CrossMark

Exoskelett: Therapiesystem oder Hilfsmittel zum Behinderungsausgleich

Update Exoskelett

Der Begriff Exoskelett kommt ursprünglich aus der Biologie und wurde vor dem Hintergrund der grundlegenden Eigenschaften in der Medizin wiederverwendet, weil das Exoskelett in der Rehabilitation auf das Prinzip nicht motorisierter Orthesen zurückzuführen ist, die eine äußere Stützfunktion in Form von Schienen darstellen.

Unter einem technischen Exoskelett versteht man einen anziehbaren und sich außerhalb des Körpers befindlichen, batteriegestützten und motorbetriebenen bionischen (Geh-)Roboter zur Führung und Unterstützung der Extremitäten und/oder der Rumpffunktion.

Ziel der Verwendung dieser Systeme ist sowohl eine angestrebte Unterstützung von vorhandenen normalen Körperfunktionen unter präventiver Gesichtspunkten als auch die Wiedererlangung verloren gegangener Funktionen im Rahmen rehabilitativer Prozesse. Die zwei aktuellen Anwendungsgebiete und Zielrichtungen sind:

- die vorhandenen Körperfunktionen in Kraft und Transportkapazität zu unterstützen und zu verbessern,
- Anwendung in der Therapie von körperlichen Schäden.

Die Systeme werden momentan primär als dynamisches Gehtrainingsgerät angewendet. Sie ermöglichen Patienten mit Schwächung oder Lähmung der Beine, ein Stehen und Gehen auf ebenen Flächen.

Die Unterscheidung der jeweiligen am Markt etablierten Systeme erfolgt durch:

- die Art der der Ansteuerung der Motoren,
- den Einsatzbereich (Groundwalking vs. Laufband),
- die Einstellparameter,
- den Nutzungszeitraum,
- die Aufbaumaße,
- den generierten Bewegungsablauf.

Exoskelettsysteme

Exoskelettsysteme gibt es aktuell im präventiven und im rehabilitativen Bereich. Primär wurden Exoskelette für den militärischen Bereich entwickelt und konstruiert, um Soldaten zu befähigen, schwere Lasten über lange Strecken und in unwegsamem Gelände zu transportieren. Der Einsatz dieser unterstützenden Geräte und damit die Gewinnung von Erfahrungen zur Bewertung ihres Nutzens befinden sich in diesem Zusammenhang erst in einem sehr frühen Stadium der wissenschaftlichen Forschung. Somit ist die Aussagekraft für die Anwendung dieser Systeme im Bereich der Rehabilitation oder zum Ausgleich von Fähigkeitsstörungen (Behinderungsausgleich) noch limitiert.

Die am Markt erhältlichen und zugelassenen Exoskelettsysteme etablieren sich zunehmend im therapeutischen Behandlungsprozess. Allerdings ist nur über Kenntnisse der patientenbezogenen Befunddaten und der technischen Parameter der Systeme eine in sich schlüssige und lückenlose Indikationsstellung für eine sinnhafte Therapie zu erreichen.

Im eigenen klinischen Setting (akut, rehabilitativ, ambulant) wurden folgende Exoskelettsysteme angewendet und getestet:

- EksoGT™, Fa. Ekso Bionics vormalig Fa. Berkley (Richmond, CA, USA):
 - System bisher nur zur Anwendung in der Therapie zugelassen, CE- und FDA-Zulassung
 - Groundwalking
 - Ansteuerung über Bewegungssensoren, die durch seitliche Gewichtsverlagerung aktiviert werden
 - Begleitperson immer erforderlich
 - mögliche Körpergröße: 158–188 cm
 - maximales Körpergewicht: 100 kg
 - maximale Hüftbreite: 45,7 cm
 - Femurlänge: 51–61 cm
 - Eigengewicht: 23,5/23,9 kg
 - Treppensteigen nicht möglich
 - Betriebsdauer: 4–6 Stunden
- Indego®, Fa. Parker Hannifin Corporation (Macedonia, OH, USA):
 - System zur Anwendung in der Therapie zugelassen, CE- und FDA-Zulassung
 - Groundwalking
 - Ansteuerung über Bewegungssensoren in Knie- und Hüftgelenken, welche durch die Schritteinleitung aktiviert werden
 - Begleitperson immer erforderlich
 - mögliche Körpergröße: 155–195 cm, 3 Systemgrößen (klein, mittel, groß)
 - maximales Körpergewicht: 113 kg
 - maximale Hüftbreite: 42,2 cm
 - Femurlänge: 35–47 cm
 - Eigengewicht: 12 kg
 - Treppensteigen nicht möglich
 - Betriebsdauer: 3–4 h aktive Gangzeit, bis zu 8 h bei normalen täglichen Gebrauch

- HAL® (Hybrid Assistive Limb) – Lower Limb Model, Fa. Cyberdyne Inc (Tsukuba, Präfektur Ibaraki, Japan):
 - System zur Anwendung in der Therapie zugelassen, CE-Zulassung
 - lauffandgebundenes Therapiegerät zur Durchführung von Gehübungen
 - Sicherung des Patienten durch Deckenschienensystem oder Aufhängung im Laufband
 - Ansteuerung über Oberflächen-EMG-Ableitung und Bewegungssensoren
 - Begleitpersonen immer erforderlich
 - mögliche Körpergröße: 150–200 cm, 4 Systemgrößen (S-Size, M-Size, L-Size, X-Size)
 - maximales Körpergewicht: 100 kg
 - maximale Hüftbreite: 40 cm
 - Femurlänge: 36–48 cm
 - Eigengewicht: je nach Ausführung 9–14 kg
 - Betriebsdauer: ca. 1 Stunde
- ReWalk™ Personal 6.0, ReWalk Robotics Ltd. (Yokneam, Israel):
 - System zur Anwendung in der Therapie zugelassen, CE- und FDA-Zulassung
 - Groundwalking
 - Ansteuerung über Bewegungssensoren in Knie- und Hüftgelenken, welche durch Gewichtsverlagerung nach vorn aktiviert werden und die Schritte einleitet
 - Begleitperson laut Hersteller immer erforderlich
 - mögliche Körpergröße: 160–190 cm, 3 Systemgrößen (klein, mittel, groß)
 - maximales Körpergewicht: 100 kg
 - maximale Hüftbreite: 37 cm
 - maximale Femurlänge: 48 cm
 - Eigengewicht: 18 kg
 - Treppensteigen (theoretisch) möglich
 - Betriebsdauer: 3–4 h

Studienlage

Der Einsatz dieser unterstützenden Geräte und damit die Gewinnung von Erfahrungen zur Bewertung ihres Nutzens befinden sich in diesem Zusammenhang

erst in einem sehr frühen Stadium der wissenschaftlichen Forschung. Somit ist die Aussagekraft für die Anwendung dieser Systeme im Bereich der Rehabilitation sowie die Anwendung zum Ausgleich von Fähigkeitsstörungen (Behinderungsausgleich) noch limitiert. Aktuelle Untersuchungen und Studien zum Nachweis von Therapieeffekten befinden sich noch in den Anfängen. Ein positiver Einfluss auf viele Körperfunktionen, wie z. B. die Magen-/Darmfunktion, die Blutdruckregulation, die Knochendichte, den Gewebestoffwechsel, sowie der Einfluss auf die muskuläre Spannungssituation/Spastik werden vermutet, sind aber aktuell noch nicht nachgewiesen.

Demzufolge beschäftigen sich aktuelle Untersuchungen mit folgenden Fragestellungen.

- Neurodegeneration und Neuorganisation/Plastizität des peripheren und zentralen Nervensystems: Freund et al. (2011) und Fleerkotte et al. (2014) konnten mittels Magnetresonanztomographie (MRT) und gestellten funktionellen Aufgaben eine positive Wirkung von selbstständigen Aktivitäten auf die Regeneration und Reorganisation peripherer und zentraler Strukturen bei QSL/SCI („spinal cord injury“) innerhalb der ersten 2 Jahre nach Schädigung/Trauma nachweisen [2, 3].
- Erlernen der Funktion und Praktikabilität von Exoskeletten im selbstständigen Einsatz [6]; der zeitliche Aufwand des Erlernens eines roboterassistierten Gehgerätes. Das Ergebnis zeigt, dass Patienten mit einer tieferen Schädigung des Rückenmarkes oder einer inkompletten, unvollständigen Schädigung des Rückenmarkes das Erlernen der Handhabung eines Exoskeletts leichter fällt als Patienten mit einer komplexen oder vollständigen Schädigung des Rückenmarkes.
- Anleitung und Betreuung (ambulant oder stationär): Hayes et al. (2018) haben in einer Literaturrecherche zu roboterassistierter Ganganalyse 12 Studien zur Art und Weise (sowohl im klinischen als auch ambulanten Setting) der Durchführung einer Anleitung des roboterassistierten Gangtrainings untersucht

und ausgewertet [5]. Roboterassistiertes Gangtraining (egal ob im ambulanten oder klinischen Bereich) hat einen positiven Einfluss, ersetzt aber keine etablierten Therapien in der Behandlung von QSL/SCI. Es ist ein hervorragendes ergänzendes Hilfsmittel in der Rehabilitation von neurologischen Gangstörungen.

- Möglicher funktioneller Einsatz im häuslichen Bereich: Fritz et al. (2017) und Palermo et al. (2017) untersuchten eine mögliche Wiederaufnahme von selbstständigen Alltagsaktivitäten durch diese Geräte [4, 7]. Selbstständige Alltagsaktivitäten können die Systeme noch nicht ermöglichen. Die etablierten Exoskelettsysteme werden nur für Rehabilitationseinrichtungen unter fachgemäßer Anwendung und Begleitung empfohlen. Das Gerätgewicht, der hohe Energiebedarf, lange Ab- und Anlegezeiten, die Notwendigkeit des Stützens durch die obere Extremität, Überwachungsanforderungen, ein physiologisches Gangmuster und der begrenzte Bewegungsraum schließen momentan eine selbstständige Nutzung im häuslichen Bereich aus.
- Sicherheitsfragen in der Anwendung: Fisahn et al., 2016; untersuchten die Schutz- und Sicherheitsfunktionen für einen Notfall [1]. Es gibt zurzeit kein Gerät, das einen Sturz oder einen anderen Notfall abfangen oder verhindern kann.
- Vergleichbare Messinstrumente: Alle bisherigen Untersuchungen haben keine einheitlichen Ein- und Ausschlusskriterien und keine einheitlichen Messinstrumente bzw. Gangregularien. Dies macht eine Vergleichbarkeit der Wirkung der Exoskelettsysteme zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich.

Für den häuslichen Gebrauch benötigt es weitere Erfahrungen, Studien und für die Weiterentwicklung in der Industrie eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Patienten/Anwendern, Ärzten, Entwicklern, Ingenieuren, Therapeuten, IT-Technikern und Angehörigen. Ein solches Team ist in der Lage, ein roboterassistiertes Gangsystem für den

Hausgebrauch zu konzipieren und zu entwickeln.

Zurzeit gibt es keine Geräte, die einen Sturz oder einen Notfall abfangen oder verhindern können. Die Exoskeletttherapie ist momentan eine hervorragende Ergänzung zu den etablierten therapeutischen Verfahren sowohl im Rahmen der Akutbehandlung als auch im Rahmen der lebenslangen Nachsorge. Ihre Anwendung ist allgemein noch limitiert durch die jeweiligen Läsionshöhen, durch die Größe und das Gewicht der Patienten (Oberschenkelänge etc.), durch das Bewegungsausmaß und die Rotationsstellung im Hüftbereich (Kontrakturen, Periartikuläre Ossifikation/Verkalkung), bestehende operative Versorgung (Hüft-TEP [Totalendoprothese]), vorbestehende Grunderkrankungen (Osteoporose, Arthrose). Sie ist momentan ausnahmslos als therapeutisches Hilfsmittel zu sehen und nicht als eine Alternative zum adaptierten Aktivrollstuhl.

Heilmittel oder Hilfsmittel

Aktuell können Hersteller von Exoskelettsystemen eine Aufnahme in die Produktgruppe 23, „Orthesen/Schienen“ des Hilfsmittelverzeichnisses nach § 139 SGB V, beantragen. Diese Aufnahme ist grundlegend notwendig, um eine Verordnung stellen zu können. Die Hersteller der Systeme müssen weiterhin eine Aufnahme in das Hilfsmittel-/Pflegemittelverzeichnis beantragen. Das System muss eine Prüfung seiner Funktionstauglichkeit, seiner Sicherungssysteme und der Qualität sowie den medizinischen und pflegerischen Nutzen nachweisen können. Alle vier hier vorgestellten Systeme, haben eine CE (Certificate Europe)-Zulassung und drei eine FDA (Food and Drug Administration/USA)-Zulassung (Ekso, Indego, ReWalk). Seit Juni diesen Jahres ist das erste Exoskelettsystem, das Personal 6.0 der Firma ReWalk Robotics, im Hilfsmittelverzeichnis aufgenommen worden.

Ob ein Anspruch auf Versorgung mit einem Exoskelettsystem vorliegt, hängt von den individuellen Verhältnissen und Fähigkeiten des Patienten ab und wird von den Kostenträgern unter Berück-

Trauma Berufskrankh 2018 · 20 (Suppl 4):S254–S259
<https://doi.org/10.1007/s10039-018-0394-7>

© Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

D. Kuhn · B. Freyberg-Hanl

Exoskelett: Therapiesystem oder Hilfsmittel zum Behinderungsausgleich

Zusammenfassung

Die Schätzungen zur weltweiten Inzidenz von Querschnittlähmung (QSL) belaufen sich auf 40 bis 80 neue Fälle jährlich pro 1 Mio. Einwohner. Historisch waren bis zu 90 % der Fälle von QSL traumatischen Ursprungs. Die betroffenen Menschen mit nichttraumatischer QSL sind in der Regel älter und leiden an fortschreitenden Erkrankungen. Ein bedeutender Anteil der Unfälle, die zu QSL führen, ist berufsbedingt. Der Bedarf an unterstützender Technologie beginnt normalerweise mit dem Eintreten einer QSL und besteht während der gesamten Lebensdauer des Betroffenen. Welche Art der unterstützenden Technologie benötigt wird, hängt vom Grad der QSL und den damit verbundenen Beeinträchtigungen, Umweltfaktoren und personenbezogenen Faktoren und ggf. bestehenden sekundären Gesundheitsproblemen ab. Eine relativ

neue unterstützende Technologie ist das robotergestützte Gehtraining mithilfe eines Exoskeletts. In der Anwendung dieser Systeme im rehabilitativen Bereich, zeigen sich nicht nur große positive Effekte auf die sensorimotorischen Störungen, sondern auch auf Begleiterkrankungen/Begleitkomplikationen der Grunderkrankungen und die psychische Gesundheit. Zum derzeitigen Zeitpunkt ist eine Exoskeletttherapie in der Rehabilitation von neurologischen Gangstörungen eine hervorragende Ergänzung der etablierten therapeutischen Verfahren sowohl im Rahmen der Akutbehandlung als auch im Rahmen lebenslanger Nachsorge.

Schlüsselwörter

Rückenmarkverletzung · Neurologische Gangstörung · Robotergestütztes Gehtraining · Rehabilitation · Querschnittlähmung

Exoskeleton: therapy system or aid for disability compensation

Abstract

Estimates of the worldwide incidence of spinal cord injury (SCI) are 40–80 new cases annually per million inhabitants. Historically, up to 90% of cases of SCI were of traumatic origin. The people affected by non-traumatic SCI are usually older and suffer from progressive diseases. A significant proportion of accidents leading to SCI are occupational. The need for assistive technology usually begins with the occurrence of SCI and persists throughout the life of the person concerned. The type of assistive technology needed depends on the level of SCI and the associated impairments, environmental factors and personal factors and any existing secondary health problems. A relatively new supporting technology is robotic walking

training with the help of an exoskeleton. The application of these systems in the field of rehabilitation not only show great positive effects on sensorimotor disorders but also on comorbidities/concomitant complications of underlying diseases and mental health. At the present time, exoskeletal therapy in the rehabilitation of neurological gait disorders is an excellent supplement to the established therapeutic procedures, both in the context of acute treatment and in the context of lifelong aftercare.

Keywords

Spinal cord injury · Neurological gait disorder · Robot-assisted walking training · Rehabilitation · Paraplegia

sichtigung des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes im Einzelfall geprüft. Das Hilfsmittelverzeichnis ist somit die Kontrollinstanz und keine Positivliste. Es hat eine Ordnungs- und Orientierungsfunktion für die Versicherungen und Patienten und kann gleichzeitig versorgungsrelevante Informationen über Hilfsmittel geben.

SGB VII-Kontext

Es gibt zum aktuellen Zeitpunkt keine festen Vereinbarungen mit der DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) oder anderen Kostenträgern. Aktuell laufen Gespräche mit dem Heilverfahrensausschuss der DGUV. Die Berufsgenossenschaftlichen Kliniken und SAV (Schwerstverletzungsartenver-

Abb. 1 ▲ Entscheidungsalgorithmus zur Ertestung von Exoskeletten. ASIA „American Spinal Injury Association Impairment Scale“, ROM „Range of Motion“, MFT Muskelfunktionstest. (© Dr. D. Kuhn 2018)

fahren)-Einrichtungen haben für ihre Patienten einen höchsten qualitativen Anspruch. Sie arbeiten mit medizinisch-therapeutischer Fachexpertise, einem bestimmungsgemäßen Gebrauch von Medizinprodukten und stellen ihren Patienten neueste Medizin-/und Rehabilitationstechnik zur Verfügung.

Die Kostenträger bedürfen daher obligat von den Einrichtungen einer dif-

ferenzierten Primär- und Abschlussevaluation, der engmaschigen fachlichen Betreuung/Begleitung und einer objektiven Ergebnisdarstellung mit Fokus auf alle Kontextfaktoren der International Classification of Function.

Herausforderungen

Die Herausforderungen, die sich aus der Funktion und der Anwendung von Exoskelettsystemen ergeben, sind medizinisch, technisch und wirtschaftlich. Medizinisch sind in dem Exoskelettsystem zum einen die Ein- und Ausschlusskriterien, die Sicherheitsrisiken und die evtl. Überlastungen des muskuloskeleta-

len Systems zu sehen. Der Patient kann aufgrund seiner Behinderung im Fall eines Sturzes sich nicht selber oder durch das System schützen. In der Anwendung kann es ungewollt zu Überlastungsschäden in muskuloskeletalen Strukturen wie Haut, Gelenken, Muskeln, Sehnen und Bindegewebe kommen. Technische Grenzen sind durch das Medizinproduktegesetz (Betriebsverordnung) gesetzt. Wirtschaftlich bedarf die Anschaffungssumme eines Systems zwischen 50.000 und 100.000 € zwingend einer Einzelentscheidung.

Ein- und Ausschlusskriterien zur Durchführung der Exoskeletttherapie

Die Grundlagen zur möglichen Einbindung eines Exoskeletts in eine Therapie bilden eine strukturierte initiale Anamnese des Patienten sowie die auf Aktenlage basierenden Recherchen. Ergänzend muss regelhaft eine fokussierte klinische Befundung im Sinne einer medizinischen Primäranalyse durchgeführt und diese anschließend bewertet werden.

Indikationen sind:

- Querschnittlähmung sub C7 AIS (ASIA [American Spinal Injury Association Impairment Scale]) A–D,
- neurologische Erkrankungen mit muskulärer Schwäche,
- Körpergröße zwischen 160 und 195 cm,
- Körpergewicht bis maximal 100 kg,
- Hüftweite von maximal 45 cm,
- regelmäßige Nutzung von Stehgeräten,
- belastungsstabile Gliedmaßen im nahezu normalen Bewegungsbereich,
- Einwilligungsfähigkeit in die Therapiemaßnahme,
- Freigabe nach Untersuchung durch einen Arzt.

Kontraindikationen sind:

- ernsthafte Begleiterkrankungen wie Infektionen, Herz-Kreislauf-Störungen, Herz- oder Lungenleiden, Druckstellen,
- schwere Spastizität (Ashworth ≥ 4),
- erhebliche Kontrakturen,
- heterotrope Ossifikation,
- kognitive Beeinträchtigungen,

- Kolostomie,
- eingeschränkte Gelenkbeweglichkeit,
- Unterschied in den Beinlängen,
- unbelebte tiefe Venenthrombose,
- Amputation.

Klinisch/ambulanter Zyklus

Auf der Grundlage der eigenen Erfahrungen in der Anwendung von Exoskelettsystemen ergibt sich ein Zyklus in der Behandlung:

1. Vorevaluation des Kostenträgers nach Aktenlage,
2. fachärztliche und fachtherapeutische Befundaufnahme,
3. klinische Testung und Evaluation,
4. Durchführung einer Behandlungsreihe (10 Einheiten à 60 min),
5. Reevaluation,
6. Kostenträgermeldung.

Während des gesamten Zyklus erfolgt eine Evaluation. Mit diesem Verfahrenszklus in der Anwendung der Systeme kam es zur Entwicklung eines „Entscheidungsalgorithmus“ für oder gegen die Anwendung eines Exoskelettsystems.

Entscheidungsalgorithmus

Im Prozess einer Einsatzplanung erfolgen eine Differenzierung und Betrachtung der Lähmungssituation und des darauf basierenden motorisch-sensiblen Funktionsbildes sowie einer Definition der Zielsetzung der Therapie.

Weiterhin ist in Abhängigkeit des möglichen Einsatzbereiches eines Exoskeletts eine Differenzierung nach Therapie- bzw. Trainingssystem vorzunehmen. Hierzu wurde im Verlauf der Anwendung verschiedener Systeme im klinischen Setting ein Entscheidungsalgorithmus entwickelt (Abb. 1).

Nur in einer Kombination aus der Kenntnis über eine neurologische Gangstörung und dem Wissen über die Kontraindikationen der Anwendung eines Exoskeletts und durch das Verständnis der technischen Parameter des Systems, besteht im Ergebnis Klarheit über den möglichen Einsatz und den damit verbundenen Nutzen für den Patienten.

Fazit für die Praxis

- Die Exoskeletttherapie ist zum aktuellen Zeitpunkt eine hervorragende Unterstützung der etablierten therapeutischen Verfahren in der Behandlung von rückenmarkverletzten Patienten.
- Sie ist eine deutliche Erweiterung von Therapieverfahren im rehabilitativen Bereich in der Behandlung von zentralen neurologischen Erkrankungen.
- Ihre Anwendung ist limitiert.
- Eine Anwendung und Durchführung erfordern zwingend eine fachärztliche und fachtherapeutische Begleitung und Überwachung.
- Somit ist die Exoskeletttherapie primär als Hilfsmittel zu sehen. Sie bietet keine Alternative zu einem adaptierten Aktivrollstuhl.
- Weitere Untersuchungen bezüglich der detaillierten Wirksamkeit auf die einzelnen körperlichen Systeme und Funktionen sind zwingend notwendig.

Korrespondenzadresse

Dr. D. Kuhn
BG Klinikum Bergmannstrost
Halle
Merseburger Str. 165,
06112 Halle, Deutschland
daniel.kuhn@
bergmannstrost.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. D. Kuhn und B. Freyberg-Hanl geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

The supplement containing this article is not sponsored by industry.

Literatur

1. Fisahn C, Aach M, Jansen O, Moisi M, Mayadev A, Pagarigan KT, Dettori JR, Schildhauer TA (2016) The effectiveness and safety of exoskeletons as assistive and rehabilitation devices in the treatment of neurologic gait disorders in patients with spinal cord injury: a systematic review. *Global Spine J* 6(8):822–841
2. Fleerkotte BM, Koopman B, Buurke JH, van Asseldonk EH, van der Kooij H, Rietman JS

-
- (2014) The effect of impedance-controlled robotic gait training on walking ability and quality in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: an explorative study. *J Neuroeng Rehabil* 11(1):26
3. Freund P, Wannier T, Schmidlin E, Bloch J, Mir A, Schwab ME, Rouiller EM (2007) Anti-Nogo-A antibody treatment enhances sprouting of corticospinal axons rostral to a unilateral cervical spinal cord lesion in adult macaque monkey. *J Comp Neurol* 502(4):644–659
 4. Fritz H, Patzer D, Galen SS (2017) Robotic exoskeletons for reengaging in everyday activities: promises, pitfalls, and opportunities. *Disabil Rehabil*:1–4. <https://doi.org/10.1080/09638288.2017.1398786>
 5. Hayes SC, Wilcox CRJ, Forbes White HS, Vanicek N (2018) The effects of robot assisted gait training on temporal-spatial characteristics of people with spinal cord injuries: a systematic review. *J Spinal Cord Med*:1–15. <https://doi.org/10.1080/10790268.2018.1426236>
 6. Kozlowski A, Bryce T, Dijkers M (2015) Time and effort required by persons with spinal cord injury to learn to use a powered exoskeleton for assisted walking. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 21(2):110–121
 7. Palermo AE, Maher JL, Baunsgaard CB, Nash MS (2017) Clinician-focused overview of bionic exoskeleton use after spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 23(3):234–244