



## Doctoral Thesis

# Comparing mechanical discomfort and risk of low back pain or injury when wearing load carriage systems

**Author(s):**

Wettenschwiler, Patrick D.

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010610169> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23199

**COMPARING MECHANICAL DISCOMFORT AND RISK OF LOW BACK PAIN OR  
INJURY WHEN WEARING LOAD CARRIAGE SYSTEMS**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

PATRICK DANIEL WETTENSCHWILER

MSc, ETH Zurich

born on 05.05.1984

citizen of Rapperswil-Jona SG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stephen J. Ferguson, examiner

Dr. Silvio Lorenzetti, co-examiner

Dr. Simon Annaheim, co-examiner

2016

## Summary

Load carriage has become an everyday task for a large part of the population. Special attention is required in the fields of school children's load carriage, infantry, or recreational outdoor activities, as the typical loads to be carried in these fields have increased over the last decades. The increasing loads call for a constant improvement of the type and design of load carriage systems. The biggest challenges due to the mechanical interaction between a load carriage system and the human body concern the discomfort and the risk of low back pain or injury.

Discomfort is a subjective perception depending on biomechanical factors like soreness, numbness, stiffness, or other comparable perceptions and it can directly influence the user acceptance of a load carriage system. Today, discomfort is usually assessed with subject studies, but they are labor-intensive, costly, and often include bias. Therefore, the first goal was to provide a first validated physical model to assess the mechanical aspects of discomfort when wearing load carriage systems. The validation required the collection of new *in vivo* data, which in turn called for an improved measurement technique regarding the pressure distribution at the interface between load carriage system and body.

The second goal of this thesis focused on the risk of low back pain or injury. Low back pain or injury is a serious health issue that concerns more than 50% of the adults. Regarding load carriage, known risk factors like the peak shear and the cumulative compression forces in the L4-L5 intervertebral disc must be minimized in order to decrease the risk of low back pain or injury. As these parameters are ethically impossible to measure *in vivo*, models are necessary to evaluate the risk of low back pain or injury. While existing numerical models already offer the prediction of the loads on the lumbar discs for different postures or everyday activities, they usually do not model the complex interaction with a load carriage system and the relevance of subject-specific lumbar curvature that is adapted to the load condition is unknown. Therefore, the second goal was to present an approach to efficiently model the effect of load carriage systems on the body in numerical simulations and to investigate the relevance of precise lumbar curvature data in spinal models.

In a first subject study, the reliability of Tekscan pressure sensors was assessed and possibilities to improve their reliability were investigated. These results allowed the identification of mechanical predictors of discomfort during load carriage in a second subject study. Through comparison of these mechanical parameters from the second subject study with the corresponding parameters measured on an instrumented dummy, a validation of that dummy was conducted. For the second goal, the same instrumented dummy was used in an approach to compare the risk of low back pain or injury during load carriage by combining physical and numerical modeling. The dummy provided the external forces resulting from the mechanical interaction between the body and a load carriage system, while the numerical model calculated the compression and shear forces in the lumbar discs. An existing validated rigid body model was used for the numerical modeling. A third subject study was conducted to provide the lumbar posture input data and determine its relevance.

Regarding the first goal, the instrumented dummy could be validated to accurately simulate the interaction between the human body and load carriage systems. It can explain 75% or more of the variation in discomfort. This dummy represents the first validated model to assess discomfort during load carriage and it exhibits a higher predictive power than previous models. Regarding the second goal, a novel approach of assessing the risk of low back pain or injury during load carriage was presented by combining physical and numerical modeling. Additionally, the necessity of precise lumbar curvature data as input for spinal models was shown for the realistic prediction of shear forces.

The presented models provide much needed opportunities for future research and development of load carriage system type and design. They enable hundreds of measurements in a reliable and controllable laboratory environment and at reduced cost, which provides freedom to investigate new or unconventional concepts. Both manufacturers and users of load carriage systems will profit from future improvements regarding discomfort and risk of low back pain or injury.

## Zusammenfassung

Für einen Grossteil der Bevölkerung ist das Tragen von Lasten Bestandteil der täglichen Routine. Eine spezielle Bedeutung kommt dem Tragen von Lasten im Falle von Schulkindern, Infanteristen und Outdoor-Sportlern zu, da in diesen Bereichen die getragenen Gewichte in der Vergangenheit deutlich angestiegen sind. Das steigende Gewicht verlangt nach kontinuierlicher Anpassung und Verbesserung der Tragsysteme. Die grössten Herausforderungen in Zusammenhang mit der mechanischen Wechselwirkung zwischen Tragsystem und menschlichem Körper betreffen den Diskomfort und das Risiko von Rücken-Beschwerden im Bereich der Lendenwirbelsäule.

Diskomfort ist eine subjektive Wahrnehmung, die auf biomechanischen Faktoren, wie Unannehmlichkeit, Taubheit, Steifheit oder anderen vergleichbaren Empfindungen beruht und kann die Zufriedenheit der Benutzer gegenüber dem Tragsystem beeinflussen. Heutzutage wird Diskomfort normalerweise mittels Probandenstudien erhoben, obwohl damit ein hoher Aufwand, hohe Kosten und allfällige Beeinflussung verbunden sind. Das erste übergeordnete Ziel war es daher, ein erstes validiertes physisches Modell zur Beurteilung von Diskomfort bei Tragsystemen zu erstellen. Um die Validierung zu ermöglichen, mussten neue in vivo Daten gesammelt werden, wofür wiederum eine verbesserte Messtechnik bei der Erfassung der Druckverteilung an den Kontaktflächen von Tragsystem und Körper nötig war.

Das zweite übergeordnete Ziel dieser Arbeit betraf das Risiko von Rücken-Beschwerden im Lendenwirbelsäulenbereich. Solche Beschwerden beeinträchtigen mehr als 50% der Erwachsenen und stellen damit eine ernstzunehmende Problematik dar. Bekannte Risikofaktoren wie die Spitzenschwerkkräfte und die kumulativen Kompressionskräfte in der Bandscheibe zwischen dem 4. und 5. Lendenwirbel müssen minimiert werden, um das Verletzungsrisiko beim Tragen von Lasten zu senken. Da diese Parameter in Probandenstudien aus ethischen Gründen praktisch unmöglich zu messen sind, benötigt es Modelle, um das Verletzungsrisiko bei Tragsystemen zu beurteilen. Bestehende numerische Modelle ermöglichen zwar die Berechnung der Kräfte in den Bandscheiben, sie modellieren aber nicht die komplexe Wechselwirkung mit Tragsystemen und die Relevanz von Probanden-spezifischer Lendenwirbelsäulenkrümmung, die der äusseren Last angepasst wird, ist unbekannt.

Das zweite übergeordnete Ziel war es daher, eine Methode zu erstellen, um das Verletzungsrisiko im Lendenwirbelsäulenbereich bei Tragsystemen zu beurteilen und die Relevanz von präziser Lendenwirbelsäulenkrümmung in Modellen zu untersuchen.

In einer ersten Probandenstudie wurde die Reliabilität von Tekscan Drucksensoren untersucht und Verbesserungsmöglichkeiten dafür getestet. Unter Berücksichtigung dieser Resultate konnten in einer zweiten Probandenstudie mechanische Parameter identifiziert werden, die mit dem Diskomfort bei Tragsystemen assoziiert sind. Durch Vergleiche der mechanischen Parameter von der Probandenstudie mit den entsprechenden Parametern vom instrumentierten Dummy wurde eine Validierung dieses Dummies durchgeführt. Für das zweite übergeordnete Ziel wurde derselbe Dummy eingesetzt, um eine Methode zur Beurteilung des Verletzungsrisikos im Lendenwirbelsäulenbereich durch Kombination von physischer und numerischer Modellierung zu erstellen. Der Dummy erfasste die Belastung des menschlichen Körpers durch das Tragsystem und das numerische Modell verwendete unter anderem diese Information, um die Kompressions- und Scherkräfte in den Bandscheiben zu berechnen. Das numerische Modell bestand aus einem existierenden, validierten Rigid Body Model. Anhand einer dritten Probandenstudie wurden letztlich die Lendenwirbelsäulenkrümmung und deren Relevanz für dieses Modell erhoben.

Der instrumentierte Dummy konnte validiert werden, die Wechselwirkung zwischen Tragsystem und Körper zuverlässig abzubilden. Der Dummy kann 75% oder mehr der Diskomfort-Varianz erklären. Dies ist das erste validierte Modell zur Beurteilung von Diskomfort bei Tragsystemen und weist eine höhere Vorhersagekraft als bisherige Modelle aus. Zudem wurde ein neuartiger Ansatz zur Beurteilung des Verletzungsrisikos im Lendenwirbelsäulenbereich vorgestellt, durch Kombination von physischer und numerischer Modellierung. Für die realistische Berechnung der Scherkräfte konnte die Notwendigkeit präziser Definierung der Lendenwirbelsäulenkrümmung in Modellen gezeigt werden. Diese beiden Methoden stellen dringend benötigte Gelegenheiten dar für zukünftige Forschung und Entwicklung im Bereich der Tragsysteme. Sie ermöglichen hunderte Messungen unter reliablen und kontrollierten Bedingungen zu geringeren Kosten, was den Weg für neue und unkonventionelle Tragsystem-Konzepte ebnet. Sowohl die Hersteller, als auch die Benutzer von Tragsystemen werden in Zukunft von Verbesserungen bezüglich Diskomfort und Verletzungsrisiko profitieren.