 0,338$ | n.s. | n.s. |
| kleine „a“s | | | | | |
| P | n.s. | $p = 0,088$ | n.s. | $p = 0,013, r = 0,470$ | n.s. |
| F | n.s. | n.s. | n.s. | $p = 0,028, r = 0,423$ | n.s. |
| NIV | n.s. | n.s. | n.s. | $p = 0,019, r = -0,447$ | n.s. |
| Kreise Augen geschlossen | | | | | |
| F | n.s. | $p = 0,070$ | n.s. | n.s. | n.s. |
| Atrophiequotient [%] (MRT) | n.s. | n.s. | $p = 0,056, r = -0,365$ | n.s. | n.s. |

Die kinematischen Parameter, die Gangparameter und die MRT-Parameter wurden mittels nicht-parametrischer Tests für zwei unabhängige Variablen zwischen folgenden Gruppen verglichen: körperlich anstrengender Beruf vs. körperlich nicht anstrengender Beruf; Sport vs. kein Sport; männlich vs. weiblich. Des Weiteren wurden die Parameter mittels zweiseitiger Spearman-Rangkorrelation mit dem BMI und der Dauer der Symptome korreliert.

Die Gangparameter und die Signallänge (MRT) korrelierten nicht signifikant mit dem Beruf, Sport, dem BMI, der Dauer der Symptome und dem Geschlecht.

BMI: Body-Mass-Index; D: dominante Hand; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%]; MRT: Magnetresonanztomographie; p = Signifikanzgrad; r = Rangkorrelationskoeffizient; n.s.: nicht signifikant.

3.4 Longitudinale Analyse

3.4.1 Kinematische Parameter

Die kinematischen Parameter für die sechs Schreib- und Zeichenaufgaben zu den drei Untersuchungszeitpunkten werden in Tabelle 9 dargestellt, signifikante Unterschiede (Wilcoxon-Test) zwischen den Untersuchungszeitpunkten in Tabelle 10.

Beim Vergleich der kinematischen Parameter der präoperativen Untersuchung mit denen der ersten postoperativen Untersuchung wurden bei allen Schreib- und Zeichenaufgaben signifikante Unterschiede gefunden, außer bei der ersten Aufgabe (*Kreise Zeichnen dominante Hand*).

Der Druck war postoperativ signifikant höher als präoperativ. Vor allem in den Aufgaben *Spirale Zeichnen*, *Satz Schreiben* und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* konnte eine deutlich signifikante Erhöhung bei der ersten postoperativen Untersuchung beobachtet werden (*Spirale*: $p = 0,005$, *Satz*: $p = 0,003$, *Kreise Augen geschlossen*: $p = 0,005$).

Die Frequenz war bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* postoperativ signifikant höher ($p = 0,006$) und bei der Aufgabe *Spirale Zeichnen* tendenziell höher ($p = 0,058$). Für die anderen Schreib- und Zeichenaufgaben konnte kein Unterschied der Frequenz zwischen dem prä- und postoperativen Untersuchungszeitpunkt festgestellt werden.

Die Maximalgeschwindigkeit verbesserte sich bei den Aufgaben *Satz Schreiben* und *kleine „a“s Schreiben* im Vergleich zur präoperativen Untersuchung signifikant (*Satz*: $p = 0,005$; *kleine „a“s*: $p < 0,001$). Bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen dominante Hand* und *Spirale Zeichnen* konnte ebenfalls eine höhere Maximalgeschwindigkeit beobachtet werden, jedoch war der Unterschied bei diesen Aufgaben nicht signifikant. Dagegen verschlechterte sich die Maximalgeschwindigkeit bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* postoperativ signifikant ($p = 0,003$).

Bei den Aufgaben *Spirale Zeichnen* und *kleine „a“s Schreiben* wurde eine Verminderung des NIVs ermittelt. Der NIV war jedoch bei den Aufgaben *Kreise*

Zeichnen nicht dominante Hand und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* postoperativ signifikant höher als präoperativ (*Kreise ND*: $p = 0,035$; *Kreise Augen geschlossen*: $p = 0,004$). Außerdem war der NIV bei der Aufgabe *Satz Schreiben* höher.

Der Variationskoeffizient war bei den Aufgaben *Satz Schreiben* und *kleine „a“s Schreiben* bei der postoperativen Untersuchung niedriger als bei der präoperativen Untersuchung. Er war jedoch für keine Schreib- und Zeichenaufgabe signifikant verändert.

Des Weiteren wurden die kinematischen Parameter der präoperativen Untersuchung mit denen der zweiten postoperativen Untersuchung verglichen.

Wie schon bei der ersten postoperativen Untersuchung konnte eine postoperative Erhöhung des Drucks für alle Aufgaben beobachtet werden. Der Unterschied war signifikant bei den Aufgaben *Spirale Zeichnen* ($p = 0,008$), *Satz Schreiben* ($p = 0,004$) und *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* ($p = 0,004$).

Die Frequenz war postoperativ verbessert bei den Aufgaben *kleine „a“s Schreiben* und *Satz Schreiben*; der Unterschied zu präoperativ war signifikant bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* ($p = 0,004$). Dagegen wurde eine postoperative Verminderung der Frequenz beobachtet bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen*.

Die Maximalgeschwindigkeit war zum Zeitpunkt der zweiten postoperativen Untersuchung bei den Aufgaben *Satz Schreiben* und *kleine „a“s Schreiben* signifikant erhöht (*Satz*: $p = 0,001$; *kleine „a“s*: $p = 0,001$) (Abbildung 8). Eine signifikante Erhöhung der Maximalgeschwindigkeit für diese beiden Aufgaben wurde schon zum Zeitpunkt der ersten postoperativen Untersuchung beobachtet. Dagegen war bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen*, wie schon bei der frühen postoperativen Untersuchung, die Maximalgeschwindigkeit signifikant vermindert im Vergleich zu präoperativ ($p = 0,001$).

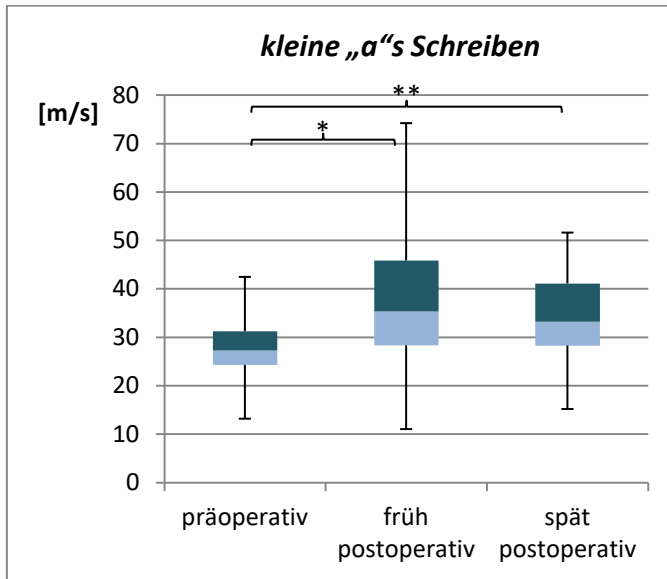
Ebenso wie bei der ersten postoperativen Untersuchung wurde eine Verbesserung des NIVs beobachtet bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben*. Bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* war der NIV postoperativ signifikant höher als präoperativ ($p = 0,001$), dies wurde schon bei der ersten postoperativen Kontrolle erfasst. Der NIV war auch bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* erhöht.

Bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand* war der Variationskoeffizient bei der zweiten postoperativen Untersuchung vermindert im Vergleich zur präoperativen Untersuchung. Der Variationskoeffizient war allerdings bei keiner Schreibaufgabe signifikant verändert.

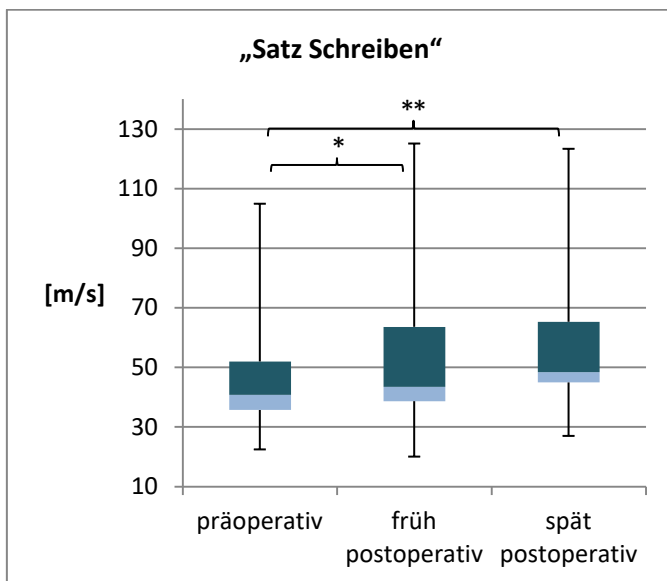
Schließlich wurden die kinematischen Parameter der ersten postoperativen Untersuchung mit denen der zweiten postoperativen Untersuchung miteinander verglichen.

Dabei konnte lediglich ein signifikanter Unterschied des Variationskoeffizienten bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand* beobachtet werden ($p = 0,047$); der Variationskoeffizient war bei der zweiten postoperativen Kontrolle kleiner als bei der ersten Kontrolle.

Maximalgeschwindigkeit



* $p < 0,001$; ** $p = 0,001$



* $p = 0,005$; ** $p = 0,001$

Abbildung 8: Maximalgeschwindigkeit in der longitudinalen Analyse. Veränderung der Maximalgeschwindigkeit bei den Aufgaben *kleine „a“s Schreiben* und *Satz Schreiben* zwischen der präoperativen, ersten und zweiten postoperativen Untersuchung.

Tabelle 9

Kinematische Parameter der Patienten zum präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt

| Aufgaben | kinematische Parameter | Untersuchungszeitpunkt | | |
|-------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | präoperativ (n = 28) | 1. postoperativ (n = 22) | 2. postoperativ (n = 16) |
| Kreise D | P | 2,97 (0,71) | 3,05 (0,86) | 3,04 (0,86) |
| | F | 2,83 (0,90) | 2,84 (0,96) | 2,86 (0,92) |
| | V | 106,56 (30,00) | 113,61 (31,18) | 114,67 (34,82) |
| | NIV | 1,43 (0,81) | 1,61 (1,28) | 1,49 (1,21) |
| | VarkoV | 16,26 (5,75) | 16,37 (4,53) | 14,78 (4,24) |
| Spirale | P | 2,92 (0,83) | 3,19 (0,76) | 3,26 (0,62) |
| | F | 0,67 (0,31) | 0,76 (0,43) | 0,67 (0,40) |
| | V | 61,83 (20,86) | 63,29 (22,18) | 60,58 (24,27) |
| | NIV | 8,79 (7,79) | 7,95 (5,87) | 9,26 (7,32) |
| | VarkoV | 44,83 (10,55) | 42,93 (10,05) | 42,46 (11,82) |
| Satz | P | 2,73 (0,75) | 2,97 (0,79) | 3,02 (0,73) |
| | F | 2,26 (0,75) | 2,29 (0,96) | 2,46 (1,06) |
| | V | 48,59 (20,21) | 54,63 (26,91) | 56,93 (23,06) |
| | NIV | 1,93 (0,88) | 2,34 (1,89) | 2,19 (2,01) |
| | VarkoV | 46,88 (9,70) | 43,35 (8,97) | 44,50 (10,52) |
| kleine „a“s | P | 3,28 (0,84) | 3,43 (0,76) | 3,41 (0,78) |
| | F | 1,31 (0,49) | 1,53 (0,71) | 1,63 (0,79) |
| | V | 29,06 (7,53) | 36,41 (14,25) | 33,67 (9,86) |
| | NIV | 4,23 (2,18) | 4,16 (3,34) | 3,82 (2,97) |
| | VarkoV | 32,16 (9,15) | 29,98 (7,28) | 30,68 (5,71) |
| Kreise ND | P | 2,32 (0,79) | 2,49 (1,00) | 2,91 (0,96) |
| | F | 1,72 (0,46) | 1,68 (0,62) | 1,67 (0,65) |
| | V | 89,90 (25,50) | 86,92 (27,10) | 86,64 (29,29) |
| | NIV | 2,45 (0,93) | 3,04 (1,73) | 3,20 (2,04) |
| | VarkoV | 24,00 (7,82) | 24,08 (8,40) | 23,92 (7,56) |
| Kreise A. geschl. | P | 2,83 (0,77) | 3,05 (0,78) | 3,08 (0,96) |
| | F | 2,43 (0,78) | 2,43 (0,94) | 2,24 (0,82) |
| | V | 112,45 (41,27) | 95,62 (34,18) | 88,59 (26,51) |
| | NIV | 1,45 (0,84) | 1,78 (1,54) | 1,71 (1,16) |
| | VarkoV | 18,30 (5,13) | 17,49 (4,85) | 17,54 (4,76) |

Mittelwert und, in Klammern, Standardabweichung der kinematischen Parameter.

n: Anzahl Patienten; D: dominante Hand; ND: nicht dominante Hand; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%].

Tabelle 10

Signifikante Veränderungen der kinematischen Parameter der Patienten zwischen dem präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt

| kinematische Parameter | Aufgaben | Vergleich der Untersuchungszeitpunkte | | |
|------------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| | | präoperativ vs. 1. postoperativ | präoperativ vs. 2. postoperativ | 1. postoperativ vs. 2. postoperativ |
| P | Kreise D | $p = 0,062$ | $p = 0,063$ | n.s. |
| | Spirale | $p = 0,005$ | $p = 0,008$ | |
| | Satz | $p = 0,003$ | $p = 0,004$ | n.s. |
| | kleine „a“s | n.s. | $p = 0,026$ | n.s. |
| | Kreise ND | $p = 0,082$ | $p = 0,004$ | n.s. |
| | Kreise A. geschl. | $p = 0,005$ | $p = 0,023$ | n.s. |
| F | Spirale | $p = 0,058$ | n.s. | n.s. |
| | kleine „a“s | $p = 0,006$ | $p = 0,004$ | n.s. |
| V | Satz | $p = 0,005$ | $p = 0,001$ | n.s. |
| | kleine „a“s | $p < 0,001$ | $p = 0,001$ | n.s. |
| | Kreise A. geschl. | $p = 0,003$ | $p = 0,001$ | n.s. |
| NIV | Kreise ND | $p = 0,035$ | n.s. | n.s. |
| | Kreise A. geschl. | $p = 0,004$ | $p = 0,001$ | n.s. |
| VarkoV | Kreise D | n.s. | n.s. | $p = 0,047$ |

Die kinematischen Parameter zu den drei Untersuchungszeitpunkten wurden mittels nicht-parametrischer Tests für zwei abhängige Variablen (Wilcoxon Test) miteinander verglichen.

D: dominante Hand; ND: nicht dominante Hand; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%]; p : Signifikanzgrad; n.s.: nicht signifikant.

3.4.2 Gangparameter

Bei der präoperativen Untersuchung waren zwei Patienten gehunfähig, postoperativ konnten alle Patienten den 10m-Gehtest durchführen.

Die Ganggeschwindigkeit war postoperativ signifikant höher als präoperativ: von durchschnittlich $1,06 \pm 0,27$ m/s präoperativ auf $1,31 \pm 0,23$ m/s bei der ersten postoperativen Kontrolle ($p = 0,001$) und $1,28 \pm 0,22$ m/s bei der zweiten postoperativen Kontrolle ($p = 0,009$). Nur bei zwei Patienten war die Ganggeschwindigkeit postoperativ niedriger und bei einem Patienten war sie unverändert im Vergleich zu präoperativ.

Die Anzahl der benötigten Schritte für die 10m-Strecke war postoperativ vermindert; der Unterschied zu präoperativ war allerdings nicht signifikant.

Der *ICARS-Score* betrug bei der präoperativen Untersuchung im Mittel $4,81 \pm 5,07$ und verbesserte sich postoperativ signifikant auf $2,56 \pm 3,20$ ($p = 0,012$) und im weiteren Verlauf auf $2,53 \pm 3,12$ ($p = 0,009$).

Zwischen den zwei postoperativen Untersuchungen bestanden keine signifikanten Unterschiede.

In Tabelle 11 sind die erhobenen Parameter des 10m-Gehtests dargestellt und in Tabelle 14 die signifikanten Veränderungen zwischen den drei Untersuchungszeitpunkten.

Tabelle 11

Gangparameter der Patienten zum präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt

| Gangparameter | Untersuchungszeitpunkt | | |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | präoperativ n = 28 | 1. postoperativ n = 22 | 2. postoperativ n = 17 |
| Ganggeschwindigkeit [m/s] | 1,06 (0,27) | 1,31 (0,23) | 1,28 (0,22) |
| Anzahl Schritte | 15,96 / 15 (4,68) | 14,23 / 14 (1,72) | 14,88 / 15 (1,93) |
| <i>ICARS-Score</i> | 4,81 / 4 (5,07) | 2,56 / 1 (3,20) | 2,53 / 1 (3,12) |
| Gehunfähigkeit | n = 2 | n = 0 | n = 0 |

Mittelwert und, in Klammern, Standardabweichung der Ganggeschwindigkeit, Mittelwert/ Median und, in Klammern, Standardabweichung der Anzahl der Schritte und des *ICARS-Score*; Anzahl der gehunfähigen Patienten.

n: Anzahl Patienten; *ICARS*: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*.

3.4.3 Kernspintomographische Parameter

Tabelle 12 zeigt die gemessene Länge des pathologischen Signals in der MRT-Bildgebung bei den einzelnen Patienten zu den drei Untersuchungszeitpunkten.

Die Länge des pathologischen Signals war signifikant vermindert zwischen der präoperativen und ersten postoperativen Untersuchung ($p = 0,001$) sowie zwischen der ersten und zweiten postoperativen Kontrolle ($p = 0,017$) (Wilcoxon-Test).

Bei 20 Patienten wurde eine Reduktion des pathologischen Signals postoperativ beobachtet. Eine postoperative Zunahme der Signallänge wurde bei vier Patienten gemessen, wobei bei zwei dieser Patienten die Signallänge deutlich länger war als bei der präoperativen Untersuchung; von 26,5 mm präoperativ auf 64,2 mm postoperativ und von 23,9 mm präoperativ auf 57,1 mm postoperativ.

Der Atrophiequotient der einzelnen Patienten zu den drei Untersuchungen ist in Tabelle 13 dargestellt.

Die Veränderungen des Atrophiequotienten zwischen den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten waren jedoch nicht signifikant (Wilcoxon-Test).

Signifikante Unterschiede der kernspintomographischen Parameter, Signallänge und Atrophiequotient, zwischen den Untersuchungszeitpunkten sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 12

Länge des pathologischen Signals in der MRT zum präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt

| Patienten- nummer | Signallänge [mm] | | |
|----------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | präoperativ | 1. postoperative Untersuchung | 2. postoperative Untersuchung |
| 1 | 12,0 | 11,6 | 9,8 |
| 2 | 29,6 | 24,8 | - |
| 3 | 33,6 | 15,9 | - |
| 4 | 23,8 | - | - |
| 5 | 22,1 | 10,3 | 10,2 |
| 6 | 34,2 | 30,7 | - |
| 7 | 11,8 | 19,8 | 19,0 |
| 8 | 14,7 | 10,7 | - |
| 9 | 34,0 | 28,2 | 23,7 |
| 10 | 35,2 | 8,0 | 9,7 |
| 11 | 12,6 | - | 14,2 |
| 12 | 26,5 | - | 64,2 |
| 13 | 24,6 | 24,4 | 18,4 |
| 14 | 23,9 | - | 57,1 |
| 15 | 33,1 | - | 30,1 |
| 16 | 18,7 | 16,5 | - |
| 17 | 17,4 | 14,4 | 11,3 |
| 18 | 35,8 | 31,5 | 29,3 |
| 19 | 47,4 | 24,6 | - |
| 20 | 43,6 | - | - |
| 21 | 13,4 | - | - |
| 22 | 29,8 | 24,5 | - |
| 23 | 28,5 | 16,0 | - |
| 24 | 32,5 | - | 19,0 |
| 25 | 12,1 | - | - |
| 26 | 29,6 | - | 22,3 |
| 27 | 37,6 | 21,4 | 13,5 |
| 28 | 10,7 | 10,5 | 10,0 |

Die Länge des pathologischen Signals in der Magnetresonanztomographie (MRT) bei den 28 untersuchten Patienten zum präoperativen sowie ersten und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt.

Tabelle 13

Atrophiequotient in der MRT bei der präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchung

| Patienten- nummer | Atrophiequotient [%] | | |
|----------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | präoperativ | 1. postoperative Untersuchung | 2. postoperative Untersuchung |
| 1 | 43,3 | 37,8 | 33,3 |
| 2 | 46,1 | 50,1 | - |
| 3 | 39,5 | 50,1 | - |
| 4 | 25,4 | - | - |
| 5 | 50,0 | 45,5 | 46,2 |
| 6 | 73,1 | 50,0 | - |
| 7 | 54,1 | 52,4 | 37,1 |
| 8 | 63,9 | 64,5 | - |
| 9 | 47,1 | 48,8 | 59,5 |
| 10 | 32,3 | 31,8 | 35,0 |
| 11 | 38,6 | - | 57,1 |
| 12 | 51,0 | - | 75,1 |
| 13 | 45,2 | 50,0 | 41,8 |
| 14 | 34,2 | - | 45,3 |
| 15 | 52,6 | - | 66,7 |
| 16 | 43,5 | 43,8 | - |
| 17 | 37,9 | 47,5 | 44,2 |
| 18 | 41,6 | 55,0 | 40,9 |
| 19 | 42,4 | 50,0 | - |
| 20 | 48,2 | - | - |
| 21 | 42,0 | - | - |
| 22 | 43,7 | 42,6 | - |
| 23 | 39,1 | 41,5 | - |
| 24 | 35,5 | - | 44,9 |
| 25 | 43,1 | - | - |
| 26 | 46,3 | - | 47,7 |
| 27 | 38,5 | 44,2 | 38,8 |
| 28 | 42,5 | 52,3 | 46,5 |

Der Atrophiequotient in der Magnetresonanztomographie (MRT) bei den 28 untersuchten Patienten zum präoperativen sowie ersten und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt.

Tabelle 14

Signifikante Veränderungen der Gangparameter und MRT-Parameter der Patienten zwischen dem präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt

| Gangparameter | Vergleich der Untersuchungszeitpunkte | | |
|---------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| | präoperativ vs. 1. postoperativ | präoperativ vs. 2. postoperativ | 1. postoperativ vs. 2. postoperativ |
| Ganggeschwindigkeit [m/s] | $p = 0,001$ | $p = 0,009$ | n.s. |
| Anzahl Schritte | n.s. | n.s. | n.s. |
| ICARS-Score | $p = 0,012$ | $p = 0,009$ | n.s. |
| MRT-Parameter | | | |
| Signallänge [mm] | $p = 0,001$ | n.s. | $p = 0,017$ |
| Atrophiequotient [%] | n.s. | n.s. | n.s. |

Die Gangparameter sowie die MRT-Parameter zu den drei Untersuchungszeitpunkten wurden mittels nicht-parametrischer Tests für zwei abhängige Variablen (Wilcoxon Test) miteinander verglichen.

MRT: Magnetresonanztomographie; ICARS: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*; p : Signifikanzgrad; n.s.: nicht signifikant.

3.4.4 Scores

Der *EMS*, der *Nurick-Score* und der *NRS-Score* der drei Untersuchungszeitpunkte sind in Tabelle 15 dargestellt, signifikante Unterschiede der drei *Scores* zwischen den einzelnen Untersuchungen in Tabelle 16.

3.4.4.1 *European Myelopathy Score*

Der *EMS-Score* war bei der ersten postoperativen Kontrolle signifikant höher im Vergleich zum präoperativen Zeitpunkt ($p = 0,039$).

Die einzelnen *EMS-Subscores* veränderten sich postoperativ unterschiedlich:

Der *EMS-Subscore 1*, der das Gangbild beurteilt, verbesserte sich postoperativ im Vergleich zu präoperativ. Der Unterschied zeigte eine Tendenz zur Signifikanz ($p = 0,058$) zwischen dem präoperativen und dem frühen postoperativen Untersuchungszeitpunkt und war signifikant zwischen dem präoperativen und dem späten postoperativen Untersuchungszeitpunkt ($p = 0,023$).

Der *EMS-Subscore 2*, zur Erhebung der vegetativen Funktion, war postoperativ nicht signifikant verändert. Der Wert blieb im Vergleich zu präoperativ unverändert bei 18 von 21 Patienten bei der frühen postoperativen Kontrolle und bei 14 von 17 Patienten bei der späten postoperativen Kontrolle.

Der *EMS-Subscore 3*, der die Feinmotorik beurteilt, war zum frühen postoperativen Untersuchungszeitpunkt im Vergleich zu präoperativ signifikant verbessert ($p = 0,024$). Sechs der 21 Patienten gaben eine postoperative Besserung an, wobei drei Patienten eine Besserung um 2 Einheiten angaben. Auch bei der späten postoperativen Untersuchung war der *Subscore 3* im Vergleich zu präoperativ verbessert ($p = 0,098$). Kein Patient gab eine postoperative Verschlechterung des *Subscores* an.

Weder der *EMS-Subscore 4*, der die Propriozeption und Koordination der Patienten bestimmt, noch der *EMS-Subscore 5*, der Parästhesien und Schmerzen erfasst, waren bei den postoperativen Kontrollen signifikant verändert.

Bei der frühen postoperativen Kontrolle war der *Subscore* 4 bei fünf Patienten besser und bei einem Patienten schlechter als präoperativ. Bei der späten postoperativen Kontrolle war der *Subscore* bei drei Patienten besser und bei zwei Patienten schlechter als präoperativ. Bei den restlichen Patienten blieb der Wert unverändert.

Fünf Patienten gaben eine Besserung des *Subscores* 5 (Schmerzen) zum frühen postoperativen Untersuchungszeitpunkt an und drei Patienten zum späten postoperativen Untersuchungszeitpunkt. Ein Patient gab eine Verschlechterung bei der frühen Kontrolle an und zwei Patienten bei der späten Kontrolle. Die restlichen Patienten hatten den identischen Wert des *Subscores* 5 wie präoperativ.

3.4.4.2 Nurick-Score

Der Nurick-Score verbesserte sich tendenziell signifikant ($p = 0,096$) zwischen der präoperativen und ersten postoperativen Untersuchung und signifikant zwischen der präoperativen und zweiten postoperativen Untersuchung.

Bei beiden postoperativen Kontrollen gaben jeweils fünf Patienten einen besseren Score an als präoperativ. Bei der ersten postoperativen Untersuchung hatte ein Patient einen schlechteren Score als präoperativ. Die restlichen Patienten gaben bei den postoperativen Kontrollen den gleichen Score an wie präoperativ.

3.4.4.3 Numerische Rating-Skala

Bei der ersten postoperativen Untersuchung war der NRS-Score im Vergleich zu präoperativ signifikant niedriger ($p = 0,008$). 13 von 21 Patienten gaben eine geringere Schmerzintensität postoperativ an. Dabei nahm die Schmerzintensität maximal um 6 Einheiten (bei zwei Patienten) und minimal um 1 Einheit ab (bei vier Patienten). Dagegen nahm die Schmerzintensität bei drei Patienten um 1 bis 3 Einheiten postoperativ zu. Die restlichen fünf Patienten gaben die gleiche Schmerzintensität wie vor der Operation an.

Zum zweiten postoperativen Zeitpunkt gaben 10 von 17 Patienten eine Verbesserung der Schmerzintensität im Vergleich zu präoperativ an. Diese betrug im Vergleich zu präoperativ maximal 7 Einheiten (bei einem Patienten) und minimal 1 Einheit (bei einem Patienten). Bei drei Patienten war die Schmerzintensität höher als präoperativ,

wobei ein Patient eine Zunahme um 9 Einheiten (von 0 präoperativ auf 9 postoperativ) auf der Numerischen Rating-Skala angab. Die restlichen vier Patienten hatten zum späten postoperativen Zeitpunkt die gleiche Schmerzintensität wie präoperativ.

Tabelle 15

Erhobene Scores zum präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt

| Scores | Untersuchungszeitpunkt | | |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | präoperativ n = 28 | 1. postoperativ n = 21 | 2. postoperativ n = 17 |
| <i>EMS</i> | | | |
| Total | 14,42 / 15 (2,69) | 15,38 / 16 (1,91) | 15,47 / 16 (2,50) |
| Subscore 1 (Gangbild) | 3,75 / 4 (1,35) | 4,00 / 4 (1,05) | 4,18 / 5 (1,07) |
| Subscore 2 (vegetative Funktion) | 2,86 / 3 (0,45) | 2,86 / 3 (0,36) | 2,82 / 3 (0,53) |
| Subscore 3 (Feinmotorik) | 3,07 / 3 (0,86) | 3,52 / 4 (0,60) | 3,53 / 4 (0,72) |
| Subscore 4 (Selbstversorgung) | 2,54 / 3 (0,64) | 2,76 / 3 (0,54) | 2,65 / 3 (0,61) |
| Subscore 5 (Schmerzen) | 2,21 / 2 (0,42) | 2,24 / 2 (0,44) | 2,29 / 2 (0,47) |
| Nurick-Score | 2,11/2 (1,23) | 1,86 / 2 (0,91) | 1,88 / 2 (0,99) |
| NRS-Score | 3,79/4 (2,94) | 2,59 / 3 (1,99) | 2,65 / 2 (2,64) |

Mittelwert/ Median und, in Klammern, Standardabweichung des *EMS-Scores*, des *Nurick-Scores* und des *NRS-Scores*.

n: Anzahl Patienten; *EMS*: *European Myelopathy Score*; *NRS*: Numerische Rating-Skala.

Tabelle 16

Signifikante Veränderungen der Scores der Patienten zwischen dem präoperativen, ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt

| Scores | Vergleich der Untersuchungszeitpunkte | | |
|--|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| | präoperativ vs. 1. postoperativ | präoperativ vs. 2. postoperativ | 1. postoperativ vs. 2. postoperativ |
| <i>EMS</i> | $p = 0,039$ | n.s. | n.s. |
| <i>EMS-Subscore 1</i> (Gangbild) | $p = 0,058$ | $p = 0,023$ | n.s. |
| <i>EMS-Subscore 3</i> (Feinmotorik) | $p = 0,024$ | $p = 0,098$ | n.s. |
| <i>EMS-Subscore 4</i> (Selbstversorgung) | n.s. | n.s. | $p = 0,083$ |
| Nurick-Score | $p = 0,096$ | $p = 0,034$ | n.s. |
| NRS-Score | $p = 0,008$ | n.s. | n.s. |

Die Scores zu den drei Untersuchungszeitpunkten wurden mittels nicht-parametrischer Tests für zwei abhängige Variablen (Wilcoxon Test) miteinander verglichen.

EMS: *European Myelopathy Score*; *NRS*: Numerische Rating-Skala; p : Signifikanzgrad; n.s.: nicht signifikant.

3.4.5 Korrelation zwischen funktionellen und morphologischen Veränderungen

3.4.5.1 Korrelation zwischen Veränderungen der kinematischen Parametern und der Länge des pathologischen Signals

Bei der ersten Kontrolluntersuchung wurde eine negative Korrelation zwischen der Zunahme des Drucks bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* und der Abnahme der Signallänge in der MRT gefunden ($p = 0,076$, $r = 0,428$).

Zwischen der präoperativen und ersten postoperativen Untersuchung sowie zwischen der präoperativen und zweiten postoperativen Untersuchung korrelierte die Verbesserung der Frequenz bei der Aufgabe *Spirale Zeichnen* mit der Abnahme der Signallänge (zw. präoperativ und 1. postoperativ: $p = 0,053$, $r = -0,463$; zw. präoperativ und 2. postoperativ: $p = 0,022$, $r = -0,604$). Des Weiteren korrelierte die Zunahme der Maximalgeschwindigkeit für diese Aufgabe mit der Abnahme der Signallänge zwischen dem präoperativen und ersten postoperativen Untersuchungszeitpunkt ($p = 0,049$, $r = -0,470$).

Zwischen der ersten und zweiten postoperativen Kontrolle wurde nur eine Korrelation gefunden zwischen der Zunahme der Maximalgeschwindigkeit bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand* und der Abnahme der Signallänge ($p = 0,016$, $r = -0,767$).

3.4.5.2 Korrelation zwischen Veränderungen der kinematischen Parametern und des Atrophiequotienten

Zwischen der präoperativen und ersten postoperativen Untersuchung wurde ein tendenzieller Zusammenhang zwischen der Zunahme des Drucks und der Zunahme des Atrophiequotienten gefunden bei den Aufgaben *Spirale Zeichnen* ($p = 0,079$, $r = 0,424$), *Satz Schreiben* ($p = 0,075$, $r = 0,430$) und *kleine „a“s Schreiben* ($p = 0,046$, $r = 0,476$).

Die postoperative Verbesserung der Frequenz bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* korrelierte negativ mit der Zunahme des Atrophiequotienten ($p = 0,045$, $r = -0,478$). Die postoperative Verschlechterung der Frequenz bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* korrelierte mit der Zunahme des Atrophiequotienten ($p = 0,025$, $r = -0,525$).

Für die gleichen Aufgaben wurde ebenfalls eine Korrelation zwischen den postoperativen Veränderungen des NIVs und des Atrophiequotienten gefunden. Die Verbesserung des NIVs bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* korrelierte negativ mit der Zunahme des Atrophiequotienten ($p = 0,027$, $r = 0,519$) und die Verschlechterung

des NIVs bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* korrelierte mit der Zunahme des Atrophiequotienten ($p = 0,035$, $r = 0,498$).

Zwischen dem präoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt korrelierte die Verschlechterung des NIVs bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* negativ mit der Zunahme des Atrophiequotienten ($p = 0,039$, $r = -0,556$).

Zwischen den zwei postoperativen Kontrollen wurde kein Zusammenhang zwischen den Veränderungen kinematischer und kernspintomographischer Parameter gefunden.

3.4.5.3 Korrelation zwischen Veränderungen der Gangparameter und der kernspintomographischen Parameter

Zwischen den Veränderungen der Gangparameter und den Veränderungen der MRT-Parameter wurde keine signifikante Korrelation erfasst. Lediglich eine tendenziell signifikante negative Korrelation wurde zwischen der Zunahme der Ganggeschwindigkeit und der Zunahme des Atrophiequotienten gefunden ($p = 0,098$, $r = -0,443$) im Vergleich zwischen der präoperativen und zweiten postoperativen Untersuchung.

Tabelle 17

Signifikante Korrelationen zwischen den Veränderungen der Funktion und der Morphologie

| funktionelle Parameter | | Δ Signallänge [mm] (MRT) | | |
|------------------------|-----------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | präop. - 1. postop. | präop. - 2. postop. | 1. postop. - 2. postop. |
| ΔP | Kreise ND | $p = 0,076, r = 0,428$ | n.s. | n.s. |
| ΔF | Spirale | $p = 0,053, r = -0,463$ | $p = 0,022, r = -0,604$ | n.s. |
| ΔV | Kreise D | n.s. | n.s. | $p = 0,016, r = -0,767$ |
| | Spirale | $p = 0,049, r = -0,470$ | n.s. | n.s. |

| | | Δ Atrophiequotient [%] (MRT) | | |
|------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | präop. - 1. postop. | präop. - 2. postop. | 1. postop. - 2. postop. |
| ΔP | Spirale | $p = 0,079, r = 0,424$ | n.s. | n.s. |
| | Satz | $p = 0,075, r = 0,430$ | n.s. | n.s. |
| | kleine „a“s | $p = 0,046, r = 0,476$ | n.s. | n.s. |
| ΔF | kleine „a“s | $p = 0,045, r = -0,478$ | n.s. | n.s. |
| | Kreise ND | $p = 0,025, r = -0,525$ | n.s. | n.s. |
| ΔNIV | kleine „a“s | $p = 0,027, r = 0,519$ | n.s. | n.s. |
| | Kreise ND | $p = 0,035, r = 0,498$ | n.s. | n.s. |
| | Kreise A. geschl. | | $p = 0,039, r = 0,556$ | n.s. |
| Δ Ganggeschwindigkeit [m/s] | n.s. | | $p = 0,098, r = -0,443$ | n.s. |

Die Differenz der funktionellen Parameter (kinematische Parameter und Gangparameter) wurden mittels zweiseitiger Spearman-Rangkorrelation mit der Differenz der morphologischen Parameter (MRT-Parameter) korreliert.

Die Veränderungen der Gangparameter (Ganggeschwindigkeit, Anzahl der Schritte, *ICARS-Score*) korrelierten nicht mit den Veränderungen der Signallänge. Zudem bestand keine Korrelation zwischen den Veränderungen der Anzahl der Schritte oder des *ICARS-Scores* und den Veränderungen des Atrophiequotienten.

MRT: Magnetresonanztomographie; präop.: präoperativ; postop.: postoperativ; Δ : Differenz; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; D: dominante Hand; ND: nicht dominante Hand; *ICARS*: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*; p : Signifikanzgrad; r : Rangkorrelationskoeffizient; n.s.: nicht signifikant.

3.4.6 Assoziierte Faktoren mit Veränderungen der funktionellen und morphologischen Parameter

3.4.6.1 Alter

Bei einigen kinematischen Parametern korrelierten die Veränderungen zwischen präoperativ und postoperativ mit dem Alter (Tabelle 18). Es wurde eine signifikante positive Korrelation zwischen dem Alter und der postoperativen Verschlechterung der Frequenz und des NIVs bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* ermittelt (F: $p = 0,021, r = -0,488$, bzw. $p = 0,008, r = -0,634$; NIV: $p = 0,074, r = 0,389$, bzw. $p = 0,018, r = 0,583$). Zudem korrelierte die Zunahme des Drucks bei dieser Aufgabe mit dem Alter ($p = 0,005, r = 0,659$). Die postoperative Abnahme der

Maximalgeschwindigkeit korrelierte schwach mit dem Alter (zwischen präoperativ und 2. postoperativen Kontrolle: $p = 0,078$, $r = -0,453$; zwischen 1. und 2. postoperativen Kontrolle: $p = 0,079$, $r = -0,468$).

Zwischen der präoperativen und zweiten postoperativen Untersuchung wurde eine signifikante positive Korrelation des Alters mit der Verschlechterung des NIVs bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* gefunden ($p = 0,012$, $r = 0,611$) und eine tendenziell signifikante negative Korrelation des Alters mit der Verbesserung der Frequenz bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* ($p = 0,088$, $r = -0,440$).

Für die Gangparameter wurde nur eine tendenziell signifikante positive Korrelation zwischen einem höheren Alter und der postoperativen Verbesserung des *ICARS-Scores* gefunden (zwischen präoperativ und 1. postoperativen Kontrolle: $p = 0,069$, $r = -0,405$; zwischen präoperativ und 2. postoperativen Kontrolle: $p = 0,067$, $r = -0,455$).

Zudem korrelierte ein schlechter präoperativer *ICARS-Score* mit einem höheren Alter ($p = 0,003$, $r = 0,556$) (Spearman-Rangkorrelation) und mit einer größeren postoperativen Verbesserung (präoperativ - 1. postoperativ: $p = 0,002$, $r = 0,633$; präoperativ - 2. postoperativ: $p < 0,001$, $r = 0,853$) (Spearman-Rangkorrelation).

Einen Zusammenhang zwischen Alter und morphologischen Veränderungen in der MRT wurde nur für die Signallänge gefunden ($p = 0,047$, $r = 0,473$).

Tabelle 18

Signifikante Korrelation zwischen den Veränderungen der Parameter (kinematischen Parameter, Gangparameter, MRT-Parameter) und dem Alter

| Parameter | Alter | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | präop. - 1. postop. | präop. - 2. postop. | 1. postop. - 2. postop. |
| kleine „a“s | | | |
| ΔF | n.s. | $p = 0,088, r = -0,440$ | n.s. |
| Kreise ND | | | |
| ΔP | n.s. | $p = 0,005, r = 0,659$ | n.s. |
| ΔF | $p = 0,021, r = -0,488$ | $p = 0,008, r = -0,634$ | n.s. |
| ΔV | n.s. | $p = 0,078, r = -0,453$ | $p = 0,079, r = -0,468$ |
| ΔNIV | $p = 0,074, r = 0,389$ | $p = 0,018, r = 0,583$ | n.s. |
| Kreise Augen geschlossen | | | |
| ΔNIV | n.s. | $p = 0,012, r = 0,611$ | n.s. |
| ΔGanggeschwindigkeit | n.s. | n.s. | n.s. |
| ΔAnzahl Schritte | n.s. | n.s. | n.s. |
| Δ <i>ICARS-Score</i> | $p = 0,069, r = -0,405$ | $p = 0,067, r = -0,455$ | n.s. |
| ΔSignallänge [mm] (MRT) | $p = 0,047, r = 0,473$ | n.s. | n.s. |
| ΔAtrophiequotient [%] (MRT) | n.s. | n.s. | n.s. |

Die Differenz der Parameter zwischen dem präoperativen und ersten postoperativen, dem präoperativen und zweiten postoperativen sowie dem ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt wurden mittels zweiseitiger Spearman-Rangkorrelation mit dem Alter korreliert. MRT: Magnetresonanztomographie; präop.: präoperativ; postop.: postoperativ; Δ: Differenz; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; ND: nicht dominante Hand; *ICARS*: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*; p : Signifikanzgrad; r : Rangkorrelationskoeffizient; n.s.: nicht signifikant.

3.4.6.2 Body-Mass-Index

Der BMI zeigte nur schwache Korrelationen mit den Veränderungen kinematischer Parameter.

Zwischen der präoperativen und ersten postoperativen Untersuchung wurde eine negative Korrelation ermittelt zwischen der Abnahme des Variationskoeffizienten in der Aufgabe *Spirale Zeichnen* und dem BMI ($p = 0,046, r = 0,430$). Auf der anderen Seite korrelierte der BMI schwach negativ mit der Zunahme des Variationskoeffizienten bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* ($p = 0,045, r = -0,432$).

Zwischen der ersten und zweiten postoperativen Untersuchung wurde eine negative Korrelation ermittelt zwischen der Zunahme des Drucks bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* und dem BMI ($p = 0,087, r = -0,457$). Zudem korrelierte eine Verbesserung des NIVs bei der Aufgabe *Satz Schreiben* schwach mit dem BMI ($p = 0,056, r = -0,504$).

Es konnte weder eine Korrelation mit den postoperativen Veränderungen der Gangparameter noch mit denen der kernspintomographischen Parameter beobachtet werden (Tabelle 19).

Tabelle 19
Signifikante Korrelationen zwischen den Veränderungen der Parameter (kinematischen Parameter, Gangparameter, MRT-Parameter) und dem BMI (Body-Mass-Index)

| Parameter | BMI | | |
|-----------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| | präop.- 1. postop. | präop. – 2. postop. | 1. postop. – 2. postop. |
| Spirale | | | |
| Δ VarkoV | $p = 0,046, r = 0,430$ | n.s. | n.s. |
| Satz | | | |
| Δ NIV | n.s. | n.s. | $p = 0,056, r = -0,504$ |
| kleine „a“s | | | |
| Δ P | n.s. | n.s. | $p = 0,087, r = -0,457$ |
| Kreise ND | | | |
| Δ VarkoV | $p = 0,045, r = -0,432$ | n.s. | n.s. |

Die Differenz der Parameter zwischen dem präoperativen und ersten postoperativen, dem präoperativen und zweiten postoperativen sowie dem ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt wurden mittels zweiseitiger Spearman-Rangkorrelation mit dem BMI korreliert.

Die Veränderungen der Ganggeschwindigkeit, der Anzahl der Schritte, des *ICARS-Scores*, der Signallänge (MRT) und des Atrophiequotienten (MRT) korrelierten nicht signifikant mit dem BMI.

MRT: Magnetresonanztomographie; präop.: präoperativ; postop.: postoperativ; Δ : Differenz; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%]; ND: nicht dominante Hand; p : Signifikanzgrad; r : Rangkorrelationskoeffizient; n.s.: nicht signifikant; *ICARS*: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*.

3.4.6.3 Dauer der Symptome

Die Dauer der Symptome korrelierte schwach mit der postoperativen Zunahme des Drucks bei den Schreibaufgaben. Dabei korrelierte die Dauer der Symptome negativ mit der Zunahme des Drucks bei den Aufgaben *Spirale Zeichnen* ($p = 0,091, r = -0,369$), *Satz Schreiben* ($p = 0,045, r = -0,506$) und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* ($p = 0,084, r = -0,446$). Dagegen korrelierte sie schwach positiv mit der Zunahme des Drucks bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* ($p = 0,090, r = 0,370$). Des Weiteren korrelierten die Verbesserung der Frequenz und des NIVs bei der Aufgabe *Spirale Zeichnen* negativ mit der Dauer der Symptome (F: $p = 0,036, r = -0,461$ bzw. $p = 0,079, r = -0,452$; NIV: $p = 0,085, r = 0,385$). Die postoperative Verschlechterung des NIVs bei der Aufgabe *Satz Schreiben* korrelierte positiv mit der Symptombdauer ($p = 0,056, r = 0,423$ bzw. $p = 0,099, r = 0,427$). Zudem konnte eine signifikante negative Korrelation zwischen der Dauer der Symptome und der postoperativen Zunahme der Maximalgeschwindigkeit bei der Aufgabe *kleine „a“s*

Schreiben ermittelt werden ($p = 0,028$, $r = -0,479$ bzw. $p = 0,015$, $r = -0,595$). Die Abnahme des Variationskoeffizienten bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* korrelierte negativ mit der Symptombdauer ($p = 0,007$, $r = 0,642$). Das postoperative Ergebnis der Gangparameter und der kernspintomographischen Parameter korrelierte nicht mit der Symptombdauer.

Tabelle 20
Signifikante Korrelationen zwischen den Veränderungen der Parameter (kinematischen Parameter, Gangparameter, MRT-Parameter) und der Dauer der Symptome

| Parameter | Dauer der Symptome | | |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | präop. - 1. postop. | präop. - 2. postop. | 1. postop. - 2. postop. |
| Spirale | | | |
| ΔP | $p = 0,091$, $r = -0,369$ | n.s. | n.s. |
| ΔF | $p = 0,036$, $r = -0,461$ | $p = 0,079$, $r = -0,452$ | n.s. |
| ΔNIV | $p = 0,085$, $r = 0,385$ | n.s. | n.s. |
| Satz | | | |
| ΔP | n.s. | $p = 0,045$, $r = -0,506$ | n.s. |
| ΔNIV | $p = 0,056$, $r = 0,423$ | $p = 0,099$, $r = 0,427$ | n.s. |
| kleine „a“s | | | |
| ΔV | $p = 0,028$, $r = -0,479$ | $p = 0,015$, $r = -0,595$ | n.s. |
| Kreise ND | | | |
| ΔP | $p = 0,090$, $r = 0,370$ | | |
| Kreise Augen geschlossen | | | |
| ΔP | n.s. | $p = 0,084$, $r = -0,446$ | n.s. |
| ΔVarkoV | n.s. | $p = 0,007$, $r = 0,642$ | n.s. |

Die Differenz der Parameter zwischen dem präoperativen und ersten postoperativen, dem präoperativen und zweiten postoperativen sowie dem ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt wurden mittels zweiseitiger Spearman-Rangkorrelation mit der Dauer der Symptome korreliert.

Die Veränderungen der Ganggeschwindigkeit, der Anzahl der Schritte, des *ICARS-Scores*, der Signallänge (MRT) und des Atrophiequotienten (MRT) korrelierten nicht signifikant mit der Dauer der Symptome.

MRT: Magnetresonanztomographie; präop.: präoperativ; postop.: postoperativ; Δ: Differenz; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%]

D: dominante Hand; p : Signifikanzgrad; r : Rangkorrelationskoeffizient; n.s.: nicht signifikant; *ICARS*: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*.

3.4.6.4 Anzahl der operierten Höhen der HWS

Je nach Anzahl der operierten Höhen der HWS (eine HWK-Höhe vs. mehrere HWK-Höhen) unterschieden sich die postoperativen Veränderungen kinematischer Parameter (Mann-Whitney-U-Test) (Tabelle 21). Einen signifikanten Unterschied konnte allerdings nur für die Zunahme der Frequenz zwischen dem präoperativen und ersten postoperativen Untersuchungszeitpunkt bei der Aufgabe *Spirale Zeichnen* gefunden

werden (1 HWK-Höhe: $\Delta F = 0,226 \pm 0,3$ Hz, $n = 11$; mehrere HWK-Höhen: $\Delta F = 0,002 \pm 0,6$ Hz, $n = 11$; $p = 0,019$). Bei der gleichen Aufgabe wurde ein Unterschied mit Tendenz zur Signifikanz in der Veränderung der Maximalgeschwindigkeit erfasst ($p = 0,088$). Dabei verbesserte sich die Maximalgeschwindigkeit durchschnittlich um $12,65 \pm 21,9$ m/s bei der Patientengruppe, die nur auf einer Höhe der HWS operiert wurde ($n = 11$), während sie sich bei der Gruppe, die über mehrere Höhen operiert wurde ($n=11$), um $4,54 \pm 15,1$ m/s verschlechterte.

Zwischen präoperativ und der zweiten postoperativen Untersuchung wurde je nach Anzahl der operierten Höhen ein signifikanter Unterschied in der Zunahme des Drucks bei den Aufgaben *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* gefunden. Die postoperative Zunahme des Drucks war höher bei der Patientengruppe, die über mehrere Höhen operiert wurde (1 HWK-Höhe: $\Delta P = 0,02 \pm 0,3$ N, $n = 8$; mehrere HWK-Höhen: $\Delta P = 0,76 \pm 0,7$ N, $n = 8$; $p = 0,021$). Zudem wurde ein tendenziell signifikanter Unterschied in der Zunahme der Frequenz bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* beobachtet (1 HWK-Höhe: $\Delta F = 0,50 \pm 0,4$ Hz, $n = 8$; mehrere HWK-Höhen: $\Delta F = 0,15 \pm 0,3$ Hz, $n = 8$; $p = 0,083$). Die Frequenz bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* war postoperativ im Mittel um $0,19 \pm 0,5$ Hz höher bei den Patienten, die auf einer Höhe operiert wurden ($n = 8$), und um $0,19 \pm 0,4$ Hz niedriger bei den anderen Patienten ($n = 8$) ($p = 0,083$).

Schließlich unterschied sich die Verbesserung des NIVs zwischen den zwei postoperativen Kontrollen bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand*. Hierbei zeigte sich jedoch nur eine Tendenz zur Signifikanz (1 HWK-Höhe: $\Delta NIV = -0,20 \pm 0,3$, $n = 7$; mehrere HWK-Höhen: $\Delta NIV = -0,01 \pm 0,2$, $n = 8$; $p = 0,094$).

Die Veränderungen der Gangparameter und der MRT-Parameter unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Patienten, die auf einer Höhe operiert wurden, und den Patienten, die auf mehreren Höhen operiert wurden.

Tabelle 21

Signifikante Unterschiede zwischen den Veränderungen der Parameter (kinematischen Parameter, Gangparameter, MRT-Parameter) bei einer Operation auf 1 HWK-Höhe und bei einer Operation über mehrere HWK-Höhen

| Parameter | Anzahl der operierten Höhen (1 HWK-Höhe vs. mehrere HWK-Höhen) | | |
|-------------------|--|--|--|
| | präop. - 1. postop. (n = 11 vs. n = 11) | präop. - 2. postop. (n = 8 vs. n = 8) | 1. postop. - 2. postop. (n = 7 vs. n = 8) |
| Kreise D | | | |
| Δ NIV | n.s. | n.s. | $p = 0,094$ |
| Spirale | | | |
| Δ F | $p = 0,019$ | n.s. | n.s. |
| Δ V | $p = 0,088$ | n.s. | n.s. |
| kleine „a“s | | | |
| Δ F | n.s. | $p = 0,083$ | n.s. |
| Kreise ND | n.s. | n.s. | n.s. |
| Δ F | n.s. | $p = 0,083$ | n.s. |
| Kreise A. geschl. | | | |
| Δ P | n.s. | $p = 0,021$ | n.s. |

Die Differenz der Parameter zwischen dem präoperativen und ersten postoperativen, dem präoperativen und zweiten postoperativen sowie dem ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt bei einer Operation auf 1 HWK-Höhe wurde mit derer bei einer Operation auf mehreren HWK-Höhen verglichen mittels nicht-parametrischer Tests für zwei unabhängige Variablen (Mann-Whitney-U-Test).

Die Veränderungen der Ganggeschwindigkeit, der Anzahl der Schritte, des *ICARS-Score*, der Signallänge (MRT) und des Atrophiequotienten (MRT) unterschieden sich nicht signifikant mit der Anzahl der operierten Höhen der Halswirbelsäule.

MRT: Magnetresonanztomographie; HWK: Halswirbelkörper; präop.: präoperativ; postop.: postoperativ; n: Anzahl Patienten; Δ : Differenz; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; D: dominante Hand; ND: nicht dominante Hand; p : Signifikanzgrad; r: Rangkorrelationskoeffizient; n.s.: nicht signifikant; *ICARS: International Cooperative Ataxia Rating Scale*.

3.4.6.5 Operationszugang

Beim Vergleich der Operationszugänge (ventral vs. dorsal) konnten nur tendenziell signifikante Unterschiede in der Veränderungen kinematischer Parameter beobachtet werden (Mann-Whitney-U-Test) (Tabelle 22).

Zwischen der präoperativen und ersten postoperativen Untersuchung nahm der Druck bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand* bei den von ventral operierten Patienten ($n = 17$) um durchschnittlich $0,14 \pm 0,7$ N zu, während bei den von dorsal operierten Patienten ($n = 5$) eine größere Zunahme von $0,83 \pm 0,2$ N zu beobachten war ($p = 0,039$). Zwischen der präoperativen und zweiten postoperativen Untersuchung war die Zunahme des Drucks für die gleiche Aufgabe ebenfalls größer bei der von dorsal operierten Patientengruppe (ventral: $\Delta P = 0,11 \pm 0,9$ N, $n = 12$; dorsal: $\Delta P = 0,81 \pm 0,6$ N, $n = 4$; $p = 0,058$). Dies konnte auch beobachtet werden bei den Aufgaben *Spirale Zeichnen* (ventral: $\Delta P = 0,36 \pm 0,8$ N, $n = 12$; dorsal: $\Delta P = 0,91 \pm 0,7$ N, $n = 4$; p

= 0,078) und *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* (ventral: $\Delta P = 0,21 \pm 0,5$ N, n = 12; dorsal: $\Delta P = 0,95 \pm 0,5$ N, n = 4; $p = 0,020$).

Die Veränderungen der Frequenz zwischen präoperativ und der zweiten postoperativen Kontrolle unterschieden sich je nach Operationszugang. Bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben* nahm die Frequenz bei der von ventral operierten Patientengruppe (n = 12) im Mittel um $0,43 \pm 0,4$ Hz zu und bei der von dorsal operierten Gruppe (n = 4) um $0,03 \pm 0,2$ Hz ($p = 0,058$), bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* nahm sie bei den von ventral operierten Patienten zu ($\Delta F = 0,13 \pm 0,5$ Hz, n = 12) und bei den von dorsal operierten Patienten ab ($\Delta F = -0,39 \pm 0,3$ Hz, n = 4) ($p = 0,042$) und schließlich bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen*, nahm sie bei beiden Gruppen postoperativ ab (ventral: $\Delta F = -0,14 \pm 0,6$ Hz, n = 12; dorsal: $\Delta F = -0,55 \pm 0,3$ Hz, n = 4; $p = 0,078$).

Ein Unterschied wurde auch für die postoperative Verbesserung der Maximalgeschwindigkeit bei der Aufgabe *Satz Schreiben* gefunden (ventral: $\Delta V = 6,59 \pm 12,2$ m/s, n = 18; dorsal: $\Delta V = 18,01 \pm 15,4$ m/s, n = 4; $p = 0,071$).

Außerdem unterschieden sich die Veränderungen des NIVs: zwischen der präoperativen und der zweiten postoperativen Untersuchung nahmen die NIVs der zwei Gruppen bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand* unterschiedlich zu (ventral: $\Delta NIV = 0,41 \pm 1,9$, n = 12; dorsal: $\Delta NIV = 1,51 \pm 2,1$, n = 4; $p = 0,058$) und zwischen den zwei postoperativen Kontrollen verbesserte sich der NIV der ventral operierten Patienten bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand* ($\Delta NIV = -0,16 \pm 0,3$, n = 11), dagegen verschlechterte er sich bei den von dorsal operierten Patienten ($\Delta NIV = -0,09 \pm 0,1$, n = 4; $p = 0,056$).

Bei den von ventral operierten Patienten kam es postoperativ zu einer Abnahme des Variationskoeffizienten bei den Aufgaben *kleine „a“s Schreiben* ($\Delta \text{VarkoV} = -0,02 \pm 0,1$ %, n = 18), wogegen es bei den von dorsal operierten Patienten zu einer Zunahme kam ($\Delta \text{VarkoV} = 0,02 \pm 0,04$ %, n = 4) ($p = 0,071$). Umgekehrt wurde zwischen den postoperativen Kontrollen bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* eine Zunahme des Variationskoeffizienten bei der Patientengruppe mit ventralem Zugang ($\Delta \text{VarkoV} = 0,01 \pm 0,03$ %, n = 11) und eine Abnahme bei der Patientengruppe mit dorsalem Zugang ($\Delta \text{VarkoV} = 0,03 \pm 0,04$ %, n = 4) ermittelt ($p = 0,056$).

Für das postoperative Ergebnis der Gangparameter und der MRT-Parameter konnte kein signifikanter Unterschied zwischen dem ventralen und dem dorsalen Operationszugang gefunden werden.

Tabelle 22

Signifikante Unterschiede zwischen den Veränderungen der Parameter (kinematischen Parameter, Gangparameter, MRT-Parameter) bei einer Operation mit ventralem und bei einer Operation mit dorsalem Zugang

| Parameter | Operationszugang (ventral vs. dorsal) | | |
|-------------------|---|---|---|
| | präop. - 1. postop. n = 17 vs. n = 5 | präop. - 2. postop. n = 12 vs. n = 4 | 1. postop. - 2. postop. n = 11 vs. n = 4 |
| Kreise D | | | |
| ΔP | $p = 0,039$ | $p = 0,058$ | n.s. |
| ΔNIV | n.s. | n.s. | $p = 0,056$ |
| Spirale | | | |
| ΔP | n.s. | $p = 0,078$ | n.s. |
| Satz | | | |
| ΔV | $p = 0,071$ | n.s. | n.s. |
| kleine „a“s | | | |
| ΔF | n.s. | $p = 0,058$ | n.s. |
| ΔVarkoV | $p = 0,071$ | | n.s. |
| Kreise ND | | | |
| ΔF | n.s. | $p = 0,042$ | n.s. |
| ΔNIV | n.s. | $p = 0,058$ | n.s. |
| Kreise A. geschl. | | | |
| ΔP | n.s. | $p = 0,020$ | n.s. |
| ΔF | n.s. | $p = 0,078$ | n.s. |
| ΔVarkoV | n.s. | n.s. | $p = 0,056$ |

Die Differenz der Parameter zwischen dem präoperativen und ersten postoperativen, dem präoperativen und zweiten postoperativen sowie dem ersten postoperativen und zweiten postoperativen Untersuchungszeitpunkt bei einer Operation mit ventralem Zugang wurde mit derer bei einer Operation mit dorsalem Zugang verglichen mittels nicht-parametrischer Tests für zwei unabhängige Variablen (Mann-Whitney-U-Test).

Die Veränderungen der Ganggeschwindigkeit, der Anzahl der Schritte, des *ICARS-Score*, der Signallänge (MRT) und des Atrophiequotienten (MRT) unterschieden sich nicht signifikant mit dem Operationszugang.

MRT: Magnetresonanztomographie; n: Anzahl Patienten; präop.: präoperativ; postop.: postoperativ; Δ: Differenz; P: Druck [N]; F: Frequenz [Hz]; V: Maximalgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeitsmaxima der Auf- und Abstriche) [m/s]; NIV: Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen; VarkoV: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmaxima eines Segments [%]; D: dominante Hand; ND: nicht dominante Hand; p : Signifikanzgrad; n.s.: nicht signifikant; *ICARS*: *International Cooperative Ataxia Rating Scale*.

4 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, die neurologischen Störungen von Patienten mit einer zervikalen Myelopathie zu quantifizieren, sie mit einem altersadaptierten Normalkollektiv zu vergleichen und das Erholungspotenzial und die Dynamik der Regeneration nach einer dekompressiven Operation zu untersuchen. Im Fokus standen die feinmotorischen Funktionsstörungen der Patienten, über die es in der Literatur bislang nur spärliche Informationen gibt.

Erstmals wurde in dieser Studie ein digitales Schreibtablett angewandt mit dem eine quantitative Analyse der feinmotorischen Funktion möglich ist.

Dies ermöglichte eine objektive und differenziertere Untersuchung der feinmotorischen Funktionsstörungen.

4.1.1 Störungen der Feinmotorik

Bei den Patienten mit zervikaler Myelopathie waren die kinematischen Parameter der komplexen Aufgaben beeinträchtigt. Vor allem bei der Aufgabe *Satz Schreiben* konnte ein signifikanter Unterschied der Schreibgeschwindigkeit (Frequenz, Maximalgeschwindigkeit) und der Automatisierung (NIV) im Vergleich zur Kontrollgruppe beobachtet werden. Die Schreibbewegungen der Patienten wurden also langsamer und weniger flüssig durchgeführt. Die Aufgabe *Satz Schreiben* erfordert eine komplexe Koordination der Bewegungen des Arms, der Hand und der Finger, wie sie im alltäglichen Leben beim Schreiben gebraucht wird. Diese Aufgabe spiegelt daher die Beeinträchtigung dieser Funktion bei Patienten mit zervikaler Myelopathie im Alltag wieder.

Während des Schreibens ist ein kontinuierliches sensorisches Feedback nötig, damit die Bewegungen kontrolliert und koordiniert ablaufen können. Dieses sensorische Feedback setzt sich aus der Propriozeption, der Exterozeption sowie der visuellen Kontrolle zusammen.⁷

Diese koordinativen Inputs werden im Kleinhirn verschaltet.

Die Propriozeption - Information über die Stellung der Extremitäten und der Körperhaltung - und die Exterozeption - Information über die Lokalisation und Intensität der Tastempfindung - sind Funktionen, die über die Hinterstränge, den Fasciculus gracilis von Rumpf und Beinen und den Fasciculus cuneatus von Oberkörper und Armen, geleitet werden. Auch bei der überwiegenden Anzahl an Patienten mit einer zervikalen Myelopathie besteht eine Schädigung der Hinterstränge. In Analogie zur ataktischen Funktionsstörung der Beine könnte somit eine eingeschränkte propriozeptive und taktile Wahrnehmung bei Patienten mit zervikaler Myelopathie zu den gemessenen Veränderungen der kinematischen Parameter beitragen.

Hepp-Reymond et al.²⁷ beobachteten, dass ein Verlust der Propriozeption und der taktilen Wahrnehmung zu gestörten Bewegungsabläufen beim Schreiben führen. Die Frequenz und der NIV waren beeinträchtigt beim Schreiben des Wortes „Parallele“. Auch Ebied et al.¹² konnten eine Beeinträchtigung der Schreibbewegung bei Verlust der taktilen Wahrnehmung beobachten. Die Dauer der Bewegung und die Anzahl der Beschleunigungswechsel waren erhöht.

In dieser Studie war bei Verlust der visuellen Kontrolle (*Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen*) der kinematische Parameter der Variabilität (Variationskoeffizient) in der Patientengruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant erhöht. Dies zeigt, dass die Patienten die repetitiven Handbewegungen weniger stabil ausführen konnten und die Bewegungsabläufe somit weniger gleichmäßig waren.

Die Rolle der visuellen Kontrolle beim Schreiben wurde bereits durch Marquardt et al.⁴³ untersucht. Bei gesunden Probanden zeigte die Deprivation der visuellen Kontrolle keinen Einfluss auf die Durchführung automatisierter Schreibbewegungen. Bei einer Störung der Propriozeption scheint allerdings die visuelle Kontrolle die Beeinträchtigung beim Schreiben zu kompensieren. Hepp-Reymond et al.²⁷ untersuchten einen Patienten mit Verlust der Propriozeption und der taktilen Wahrnehmung und beobachteten eine Verschlechterung der Bewegungsabläufe bei zusätzlicher Deprivation der visuellen Kontrolle. Die Deprivation mehrerer sensorischer Komponenten scheint also mit einer schwereren Beeinträchtigung beim Schreiben einherzugehen.

Auch bei zervikaler Myelopathie sind die Propriozeption und die taktile Wahrnehmung beeinträchtigt. So scheint die visuelle Kontrolle hier eine wichtige, kompensierende Rolle bei der korrekten Ausführung von Handbewegungen zu spielen.

Beim Schreiben mit der ungeübten Hand (*Kreise Zeichnen nicht dominante Hand*) konnten die Patienten die einfachen repetitiven Schreibbewegungen ebenfalls weniger stabil und gleichmäßig ausführen (der Variationskoeffizient war signifikant erhöht) im Vergleich zur Kontrollgruppe. Interessanterweise waren keine signifikanten feinmotorischen Störungen bei den einfachen Zeichenübungen mit der dominanten Hand (*Kreise Zeichnen dominante Hand, Spirale Zeichnen*) zu beobachten. Die Schreibgewohnheit der geübten Hand scheint einen positiven Effekt auf die feinmotorischen Funktionsstörungen zu haben. Zdunczyk et al.⁹⁹ beobachteten eine kompensatorische Reorganisation des kortikospinalen Systems (höhere Aktivierung nicht-primär motorischer Areale) bei Patienten mit leichtgradiger (*JOA-Score* >12) zervikaler Myelopathie.

Dies könnte darauf hindeuten, dass durch Kompensationsmechanismen die feinmotorische Funktion zu einem gewissen Maße erhalten werden kann. Hierbei scheint Übung einen positiven Effekt zu haben. Die Beeinträchtigung der feinmotorischen Funktion bei den komplexen Schreibaufgaben im Vergleich zur Kontrollgruppe lässt vermuten, dass eine Kompensation nur zu einem gewissen Ausmaß möglich ist. Allerdings haben solche komplexeren Bewegungsabläufe im Alltag eine hohe Relevanz.

Frühere Studien haben jedoch auch Störungen der feinmotorischen Funktion bei der Durchführung einfacherer Tests mit repetitiven Bewegungsabläufen bei zervikaler Myelopathie beschrieben:

Hosono et al.²⁹ führten bei 30 Patienten mit zervikaler Myelopathie den *Grip and Release*-Test durch und zeigten, dass die Anzahl der Bewegungszyklen im Vergleich zur Kontrollgruppe vermindert war. Miwa et al.⁵³ führten bei 43 Patienten den *Finger Tapping*-Test durch und stellten eine signifikante Verminderung der Geschwindigkeit und der Gleichmäßigkeit der Bewegungsabläufe im Vergleich zur Kontrollgruppe fest.

Der Schweregrad der zervikalen Myelopathie war in beiden Studien vergleichbar. In dieser Studie scheint der Schweregrad etwas niedriger zu sein als in den beiden anderen Studien. Dies könnte ein Grund für die widersprüchlichen Ergebnisse bei der Durchführung repetitiver Bewegungen sein. Dies würde auch den Beobachtungen von Zdunczyk et al.⁹⁹ entsprechen, welche nur bei Patienten mit leichtgradiger Beeinträchtigung eine kompensatorische Reorganisation des zentralen Nervensystems beschrieben.

Ein direkter Vergleich des Schweregrads zwischen den Studien ist jedoch nicht möglich, da unterschiedliche Scores (*JOA-Score*, *EMS-Score*) benutzt wurden.

Zudem unterscheiden sich die Bewegungsabläufe beim *Grip and Release*-Test und beim *Finger Tapping*-Test von denen der Aufgabe *Kreise Zeichnen dominante Hand*. In beiden Tests werden isoliert Flexions- und Extensionsbewegungen der Finger erfasst. Beim Schreiben werden allerdings koordinierte Finger-, Handgelenks- und Armbewegungen durchgeführt.⁸⁸ Der Umfang der Extensions- und Flexionsbewegungen der Finger sind hierbei, im Gegensatz zum *Grip and Release*-Test und *Finger Tapping*-Test, nur minimal. So scheint die Durchführung feiner repetitiver Bewegungen bei zervikaler Myelopathie wenig beeinträchtigt zu sein, wogegen bei einem größeren Bewegungsumfang die feinmotorischen Funktionsstörungen erkennbar sind.

Der Druck beim Schreiben war im Vergleich zu den Probanden vermindert, erreichte jedoch nicht das Signifikanz-Niveau. Dies könnte daran liegen, dass neben dem Verlust von koordinativen (Hinterstrang-)Funktionen auch ein Verlust der Kraft der oberen Extremität und eine verminderte Greifkraft bei zervikaler Myelopathie auftreten, sodass beim Schreiben weniger Druck auf den Stift ausgeübt werden kann.

4.1.2 Störungen des Gangbilds

Die Ganggeschwindigkeit war bei den Patienten mit zervikaler Myelopathie im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant vermindert.

Zudem war bei den Patienten mit erhöhtem *ICARS-Score* auch die Anzahl der benötigten Schritte für die 10m-Gehstrecke erhöht. Die Schrittlänge war bei diesen Patienten also verkürzt.

Eine reduzierte Ganggeschwindigkeit und verkürzte Schrittlänge wurden bereits in früheren Studien beschrieben.^{42,61,84}

Das spastische Gangbild bei Patienten mit zervikaler Myelopathie ist bedingt durch einen erhöhten Tonus der Flexoren und Extensoren der unteren Extremität, durch Gelenkkontrakturen sowie durch eine verminderte Propriozeption und Exterozeption.⁴² Nishimura et al.⁶¹ beschrieben die verminderte Ganggeschwindigkeit und die verlängerte Standphase (durch verkürzte Schrittlänge und erhöhte Außenrotation der Füße) als ein Kompensationsmechanismus des instabilen Gangs.

Mazur et al.⁴⁹ fanden eine Korrelation zwischen dem 10m-Gehtest (Anzahl der Schritte, benötigte Zeit) und der zentralmotorischen Leitungszeit nach transkranieller magnetischer Stimulation des Motorkortex. Dies zeigt, dass die Störungen des Gangbildes bei zervikaler Myelopathie mit der funktionellen Schädigung des Tractus corticospinalis zusammenhängen.

4.1.3 Korrelation zwischen Funktion und Morphologie

Zur Diagnostik der zervikalen Myelopathie wird die Magnet-Resonanz-Tomographie, als bildgebendes Verfahren benutzt. Ob die pathologischen Veränderungen in der MRT den klinischen Schweregrad der zervikalen Myelopathie widerspiegeln, wurde bereits in früheren Studien untersucht.^{38,54,64}

Hierbei wurde eine indirekte Korrelation der transversalen Fläche auf Höhe der maximalen Myelonkompression mit der Ausprägung funktioneller Einschränkungen (*JOA-Score*^{38,54,64}, *Nurick-Score*³⁸, standardisierter Gangtest³⁸) gefunden.

In dieser Studie ging ein hoher Atrophiequotient lediglich tendenziell mit einer Verschlechterung der Automatisierung einfacherer, repetitiver Handbewegungen (*Kreise Zeichnen dominante Hand* und *Kreise Zeichnen nicht dominante Hand*) einher.

Andere Studien untersuchten den Zusammenhang zwischen den präoperativen Veränderungen der Signalintensität und der präoperativen Symptomatik.

Suri et al.⁸³ fanden keine Korrelation zwischen der Präsenz oder Absenz einer intramedullären Signalveränderung in der T1- und/ oder T2-gewichteten MRT mit dem klinischen Schweregrad (*Nurick-Score*). Vitzthum et al.⁹⁰ konnten ebenfalls keine Korrelation zwischen der Signalintensität und diversen klinischen *Scores* (*JOA-Score*, *Nurick-Score*, *EMS*, *Prolo-Score*, *Cooper-Myelopathy-Scale*) finden.

Arvin et al.² untersuchten nicht nur die Präsenz oder Abwesenheit einer Signalintensität, sondern unterteilten diese in diffuse, fokale und segmentierte Signalveränderungen (in der T2-gewichteten MRT). Hierbei korrelierte eine fokale Signalveränderung mit einer schwereren funktionellen Beeinträchtigung (*JOA-Score*, *Nurick-Score*) als eine diffuse oder keine Signalveränderung in der T2-gewichteten MRT. Zudem korrelierten segmentierte Signalveränderungen mit einer schwereren Klinik (Zeit und Anzahl der Schritte im 30m-Gehtest).

Zwischen einer fokalen und einer multisegmentalen erhöhten Signalintensität in der T2-gewichteten MRT konnten Wada et al.⁹¹ keinen Unterschied des klinischen Schweregrads (*JOA-Score*) beobachten.

In dieser Studie wurde nicht die morphologische Darstellung der Veränderung der Signalintensität in der T2-gewichteten MRT untersucht, sondern die Ausdehnung des pathologischen Signals quantifiziert, indem die Signallänge gemessen wurde. Dabei beschränkten sich signifikante Korrelationen zwischen den präoperativen kinematischen Parameter und der Signallänge auf die Aufgabe *Spirale Zeichnen*, mit Beeinträchtigung der Schreibgeschwindigkeit und der Automatisierung.

Die eher kleine Gruppengröße von 28 Patienten könnte erklären, dass nicht alle funktionellen Parameter mit den kernspintomographischen Veränderungen signifikant korrelieren. Der Zusammenhang scheint also zwar vorhanden, jedoch nicht stark ausgeprägt zu sein.

Die Ausdehnung der Rückenmarksschädigung in der MRT wurde bisher nur in einer Ebene erfasst: Atrophiequotient und transversale Fläche in transversaler Ebene, Länge des pathologischen Signals und Veränderungen der Signalintensität in sagittaler Ebene. Um das gesamte Ausmaß der MR-morphologischen Rückenmarksschädigung zu quantifizieren wäre eine Volumetrie nötig. In einer Studie von Wang et al.⁹³ wurden Patienten mit zervikaler Myelopathie bedingt durch die Ossifikation des Ligamentum longitudinale posterius mittels 3-dimensionaler Computertomographie untersucht. Hierbei wurde die „occupation rate“ (OR), also die Einnahme des Spinalkanals durch das Ligamentum longitudinale posterius, bestimmt. Im Gegensatz zur 2-dimensional bestimmten OR ging die 3-dimensional bestimmte OR signifikant mit der funktionellen

Beeinträchtigung (*JOA-Score*) einher. Ob durch eine 3-dimensionale Untersuchung des Myelons eine genauere Beurteilung des klinischen Schweregrads möglich ist, könnte in weiteren Studien untersucht werden.

4.1.4 Assoziierte Faktoren mit der Funktion und Morphologie

Die Dauer der Symptome bis zur operativen Therapie hatte in dieser Studie den größten Einfluss auf den präoperativen Schweregrad der feinmotorischen Störung. Eine längere Dauer der Symptome korrelierte mit einer größeren Beeinträchtigung der Geschwindigkeit und der Automatisierung beim Schreiben, allerdings nur bei der Aufgabe *kleine „a“s Schreiben*. Je länger die Erkrankung besteht, desto schwerer äußert sich also die feinmotorische Beeinträchtigung.

Für die anderen anamnestisch und mit einem Fragebogen erhobenen Faktoren (Beruf, Sport, BMI, Geschlecht) konnte keine eindeutige Korrelation mit dem präoperativen Schweregrad der feinmotorischen Funktionsstörungen ausgemacht werden.

Der Faktor Sport könnte einen Einfluss auf den Schreibdruck haben. Bei Patienten, die angaben, dass sie regelmäßig Sport treiben, war der präoperative Druck bei den Schreibaufgaben *Satz Schreiben* und *kleine „a“s Schreiben* höher als bei Patienten, die keinen Sport trieben. Dieser Zusammenhang könnte darauf hindeuten, dass sportliche Betätigung einen positiven - hemmenden - Einfluss auf den Verlust der Kraft in den oberen Extremitäten bei zervikaler Myelopathie hat.

Durch die unterschiedlichen Gruppengrößen zwischen Patienten mit körperlich anstrengenden und weniger anstrengenden Berufen sowie zwischen den Geschlechtern, war ein Vergleich nur eingeschränkt möglich.

Keiner der untersuchten Faktoren korrelierte mit dem Schweregrad der Gangstörung oder dem Schweregrad im MRT-Befund.

Suri et al.⁸³ untersuchten, ob es Risikofaktoren für präoperative Veränderungen der Signalintensität in der MRT gibt. Allerdings schienen Alter, Geschlecht, Symptombdauer, klinische Symptomatik und funktionelle Störungen keinen Einfluss auf das Vorhandensein von Veränderungen der Signalintensität zu haben. Auch Arvin et al.²

konnten keinen Einfluss des Alters, der Symptombdauer oder des Geschlechts auf das Vorhandensein einer Veränderung der Signalintensität in einer T1- oder T2-gewichteten MRT finden.

4.2 Longitudinale Analyse

4.2.1 Postoperative Veränderung der kinematischen Parameter

Bei der Untersuchung der kinematischen Parameter 6 Monate und 12 Monate postoperativ konnte eine signifikante Verbesserung der feinmotorischen Funktionen festgestellt werden.

Der Druck war bei allen Schreib- und Zeichenaufgaben postoperativ signifikant höher. Die Operation scheint einen positiven Effekt auf die Greifkraft zu haben, sodass die Patienten beim Schreiben und Zeichnen mehr Druck ausüben können.

Neben dem Druck verbesserte sich postoperativ auch die Schreibgeschwindigkeit (Frequenz, Maximalgeschwindigkeit). Die Zunahme der Schreibgeschwindigkeit betraf die komplexen Schreibaufgaben (*Satz Schreiben, kleine „a“s Schreiben*). Da diese Aufgaben am ehesten den Schreibaufgaben im alltäglichen Leben entsprechen, scheinen die Patienten im Alltag von einer Verbesserung der Schreibfunktion zu profitieren.

Die feinmotorische Funktion scheint sich also durch eine operative Dekompression zu erholen. Die Verbesserung der Schreibgeschwindigkeit kann durch eine Verminderung der Spastik der Hände und Finger bedingt sein. Dies würde auf eine Regeneration, zumindest zu einem gewissen Ausmaß, der motorischen Bahnen hindeuten.

Eine postoperative Erholung des Tractus corticospinalis konnten Nakanishi et al.⁵⁹ beobachten. Sie fanden eine signifikante Verbesserung der zentralen motorischen Leitungszeit ein Jahr postoperativ bei Patienten mit zervikaler Myelopathie.

Eine Verbesserung der feinmotorischen Funktion nach Operation wurde bereits in früheren Studien beschrieben.

Hosono et al.²⁹ beobachteten bei Patienten mit zervikaler Myelopathie eine Verbesserung der Fingerfertigkeit zwei Wochen nach operativer Therapie. Präoperativ

zeigten die Patienten im *Grip and Release*-Test eine verminderte Bewegungsgeschwindigkeit während der initialen Phase der Handbewegung. Dieses initiale *freezing* war postoperativ nicht mehr nachweisbar.

Miwa et al.⁵³ führten präoperativ und einige Wochen postoperativ den *Finger Tapping*-Test bei Patienten mit zervikaler Myelopathie durch. Sie stellten eine Verbesserung der Geschwindigkeit und der Gleichmäßigkeit der Bewegung fest.

Mazur et al.⁴⁹ führten 1, 3, 6 und 12 Monate nach operativer Dekompression Kontrolluntersuchungen durch und konnten ebenfalls eine postoperative Verbesserung der Fingerfertigkeit beobachten mittels *Nine Hole Peg*-Test und *Grip and Release*-Test. Hierbei zeigte sich beim *Nine Hole Peg*-Test mit der linken (nicht dominanten) Hand noch nach 12 Monaten eine Verbesserung. Beim *Grip and Release*-Test war eine Verbesserung bis 6 Monate postoperativ zu beobachten mit anschließender Verschlechterung. Allerdings war die *drop-out* Rate nach 12 Monaten relativ hoch, sodass die Beurteilung der Regenerationsfähigkeit 12 Monate postoperativ nur eingeschränkt möglich war.

In dieser Studie konnte zwischen den zwei postoperativen Untersuchungen keine signifikante Verbesserung der kinematischen Parameter beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass die Regeneration der feinmotorischen Funktion nach den ersten sechs Monaten postoperativ weitestgehend abgeschlossen ist und es danach zu keiner signifikanten Verbesserung mehr kommt. Die verminderte Anzahl an Patienten, die in beide postoperative Kontrollen eingeschlossen werden konnten (n = 15), verringert jedoch die statistische Aussagekraft dieser Untersuchung.

Interessanterweise kam es in dieser Studie zu einer postoperativen Verschlechterung der Maximalgeschwindigkeit und der Automatisierung bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen*. Bei der gleichen Aufgabe mit geöffneten Augen (*Kreise Zeichnen dominante Hand*) gab es dagegen keinen signifikanten Unterschied zwischen den präoperativen und postoperativen Untersuchungszeitpunkten.

Die visuelle Kontrolle scheint bei Beeinträchtigung der Propriozeption und Exterozeption eine kompensierende Rolle zu spielen.²⁷ Eine postoperative Verschlechterung beim Schreiben mit geschlossenen Augen könnte darauf hindeuten,

dass es zu keiner wesentlichen Verbesserung der Propriozeption und Exterozeption kommt. Dies würde auf eine ausbleibende bzw. unzureichende Regeneration der Hinterstränge nach operativer Dekompression hindeuten.

4.2.2 Postoperative Veränderungen der Gangparameter

Die Ganggeschwindigkeit war bei den postoperativen Kontrollen im Vergleich zu präoperativ signifikant verbessert. Zudem konnte eine signifikante Verminderung des *ICARS-Scores* postoperativ beobachtet werden. Dies deutet auf eine Verbesserung des ataktischen Gangbilds nach operativer Therapie hin. Darüber hinaus war ein rollstuhlpflichtiger Patient nach operativer Therapie wieder selbständig gehfähig.

Auch Maezawa et al.⁴² stellten eine postoperative Erhöhung der Ganggeschwindigkeit und der Schrittlänge fest (nach 12 – 44 Monaten). Zudem verbesserte sich bei dem Patienten der Bewegungsumfang im Hüft- und Kniegelenk. Bei 12 von 24 Patienten zeigten sich die Gangparameter postoperativ im Vergleich zur gesunden Kontrollgruppe nicht signifikant verändert.

Eine operative Dekompression scheint also einen positiven Effekt auf das Gangbild zu haben. Dies führt zu einer besseren Mobilität und einem höheren Maß an Unabhängigkeit im Alltag, sodass eine Erhöhung der Lebensqualität zu erwarten ist.

In dieser Studie zeigte sich die Verbesserung des Gangbilds in den ersten 6 Monaten nach der Operation, hiernach blieben die Gangparameter weitestgehend konstant (Tabelle 11). Singh et al.⁸¹ berichteten über eine signifikante Verbesserung des Gangbilds (benötigte Zeit und Anzahl der Schritte bei einem 30m-Gehtest) 2 Monate nach operativer Therapie. Karpova et al.³⁸ fanden eine Verbesserung der benötigten Zeit und Schritte beim 30m-Gehtest 6 Monate postoperativ. Auch Mazur et al.⁴⁹ konnten bei den postoperativen Kontrolluntersuchungen nach 1, 3, 6 und 12 Monaten eine Verbesserung beider Gangparameter beim 10m-Gehtest beobachten. Hierbei wurde die größte postoperative Verbesserung nach 3 Monaten beobachtet.

Durch die operative Dekompression scheint es also relativ rasch (nach 2-6 Monaten) zu einer relevanten Regeneration des Myelongewebes mit Verbesserung der Funktion zu kommen.

4.2.3 Veränderungen der kernspintomographischen Parameter

Die Länge des pathologischen Signals in der T2-gewichteten MRT zeigte sich postoperativ signifikant reduziert (Abbildung 9a-b). Zudem konnte eine signifikante Reduktion der Signallänge zwischen der ersten und zweiten postoperativen Kontrolle beobachtet werden. Dies zeigt, dass das Myelgewebe das Potential besitzt nach dekompressiver Therapie noch über einen längeren Zeitraum hinweg zu regenerieren.

Es ist unklar, ob das verbleibende pathologische Signal einer irreversiblen Schädigung des Myelgewebes entspricht oder ob die Regenerationsphase nach dem ersten postoperativen Jahr noch nicht abgeschlossen ist. Weitere Langzeitstudien müssten durchgeführt werden, um dies zu untersuchen.



Abbildung 9a-b: T2-gewichtete Magnetresonanztomographie in sagittaler Ebene mit dem (a) präoperativen und (b) postoperativen Befund des pathologischen Signals (Pfeil).

Der Atrophiequotient war nach operativer Therapie tendenziell höher als präoperativ. Dies ist am ehesten durch eine Ausdehnung des sagittalen Durchmessers des Myelons nach erfolgter Dekompression zu erklären.

Die Auswirkungen einer operativen Therapie auf die pathologischen MRT-Befunde bei zervikaler Myelopathie wurden in früheren Studien untersucht. Morio et al.⁵⁴ und Suri

et al.⁸³ haben 3 und 6 Monate postoperativ MRT-Verlaufskontrollen durchgeführt und die intramedullären Signalveränderungen untersucht.

Morio et al.⁵⁴ konnten bei 54 von 68 Patienten eine postoperative Verminderung der Signalintensität in einer T2-gewichteten MRT beobachten.

Suri et al.⁸³ konnten bei 14 von 44 (31,8%) Patienten eine postoperative Regression der intramedullären Signalveränderungen in T2-gewichteten Sequenzen und bei 7 von 34 Patienten (20,6%) in T1-gewichteten Sequenzen beobachten. Zudem haben sie die postoperative Myelondekompression mittels MRT beurteilt. Nur bei 5 von 44 Patienten (11,4%) bestand postoperativ eine Myelonkompression fort. Bei diesen Patienten kam es zu keiner Regression der intramedullären Signalveränderungen, sodass die ausreichende Dekompression als Voraussetzung für eine Regeneration angesehen werden kann.

4.2.4 Postoperative Veränderungen der Scores

Der *EMS*, der *Nurick-Score* und der *NRS-Score* verbesserten sich nach operativer Therapie.

Signifikante Unterschiede zwischen den präoperativen und postoperativen Untersuchungszeitpunkten waren bei den *EMS-Subscores* der Feinmotorik und des Gangbilds zu beobachten. Dies zeigt, dass die Patienten auch subjektiv eine Verbesserung der feinmotorischen Funktion und des Gangbilds wahrnehmen.

Die Schmerzintensität war allerdings nur bei der 6-Monatskontrolle signifikant vermindert im Vergleich zum präoperativen Zustand. Das Fehlen einer signifikanten Verbesserung bei der späten postoperativen Kontrolle, könnte dadurch erklärt werden, dass die Anzahl der Patienten gering war (n = 17) und zwei Patienten eine ausgeprägte Verschlechterung um 6 bzw. 9 Einheiten angaben. 14 Patienten gaben allerdings eine postoperative Verbesserung oder eine Konstanz der Schmerzintensität an.

Auch in anderen Studien, die unterschiedliche Operationsverfahren anwandten (Korporektomie, Laminektomie, Laminoplastie) und zu unterschiedlichen Zeitpunkten Verlaufskontrollen durchführten, konnte eine postoperative Verbesserung des *EMS*, des *Nurick-Scores* und der Schmerzintensität beobachtet werden.^{13, 14, 26, 38, 49, 78, 81, 90, 93}

Mazur et al.⁴⁹ führten 1, 3, 6 und 12 Monaten nach operativer Therapie

Verlaufskontrollen durch und fanden die größte Verbesserung des Nurick-*Scores* und des VAS-*Scores* 6 Monate postoperativ.

Sampath et al.⁷⁸ untersuchten die postoperativen Veränderungen der Schmerzintensität differenzierter, indem sie die höchste Schmerzintensität und die durchschnittliche Schmerzintensität erfassten. Beide analysierten Niveaus der Schmerzintensität verbesserten sich 12 Monate postoperativ.

Durch die Operation scheinen sich die Bahnen des anterolateralen Systems (Schmerzempfinden) zu erholen.

4.2.5 Korrelation zwischen funktionellen und morphologischen Veränderungen

Durch die geringe Bereitschaft der Patienten sich postoperativ erneut MRT-Untersuchungen zu Studienzwecken zu unterziehen, war die Fallzahl zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen den Veränderungen der Funktion (feinmotorische Funktion, Gangbild) und der kernspintomographischen Parameter niedrig. Die Veränderungen der MRT-Parameter zwischen der präoperativen und der frühen postoperativen Untersuchung konnten bei 18 Patienten erfasst werden, zwischen der präoperativen und der späten postoperativen Untersuchung bei 16 Patienten. Bei lediglich 10 Patienten konnten die Veränderungen zwischen den beiden postoperativen Kontrollen erfasst werden.

Daher sind die ermittelten Korrelationen in dieser Studie nur begrenzt aussagekräftig.

Es konnte keine starke Korrelation zwischen den Veränderungen der kinematischen Parameter und den Veränderungen der kernspintomographischen Parameter nach operativer Therapie gefunden werden. Auch zwischen den postoperativen Veränderungen der Gangparameter und der Veränderungen der MRT-Parameter wurden keine eindeutigen Zusammenhänge gefunden.

Aufgrund der Gruppengröße kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass es einen Zusammenhang zwischen diesen Parametern gibt.

Morio et al.⁵⁴ untersuchten 73 Patienten, Karpova et al.³⁸ 134 Patienten. In beiden Studien konnte ein Zusammenhang zwischen der postoperativen transversalen Fläche und der Verbesserung von subjektiven *Scores* gefunden werden.

Zudem stellten Karpova et al.³⁸ fest, dass die postoperative transversale Fläche mit der Verbesserung des Gangbilds einhergeht. Allerdings beobachteten sie, dass bei einer präoperativen transversalen Fläche unter 45 mm² die funktionellen Schäden irreversibel sind.

Fujiwara et al.²¹ fanden ebenfalls, dass unter einem kritischen Wert für die transversale Fläche von 30 mm² das postoperative Ergebnis unbefriedigend war und die Morphologie des Myelons nicht ausreichend wiederhergestellt wurde.

4.3 Assoziierte Faktoren mit der Veränderung der Funktion und Morphologie

Zur Indikationsstellung einer chirurgischen Intervention ist es entscheidend, die Nutzen und Risiken einer operativen Therapie abzuwägen. Faktoren, die einen prognostischen Wert für das postoperative Ergebnis haben, können dabei hilfreich sein. Der größte Teil der früheren Studien, die Einflussfaktoren auf das postoperative Ergebnis untersuchten, benutzten zur Ermittlung der postoperativen Erholung den *JOA-Score* oder *Nurick-Score*. Diese liegen subjektiven Angaben durch die Patienten zugrunde. In dieser Studie wurde der Einfluss von verschiedenen Faktoren auf Veränderungen objektiv gemessener Funktionen und Morphologie untersucht. Dabei standen die Veränderungen der feinmotorischen Funktion im Vordergrund.

Das Alter der Patienten und die Dauer der Symptome hatten den größten Einfluss auf eine postoperative Veränderung der kinematische Parameter.

4.3.1 Alter

Das Alter der Patienten zum Zeitpunkt der Operation korrelierte mit einer Verbesserung der Geschwindigkeit (Frequenz, Maximalgeschwindigkeit) und der Automatisierung bei den komplexen repetitiven Aufgaben (*Kreise Zeichnen nicht dominante Hand*, *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen*). Bei jüngeren Patienten verbesserten sich die kinematischen Parameter bei diesen Aufgaben, wogegen sie sich bei älteren Patienten postoperativ eher verschlechterten. Jüngere Patienten profitierten also stärker von einer dekompressiven Operation.

Ein höheres Alter ging mit einer größeren postoperativen Verbesserung des *ICARS-Scores* einher. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der *ICARS-Score* bei älteren Patienten präoperativ schlechter war als bei jüngeren Patienten. Somit war bei älteren

Patienten eine größere Veränderung zwischen präoperativem und postoperativem *ICARS-Score* möglich als bei jüngeren Patienten.

Dies zeigt, dass eine Verbesserung der ataktischen Gangstörung auch noch im höheren Alter möglich ist.

Das Alter korrelierte allerdings nicht mit der Verbesserung der Ganggeschwindigkeit oder der Anzahl der Schritte.

Darüber hinaus hatte das Alter einen Einfluss auf die postoperative Verminderung der Länge des pathologischen Signals in der MRT. Jüngere Patienten zeigten eine größere postoperative Reduktion der Signallänge. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Fähigkeit der Myelonregeneration nach dekompressiver Therapie bei jüngeren Patienten größer ist als bei älteren Patienten.

Dagegen wurde in dieser Studie kein Zusammenhang zwischen dem Alter und einer postoperativen Verbesserung des Atrophiequotienten gefunden.

Auch frühere Studien fanden ein besseres postoperatives Ergebnis (*Nurick-Score*, *JOA-Score*) bei jüngeren Patienten.^{6,21,37,41,54,58,83,94} Zudem fanden Morio et al.⁵⁴, dass das Alter mit den postoperativen Veränderungen in der MRT (Reduktion der Signalintensität) korrelierte.

Dagegen fanden Wang et al.⁹³ in ihrer Studie mit 204 Patienten, dass das Alter (über und unter 75 Jahre) keinen Einfluss auf das postoperative funktionelle Ergebnis hat. Auch andere Studien konnten keinen Zusammenhang zwischen einem hohen Alter und einem schlechteren postoperativen Ergebnis ausmachen.^{11,24,64} Hasegawa et al.²⁵ fanden, dass das Alter keinen Einfluss auf das postoperative Ergebnis darstellt, jedoch war die postoperative Komplikationsrate bei den älteren Patienten höher. Daher ist die Nutzen-Risiko-Abwägung einer Operation besonders bei älteren Patienten wichtig.

In einigen dieser Studien^{6,11,24,37,41,58,83,93,94} wurden die Patienten in zwei Altersgruppen unterteilt und das postoperative Ergebnis der beiden Gruppen verglichen. Hierbei wurde der Altersgrenzwert unterschiedlich gewählt. So lag er in der Studie von Suri et al.⁸³ bei 40 Jahren, während Wang et al.⁹³ ihn bei 75 Jahren festlegten. Dies vermindert die

Vergleichbarkeit der Studien und könnte die kontroversen Aussagen über den prognostischen Wert des Alters erklären.

4.3.2 Dauer der Symptome

Eine kürzere Symptombdauer korrelierte schwach mit einer postoperativen Verbesserung der Geschwindigkeit und der Automatisierung bei den Schreibaufgaben (*Spirale Zeichnen, Satz Schreiben, kleine „a“s Schreiben*). Eine signifikante Korrelation wurde zwischen einer kurzen Symptombdauer und einer Verbesserung der Variabilität bei der Aufgabe *Kreise Zeichnen mit geschlossenen Augen* gefunden.

Patienten, die frühzeitig operiert werden, profitieren also stärker von einer Verbesserung der feinmotorischen Funktion.

Zwischen der Verbesserung des Gangbilds und der Symptombdauer konnte kein Zusammenhang beobachtet werden.

Ferner gab es keine Korrelation zwischen den postoperativen Veränderungen der MRT-Parameter und der Dauer der Symptome.

Auch in früheren Studien hatte die Symptombdauer einen Einfluss auf das postoperative Ergebnis.^{6,11,21,54,64,83}

Suri et al.⁸³ und Chagas et al.⁶ fanden ein besseres postoperatives Ergebnis bei einer Symptombdauer unter zwei Jahren. Zudem berichteten Suri et al.⁸³, dass die Symptombdauer ein Einflussfaktor für die Persistenz der Veränderung der Signalintensität in der MRT sein könnte. Ebersold et al.¹¹ untersuchten den prognostischen Wert mehrerer Faktoren (Alter, Schweregrad, Symptombdauer, Anzahl der operierten Höhen) und fanden die Symptombdauer als einzigen Faktor, der mit einer potentiellen Verschlechterung einherging. Sie schlussfolgerten, dass nach einer gewissen Erkrankungsdauer das Myelon irreversibel geschädigt ist, wodurch der Patient weniger wahrscheinlich von einer Operation profitiert.

Handa et al.²⁴ und Yamazaki et al.⁹⁴ beobachteten, dass die Symptombdauer nur bei älteren Patienten (über 70 Jahre bzw. über 65 Jahre) ein signifikanter Prognosefaktor für das postoperative Ergebnis ist.

Andere Studien wiederum fanden keine signifikante Korrelation zwischen der Symptombdauer und der postoperativen Verbesserung.^{37,40,50} Allerdings beschrieben

Karpova et al.³⁷ einen Trend zu einer schwachen Assoziation der Symptombdauer mit dem postoperativen Ergebnis (*JOA-Score*).

Einen Zusammenhang zwischen der Symptombdauer und postoperativen MR-morphologischen Veränderungen wurden von Morio et al.⁵⁴ und Mehalic et al.⁵⁰ beschrieben. Morio et al.⁵⁴ fanden eine Korrelation zwischen der postoperativen Reduktion der Signalintensität und der Symptombdauer. Auch Mehalic et al.⁵⁰ beobachteten, dass in der Patientengruppe (n = 5) mit hoher präoperativer Veränderung der Signalintensität in der T2-gewichteten MRT und hoher postoperativer Reduktion der Signalintensität, eine kurze Symptombdauer bestand (bis zu 10 Monate).

Eine kurze Symptombdauer scheint sich also positiv auf das postoperative Ergebnis auszuwirken. Eine frühe Diagnosestellung mit frühzeitiger Operation scheint relevant zu sein, um ein gutes postoperatives Ergebnis zu erzielen.

Allerdings ist eine Aussage über den prognostischen Wert der Symptombdauer nur eingeschränkt möglich, da die Bestimmung des Zeitpunkts des Beginns der Symptome von der Erinnerung und subjektiven Einschätzung der Patienten und der Interpretation des Untersuchers abhängt.

4.3.3 Anzahl der operierten Höhen der HWS

In dieser Studie konnte kein eindeutiger Unterschied des postoperativen Ergebnisses zwischen Patienten, die über eine oder mehrere Höhen operiert wurden, gefunden werden. Die Wahl der Operationsmethode (dorsaler oder ventraler Zugang) wurde beim Vergleich der beiden Gruppen nicht berücksichtigt. Sie hängt primär vom zu erwartenden Risiko des Eingriffs ab und hängt somit mittelbar mit dem postoperativen Ergebnis für den Patienten zusammen. Im Allgemeinen werden aufgrund des Risikospektrums heute bei kurzstreckigen Stenosen der HWS vorwiegend ventrale Zugänge und Dekompressionen gewählt, bei langstreckigen Stenosen dorsale Zugänge. So wurde auch im hier analysierten Patientenkollektiv bei „Ein-Höhen-Stenosen“ immer über einen ventralen Zugang operiert. War eine Stenose in mehreren Höhen vorhanden, wurden sowohl ventrale als auch dorsale Operationsmethoden verwendet oder eine Kombination der beiden Verfahren. So wurden neben den verschiedenen Anzahlen der operierten Höhen auch verschiedene Operationsverfahren miteinander verglichen. Beide Faktoren stellen einen potentiellen Bias dar und könnten das Ergebnis

beeinflusst haben. Hier konnte kein eindeutiger Trend gesehen werden. Eine weitere Unterteilung der Gruppen oder die Anwendung eines multivariaten Modells ist jedoch aufgrund der geringen Gruppengrößen nicht sinnvoll.

Chagas et al.⁶ untersuchten Patienten bei denen eine zervikale Korporektomie mit Fusion durchgeführt wurde. Die Anzahl der operierten Höhen (1 oder 2) hatte keinen Einfluss auf das postoperative Ergebnis.

Ebersold et al.¹¹ unterteilten die Patienten in zwei Gruppen je nach Art des Operationszugangs (ventral oder dorsal). Innerhalb der beiden Gruppen hatte die Anzahl der operierten Höhen der HWS keinen Einfluss auf das postoperative Ergebnis.

4.3.4 Art des Operationszugangs

Auch bei der Art des Operationszugangs wurde in dieser Studie kein eindeutiger Vorteil eines ventralen oder dorsalen Zugangs gefunden. Allerdings wurden in dieser Studie nur sechs Patienten von dorsal operiert, während 22 Patienten von ventral operiert wurden. Der Unterschied der Gruppengrößen schränkt somit die Aussagekraft dieser Untersuchung erheblich ein.

Karpova et al.³⁷ konnten keinen Unterschied des postoperativen Ergebnisses zwischen ventralen Operationsverfahren (Diskektomie, Korporektomie mit Fusion) und dorsalen Verfahren (Laminektomie, Laminoplastie) finden. Auch andere Studien konnten die Art des Operationszugangs nicht als Prognosefaktor ausmachen. Hierbei verglichen Hasegawa et al.²⁵ und Sakaura et al.⁷⁶ das postoperative Ergebnis nach ventraler zervikaler Fusion und nach dorsalen Operationsverfahren. Wada et al.⁹² und Yonenobu et al.⁹⁵ verglichen die Ergebnisse nach subtotaler Korporektomie und nach Laminoplastie.

Obwohl sich das postoperative Ergebnis zwischen ventralem und dorsalem Operationszugang nicht signifikant unterschieden, bemerkten Yonenobu et al.⁹⁵, dass die Komplikationsrate bei subtotaler Korporektomie mit *Strut Graft* (strukturellen Allografts) höher war. Diese war vor allem durch die Knochentransplantation bedingt (Dislokation, Fraktur, Nichtvereinigung).

Suri et al.⁸³ fanden, dass Patienten, die über einen ventralen Zugang (Diskektomie, Korporektomie) operiert wurden, ein besseres postoperatives Ergebnis der Motorik und Sensibilität hatten als Patienten bei denen eine Laminektomie oder Laminoplastie durchgeführt wurde. Diese Korrelation war jedoch schwach, die Gruppengrößen der ventral und dorsal operierten Patienten unterschieden sich erheblich. Zudem ist zu berücksichtigen, dass dorsale Verfahren eher bei langstreckiger zervikaler Myelopathie durchgeführt werden, sodass ein besseres postoperatives Ergebnis nach ventraler Dekompression durch eine präoperativ mildere Form der zervikalen Myelopathie bedingt sein kann.

5 Zusammenfassung

Die zervikale Myelopathie ist ein Krankheitsbild, welches durch eine Schädigung des zervikalen Rückenmarks hervorgerufen wird, die in vielen Fällen durch eine Einengung des Spinalkanals entsteht. Hierdurch kann es zu Störungen der Feinmotorik und des Gangbilds kommen, sodass die Durchführung von Aktivitäten des alltäglichen Lebens erschwert wird. Daneben können Schmerzen, Sensibilitätsstörungen sowie Störungen der Blasen- und Mastdarmfunktion auftreten. Es ist allgemein anerkannt, dass die operative Dekompression des Rückenmarks ein Fortschreiten der neurologischen Symptome verhindern oder abmildern kann.

Ziel dieser Studie war die Erfassung unterschiedlicher neurologischer Funktionsstörungen bei zervikaler Myelopathie präoperativ sowie die Evaluierung der funktionellen Veränderung nach operativer Dekompression. Hierbei wurden verschiedene - objektive und subjektive - Messmethoden angewandt. Die Erfassung der feinmotorischen Funktionsstörungen lag dabei im Vordergrund, da keine dezidierten Untersuchungen in der Literatur beschrieben sind. Daneben wurde die Regeneration kernspintomographisch gemessener Schädigung des Myelons nach operativer Dekompression untersucht.

In dieser Studie wurde erstmals ein digitales Graphiktablett zur quantitativen und objektiven Erfassung der feinmotorischen Funktionsstörungen bei zervikaler Myelopathie benutzt. Eine Beeinträchtigung der Feinmotorik wurde vor allem bei komplexen Schreibaufgaben festgestellt, welche am ehesten Schreibaufgaben im alltäglichen Leben entsprechen. Mit früheren Studien im Einklang wurde auch in dieser Studie eine Störung des Gangbilds bei Patienten mit zervikaler Myelopathie festgestellt. Die Dauer der Symptome bis zur Operation konnte als einziger signifikanter Einflussfaktor für den Schweregrad der feinmotorischen Funktionsstörungen ausgemacht werden. Das Geschlecht, der BMI, der Beruf und Sport hatten in dieser Analyse weder einen Einfluss auf den klinischen noch auf den neuroradiologischen Schweregrad der zervikalen Myelopathie.

Nach operativer Dekompression verbesserten sich die feinmotorische Funktion sowie das Gangbild der Patienten. Auch die subjektiven *Scores* zur Erfassung der neurologischen Funktion (*EMS*, *Nurick-Score*) sowie die Schmerzen (*NRS*) verbesserten sich postoperativ. Zudem nahm die Länge des pathologischen Signals in der MRT ab.

Faktoren, die einen Trend zur Korrelation mit den postoperativen Veränderungen der Funktion zeigten, waren das Alter der Patienten und die Symptombdauer. In dieser Studie konnte kein Einfluss des *BMI*s, der Anzahl der operierten Höhen oder der Art des Operationszugangs festgestellt werden.

Obwohl die Anzahl der untersuchten Patienten begrenzt war, gestaltete sich die Gruppe heterogen (Alter, Geschlecht, *BMI*, Dauer der Symptome). So konnte ein möglichst breites Spektrum an Patienten mit zervikaler Myelopathie untersucht werden.

Die wichtigste Limitation dieser Studie war die relativ hohe *drop-out* Rate in den postoperativen Verlaufsuntersuchungen und somit das kleine Patientenkollektiv. Daher konnten die Ergebnisse der Längsschnittanalyse nur an einer kleinen Patientengruppe ermittelt werden und bei der Untersuchung von Einflussfaktoren für das postoperative Ergebnis nur Tendenzen erkannt werden. Ob diese Faktoren weitergehenden prognostischen Wert für das postoperative Ergebnis haben, müsste in weiteren Studien an einem größeren Kollektiv untersucht werden.

6 Literaturverzeichnis

- 1 O. Al-Mefty, L. H. Harkey, T. H. Middleton, R. R. Smith, and J. L. Fox, 'Myelopathic Cervical Spondylotic Lesions Demonstrated by Magnetic Resonance Imaging', *J Neurosurg*, 68 (1988), 217-22.
- 2 B. Arvin, S. Kalsi-Ryan, D. Mercier, J. C. Furlan, E. M. Massicotte, and M. G. Fehlings, 'Preoperative Magnetic Resonance Imaging Is Associated with Baseline Neurological Status and Can Predict Postoperative Recovery in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 38 (2013), 1170-6.
- 3 M. S. Beattie, and G. T. Manley, 'Tight Squeeze, Slow Burn: Inflammation and the Aetiology of Cervical Myelopathy', *Brain*, 134 (2011), 1259-61.
- 4 K. S. Beekhuizen, and E. C. Field-Fote, 'Sensory Stimulation Augments the Effects of Massed Practice Training in Persons with Tetraplegia', *Arch Phys Med Rehabil*, 89 (2008), 602-8.
- 5 Moore and Blumhardt, 'A Prospective Survey of the Causes of Non-Traumatic Spastic Paraparesis and Tetraparesis in 585 Patients', *Spinal Cord* 35 (1997), 361 ± 67.
- 6 H. Chagas, F. Domingues, A. Aversa, A. L. Vidal Fonseca, and J. M. de Souza, 'Cervical Spondylotic Myelopathy: 10 Years of Prospective Outcome Analysis of Anterior Decompression and Fusion', *Surg Neurol*, 64 Suppl 1 (2005), S1:30-5; discussion S1:35-6.
- 7 J. Danna, and J. L. Velay, 'Basic and Supplementary Sensory Feedback in Handwriting', *Front Psychol*, 6 (2015), 169.
- 8 G. Deuschl, P. Bain, and M. Brin, 'Consensus Statement of the Movement Disorder Society on Tremor. Ad Hoc Scientific Committee', *Mov Disord*, 13 Suppl 3 (1998), 2-23.
- 9 W. Du, L. Wang, Y. Shen, Y. Zhang, W. Ding, and L. Ren, 'Long-Term Impacts of Different Posterior Operations on Curvature, Neurological Recovery and Axial Symptoms for Multilevel Cervical Degenerative Myelopathy', *Eur Spine J*, 22 (2013), 1594-602.
- 10 S. Ebara, K. Yonenobu, K. Fujiwara, K. Yamashita, and K. Ono, 'Myelopathy Hand Characterized by Muscle Wasting. A Different Type of Myelopathy Hand in Patients with Cervical Spondylosis', *Spine (Phila Pa 1976)*, 13 (1988), 785-91.
- 11 M. J. Ebersold, M. C. Pare, and L. M. Quast, 'Surgical Treatment for Cervical Spondylitic Myelopathy', *J Neurosurg*, 82 (1995), 745-51.
- 12 A. M. Ebied, G. J. Kemp, and S. P. Frostick, 'The Role of Cutaneous Sensation in the Motor Function of the Hand', *J Orthop Res*, 22 (2004), 862-6.
- 13 C. C. Edwards, 2nd, J. G. Heller, and H. Murakami, 'Corpectomy Versus Laminoplasty for Multilevel Cervical Myelopathy: An Independent Matched-Cohort Analysis', *Spine (Phila Pa 1976)*, 27 (2002), 1168-75.
- 14 C. C. Edwards, 2nd, J. G. Heller, and D. H. Silcox, 3rd, 'T-Saw Laminoplasty for the Management of Cervical Spondylotic Myelopathy: Clinical and Radiographic Outcome', *Spine (Phila Pa 1976)*, 25 (2000), 1788-94.
- 15 C. C. Edwards, 2nd, K. D. Riew, P. A. Anderson, A. S. Hilibrand, and A. F. Vaccaro, 'Cervical Myelopathy. Current Diagnostic and Treatment Strategies', *Spine J*, 3 (2003), 68-81.
- 16 T. E. Eichhorn, T. Gasser, N. Mai, C. Marquardt, G. Arnold, J. Schwarz, and W. H. Oertel, 'Computational Analysis of Open Loop Handwriting Movements in Parkinson's Disease: A Rapid Method to Detect Dopamimetic Effects', *Mov Disord*, 11 (1996), 289-97.

- 17 R. J. Elble, M. Brilliant, K. Leffler, and C. Higgins, 'Quantification of Essential Tremor in Writing and Drawing', *Mov Disord*, 11 (1996), 70-8.
- 18 J. A. Epstein, R. Carras, B. S. Epstein, and L. S. Levine, 'Myelopathy in Cervical Spondylosis with Vertebral Subluxation and Hyperlordosis', *J Neurosurg*, 32 (1970), 421-6.
- 19 L. P. Erasmus, S. Sarno, H. Albrecht, M. Schwecht, W. Pollmann, and N. Konig, 'Measurement of Ataxic Symptoms with a Graphic Tablet: Standard Values in Controls and Validity in Multiple Sclerosis Patients', *J Neurosci Methods*, 108 (2001), 25-37.
- 20 M. G. Fehlings, and G. Skaf, 'A Review of the Pathophysiology of Cervical Spondylotic Myelopathy with Insights for Potential Novel Mechanisms Drawn from Traumatic Spinal Cord Injury', *Spine (Phila Pa 1976)*, 23 (1998), 2730-7.
- 21 K. Fujiwara, K. Yonenobu, S. Ebara, K. Yamashita, and K. Ono, 'The Prognosis of Surgery for Cervical Compression Myelopathy. An Analysis of the Factors Involved', *J Bone Joint Surg Br*, 71 (1989), 393-8.
- 22 K. Fukui, O. Kataoka, T. Sho, and M. Sumi, 'Pathomechanism, Pathogenesis, and Results of Treatment in Cervical Spondylotic Myelopathy Caused by Dynamic Canal Stenosis', *Spine (Phila Pa 1976)*, 15 (1990), 1148-52.
- 23 D. R. Gore, S. B. Sepic, and G. M. Gardner, 'Roentgenographic Findings of the Cervical Spine in Asymptomatic People', *Spine (Phila Pa 1976)*, 11 (1986), 521-4.
- 24 Y. Handa, T. Kubota, H. Ishii, K. Sato, A. Tsuchida, and Y. Arai, 'Evaluation of Prognostic Factors and Clinical Outcome in Elderly Patients in Whom Expansive Laminoplasty Is Performed for Cervical Myelopathy Due to Multisegmental Spondylotic Canal Stenosis. A Retrospective Comparison with Younger Patients', *J Neurosurg*, 96 (2002), 173-9.
- 25 K. Hasegawa, T. Homma, Y. Chiba, T. Hirano, K. Watanabe, and A. Yamazaki, 'Effects of Surgical Treatment for Cervical Spondylotic Myelopathy in Patients > or = 70 Years of Age: A Retrospective Comparative Study', *J Spinal Disord Tech*, 15 (2002), 458-60.
- 26 J. G. Heller, C. C. Edwards, 2nd, H. Murakami, and G. E. Rodts, 'Laminoplasty Versus Laminectomy and Fusion for Multilevel Cervical Myelopathy: An Independent Matched Cohort Analysis', *Spine (Phila Pa 1976)*, 26 (2001), 1330-6.
- 27 M. C. Hepp-Reymond, V. Chakarov, J. Schulte-Monting, F. Huethe, and R. Kristeva, 'Role of Proprioception and Vision in Handwriting', *Brain Res Bull*, 79 (2009), 365-70.
- 28 L. T. Holly, P. G. Matz, P. A. Anderson, M. W. Groff, R. F. Heary, M. G. Kaiser, P. V. Mummaneni, T. C. Ryken, T. F. Choudhri, E. J. Vresilovic, D. K. Resnick, Spine Joint Section on Disorders of the, Surgeons Peripheral Nerves of the American Association of Neurological, and Surgeons Congress of Neurological, 'Functional Outcomes Assessment for Cervical Degenerative Disease', *J Neurosurg Spine*, 11 (2009), 238-44.
- 29 N. Hosono, H. Sakaura, Y. Mukai, T. Kaito, T. Makino, and H. Yoshikawa, 'A Simple Performance Test for Quantifying the Severity of Cervical Myelopathy', *J Bone Joint Surg Br*, 90 (2008), 1210-3.
- 30 N. Hosono, K. Yonenobu, and K. Ono, 'Neck and Shoulder Pain after Laminoplasty. A Noticeable Complication', *Spine (Phila Pa 1976)*, 21 (1996), 1969-73.
- 31 Y. Hu, Y. Ding, D. Ruan, Y. W. Wong, K. M. Cheung, and K. D. Luk, 'Prognostic Value of Somatosensory-Evoked Potentials in the Surgical Management of Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 33 (2008), E305-10.
- 32 R. H. Jepsen, N. Taylor, R. B. Trieschmann, M. J. Trotter, and L. A. Howard, 'An Objective and Standardized Test of Hand Function', *Arch Phys Med Rehabil*, 50 (1969), 311-9.
- 33 S. Kalsi-Ryan, S. K. Karadimas, and M. G. Fehlings, 'Cervical Spondylotic Myelopathy: The Clinical Phenomenon and the Current Pathobiology of an Increasingly Prevalent and Devastating Disorder', *Neuroscientist*, 19 (2013), 409-21.

- 34 S. Kalsi-Ryan, A. Singh, E. M. Massicotte, P. M. Arnold, D. S. Brodke, D. C. Norvell, J. T. Hermismeyer, and M. G. Fehlings, 'Ancillary Outcome Measures for Assessment of Individuals with Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 38 (2013), S111-22.
- 35 S. K. Karadimas, W. M. Erwin, C. G. Ely, J. R. Dettori, and M. G. Fehlings, 'Pathophysiology and Natural History of Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 38 (2013), S21-36.
- 36 S. K. Karadimas, E. S. Moon, W. R. Yu, K. Satkunendrarajah, J. K. Kallitsis, G. Gatzounis, and M. G. Fehlings, 'A Novel Experimental Model of Cervical Spondylotic Myelopathy (Csm) to Facilitate Translational Research', *Neurobiol Dis*, 54 (2013), 43-58.
- 37 A. Karpova, R. Arun, A. M. Davis, A. V. Kulkarni, E. M. Massicotte, D. J. Mikulis, Z. I. Lubina, and M. G. Fehlings, 'Predictors of Surgical Outcome in Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 38 (2013), 392-400.
- 38 A. Karpova, R. Arun, S. Kalsi-Ryan, E. M. Massicotte, B. Kopjar, and M. G. Fehlings, 'Do Quantitative Magnetic Resonance Imaging Parameters Correlate with the Clinical Presentation and Functional Outcomes after Surgery in Cervical Spondylotic Myelopathy? A Prospective Multicenter Study', *Spine (Phila Pa 1976)*, 39 (2014), 1488-97.
- 39 M. R. Khan, A. McInnes, and S. P. Hughes, 'Electrophysiological Studies in Cervical Spondylosis', *J Spinal Disord*, 2 (1989), 163-9.
- 40 V. G. Kumar, G. L. Rea, L. J. Mervis, and J. M. McGregor, 'Cervical Spondylotic Myelopathy: Functional and Radiographic Long-Term Outcome after Laminectomy and Posterior Fusion', *Neurosurgery*, 44 (1999), 771-7; discussion 77-8.
- 41 R. K. Lyu, L. M. Tang, C. J. Chen, C. M. Chen, H. S. Chang, and Y. R. Wu, 'The Use of Evoked Potentials for Clinical Correlation and Surgical Outcome in Cervical Spondylotic Myelopathy with Intramedullary High Signal Intensity on Mri', *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 75 (2004), 256-61.
- 42 Y. Maezawa, K. Uchida, and H. Baba, 'Gait Analysis of Spastic Walking in Patients with Cervical Compressive Myelopathy', *J Orthop Sci*, 6 (2001), 378-84.
- 43 C. Marquardt, W. Gentz, and N. Mai, 'Visual Control of Automated Handwriting Movements', *Exp Brain Res*, 128 (1999), 224-8.
- 44 C. Marquardt, Mai, N., 'A Computational Procedure for Movement Analysis in Handwriting', *Journal of Neuroscience Methods*, 52 (1994), 39-45.
- 45 S. Matsunaga, T. Sakou, and K. Nakanisi, 'Analysis of the Cervical Spine Alignment Following Laminoplasty and Laminectomy', *Spinal Cord*, 37 (1999), 20-4.
- 46 P. G. Matz, P. A. Anderson, M. W. Groff, R. F. Heary, L. T. Holly, M. G. Kaiser, P. V. Mummaneni, T. C. Ryken, T. F. Choudhri, E. J. Vresilovic, D. K. Resnick, Spine Joint Section on Disorders of the, Surgeons Peripheral Nerves of the American Association of Neurological, and Surgeons Congress of Neurological, 'Cervical Laminoplasty for the Treatment of Cervical Degenerative Myelopathy', *J Neurosurg Spine*, 11 (2009), 157-69.
- 47 P. G. Matz, P. A. Anderson, L. T. Holly, M. W. Groff, R. F. Heary, M. G. Kaiser, P. V. Mummaneni, T. C. Ryken, T. F. Choudhri, E. J. Vresilovic, D. K. Resnick, Spine Joint Section on Disorders of the, Surgeons Peripheral Nerves of the American Association of Neurological, and Surgeons Congress of Neurological, 'The Natural History of Cervical Spondylotic Myelopathy', *J Neurosurg Spine*, 11 (2009), 104-11.
- 48 P. G. Matz, L. T. Holly, P. V. Mummaneni, P. A. Anderson, M. W. Groff, R. F. Heary, M. G. Kaiser, T. C. Ryken, T. F. Choudhri, E. J. Vresilovic, D. K. Resnick, Spine Joint Section on Disorders of the, Surgeons Peripheral Nerves of the American Association of

- Neurological, and Surgeons Congress of Neurological, 'Anterior Cervical Surgery for the Treatment of Cervical Degenerative Myelopathy', *J Neurosurg Spine*, 11 (2009), 170-3.
- 49 M. D. Mazur, A. White, S. McEvoy, and E. F. Bisson, 'Transcranial Magnetic Stimulation of the Motor Cortex Correlates with Objective Clinical Measures in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 39 (2014), 1113-20.
- 50 T. F. Mehalic, R. T. Pezzuti, and B. I. Applebaum, 'Magnetic Resonance Imaging and Cervical Spondylotic Myelopathy', *Neurosurgery*, 26 (1990), 217-26 discussion 26-7.
- 51 R. Mergl, G. Juckel, J. Rihl, V. Henkel, M. Karner, P. Tigges, A. Schroter, and U. Hegerl, 'Kinematical Analysis of Handwriting Movements in Depressed Patients', *Acta Psychiatr Scand*, 109 (2004), 383-91.
- 52 R. Mergl, P. Tigges, A. Schroter, H. J. Moller, and U. Hegerl, 'Digitized Analysis of Handwriting and Drawing Movements in Healthy Subjects: Methods, Results and Perspectives', *J Neurosci Methods*, 90 (1999), 157-69.
- 53 T. Miwa, N. Hosono, Y. Mukai, T. Makino, A. Kandori, and T. Fuji, 'Finger-Tapping Motion Analysis in Cervical Myelopathy by Magnetic-Sensor Tapping Device', *J Spinal Disord Tech*, 26 (2013), E204-8.
- 54 Y. Morio, R. Teshima, H. Nagashima, K. Nawata, D. Yamasaki, and Y. Nanjo, 'Correlation between Operative Outcomes of Cervical Compression Myelopathy and Mri of the Spinal Cord', *Spine (Phila Pa 1976)*, 26 (2001), 1238-45.
- 55 Y. Morishita, S. Hida, M. Naito, and U. Matsushima, 'Evaluation of Cervical Spondylotic Myelopathy Using Somatosensory-Evoked Potentials', *Int Orthop*, 29 (2005), 343-6.
- 56 Y. Morishita, M. Naito, H. Hymanson, M. Miyazaki, G. Wu, and J. C. Wang, 'The Relationship between the Cervical Spinal Canal Diameter and the Pathological Changes in the Cervical Spine', *Eur Spine J*, 18 (2009), 877-83.
- 57 D. M. Morris, G. Uswatte, J. E. Crago, E. W. Cook, 3rd, and E. Taub, 'The Reliability of the Wolf Motor Function Test for Assessing Upper Extremity Function after Stroke', *Arch Phys Med Rehabil*, 82 (2001), 750-5.
- 58 S. Naderi, S. Ozgen, M. N. Pamir, M. M. Ozek, and C. Erzen, 'Cervical Spondylotic Myelopathy: Surgical Results and Factors Affecting Prognosis', *Neurosurgery*, 43 (1998), 43-9; discussion 49-50.
- 59 K. Nakanishi, N. Tanaka, N. Kamei, R. Ohta, Y. Fujioka, T. Hiramatsu, S. Ujigo, and M. Ochi, 'Electrophysiological Evidence of Functional Improvement in the Corticospinal Tract after Laminoplasty in Patients with Cervical Compressive Myelopathy: Clinical Article', *J Neurosurg Spine*, 21 (2014), 210-6.
- 60 H. Nakashima, F. Kato, Y. Yukawa, S. Imagama, K. Ito, M. Machino, and N. Ishiguro, 'Comparative Effectiveness of Open-Door Laminoplasty Versus French-Door Laminoplasty in Cervical Compressive Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 39 (2014), 642-7.
- 61 H. Nishimura, K. Endo, H. Suzuki, H. Tanaka, T. Shishido, and K. Yamamoto, 'Gait Analysis in Cervical Spondylotic Myelopathy', *Asian Spine J*, 9 (2015), 321-6.
- 62 S. Nurick, 'The Pathogenesis of the Spinal Cord Disorder Associated with Cervical Spondylosis', *Brain*, 95 (1972), 87-100.
- 63 I. Ohshio, A. Hatayama, K. Kaneda, M. Takahara, and K. Nagashima, 'Correlation between Histopathologic Features and Magnetic Resonance Images of Spinal Cord Lesions', *Spine (Phila Pa 1976)*, 18 (1993), 1140-9.
- 64 Y. Okada, T. Ikata, H. Yamada, R. Sakamoto, and S. Katoh, 'Magnetic Resonance Imaging Study on the Results of Surgery for Cervical Compression Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 18 (1993), 2024-9.
- 65 R. C. Oldfield, 'The Assessment and Analysis of Handedness: The Edinburgh Inventory', *Neuropsychologia*, 9 (1971), 97-113.

- 66 S. Olindo, A. Signate, A. Richech, P. Cabre, Y. Catonne, D. Smadja, and H. Pascal-Mousselard, 'Quantitative Assessment of Hand Disability by the Nine-Hole-Peg Test (9-Hpt) in Cervical Spondylotic Myelopathy', *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 79 (2008), 965-7.
- 67 K. Ono, S. Ebara, T. Fujii, K. Yonenobu, K. Fujiwara, and K. Yamashita, 'Myelopathy Hand. New Clinical Signs of Cervical Cord Damage', *J Bone Joint Surg Br*, 69 (1987), 215-9.
- 68 A. A. Patel, W. R. Spiker, M. Daubs, D. S. Brodke, and L. A. Cannon-Albright, 'Evidence of an Inherited Predisposition for Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 37 (2012), 26-9.
- 69 E. E. Payne, and J. D. Spillane, 'The Cervical Spine; an Anatomico-Pathological Study of 70 Specimens (Using a Special Technique) with Particular Reference to the Problem of Cervical Spondylosis', *Brain*, 80 (1957), 571-96.
- 70 J. G. Phillips, R. M. Gallucci, and J. L. Bradshaw, 'Functional Asymmetries in the Quality of Handwriting Movements: A Kinematic Analysis', *Neuropsychology*, 13 (1999), 291-7.
- 71 T. Platz, R. G. Brown, and C. D. Marsden, 'Training Improves the Speed of Aimed Movements in Parkinson's Disease', *Brain*, 121 (Pt 3) (1998), 505-14.
- 72 P. Rossier, and D. T. Wade, 'Validity and Reliability Comparison of 4 Mobility Measures in Patients Presenting with Neurologic Impairment', *Arch Phys Med Rehabil*, 82 (2001), 9-13.
- 73 S. M. Rueckriegel, F. Blankenburg, R. Burghardt, S. Ehrlich, G. Henze, R. Mergl, and P. Hernaiz Driever, 'Influence of Age and Movement Complexity on Kinematic Hand Movement Parameters in Childhood and Adolescence', *Int J Dev Neurosci*, 26 (2008), 655-63.
- 74 S. M. Rueckriegel, F. Blankenburg, G. Henze, H. Baque, and P. H. Driever, 'Loss of Fine Motor Function Correlates with Ataxia and Decline of Cognition in Cerebellar Tumor Survivors', *Pediatr Blood Cancer*, 53 (2009), 424-31.
- 75 T. C. Ryken, R. F. Heary, P. G. Matz, P. A. Anderson, M. W. Groff, L. T. Holly, M. G. Kaiser, P. V. Mummaneni, T. F. Choudhri, E. J. Vresilovic, D. K. Resnick, Spine Joint Section on Disorders of the, Surgeons Peripheral Nerves of the American Association of Neurological, and Surgeons Congress of Neurological, 'Cervical Laminectomy for the Treatment of Cervical Degenerative Myelopathy', *J Neurosurg Spine*, 11 (2009), 142-9.
- 76 H. Sakaura, N. Hosono, Y. Mukai, T. Ishii, M. Iwasaki, and H. Yoshikawa, 'Long-Term Outcome of Laminoplasty for Cervical Myelopathy Due to Disc Herniation: A Comparative Study of Laminoplasty and Anterior Spinal Fusion', *Spine (Phila Pa 1976)*, 30 (2005), 756-9.
- 77 F. J. Salvi, J. C. Jones, and B. J. Weigert, 'The Assessment of Cervical Myelopathy', *Spine J*, 6 (2006), 182S-89S.
- 78 P. Sampath, M. Bendebba, J. D. Davis, and T. B. Ducker, 'Outcome of Patients Treated for Cervical Myelopathy. A Prospective, Multicenter Study with Independent Clinical Review', *Spine (Phila Pa 1976)*, 25 (2000), 670-6.
- 79 M. M. Schoemaker, C. E. Ketelaars, M. van Zonneveld, R. B. Minderaa, and T. Mulder, 'Deficits in Motor Control Processes Involved in Production of Graphic Movements of Children with Attention-Deficit-Hyperactivity Disorder', *Dev Med Child Neurol*, 47 (2005), 390-5.
- 80 A. Singh, and H. A. Crockard, 'Comparison of Seven Different Scales Used to Quantify Severity of Cervical Spondylotic Myelopathy and Post-Operative Improvement', *J Outcome Meas*, 5 (2001), 798-818.
- 81 ———, 'Quantitative Assessment of Cervical Spondylotic Myelopathy by a Simple Walking Test', *Lancet*, 354 (1999), 370-3.

- 82 A. Singh, H. A. Crockard, A. Platts, and J. Stevens, 'Clinical and Radiological Correlates of Severity and Surgery-Related Outcome in Cervical Spondylosis', *J Neurosurg*, 94 (2001), 189-98.
- 83 A. Suri, R. P. Chhabra, V. S. Mehta, S. Gaikwad, and R. M. Pandey, 'Effect of Intramedullary Signal Changes on the Surgical Outcome of Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine J*, 3 (2003), 33-45.
- 84 E. Suzuki, H. Nakamura, S. Konishi, and Y. Yamano, 'Analysis of the Spastic Gait Caused by Cervical Compression Myelopathy', *J Spinal Disord Tech*, 15 (2002), 519-22.
- 85 J. A. Tracy, and J. D. Bartleson, 'Cervical Spondylotic Myelopathy', *Neurologist*, 16 (2010), 176-87.
- 86 P. Trouillas, T. Takayanagi, M. Hallett, R. D. Currier, S. H. Subramony, K. Wessel, A. Bryer, H. C. Diener, S. Massaquoi, C. M. Gomez, P. Coutinho, M. Ben Hamida, G. Campanella, A. Filla, L. Schut, D. Timann, J. Honnorat, N. Nighoghossian, and B. Manyam, 'International Cooperative Ataxia Rating Scale for Pharmacological Assessment of the Cerebellar Syndrome. The Ataxia Neuropharmacology Committee of the World Federation of Neurology', *J Neurol Sci*, 145 (1997), 205-11.
- 87 O. Tucha, S. Walitza, L. Mecklinger, D. Stasik, T. A. Sontag, and K. W. Lange, 'The Effect of Caffeine on Handwriting Movements in Skilled Writers', *Hum Mov Sci*, 25 (2006), 523-35.
- 88 G.P. Van Galen, 'Handwriting: Issues for a Psychomotor Theory', *Human Movement Science* 10 (1991), 165-91
- 89 G.P. Van Galen, Portier, S.J., Smits-Engelsman, B.C.M. and Schomaker, L.R.B., 'Neuromotor Noise and Poor Handwriting in Children', *Acta Psychologica*, 82 (1993), 161-78.
- 90 H. E. Vitzthum, and K. Dalitz, 'Analysis of Five Specific Scores for Cervical Spondylogenic Myelopathy', *Eur Spine J*, 16 (2007), 2096-103.
- 91 E. Wada, M. Ohmura, and K. Yonenobu, 'Intramedullary Changes of the Spinal Cord in Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 20 (1995), 2226-32.
- 92 E. Wada, S. Suzuki, A. Kanazawa, T. Matsuoka, S. Miyamoto, and K. Yonenobu, 'Subtotal Corpectomy Versus Laminoplasty for Multilevel Cervical Spondylotic Myelopathy: A Long-Term Follow-up Study over 10 Years', *Spine (Phila Pa 1976)*, 26 (2001), 1443-7; discussion 48.
- 93 M. Y. Wang, S. Shah, and B. A. Green, 'Clinical Outcomes Following Cervical Laminoplasty for 204 Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy', *Surg Neurol*, 62 (2004), 487-92; discussion 92-3.
- 94 T. Yamazaki, K. Yanaka, H. Sato, K. Uemura, A. Tsukada, and T. Nose, 'Cervical Spondylotic Myelopathy: Surgical Results and Factors Affecting Outcome with Special Reference to Age Differences', *Neurosurgery*, 52 (2003), 122-6; discussion 26.
- 95 K. Yonenobu, N. Hosono, M. Iwasaki, M. Asano, and K. Ono, 'Laminoplasty Versus Subtotal Corpectomy. A Comparative Study of Results in Multisegmental Cervical Spondylotic Myelopathy', *Spine (Phila Pa 1976)*, 17 (1992), 1281-4.
- 96 W. F. Young, 'Cervical Spondylotic Myelopathy: A Common Cause of Spinal Cord Dysfunction in Older Persons', *Am Fam Physician*, 62 (2000), 1064-70, 73.
- 97 W. R. Yu, T. Liu, T. R. Kiehl, and M. G. Fehlings, 'Human Neuropathological and Animal Model Evidence Supporting a Role for Fas-Mediated Apoptosis and Inflammation in Cervical Spondylotic Myelopathy', *Brain*, 134 (2011), 1277-92.
- 98 Y. Yukawa, F. Kato, H. Yoshihara, M. Yanase, and K. Ito, 'Mr T2 Image Classification in Cervical Compression Myelopathy: Predictor of Surgical Outcomes', *Spine (Phila Pa 1976)*, 32 (2007), 1675-8; discussion 79.

- 99 A. Zdunczyk, V. Schwarzer, M. Mikhailov, B. Bagley, T. Rosenstock, T. Picht, and P. Vajkoczy, 'The Corticospinal Reserve Capacity: Reorganization of Motor Area and Excitability as a Novel Pathophysiological Concept in Cervical Myelopathy', *Neurosurgery*, 83 (2018), 810-18.

7 Appendix

Fragebogen (mit *European Myelopathy Score*, *Nurick-Score*, *Numerischer Rating-Skala*)

Prospektive Evaluation der Verbesserung neurologischer Dysfunktionen nach
operativer Dekompression bei zervikaler Myelopathie

Fragebogen

Name _____ Vorname _____

Alter _____ Jahre Körpergröße _____ cm Gewicht _____ kg

Familienstand _____ Anzahl der Kinder _____

Alter der Kinder _____

Erlerner Beruf _____

Aktuell ausgeübter Beruf _____

Seit wann bestehen die Beschwerden? _____

Aktuelle Erwerbstätigkeit

- Selbständig
- Hausfrau/-mann
- Angestellte/r, Beamter/in
- Rentner/in, Pensionist/in
- Arbeitslos, Hartz 4

Art der Tätigkeit (Mehrfachnennungen möglich)

- Vorwiegend körperliche Arbeit mit schwerem Heben oder langem Stehen
- Teilweise körperliche Arbeit mit schwerem Heben oder langem Stehen
- Vorwiegend sitzende Tätigkeit im Büro
- Tätigkeit mit langen Autofahrten
- Tätigkeit in wechselnden Körperhaltungen und Positionen

Belastung am Arbeitsplatz

- Tätigkeit mit starker körperlicher Belastung
- Tätigkeit mit starker psychischer Belastung („Stress“)
- Ich fühle mich in der Arbeit körperlich überlastet
- Ich fühle mich in der Arbeit psychisch überlastet
- Ich komme mit meinen Arbeitskollegen nicht zurecht
- Ich fühle mich am Arbeitsplatz gemobbt

Sicherheit des Arbeitsplatzes

- Mein Arbeitsplatz ist langfristig sicher
- Mein Arbeitsplatz ist unsicher
- Ich bin aus wirtschaftlichen Gründen ausgestellt worden/arbeitslos geworden
- Ich bin wegen meiner Rückenprobleme ausgestellt worden/arbeitslos geworden

Rückenprobleme am Arbeitsplatz (Mehrfachnennungen möglich)

- Mehr als die Hälfte meiner Kollegen leiden unter Rückenproblemen
- Einige, aber weniger als die Hälfte meiner Kollegen leiden unter Rückenproblemen
- Meine Beschwerden verstärken sich bei der Arbeit
- Ich habe meinen Arbeitsplatz bereits wegen meiner Rückenprobleme gewechselt
- Ich habe wegen der Rückenschmerzen einen Rentenantrag gestellt
- Ich überlege, wegen der Rückenschmerzen einen Rentenantrag zu stellen

Familiäre und soziale Situation (Mehrfachnennungen möglich)

- Ich lebe in einer sicheren Beziehung
- Ich lebe in wechselnden Beziehungen
- Ich habe im Moment Beziehungsprobleme
- Ich habe Probleme mit meinen Kindern
- Ich habe im Moment Probleme mit meinen Eltern
- Ich habe keine Beziehung
- Ich habe einen festen Freundeskreis

Freizeitaktivitäten

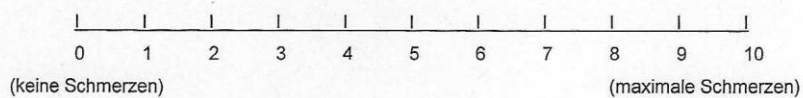
Hobbies: _____

- Ich gehe mindestens einem meiner Hobbys regelmäßig nach
- Ich habe keine regelmäßigen Freizeitaktivitäten
- Ich treibe täglich Sport
- Ich treibe mindestens zweimal in der Woche Sport
- Ich treibe unregelmäßig Sport

Stärke meiner Beschwerden

Bitte zeichnen Sie in die untenstehende Linie die aktuelle Schmerzintensität ein.

(0 = keine Beschwerden, 10 = maximal vorstellbarer Schmerz)



Edinburgh-Handedness-Inventory

Bitte kennzeichnen Sie durch Ankreuzen (+) mit welcher Hand Sie die untenstehenden Tätigkeiten durchführen. Setzen Sie 2 Kreuze (++) in das Kästchen, wenn sie die Tätigkeit nur mit einer Hand ausführen können, und es mit der anderen Hand nur versuchen würden, wenn man Sie dazu auffordern würden.

Wenn Sie einer Antwort nicht im Klaren sind, kreuzen Sie beide Kästchen an. Bitte versuchen Sie alle Fragen zu beantworten und lassen Sie das Kästchen nur frei, wenn Sie mit der gefragten Tätigkeit keinerlei Erfahrung haben.

| | Links | Rechts |
|--|--------------------------|--------------------------|
| 1. Mit welcher Hand schreiben Sie? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. Mit welcher Hand zeichnen Sie? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. Mit welcher Hand werfen Sie (z.B. einen Ball)? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4. Mit welcher Hand halten Sie eine Schere? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5. Mit welcher Hand halten sie die Zahnbürste beim Zähneputzen? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6. In welcher Hand halten Sie Ihr Messer, wenn Sie keine Gabel benutzen? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7. Welche Hand hält den Löffel? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8. Welche Hand umfasst beim Kehren das obere Stielende des Besens? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9. Mit welcher Hand entzünden Sie ein Streichholz? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10. Welche Hand hebt den Deckel beim Öffnen einer Schachtel? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Gang

Zeit: ____ Sek. Anzahl Schritte: _____ ICARS Score 1: ____ 2: ____ 3: ____

European Myelopathy Score

1. Gehfähigkeit

- 1 Unfähig zu gehen, Rollstuhlpflichtig
- 2 Gehfähig mit Hilfe auf ebenem Untergrund
- 3 Treppensteigen mit Hilfe möglich
- 4 Gangbild ataktisch, aber keine Hilfe nötig
- 5 Gangbild und Treppensteigen normal

2. Vegetative Funktion

- 1 Harnverhalt, keine Kontrolle über Blasen- und Mastdarmfunktion
- 2 Abnorme Blasenentleerung und Harnfrequenz
- 3 Normale Blasen- und Mastdarmfunktion

3. Feinmotorik

- 1 Schreiben und Essen mit Messer und Gabel nicht möglich
- 2 Schreiben und Essen mit Messer und Gabel gestört
- 3 Schreiben, Schuhe binden oder Knöpfe zumachen gestört
- 4 Normale Handschrift

4. Selbstversorgung

- 1 Ankleiden nur mit Hilfe möglich
- 2 Ankleiden umständlich und langsam
- 3 Ankleiden normal

5. Schmerzen

- 1 Invalidität wegen Schmerzen
- 2 Erträgliche Parästhesien und Schmerzen
- 3 Keine Parästhesien oder Schmerzen

Nurick-Score

- Grad 1 Myelopathiezeichen ohne Gangstörung
- Grad 2 Geringe Gangstörung, bei der eine Ganztagsarbeit noch möglich ist
- Grad 3 Schwere Gangstörung bei der fremde Hilfe benötigt wird und, bei der eine Ganztagsarbeit oder Nebenbeschäftigung nicht mehr möglich sind
- Grad 4 Gehen nur mit fremder Hilfe oder Gehhilfen möglich
- Grad 5 Rollstuhlpflichtig oder bettlägerig

Nurick-Score⁶²

| | |
|----------|---|
| Grade 0: | Signs or symptoms of root involvement but without evidence of spinal cord disease. |
| Grade 1: | Signs of spinal cord disease but no difficulty in walking. |
| Grade 2: | Slight difficulty in walking which did not prevent full-time employment. |
| Grade 3: | Difficulty in walking which prevented full-time employment or the ability to do all housework, but which was not so severe as to require someone else's help to walk. |
| Grade 4: | Able to walk only with someone else's help or with the aid of a frame. |
| Grade 5: | Chairbound or bedridden. |

International Cooperative Ataxia Rating Scale (ICARS)⁸⁶

1. Gehkapazität
(Beobachtet während eines 10-m Tests, der eine Halbdrehung beinhaltet, an einer Wand entlang mit einem Abstand von ungefähr 1,5 m)

| | |
|---|--|
| 0 | Normal |
| 1 | Fast natürlicher Gang, aber Tandem-Gang nicht möglich |
| 2 | Gehen ohne Hilfe möglich aber deutlich abnormal und unregelmäßig |
| 3 | Gehen ohne Hilfe möglich aber erheblich schwankend; Probleme bei der Halbdrehung |
| 4 | Selbstständiges Gehen nicht mehr möglich; episodisches Abstützen an der Wand bei einem 10-m Test |
| 5 | Gehen nur mit Gehstock möglich |
| 6 | Gehen nur möglich mit 2 Gehstöcken oder einem Rollator |
| 7 | Gehen nur mit Begleitperson möglich |
| 8 | Gehunfähigkeit, sogar mit Begleitperson (rollstuhlpflichtig) |

Punktzahl:

2. Ganggeschwindigkeit
(Beobachtet bei Patienten mit einer vorangegangenen Punktzahl von 1-3; bei einer vorangegangenen Punktzahl von 4 oder mehr gibt es 4 Punkte in diesem Test)

-
- 0 Normal
 - 1 Leicht reduziert
 - 2 Deutlich reduziert
 - 3 Sehr langsam
 - 4 Selbstständiges Gehen nicht mehr möglich
-

Punktzahl:

3. Standkapazität mit geöffneten Augen
(Der Patient wird zunächst gebeten zu versuchen auf einem Bein zu stehen; falls unmöglich, im Tandemposition zu stehen; falls unmöglich, mit nebeneinandergestellten Füßen zu stehen; für die natürliche Standposition, wird der Patient gebeten eine komfortable Position zu finden)

-
- 0 Normal; Einbeinstand > 10 Sek.
 - 1 Einbeinstand unmöglich, aber Tandemstand möglich
 - 2 Stand mit nebeneinandergestellten Füßen möglich, aber Tandemstand unmöglich
 - 3 Stand mit nebeneinandergestellten Füßen nicht mehr möglich, aber Stand in natürlicher Position ohne Hilfe möglich, ohne oder mit leichtem Schwanken
 - 4 Stand in natürlicher Position ohne Hilfe, mit deutlichem Schwanken und Korrigieren der Position
 - 5 Stand in natürlicher Position unmöglich ohne Abstützung eines Arms
 - 6 Unfähigkeit zu Stehen, sogar bei starkem Abstützen auf beide Arme
-

Punktzahl:

ICARS-Score (Gesamtpunktzahl):

Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. Thomas Westermaier, herzlich für seine Unterstützung bei der Durchführung sowie der Korrektur dieser Arbeit.

Meinem Betreuer, Herrn Dr. med. Stefan Rückriegel, danke ich für die Themastellung. Insbesondere für die ausgezeichnete Betreuung und ständige Hilfsbereitschaft während der gesamten Zeit meiner Promotion sowie die zeitnahen Korrekturen möchte ich einen großen Dank aussprechen.

Der neuroradiologischen Klinik danke ich für die Durchführung der MRT-Untersuchung und Auswertung der Befunde.

Ein weiterer Dank gilt dem Sekretariat der Neurochirurgie für die freundliche Hilfe bei der Organisation und Koordination der Untersuchungen.

Ich danke auch allen Patienten und Probanden, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Abschließend möchte ich meiner Familie und allen mir Nahestehenden für die liebevolle Unterstützung, Rücksichtnahme und stets aufmunternden Worte bei der Anfertigung dieser Arbeit bedanken.