

Zbl Arbeitsmed

<https://doi.org/10.1007/s40664-025-00582-3>

Eingegangen: 1. Februar 2025

Angenommen: 12. Mai 2025

© The Author(s) 2025



Klaus Schäfer¹ · Ines Schalk¹ · Frank Rokosch¹ · Matthias Jäger²

¹ Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, Mannheim, Deutschland

² Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund, Dortmund, Deutschland

Muskuloskeletale Belastung beim Betanken von Flugzeugen insbesondere mit Bezug auf den unteren Rücken

1. Einleitung

Mit dem Inkrafttreten der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit (Lastenhandhabungsverordnung) im Jahr 1996 sind manuelle Tätigkeiten im Hinblick auf deren Belastungen für die Beschäftigten im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen [8]. „Berücksichtigen“ bedeutet in diesem Zusammenhang, die Tätigkeiten der Beschäftigten zu beobachten, zu analysieren und im Hinblick auf die muskuloskeletalen Belastungen zu bewerten. Entsprechend der Bewertung sind dann ggf. präventive Maßnahmen zu planen, umzusetzen und auf deren Wirksamkeit zu überprüfen.

Für die Bewertung steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, die für die jeweiligen Tätigkeiten genutzt werden können [2, 16, 43, 45]. Gerade bei komplexeren Tätigkeiten ist eine adäquate Bewertung allerdings oft schwierig, da die erforderlichen Bewertungsverfahren entsprechendes Expertenwissen voraussetzen und damit den unmittelbaren Einsatz in der betrieblichen Praxis erschweren können. Oder die Bewertungsverfahren sind eher unspezifisch konzipiert und können somit nur für eine erste grobe Orientierung dienen [3, 17].

Auch vom Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASSI) und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) wurden Handlungsanleitungen zur Be-

urteilung der Arbeitsbedingungen beim Heben und Tragen von Lasten und zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Schieben und Ziehen von Lasten erarbeitet, die auch für die anzustrebende prospektive Beurteilung von Arbeitsplätzen gemäß der Lastenhandhabungsverordnung die jeweilige sogenannte Leitmerkmal-methode (LMM) enthält [44]. Mit diesem Verfahren können im Allgemeinen die Arbeitsbedingungen im Hinblick auf die körperliche Beanspruchung der Beschäftigten orientierend beurteilt werden; dabei wird insbesondere auch geprüft, ob präventive Maßnahmen zur Umgestaltung der Arbeit erforderlich sind. Die Leitmerkmalmethoden stellen ein relativ einfaches Beurteilungsverfahren für den betrieblichen Praktiker zur Verfügung, um die Vorgaben der Lastenhandhabungsverordnung bezüglich der Gefährdungsbeurteilung nach Arbeitsschutzgesetz erfüllen zu können.

Flugfeldtankwarte haben die Aufgabe, Flugzeuge mit Hilfe der an den jeweiligen Flughäfen vorhandenen Infrastruktur zu betanken. Hierbei werden von den Tankwarten insbesondere Tankschläuche in unterschiedlichen Körperhaltungen gehoben, gesenkt, gehalten und gezogen. Das Tätigkeitsspektrum ist dabei eher komplex, so dass von Seiten eines Mitgliedsunternehmens der Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik (BGHW) hierzu um entsprechende Unterstützung bei der Analyse einschließlich einer Beurteilung gebeten wurde. Die Ergebnisse der Untersuchun-

gen für das Heben, Senken, Halten und Ziehen von Tankschläuchen werden in dieser Arbeit zusammengefasst. Ferner ist anzumerken, dass im Mitgliedsunternehmen diese Tätigkeiten ausschließlich von Männern ausgeführt werden; aus diesem Grund zielen alle Bewertungen und Ableitungen auf männliche Beschäftigte ab.

Eine Bewertung der einzelnen und auch der gesamten körperlichen Belastung am Arbeitsplatz der Flugfeldtankwarte mittels der Leitmerkmalmethoden gestaltet sich jedoch schwierig. Das Heben, Senken und Halten des Tankschlauches lässt sich mit der Leitmerkmal-methode „Heben-Halten-Tragen“ (LMM-HHT; [64]) beurteilen. Die Leitmerkmal-methode „Ziehen und Schieben“ (LMM-ZS; [53]) kann allerdings nicht angewendet werden, da diese nur für das Ziehen und Schieben von Flurförderzeugen, d. h. Lasten auf Rollen oder an Hängebahnen gültig ist. Eine Bewertung mit der Leitmerkmal-methode „Ganzkörperkräfte“ (LMM-GK) oder der Leitmerkmal-methode „Körperfortbewegung“ (LMM-KB) wäre theoretisch möglich, allerdings lässt sich mit beiden die Komplexität der Tätigkeit hinsichtlich auftretender Körperhaltungen, der ausgeübten Kräfte in Relation zur Maximalkraft sowie der biomechanischen Unterschiedlichkeit der Teiltätigkeiten nicht ausreichend abbilden [2]. Somit entfällt auch die Nutzung der zusammenfassenden belastungsartspezifischen Beurteilung über verschiedene Teiltätig-



Abb. 1 ◀ Anschließen des Tankschlauches am Flugzeug vom Boden (a), von einer Stufenstehtleiter (b), von einer Nachlaufleiter (c) und von der Hebebühne auf einem Dispenserverfahrzeug (d)

keiten eines Arbeitstages mit der LMM-Multi-E [41].

Aufgrund der genannten Komplexität des Tätigkeitsspektrums der Flugfeldtankwarte sind ferner auch Screeningverfahren wie das sogenannte NIOSH-Verfahren des National Institute for Occupational Safety and Health der USA [55, 66] oder auch ISO-Normen zum Heben und Tragen [20, 28] bzw. Schieben und Ziehen [29] im vorliegenden Zusammenhang nicht nutzbar. Insofern wurde in diesem Beitrag eine andere Vorgehensweise gewählt und als erforderlich erachtet, die im Folgenden beschrieben wird.

In ergonomischen und arbeitsmedizinischen Fragestellungen zu Belastungen des Muskel-Skelett-Systems beim Handhaben von Lasten stellen biomechanische Analysen der ausgeführten Tätigkeiten hinsichtlich der induzierten Rückenbelastungen – aufgrund der Häufigkeit von Rückenbeschwerden und -erkrankungen [5, 14] – einen typischen Ansatz einer „Engpassbetrachtung“ zur Quantifizierung der Belastung und deren Bewertung bezüglich potenzieller Überlastungen dar, so dass auf Belastungen von beispielsweise Armen, Schultern oder Beinen und Knien hier nicht abgehoben wird

[9, 13, 42, 52, 63]. Gemeinhin werden derartige Analysen seltener für verallgemeinerbare Tätigkeiten wie das beidhändig symmetrische Heben von A nach B durchgeführt als für komplexere Belastungsfälle, für die hohe oder zu hohe Belastungen vermutet werden; dazu zählen beispielsweise das manuelle Bewegen von Menschen [1, 15, 22, 37, 48, 49, 59, 65], das Schieben oder Ziehen von Betten, Rollstühlen oder Transportwagen teilweise auch über Schrägen bzw. Treppen [11, 36, 58, 60] sowie das Schaufeln von Schüttgütern [23]. Aufgrund der Spezifität der Teiltätigkeiten und Vielfalt des Tätigkeitsspektrums von Flugfeldtankwarten wurden daher auch in diesem Beitrag biomechanische Analysen für die Belastungsbewertung und Beurteilung des Überlastungsrisikos verwendet.

2. Tätigkeitsbeschreibung

Die Betankung der Flugzeuge an den deutschen Flughäfen wird durch spezialisierte Dienstleistungsunternehmen durchgeführt. Hierfür stehen Fahrzeuge auf den Rollfeldern zur Verfügung, die den Treibstoff, das Kerosin, in die Tanks der Flugzeuge pumpen. Es existieren derzeit drei unterschiedliche Fahrzeugarten:

Flugfeldtankwagen (FTKW), Dispenserverfahrzeuge (*disponere* [lat.]: verteilen) und Kombifahrzeuge, die sowohl als Flugfeldtankwagen als auch als Dispenserverfahrzeug genutzt werden können.

2.1 Fahrzeugarten

Beim Flugfeldtankwagen wird das Kerosin in einem auf dem Tankwagen befindlichen Tank zum Flugzeug transportiert und von dort über einen anzuflanschen Schlauch in das Flugzeug gepumpt. Im Gegensatz hierzu nutzt das Dispenserverfahrzeug die auf Flughäfen vorhandenen unterirdisch verlegten Rohrsysteme für Kerosin. An den Parkpositionen der Flugzeuge verfügen diese Rohrsysteme über Hydranten, an denen Schläuche zur Betankung der Flugzeuge angeschlossen werden können. Auf den Dispenserverfahrzeugen befinden sich Hilfsmittel zum Freigeben und Übertragen des Kraftstoffes sowie Einrichtungen zum Messen, Filtern und Regeln der zu betankenden Kerosinmengen. Das Dispenserverfahrzeug wird somit auf der einen Seite mit dem Hydranten verbunden, dem sogenannten Pit, und auf der anderen Seite in Analogie zum normalen Flugfeldtankwagen mit dem zu betankenden Flugzeug.

K. Schäfer · I. Schalk · F. Rokosch · M. Jäger

Muskuloskeletale Belastung beim Betanken von Flugzeugen insbesondere mit Bezug auf den unteren Rücken

Zusammenfassung

Die Tätigkeit von Flugfeldtankwarten umfasst das Heben, Senken, Halten und Ziehen von Schläuchen in unterschiedlichen Körperhaltungen. Die Abschätzung der muskuloskeletalen Belastung im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung ist für den betrieblichen Praktiker nicht anhand einfacher Methoden durchzuführen. Im Zusammenhang dieses Beitrages wurden vor Ort die äußeren Kräfte beim Handhaben der Schläuche erfasst. Die Körperhaltungen wurden anhand von Video- und Fotoaufnahmen dokumentiert. Ferner wurden die Häufigkeiten der Tätigkeiten durch das beteiligten Mitgliedsunternehmens eruiert, das zudem aufgrund der Erhebungsergebnisse erste Präventionsmaßnahmen zeitnah eingeführt

hat. Zur quantitativen Beschreibung der situativen Muskel-Skelett-Belastung wurden als Art „Engpassbetrachtung“ für die einzelnen Lastenhandhabungen Druck- und Scherkräfte am Lenden-Kreuzbein-Übergang errechnet. Daraus abgeleitete kumulative Dosiswerte für das aktuelle Tätigkeitsspektrum zeigen auf, dass eine berufliche Verursachung bandscheibenbedingter Wirbelsäulenerkrankungen nicht a priori ausgeschlossen werden kann. Dies gilt insbesondere bei Berücksichtigung eines „Worst-Case-Szenarios“ mit Annahme maximaler Belastungshöhe und -dauer der jeweiligen Tätigkeit. Dann können die arbeitstechnischen Voraussetzungen in Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren nach einer etwa 20-jährigen Tätigkeit als

gegeben angesehen werden. Präventive Ansätze sollten die Lastenhandhabungen mit den höchsten Einzelfallbelastungen betreffen: das Anheben und Absenken der Schläuche am Flugzeug. Dies könnte durch technische Hebehilfen, verbunden mit organisatorischen Maßnahmen zum ergonomischen Handhaben der Schläuche, erfolgen, wodurch Belastungsspitzen und das biomechanische Überlastungsrisiko deutlich reduziert werden könnten.

Schlüsselwörter

Gefährdungsbeurteilung · Lendenwirbelsäule · Biomechanik · Kumulative Dosis · Prävention

Musculoskeletal load when refueling aircraft with special reference to the lower back

Abstract

The work of airfield fuel attendants involves lifting, lowering, holding and pulling hoses in different postures. It is therefore not easy for the company's practitioner to estimate the musculoskeletal loadings as part of the risk assessment, using simple methods. In the context of this contribution, the external forces involved in handling the hoses were recorded on site. The postures were documented using video recordings and photographs. Furthermore, the frequencies of the respective activities were compiled by the participating company which, in addition, immediately introduced initial preventive measures. In order to describe the situative

musculoskeletal load quantitatively and thus like a bottleneck analysis, compressive and shear forces at the lumbosacral joint were calculated for the individual materials handling activities. Derived therefrom, cumulative dose values for the current load spectrum show that occupational causation of disc-related spinal diseases cannot be ruled out a priori. This applies, in particular, when considering a "worst-case scenario" with the assumption of maximum load level as well as maximum duration of the respective activity. Then, the work-related prerequisites in occupational disease evaluation procedures can be regarded as fulfilled after around 20

years of work. Preventive approaches should focus on handling activities that involve the highest individual loadings: the lifting and lowering of the tank hoses at the aircraft. Such an advantage could be achieved using technical lifting aids in combination with organisational measures for ergonomic handling the hoses so that load peaks and the biomechanical overload risk could significantly be reduced.

Keywords

Risk assessment · Lumbar spine · Biomechanics · Cumulative dose · Prevention

Der Anschluss am Flugzeug erfolgt über ein Kupplungssystem. Dieses ist entweder am Rumpf des Flugzeuges oder auf der Unterseite der Tragflächen angebracht. In Abhängigkeit von der Größe des Flugzeuges und insbesondere von der Lage und Höhe der Tragflächen wird das eine Ende des Tankschlauches entsprechend angehoben. Dies geschieht entweder vom Boden aus, über Leitern oder über eine am Fahrzeug angebrachte Hebebühne, wenn die Tragflächenhöhe es erlaubt, dass das Betankungsfahrzeug unter die Tragfläche fährt.

Bei der Betankung von der Hebebühne kann der Tankschlauch direkt auf der Hebebühne aufgenommen und angehoben werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer Deckschlauchbetankung. In anderen Fällen wird der Tankschlauch von einer Trommel abgerollt und zum Flugzeug gezogen; diese Art der Betankung heißt Trommelschlauchbetankung. Die unterschiedlichen Arten des Anschließens sind in **Abb. 1** dargestellt.

2.2 Vorgänge beim Betanken

Der Arbeitsablauf bei der Betankung gestaltet sich wie folgt: Der Flugfeld-tankwart erhält vom Schichtführer einen Auftrag und fährt mit dem Fahrzeug zum Flugzeug. Dort stellt der Tankwart einen Potenzialausgleich zwischen Fahrzeug und Flugzeug her („Erdung“), verbindet ggf. das Fahrzeug mit dem Hydrantensystem, schließt den Tankschlauch an das Flugzeug an und startet nach der Freigabe durch den Piloten den Betankungsvorgang. Während der Betankung

kontrolliert der Tankwart den Vorgang. Nach Beendigung des Betankungsvorganges löst der Flugfeldtankwart die Schlauchverbindung vom Flugzeug und ggf. vom Hydranten, entfernt das Erdungskabel vom Flugzeug, schiebt ggf. die Leiter zurück zum Fahrzeug, führt einen Kontrollgang um sein Fahrzeug durch und fährt zum Ort des nächsten Auftrags weiter.

Wenn der Tank eines Flugfeldtankwagens leer oder für den nächsten Auftrag zu wenig gefüllt ist, wird der Wagen entweder im Flughafentanklager oder über das vorhandene Rohrsystem an den vorhandenen Hydranten befüllt. Im Tanklager positioniert der Flugfeldtankwart hierzu sein Fahrzeug an der Befüllstation, stellt den Potenzialausgleich zwischen Flughafentanklager und Flugfeldtankwagen her und schließt die üblicherweise zwei vorhandenen Tankschläuche zum Befüllen des Fahrzeuges an. Anschließend überwacht der Flugfeldtankwart den Befüllvorgang, bis der Tank voll ist. Danach werden die beiden Schläuche und das Erdungskabel wieder gelöst und in die entsprechenden Halterungen abgesetzt. Nach einer Qualitätskontrolle am Ende des Befüllvorgangs ist der Flugfeldtankwagen für weitere Betankungsaufträge bereit. Bei der Betankung über das vorhandene Rohrsystem erfolgt die Befüllung analog an einem der vorhandenen Hydranten.

Neben dem Heben, Senken, Halten und Ziehen der Tankschläuche werden durchaus weitere Lastenhandhabungen durchgeführt, wie beispielsweise das kurzzeitige Tragen oder Schieben von Leitern, das Herstellen des Potenzialausgleiches etc. Diese Nebentätigkeiten werden im Rahmen der nachfolgenden Erhebungen und Bewertungen aufgrund des geringen zeitlichen Anteils sowie der damit verbundenen geringen Belastungen nicht berücksichtigt.

3. Methoden

3.1 Messtechnik

Um die muskuloskeletalen Belastungen der Flugfeldtankwarte beim Heben, Senken, Halten und Ziehen der Tankschläuche zu erfassen, wurde ein Kraftmesse-

rät mit Kraftaufnehmer der Firma ATP Messtechnik GmbH verwendet. Durch Anschluss des seriellen Ausgangs des Messgerätes an einem Laptop bestand die Möglichkeit, den Kraft-Zeit-Verlauf zu erfassen und zu speichern. Wesentliche Komponenten der Messeinrichtung sind in **Abb. 2** dargestellt.

Durch die beiden Ösen des Kraftaufnehmers wurde jeweils ein Seil geführt. Das eine Seil wurde am zu handhabenden Tankschlauch befestigt, das andere Seil wurde vom Flugfeldtankwart zum Heben, Senken, Halten und Ziehen des Schlauches benutzt. Der Messbereich dieser Anordnung beträgt 0 bis 1000 N bei einer Unsicherheit von 0,2 %. Die maximale Auflösung beträgt 0,5 N, die zeitliche Auflösung 0,1 s.

3.2 Körperhaltungen, Betankungshäufigkeiten, betriebliche Veränderungen

Die Körperhaltungen beim Handhaben der Tankschläuche sowie die jeweilige Dauer derartiger Handhabungen wurden mit Hilfe von Videoaufnahmen und Fotos dokumentiert. Ferner wurde vom Mitgliedsunternehmen eine Auswertung zur Häufigkeit der jeweiligen Betankungen zur Verfügung gestellt. Diese Messungen und Datenerhebungen erfolgten bereits im März 2009. Ein entsprechender Messbericht wurde dem Mitgliedsunternehmen zeitnah übersandt. Auf Basis der Erhebungen vor Ort wurden vom Unternehmen im Anschluss erste Präventionsmaßnahmen in Form von technischen Änderungen umgesetzt, die das Spektrum der nachfolgenden Untersuchungen zur Rückenbelastung erweitern. Im Rahmen der Erstellung dieser Publikation wurde das Mitgliedsunternehmen nochmals kontaktiert. Die Abbildungen wurden in diesem Zuge aktualisiert. Die damals erhobenen Daten entsprechen den aktuellen Gegebenheiten.

3.3 Wirbelsäulenbelastung bei Ausführung der Tätigkeiten

Bei manuellen Tätigkeiten wie Heben, Senken, Halten und Ziehen von Lasten werden Kräfte auf die Arbeitsumgebung, im vorliegenden Beitrag auf einen

Schlauch, übertragen. Um die durch diese „Aktionskräfte“ auftretenden körperlichen Belastungen zu quantifizieren und hinsichtlich potenzieller Überlastungen zu bewerten, werden in der Arbeitswissenschaft und Arbeitsmedizin vielfach die „Reaktionskräfte“ an der Wirbelsäule als Indikatoren der Rückenbelastung verwendet. Da diese körperinternen Kräfte am Lebenden und insbesondere unter den gegebenen Umständen bei der Flugzeugbetankung nicht direkt messbar sind, werden für deren Bestimmung rechnergestützte Simulationen angewandt. Die zugrundeliegenden biomechanischen Modelle erlauben auf Basis der externen Einflussgrößen wie Lastgewichte und Aktionskräfte, der Körperhaltungen und -bewegungen sowie angemessener anthropometrischer Vorgaben, die relevanten internen Kräfte beispielsweise an der unteren Lendenwirbelsäule rechnerisch zu bestimmen. Üblicherweise werden dabei die Kräfte an der untersten Bandscheibe der Wirbelsäule zwischen dem 5. Lendenwirbel und dem obersten Teil des Kreuzbeins („Sakrum“, daher „L5-S1“) angegeben. Dieser „Lenden-Kreuzbein-Übergang“ gilt als Belastungs-, Überlastungs- und Beschwerdeschwerpunkt. Zudem werden Druck- und Scherkräfte als Komponenten der über diese Bandscheibe übertragenen Kräfte unterschieden.

Die nachfolgenden Ergebnisse zu den Druck- und Scherkräften basieren auf Berechnungen mit dem biomechanischen Simulationswerkzeug „Der Dortmunder“ [34]. Dazu wurden die vor Ort erhobenen tätigkeitsspezifischen Informationen zu ausgeübten Kräften sowie zu den jeweiligen Körperhaltungen und Körperbewegungen als Eingabegrößen in das Simulationsprogramm verwendet; zudem wurde einheitlich eine Körperhöhe von 175 cm, ein Körpergewicht von 75 kg sowie die im „biomechanischen Modell“ hinterlegte Anthropometrie vorausgesetzt.

Bei den Analysen von Halte- oder Ziehvorgängen wurde die jeweilige Körperhaltung als konstant („statisch“) angenommen, unabhängig von eventuell veränderten Faktoren wie beispielsweise die Übertragungsposition der Aktionskraft an der Schulter. Dies bedeutet auch,

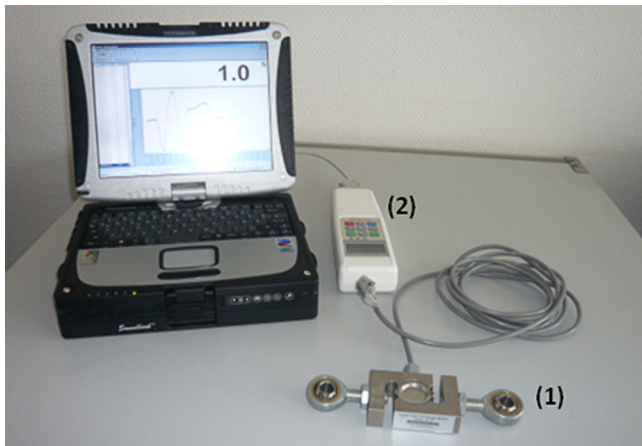


Abb. 2 ▲ Messeinrichtung für die Erfassung der Kräfte mit Kraftaufnehmer (1) und Kraftmessgerät (2)

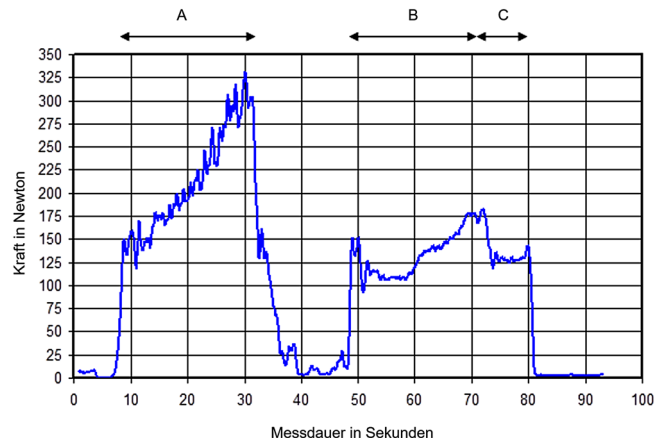


Abb. 3 ▲ Kraft-Zeit-Verlauf beim Ausziehen eines 2''-Tankschlauches auf 15 m Länge (A) sowie beim anschließenden Zurückziehen und Halten des Schlauches (B und C)

dass schrittinduzierte Schwankungen beim Ziehen unberücksichtigt bleiben. Bei Bewegungen von Körper und Last, wie beim Heben, werden die Körperhaltungen zu Beginn und Ende als ruhend angenommen; zwischenzeitliche Körperhaltungen werden mit dem Ziel einer linearen Lastspur, d. h. ohne Schwankungen oder Bögen simuliert – außer beim Anschließen des Betankungsschlauches am Tankwagen (siehe Abschn. 4.5.6), das von einer Körperdrehung um annähernd 180 Grad gekennzeichnet ist. Aus den resultierenden Zeitverläufen von Druck- und Scherkräften unter Einbeziehung der Effekte der Massenträgheit („dynamisch“) wird das jeweilige Maximum abgegriffen und als ein erstes Maß der Belastung beim betreffenden Vorgang verwendet. Die Druckkräfte werden mit einer Nachkommastelle, die deutlich geringeren Scherkräfte mit zwei Nachkommastellen in Kilonewton (1 kN = 1000 N) angegeben.

3.4 Kumulative Dosis der Wirbelsäulenbelastung

Die Kräfte an der Wirbelsäule für die einzelnen manuellen Handhabungen geben die mit der jeweiligen Situation korrespondierende interne Belastung im unteren Rücken an, die somit als situative Belastungshöhe bzw. „situative Belastungsdosis“ verstanden wird. Um zudem die Gesamtbelastung für eine Arbeitsschicht oder ein gesamtes Arbeitsleben anhand derartiger „Einzelbelastun-

gen“ zu bestimmen, werden kumulative Dosisansätze genutzt [32, 42, 56]. Diese führen die berechneten tätigkeitsspezifischen Belastungshöhen und die korrespondierenden Belastungsdauern und Auftretenshäufigkeiten zu einer weiteren Belastungskenngröße zusammen.

Für die nachfolgenden Berechnungen wird ein etablierter kumulativer Dosisansatz gewählt, der auf die Druckkräfte an der lumbosakralen Bandscheibe fokussiert, in Deutschland in arbeitsmedizinischen und arbeitswissenschaftlichen Fragestellungen genutzt wird [26, 31] und für den somit inzwischen auch Kriterien zur Bewertung von „Gesamtbelastungen“ vorliegen. Aufgrund des höheren Schädigungspotenzials hoher Kräfte im Vergleich zu beispielsweise langen Einwirkungsauern oder häufigem Auftreten geht bei diesem Dosisansatz die Höhe der Kraft F_i einer Tätigkeit i quadratisch, d. h. überproportional gegenüber der korrespondierenden Einwirkungsauer t_i in die Dosisberechnung ein:

$$\text{Tagesdosis} = \sqrt{\left(\sum F_i^2 * \frac{t_i}{T}\right) * T}$$

$$\text{Jahresdosis} = \text{Tagesdosis} \times \text{Schichten pro Jahr}$$

$$\text{Lebensdosis} = \text{Jahresdosis} \times \text{Arbeitsjahre}$$

Dabei bedeuten:

F_i = Maximum der Bandscheibendruckkraft während der Tätigkeit i ,

t_i = Dauer der Tätigkeit i (aufsummiert über die Auftretenshäufigkeit in der Schicht) und

T = Gesamtdauer der Arbeitsschicht (festgelegt auf einheitlich 8 h).

4. Ergebnisse

4.1 Kraftmessungen

Die Kräfte beim Handhaben der Tankschläuche wurden mit der im Abschn. 3.1 beschriebenen Messanordnung als Kraft-Zeit-Verlauf erfasst. In **Abb. 3** ist beispielhaft der Verlauf für das Ausziehen eines 2''-Tankschlauches ('' = Zoll) auf eine Länge von 15 m (A), das Zurückziehen zum Flugfeldtankwagen (B) und das abschließende Halten der Kupplung während des Aufrollens des Schlauches (C) grafisch dargestellt. Zum Aufrollen wird die Schlauchtrommel am FTKW mittels Motor angetrieben und somit nicht von Hand gezogen und aufgerollt. Die Steuerung hierzu erfolgt durch den Flugfeldtankwart am Fahrzeug.

Wie in **Abb. 3** dargestellt, nimmt die Zugkraft beim Ausziehen des Tankschlauches in diesem Beispiel von etwa 150 N am Anfang bis zu etwa 330 N bei der maximalen Ausziehlänge von 15 m zu. Beim Zurückziehen steigt die Zugkraft ebenfalls an, hier von anfänglich etwa 100 N auf etwa 180 N. Das Halten der Kupplung beim Aufrollen des Tankschlauches ist hier mit einer Kraft von etwa 130 N verbunden.

In **Tab. 1** sind die gemessenen Kräfte für die untersuchten Tätigkeiten zusammengefasst. Dabei wurden auch Fahr-

Tab. 1 Messtechnisch erfasste Kräfte

	Messwerte
Befüllen und Anschließen am Pit	
Anschließen eines 2,5''-Tankschlauches zum Befüllen des FTKW	130 N
Heben eines 3''-Hydrantenfüllschlauches zum Befüllen des FTKW	220 N
Verziehen des Hydranteneingangsschlauches zum Pit auf etwa 5 m	Bis 170 N
Anschließen der Schläuche am Flugzeug	
Anheben eines 2''-Tankschlauches an der Tragfläche	200 N
Anheben des Deckschlauches auf dem FTKW	180 N
Anheben des Deckschlauches auf dem Dispenserfahrzeug	220 N
Anheben des Schlauches, der an der zweiachsigen Leiter befestigt ist und über eine Zughilfe verfügt	120 N
Verziehen der Schläuche inklusive Halten beim Aufrollen	
Ausziehen eines 2''-Tankschlauches auf 10 m	150 bis 300 N
Ausziehen eines 2''-Tankschlauches auf 10 m – „schlechtes Fahrzeug“	100 bis 330 N
Ausziehen eines 2,5''-Tankschlauches auf 10 m	200 bis 480 N
Ausziehen eines 2''-Tankschlauches auf 15 m	150 bis 330 N
Ausziehen eines 2''-Tankschlauches auf 15 m – „schlechtes Fahrzeug“	100 bis 390 N
Ausziehen eines 2,5''-Tankschlauches auf 15 m	200 bis 620 N
Zurückziehen eines 2''-Tankschlauches	100 bis 180 N
Zurückziehen des 2''-Tankschlauches – „schlechtes Fahrzeug“	130 bis 200 N
Zurückziehen eines 2,5''-Tankschlauches	150 bis 340 N
Halten der Kupplung beim Aufrollen eines 2''-Tankschlauches	130 N
Halten der Kupplung beim Aufrollen eines 2,5''-Tankschlauches	150 N

zeuge berücksichtigt, die nach Aussagen der Beschäftigten subjektiv eine höhere Belastung mit sich bringen. In der Tabelle sind diese Fahrzeuge als „schlechte Fahrzeuge“ ausgewiesen.

4.2 Körperhaltungen

Anhand der durchgeführten Video- und Fotoaufnahmen wurden den Tätigkeiten beim Ausziehen des Tankschlauches, beim Anflanschen ans Flugzeug, beim Zurückziehen des Schlauches zum Flugfeldtankwagen und beim abschließenden Halten während des Aufrollens des Schlauches typische Körperhaltungen zugeordnet, die nachfolgend in [Abb. 4](#) dargestellt sind.

Beim Ausziehen des Schlauches zum Flugzeug legte sich der Flugfeldtankwart üblicherweise den Schlauch über die Schulter und zog ihn bis zur Einfüllöffnung am Flugzeug ([Abb. 4a](#)). Das Anflanschen des Tankschlauches an der Unterseite der Tragfläche geschah üblicherweise überkopf, unabhängig davon, ob dies vom Boden, von einer Leiter oder von der Hebebühne aus durchgeführt wurde ([Abb. 4b](#)). Beim Zurückziehen

fasste der Flugfeldtankwart den Schlauch üblicherweise mit einer Hand und zog diesen seitlich des Körpers zurück zum FTKW ([Abb. 4c](#)). Während des automatisierten Einziehens des Schlauches am Ende des Betankungsvorgangs nahm der Tankwart eine Körperhaltung mit aufrechtem Oberkörper an, hielt die Kupplung neben dem Körper „am hängenden Arm“ und bediente mit der anderen Hand einen Hebel für das motorisch unterstützte Einrollen ([Abb. 4d](#)).

4.3 Handhabungsdauern sowie Häufigkeiten

Typische Entfernungen beim Ausziehen der Tankschläuche sind nach den durchgeführten Videoaufnahmen, den Erhebungen vor Ort und den Aussagen der Beschäftigten in etwa 10 m bei der Trommelschlauchbetankung. Hieraus resultieren Dauern für das Ausziehen des Tankschlauches zum Flugzeug und für das Zurückziehen zum Flugfeldtankwagen im Bereich von jeweils etwa 10 s ([Tab. 2](#)). In wenigen Ausnahmefällen werden die Schläuche auch weiter bis maximal 15 m ausgezogen.

Die korrespondierenden Dauern für das Ziehen liegen dann im Bereich von etwa 15 s. Beim Anschließen oder Abnehmen der Kupplung am Flugzeug wird das Schlauchende typischerweise etwa 2–5 s gehalten, davon überwiegend überkopf. Dies betrifft sowohl Trommelschlauch- als auch Deckschlauchbetankungen. Nach dem Zurückziehen des Tankschlauches zum Flugfeldtankwagen wird die Kupplung beim automatischen Einrollen des Tankschlauches nochmals etwa 15 s mit einer Hand gehalten. Beim Anschließen des Hydranteneingangsschlauches wird dieser typischerweise zwischen 5 und 10 s vom Fahrzeug zum Hydranten gezogen und nach der Betankung wieder zurückgezogen. Das Anschließen der Befüllschläuche zum Betanken der Flugfeldtankwagen ist mit einer Hebe- und Haltedauer je Vorgang von etwa 5 s verbunden.

Auf Basis der vom Unternehmen erstellten statistischen Auswertungen der Anzahl der Betankungsvorgänge an den verschiedenen Flughäfen werden pro Mitarbeiter durchschnittlich etwa 10 bis 15 Flugzeugbetankungen pro Tag vorgenommen. Je nach örtlichen Gegebenheiten sind dies entweder Deckschlauch- oder Trommelschlauchbetankungen oder auch eine Mischung aus Deckschlauch- und Trommelschlauchbetankungen.

Zusätzlich werden – in Abhängigkeit der lokalen Bedingungen vor Ort – an den Flughäfen entweder Hydranteneingangsschläuche zum Betanken der Flugfeldtankwagen oder zum Anschluss der Dispenserfahrzeuge verwendet, oder die Flugfeldtankwagen werden mit einem Befüllschlauch im Flughafentanklager etwa 5- bis 10-mal pro Tag betankt.

Aufgrund der vorgenannten Vorgangsdauern und -häufigkeiten ergeben sich die in [Tab. 2](#) zusammengestellten typischen arbeitstäglichen (Gesamt-)Belastungsdauern für die verschiedenen Tätigkeiten, wobei für die tätigkeits-spezifischen (Einzel-)Dauern jeweils die höchsten Werte angegeben sind. Insofern stellen die Angaben in der Tabelle eher die maximalen kumulierten Belastungsdauern pro Arbeitstag dar.



Abb. 4 ◀ Typische Körperhaltungen beim Ausziehen des Tankschlau­ches zum Flugzeug (a), beim Anflanschen des Tankschlau­ches am Flugzeug (b), beim Zurückziehen des Tankschlau­ches zum Flugfeldtankwagen vor dem nachfolgenden Einrollen des Schlauches (c) sowie beim Halten der Kupplung während des motorisierten Aufrollens des Schlauches (d)

4.4 Erhebungsbedingt umgesetzte Präventionsmaßnahmen

Das Zurückziehen der Schläuche wurde automatisiert, so dass das „manuelle“ Zurückziehen des Schlauches zum FTKW entfällt. Dies wird mit Hilfe eines zusätzlichen Buttons am Totmannschalter, der das Zurückziehen und Aufrollen elektrisch aktiviert, realisiert.

Die „schlechten“ Fahrzeuge kommen so nicht mehr zum Einsatz, da auch bei diesen Fahrzeugen die Trommelschläuche mit Schlauchschutzschalen („Spiral Guards“) versehen wurden, um die Reibung auf dem Boden zu verringern. Außerdem werden die Tankschläuche, dort

wo möglich, nur noch auf eine Länge von maximal 10 m ausgezogen. Hierfür wurden die Beschäftigten entsprechend unterwiesen und zugehörige Betriebsanweisungen erstellt.

Darüber hinaus werden im Unternehmen mittlerweile ausschließlich 2''-Tankschläuche verwendet. Die schweren Tankschläuche mit 2,5'' Durchmesser werden nicht mehr eingesetzt.

4.5 Wirbelsäulenbelastung bei Ausführung der Tätigkeiten

4.5.1 Ausziehen der Tankschläuche

Das Ziehen eines auf der Schulter liegenden Tankschlau­ches stellt eine Kombina-

tionsbelastung von horizontalen und vertikalen Kräften dar. Wie in [Abb. 4a](#) im linken Teil zu sehen ist, wirkt die Zugkraft am Anfang des Ausziehens nahezu horizontal. Mit zunehmender Schlauchlänge steigt der vertikale Anteil entsprechend an ([Abb. 4a](#), rechter Teil). Unabhängig davon ist das (anteilige) Gewicht des auf der Schulter liegenden Schlauches zu berücksichtigen; dies wurde anhand der Erhebungen einheitlich mit 15 kg angenommen.

In einem ersten Schritt werden die Körperhaltungen in das Simulationswerkzeug eingegeben ([Abb. 5](#)), die entsprechend den vorliegenden Fotos nachgebildet wurden; der Kraftüber-

Tab. 2 Typische tätigkeitsspezifische Belastungshäufigkeiten und maximale Belastungsdauern sowie kumulierte Dauern je Arbeitstag je Mitarbeiter

	Häufigkeit pro Tag	Kumulierte Dauer pro Tag
Je Betankungsvorgang	5-mal	
5 s Heben und Halten zum Anschließen		25 s
5 s Senken und Halten beim Abnehmen		25 s
Trommelschlauchbetankung 10 m		
Je Betankungsvorgang	7-mal	
10 s Ausziehen		70 s
5 s Heben und Halten zum Anschließen		35 s
5 s Senken und Halten beim Abschießen		35 s
10 s Zurückziehen		70 s
15 s Halten beim Aufrollen		105 s
Trommelschlauchbetankung Ausnahme 15 m		
Je Betankungsvorgang	1-mal	
15 s Ausziehen		15 s
5 s Heben und Halten zum Anschließen		5 s
5 s Senken und Halten beim Abschießen		5 s
15 s Zurückziehen		15 s
15 s Halten beim Aufrollen		15 s
Hydranteneingangsschlauch		
Je Betankungsvorgang	7-mal	
10 s zum Pit ziehen		70 s
10 s zum Fahrzeug zurückziehen		70 s
Befüllschläuche, je 2 Schläuche		
Je Betankungsvorgang	4-mal	
5 s Heben und Halten zum Anschließen		20 s
5 s Heben und Halten beim Abschießen		20 s

tragungspunkt an der Schulter wurde abgeschätzt. Dazu zeigt **Abb. 5** die Körperhaltungen am Anfang (oben) und am Ende eines Ausziehvorgangs (unten) jeweils von der Seite (links), oben (Mitte) und hinten (rechts). In **Abb. 5** ist auch die Lage des Kraftangriffspunktes an der Schulter zu erkennen. Zu Beginn des Ausziehens liegen die externen Kräfte im Bereich von 100 bis 200 N, am Ende beim Ausziehen auf 10 bzw. 15 m bei einem 2"-Tankschlauch bei etwa 300 bzw. 330 N, beim „schlechten Fahrzeug“ bei etwa 330 bzw. 390 N und beim 2,5"-Tankschlauch bei etwa 480 bzw. 620 N (siehe auch **Tab. 1**).

Auf Basis der oben beschriebenen Körperhaltungen und der resultierenden Lastangriffspunkte werden im zweiten Schritt die vorgenannten gemessenen externen Kräfte nach Betrag und Richtung in das Modell eingepreßt. Der Aktionskraftwinkel wurde für den Be-

wegungsbeginn zu 0 bis 10° sowie für das Bewegungsende zu 20 bis 30° angenommen, für die Position der Kraftübertragung an der Schulter wurde entweder ein Drittel oder die Hälfte des seitlichen Abstands zwischen Wirbelsäule und Oberarm-Schulter-Gelenk gewählt (Fall A bzw. B). Zur Vereinfachung werden als Scherkräfte in diesem Beitrag die Werte der Komponente in Vor-Rück-Richtung wiedergegeben („sagittale Scherkraft“), da die seitliche Scherung („laterale Scherkraft“) bei den vorliegenden Arbeitssituationen deutlich geringer ausgeprägt ist und daher hier nicht weiter betrachtet wird.

In **Tab. 3** sind die errechneten Druck- und Scherkräfte an der Wirbelsäule (rechter Tabellenteil) für die am Anfang und Ende des Ausziehens der Tankschläuche gemessenen Aktionskräfte von etwa 100 bis 200 N (Anfang: oberer Tabellenteil) bzw. von etwa 300

bis 500 N sowie für das Extrem von 620 N (Ende: unterer Tabellenteil) für typische Bedingungen des Aktionskraftwinkels (oben 0–10°; unten 20–30°) und seitlicher Position der Aktionskraftübertragung an der Schulter (Fall A/B) zusammengefasst. Zudem sind jeweils die Ergebnisse für eine Referenzsituation vorangestellt, bei der der Tankschlauch auf der Schulter aufliegt (15 kg), aber noch keine Ziehkräfte auf ihn ausgeübt werden (Aktionskraft 0 N), sodass der Aktionskraftwinkel als irrelevant anzusehen ist.

Die in **Tab. 3** aufgeführten Reaktionskräfte an der Wirbelsäule zeigen für die Referenzsituation zu Vorgangsbeginn (Aktionskraft durch Ziehen 0 N, siehe 1. Ergebniszeile) Druckkraftwerte von 1,7 und 1,9 kN für die Fälle A bzw. B, bei denen das anteilige Schlauchgewicht von 15 kg seitlich dichter bzw. etwas weiter entfernt von der Wirbelsäule auf der Schulter aufliegt. Dies bedeutet, dass die weniger ausgeprägte Asymmetrie in Fall A prinzipiell zu einer etwas niedrigeren Druckkraft führt als in Fall B; analog gilt dies auch für die berechneten Scherkräfte an der lumbosakralen Bandscheibe (0,39 zu 0,41 kN).

Bei Aktionskräften von 100 bis 200 N und Aktionskraftwinkeln von 0 bis 10° ergeben sich im Vergleich zur Referenzsituation durchgehend niedrigere Druck- und Scherkraftwerte um 1 kN (0,7–1,3 kN) bzw. um 0,3 kN (0,27–0,34 kN). Dies ist darauf zurückzuführen, dass zu Vorgangsbeginn eine Körperhaltung mit leichter Rumpfvorneigung unterstellt wurde und das Ziehen des Schlauches nach vorn eine den Oberkörper aufrichtende und somit belastungsmindernde Wirkung aufweist: Die Trägheit des Schlauches „zieht den Oberkörper nach hinten bzw. hinten-unten“. Mit zunehmender Aktionskraft nimmt dieses aufrichtende Moment für den Oberkörper zu, mit zunehmendem Aktionskraftwinkel relativ zur Horizontalen nimmt die aufrichtende Wirkung ab. Letzteres ist auf die Verringerung des Hebelarms der Aktionskraft zur Bezugsbandscheibe zurückzuführen, der bei horizontalem Ziehen größer ist als bei schrägem Ziehen nach vorn-oben. Bei stärkerer Asymmetrie der Belastungssituation durch weiter

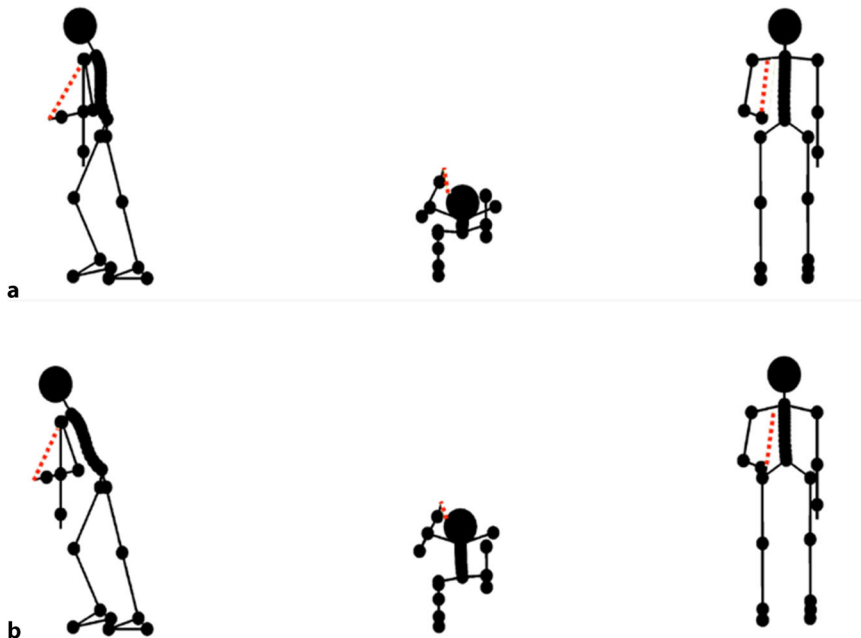


Abb. 5 ▲ Stilisierte Körperhaltungen zu Beginn (a) und am Ende (b) des Ausziehens eines Tankschlauchs in Form von Linienzugdarstellungen der Körperteile von links, oben und hinten mit Markierung des Schlauchsegmentes (*gestrichelt*) zwischen der linken Hand und der linken Schulter. (Bildschirmfotos aus Simulation)

seitlich angreifender Aktionskraft (Fall B vs. A) sind sowohl die Druck- als auch die Scherkräfte marginal bis geringfügig höher, wenn auch durch die Angabe gerundeter Werte in der [Tab. 3](#) nicht stets erkennbar.

Die Reaktionskräfte an der Wirbelsäule gegen Ende des Ziehvorgangs (siehe unterer Teil von [Tab. 3](#)), für den im Vergleich zum Anfang eine Körperhaltung mit etwas stärker ausgeprägter Rumpfvorneigung ([Abb. 4 und 5](#)) sowie höhere Aktionskräfte beim Ziehen und schrägere Zugrichtungen des Schlauches nach hinten-unten unterstellt wurden, sind insgesamt höher als die zu Vorgangsbeginn. Für die Referenzsituation ohne Aktionskraft durch das Ziehen (0N) wurden daher höhere Werte für Druck- und Scherkraft sowohl für Fall A als auch Fall B als zu Vorgangsbeginn berechnet. Die für zunehmende Aktionskraft und zunehmenden Aktionskraftwinkel aufgezeigten Tendenzen zu Vorgangsbeginn lassen sich auch für die hier zu beschreibenden Ergebnisse erkennen: Mit zunehmendem Betrag der Aktionskraft tritt bei kleinerem Aktionskraftwinkel (20°, 25°) zunächst eine Belastungsminderung auf, für sehr hohe Kräfte kehrt sich die Belastungsminderung in eine Er-

höhung um. Dies ist im Wesentlichen auf höhere Aufricht- als Beugemomente für den Oberkörper zurückzuführen. Bei größerem Aktionskraftwinkel tritt eine derartige Belastungsminderung mit zunehmender Aktionskraft nicht auf: Bei Fall A beträgt die Druckkraft auf L5-S1 durchgängig 2,4 kN, bei Fall B beträgt sie zunächst 2,7 kN und erreicht 3,1 kN bei dem Extrem von 620 N Aktionskraft (siehe letzte Zeile). Die Scherkräfte an der Bezugsbandscheibe weisen in Abhängigkeit von Aktionskraftbetrag und -winkel ein ähnliches Verhalten wie die Druckkräfte auf, wenn auch die Werte niedriger als die der Druckkraft sind.

4.5.2 Anheben der Kupplung am Flugzeug

Für das Anheben der Kupplung zum Anschluss an die Tragfläche oder – bei kleineren Flugzeugen – am Rumpf des Flugzeuges wurden Kräfte von etwa 200 N ermittelt ([Tab. 1](#)). Der Tankschlauch bei der Betankung an der Tragfläche wird üblicherweise vor dem Körper in etwa Taillenhöhe aufgenommen und bis zur Tragfläche angehoben, sodass die Kupplung dann überkopf an der Befüllereinrichtung unter der Tragfläche fixiert wird; am Vorgangsende werden die Hände an den

Kupplungsgriffen in etwa Stirnhöhe gehalten, und der Kupplungsflansch wird dann überkopf an der Befüllereinrichtung unter der Tragfläche fixiert (siehe auch [Abb. 4b](#)). Die Kupplung wird üblicherweise körpernah angehoben, und typischerweise lassen sich drei Hebearten unterscheiden: symmetrisch, d.h. körpermittig an Vorgangsanfang und -ende ([Abb. 6a](#)), aus unten-seitlicher zu oben-körpermittiger Position mit Verdrehung des Rumpfes ([Abb. 6b](#)) und aus unten-seitlicher zu oben-körpermittiger Position durch Armbewegung ([Abb. 6c](#)).

Die für die Berechnungen der Bandscheibenkräfte herangezogenen Körperbewegungen zwischen Beginn der Bewegung bei Kupplungsaufnahme und Ende beim Anschließen sind in [Abb. 6](#) anhand von Körperhaltungsskizzen dargestellt. Unter Berücksichtigung beidseits symmetrischer Körperhaltungen und mittiger Schlauchpositionen während des gesamten Bewegungsverlaufs ([Abb. 6a](#)) wurden bei Einbeziehung der „dynamischen Effekte“ für Hebedauern von typischerweise etwa 2, 1,5 oder 1 s maximale Druckkräfte von etwa 2,1 bis 2,8 kN bestimmt, die korrespondierenden Scherkräfte betragen um 0,4 kN (0,37–0,43 kN). Wird der Schlauch vor dem Körper aufgenommen und beim Heben eine Rumpfdrehung überlagert ([Abb. 6b](#)), sind die Maximalwerte ein wenig erhöht und betragen etwa 2,2 bis 2,8 kN bei den Druckkräften auf die Bezugsbandscheibe, die Scherkräfte erreichen bis etwa 0,5 kN (0,39–0,49 kN). Bei seitlicher Schlauchaufnahme und mittiger Zielposition ([Abb. 6c](#)) ohne begleitende Rumpfdrehung ergeben sich deutlich höhere Werte mit Bereichen von etwa 3,9 bis 4,8 kN bzw. 0,6 bis 0,7 kN (0,60–0,69 kN). Für das Abnehmen und nachfolgende Senken der Kupplung wurden identische Körperhaltungen und -bewegungen, jedoch in umgekehrter Reihenfolge bzw. Bewegungsrichtung unterstellt – was zu gleichen Belastungswerten führt.

4.5.3 Zurückziehen des Tankschlauches zum Flugfeldtankwagen

Beim Zurückziehen des Schlauches wird dieser üblicherweise einhändig neben

Tab. 3 Reaktionskräfte an der Wirbelsäule in Abhängigkeit der gemessenen Aktionskräfte beim Ziehen der Tankschläuche

Be- trag	Win- kel	Reaktionskraft an der Wir- belsäule			
		Druckkraft auf L5-S1 (kN)		Scherkraft auf L5-S1 (kN)	
		Fall A	Fall B	Fall A	Fall B
Am Anfang des Ziehvorgangs					
0 N	Irrele- vant	1,7	1,9	0,39	0,41
100 N	0°	1,1	1,1	0,31	0,32
	5°	1,1	1,2	0,32	0,33
	10°	1,2	1,3	0,33	0,34
150 N	0°	0,8	0,8	0,27	0,27
	5°	0,8	0,8	0,28	0,28
	10°	0,9	0,9	0,29	0,30
200 N	0°	0,7	0,8	0,27	0,28
	5°	0,8	0,9	0,28	0,29
	10°	0,8	1,0	0,29	0,31
Gegen Ende des Ziehvorgangs					
0 N	Irrele- vant	2,4	2,7	0,51	0,54
300 N	20°	2,0	2,2	0,51	0,53
	25°	2,2	2,5	0,54	0,57
	30°	2,4	2,7	0,58	0,61
330 N	20°	1,9	2,1	0,51	0,53
	25°	2,2	2,4	0,55	0,58
	30°	2,4	2,7	0,58	0,62
400 N	20°	1,8	2,1	0,51	0,53
	25°	2,1	2,4	0,55	0,58
	30°	2,4	2,8	0,60	0,64
500 N	20°	1,8	2,3	0,52	0,59
	25°	2,0	2,4	0,56	0,61
	30°	2,4	2,8	0,62	0,66
620 N	20°	2,3	2,9	0,61	0,69
	25°	2,3	3,0	0,62	0,71
	30°	2,4	3,1	0,65	0,73

dem Körper beim Gehen nach vorne gezogen (Abb. 4c). Beim Zurückziehen des 2"-Tankschlauches traten Aktionskräfte zwischen 100 und 180 N auf (Tab. 1). Die hohen Werte von 180 N sind auf das Zurückziehen der auf 15 m ausgezogenen Tankschläuche zurückzuführen, so dass diese Werte als obere Abschätzung für 2"-Schläuche anzusehen sind. Beim Zurückziehen des 2,5"-Schlauches wurden Aktionskräfte bis etwa 340 N gemessen.

Für eine aufrechte Körperhaltung und horizontal angenommene Zugrichtung

(0°) errechnen sich die in Tab. 4 zusammengefassten Druck- und Scherkräfte an der Bezugsbandscheibe. Für eine leicht schräge Zugrichtung nach vorn-oben von beispielsweise 10° ergeben sich aufgrund des nach vorn gehaltenen kraftinvolvierten Arms und des daher etwas kürzeren Hebelarms der Aktionskraft zu L5-S1 bis etwa 10 % geringere Bandscheibendruckkräfte und bis etwa 20 % geringere Bandscheibenscherkräfte. Daher wurden im Sinne einer protektiven Bewertung die Werte für horizontales Ziehen in den weiteren Analyseschritten übernommen.

4.5.4 Halten der Kupplung

Für das abschließende Halten der Kupplung während des automatisierten Einziehens des Schlauches wurden Kräfte bis etwa 150 N messtechnisch erfasst (Tab. 1). Dabei ist die Körperhaltung aufrecht, die Kupplung wird neben dem Körper „am hängenden Arm“ gehalten (Abb. 4d). Unter Berücksichtigung dieser Körperhaltung und der gemessenen Kräfte errechnen sich Bandscheibendruck- und -scherkräfte von 1,8 bzw. 0,34 kN.

4.5.5 Verziehen des Hydranteneingangsschlauches

Beim Verziehen des Hydranteneingangsschlauches wurden Zugkräfte bis etwa 170 N ermittelt (Tab. 1). Da die Schläuche ebenfalls einhändig neben dem Körper gezogen werden, wurden die zuvor gemachten Annahmen beim einhändigen Ziehen des Tankschlauches zugrunde gelegt (siehe Abschn. 4.5.3). Insofern ist von maximalen Bandscheibendruckkräften von etwa 2 kN und Scherkräften von 0,37 kN auszugehen.

4.5.6 Anschließen des Betankungsschlauches am Flugfeldtankwagen

Beim Anschließen des 2,5"-Tankschlauches zum Betanken der FTKW wurden Gewichtskräfte von 130 N messtechnisch erfasst (Tab. 1). Die Körperhaltung bei der Aufnahme des Schlauches war nahezu aufrecht. Die Kupplung des Schlauches wird dann durch eine Körperdrehung des Betankenden um etwa 180 Grad an den FTKW bewegt und danach bei einer Körperhaltung mit leichter, aber deutlich

erkennbarer Vor- und Seitneigung des Rumpfes angeschlossen. Die maximale Druckkraft für diese Tätigkeit wurde zu etwa 3,3 kN errechnet, das Scherkraftmaximum zu etwa 0,58 kN.

4.5.7 Zusammenfassung der Reaktionskräfte an der Wirbelsäule

Gemäß den Ausführungen in den Abschn. 4.5.1–4.5.6 – insbesondere zu den jeweiligen Körperhaltungen – wurden allen messtechnisch erfassten Aktionskräften beim Heben, Senken, Halten und Ziehen entsprechende Reaktionskräfte an der Wirbelsäule in Form der Druck- und Scherkräfte an der untersten Bandscheibe der Lendenwirbelsäule (L5-S1) als Maß der Rückenbelastung zugeordnet. In Tab. 5 sind die erhaltenen Maximalwerte der Bandscheibendruck- und -scherkräfte für die einzelnen Tätigkeiten zusammengefasst, die sich auf Basis der in Tab. 1 aufgeführten Messwerte der Aktionskraft ergeben; bei Aktionskraftbereichen wurde die jeweilige obere Bereichsgrenze angenommen. Die Darstellung und Gruppierung von Tab. 5 orientiert sich an Tab. 2, in der die jeweiligen Belastungsdauern je Tätigkeit und Arbeitstag zusammengefasst wurden. Sind in den beiden rechten Spalten von Tab. 5 Bereiche für die Reaktionskräfte an der Wirbelsäule angegeben, so resultieren diese entweder aus verschiedenen Arbeitsweisen beim Anheben der Kupplung am Flugzeug (siehe Abschn. 4.5.2) oder aus unterschiedlich angenommenen Aktionskraftwinkeln (20–30°) und Kraftübertragungspositionen an der Schulter (Fall A/B) beim Ausziehen der Tankschläuche (siehe Abschn. 4.5.1).

4.6 Kumulative Dosis der Wirbelsäulenbelastung

In Tab. 6 und 7 sind alle Einzeltätigkeiten sowie die jeweils korrespondierenden kumulierten Expositionsdauern pro Arbeitstag und die ermittelten maximalen Reaktionskräfte an der Wirbelsäule aufgeführt. Tab. 6 enthält die Werte für die Tätigkeiten vor Durchführung der Präventionsmaßnahmen durch das Unternehmen und Tab. 7 die Werte für die Tätigkeiten nach Durchführung der Präven-

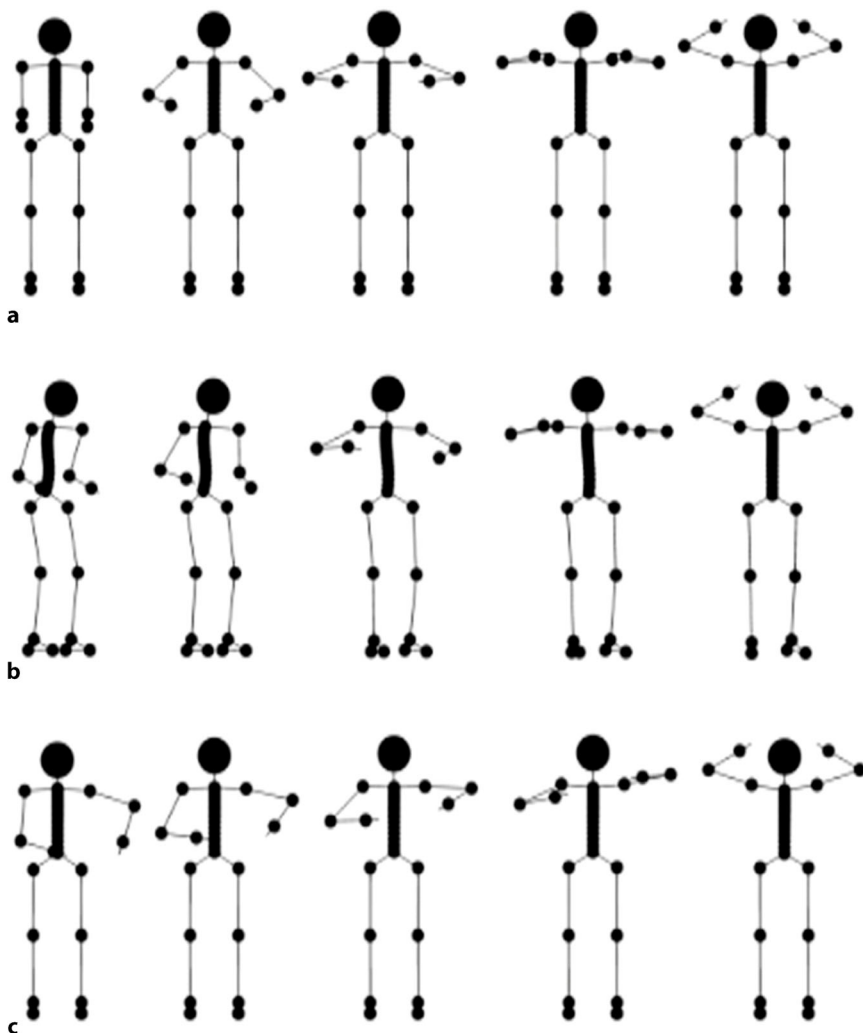


Abb. 6 ▲ Stilisierte Körperhaltungen in der Sicht von hinten beim Betanken eines Flugzeuges an der Tragfläche bei Kupplungsaufnahme in Hüfthöhe und Anflanschen überkopf mit den Händen in Stirnhöhe für symmetrisches Heben (a) sowie asymmetrisches Heben aus seitlicher Position mit Körperdrehung (b) oder durch Armbewegung (c). (Bildschirmfotofolgen aus Simulation)

tionsmaßnahmen. In einer Art konservativer Abschätzung wurden dazu, wie bei der Zusammenstellung der tätigkeitsspezifischen maximalen kumulierten Belastungsdauern (■ Tab. 2; Abschn. 4.3), die Maximalwerte für die tätigkeitsspezifische Bandscheibendruckkraft und ggf. deren obere Bereichsgrenze verwendet (■ Tab. 5; Abschn. 5.7).

Für die Berechnung der Dosiswerte vor und nach Durchführung der „erhebungsbedingten“ Präventionsmaßnahmen (■ Tab. 6 und 7) wurden die in Abschn. 4.4 aufgeführten Gestaltungsänderungen wie folgt berücksichtigt: Zunächst wurde das Zurückziehen der Schläuche aus der Dosisberechnung entfernt, da dies durch die zwischenzeitliche

Einführung einer Automatisierung nicht mehr vorkommt. Aufgrund der höheren körperlichen Belastung wurden im Rahmen der Präventionsmaßnahmen 2,5"-Schläuche durch 2"-Schläuche ersetzt. In der Berechnung wurden daher die maximalen Kraftwerte beim Ausziehen der Schläuche mit 2,5" Durchmesser durch die für das Ausziehen von 2"-Schläuchen ersetzt. Als weitere Maßnahme werden die Tankschläuche nun nicht mehr auf 15 m, sondern lediglich bis auf 10 m ausgezogen. So existiert nach Umsetzung der Präventionsmaßnahmen die Ausnahme „Ausziehen auf 15 m“ nicht mehr; diese Tätigkeit wurde aus der Dosisberechnung entfernt. Das Tätigkeitsspektrum der vormaligen

Tab. 4 Reaktionskräfte an der Wirbelsäule in Abhängigkeit der gemessenen Aktionskräfte beim horizontalen Zurückziehen der Tankschläuche zum Flugfeldtankwagen

Aktionskraft an den Händen	Druckkraft auf L5-S1	Scherkraft auf L5-S1
100 N	1,4 kN	0,29 kN
150 N	1,8 kN	0,34 kN
180 N	2,1 kN	0,38 kN
200 N	2,2 kN	0,40 kN
300 N	3,1 kN	0,51 kN
340 N	3,4 kN	0,56 kN

„Ausnahme“ der Handhabung von 2,5"-Schläuchen entspricht nun der „normalen“ Trommelschlauchbetankung mit 2"-Schläuchen.

Für die in den ■ Tab. 6 und 7 errechneten Jahresdosiswerte wurde angenommen, dass die aufgelisteten Belastungen arbeitstäglich, also an 220 Schichten pro Jahr, ausgeführt werden.

Auf Basis der vorgenannten Erhebungen, Berechnungen und Annahmen errechnet sich eine Tagesdosis von 3,7 kNh (Kilonewtonstunden = 1000 Newtonstunden) und eine Jahresdosis von etwa 800 kNh für die Tätigkeiten vor Durchführung der „erhebungsbedingten“ Präventionsmaßnahmen. Durch die umgesetzten Präventionsmaßnahmen konnte die Tagesdosis auf 3,2 kNh und die Jahresdosis auf etwa 700 kNh reduziert werden. Daraus ergeben sich bei 20-jähriger Tätigkeit Lebensdosen von etwa 16 und 14 MNh (Meganewtonstunden = 1 Mio. Newtonstunden) sowie bei 30-jähriger Ausführung von etwa 24 und 21 MNh für die Bedingungskonstellationen vor bzw. nach der Umgestaltung.

Unter der Annahme, dass nach den umgesetzten Präventionsmaßnahmen ausschließlich Deckschlauch- bzw. nur Trommelschlauchbetankungen vorgenommen werden würden, errechnen sich für diese beiden theoretischen Extremfälle Tagesdosen von 2,9 kNh für ausschließliche Deckschlauchbetankungen bzw. von 3,4 kNh für exklusive Trommelschlauchbetankungen. Hieraus resultierten korrespondierende Jahresdosen von etwa 630 bzw. 750 kNh. Für die Lebensdosen ergäben sich dann bei

Tab. 5 Zusammenfassung der Maximalwerte der Reaktionskräfte an der Wirbelsäule für die verschiedenen Tätigkeiten auf Basis der gemessenen Aktionskräfte (Tab. 1)

Tätigkeit	Bezug	Messwert der Akti- onskraft in N	Maximalwerte der Reaktionskräfte an der Wirbelsäule	
			Druckkraft auf L5-S1 (kN)	Scherkraft auf L5-S1 (kN)
Deckschlauchbetankung				
Heben u. Halten zum Anschließen	Abschn. 4.5.2	200	2,1–4,8	0,37–0,69
Senken u. Halten beim Abnehmen	Abschn. 4.5.2	200	2,1–4,8	0,37–0,69
Trommelschlauchbetankung 10 m				
2'' Ausziehen	Tab. 3	300	2,0–2,7	0,51–0,61
2,5'' Ausziehen	Tab. 3	480	1,8–2,8	0,52–0,66
Heben u. Halten zum Anschließen	Abschn. 4.5.2	200	2,1–4,8	0,37–0,69
Senken u. Halten beim Abschließen	Abschn. 4.5.2	200	2,1–4,8	0,37–0,69
2'' Zurückziehen	Tab. 4	180	2,1	0,38
2,5'' Zurückziehen	Tab. 4	340	3,4	0,56
Halten beim Aufrollen	Abschn. 4.5.4	150	1,8	0,34
Trommelschlauchbetankung Ausnahme 15 m				
2'' Ausziehen	Tab. 3	330	1,9–2,7	0,51–0,62
2,5'' Ausziehen	Tab. 3	620	2,3–3,1	0,61–0,73
Heben u. Halten zum Anschließen	Abschn. 4.5.2	200	2,1–4,8	0,37–0,69
Senken u. Halten beim Abschließen	Abschn. 4.5.2	200	2,1–4,8	0,37–0,69
2'' Zurückziehen	Tab. 4	180	2,1	0,38
2,5'' Zurückziehen	Tab. 4	340	3,4	0,56
Halten beim Aufrollen	Abschn. 4.5.4	150	1,8	0,34
Hydranteneingangsschlauch				
Zum Pit ziehen	Abschn. 4.5.5	170	2,0	0,37
Zum Fahrzeug zurückzie- hen	Abschn. 4.5.5	170	2,0	0,37
Befüllschläuche, je 2 Schläuche				
Heben u. Halten zum Anschließen	Abschn. 4.5.6	130	3,3	0,58
Heben u. Halten beim Abschließen	Abschn. 4.5.6	130	3,3	0,58

20-jähriger Tätigkeit etwa 13 MNh für reine Deckschlauchbetankungen bzw. etwa 15 MNh für ausschließliche Trommelschlauchbetankungen sowie etwa 19 MNh bzw. 22 MNh bei 30-jähriger Tätigkeit.

5. Diskussion

Um manuelle Lastenhandhabungen zu reduzieren, die für Beschäftigte eine Gefährdung für Sicherheit und Gesundheit – insbesondere der Lendenwirbelsäule – mit sich bringen, wurde 1996 die Verordnung über Sicherheit und

Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit, die sogenannte Lastenhandhabungsverordnung, erlassen [8]. Diese stellt die Umsetzung der Europäischen Richtlinie 90/269/EWG über die Mindestvorschriften bezüglich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der manuellen Handhabung von Lasten, die für Arbeitnehmer insbesondere eine Gefährdung der Lendenwirbelsäule mit sich bringt, aus dem Jahr 1990 dar [18]. Die Europäische Richtlinie und die nationale Umsetzung in der Verordnung geben allgemeine Schutzziele vor, deren

Ausgestaltung durch untergeordnetes Regelwerk und arbeitswissenschaftliche und arbeitsmedizinische Erkenntnisse zu erfolgen hat.

Die in diesem Beitrag erhobenen Ergebnisse zur Wirbelsäulenbelastung werden nachfolgend zunächst Werten der Literatur gegenübergestellt und danach anhand der verschiedenen Kenngrößen der Belastung mit Richtwerten von etablierten Bewertungsverfahren verglichen sowie hinsichtlich der jeweiligen Aussagemöglichkeiten diskutiert und interpretiert.

5.1 Vergleich der Wirbelsäulenbelastungen mit Literaturangaben

Spezifische Literaturangaben zur körperlichen Belastung der Flugfeldtankwarte beim Betanken von Flugzeugen mit Bezug auf das Muskel-Skelett-System waren bei Erstellung dieses Beitrags nicht verfügbar, eher standen Auswirkungen von Lärm oder Aerosolen als Form körperlicher Expositionen im Vordergrund [4, 40, 57]; deshalb können Vergleiche der Wirbelsäulenbelastungen nicht mit identischen, sondern „lediglich“ mit ähnlichen Tätigkeiten vorgestellt werden, die dennoch der Einordnung der Belastungen beim Betanken dienen.

Eine erste umfangreiche Referenzquelle stellen die Ergebnisse des Gemeinschaftsprojektes „Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz – MEGAPHYS“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) dar, das im Zeitraum von 2013 bis 2018 durchgeführt wurde [2, 16]. Durch die unterschiedlichen Detaillierungsgrade der neu- oder weiterentwickelten Verfahren wird durch MEGAPHYS einerseits Praktikern mit den Leitmerkmalmethoden „ein sowohl wissenschaftlich fundiertes als auch praktisch erprobtes Methodeninventar zur Verfügung gestellt“ [2]. Andererseits wird mit darüberhinausgehenden Methoden Ergonomiefachkräften und Wissenschaftlern ermöglicht, auch komplexe Belastungsfälle zu analysieren bzw. zu beurteilen. Im Bd. 2 des Abschlussberichtes [16] werden beispielsweise

Tab. 6 Tätigkeitsdauern, Reaktionskräfte an der Wirbelsäule für die einzelnen Tätigkeiten sowie Tages-, Jahres- und Lebensdosiswerte vor der Durchführung der Präventionsmaßnahmen

Einzelaktivitäten und kumulative Belastungsmaße	Kumulierte Dauer pro Tag	Maximale Druckkräfte an der Wirbelsäule
Deckschlauchbetankung		
Heben und Halten zum Anschließen	25 s	4,8 kN
Senken und Halten beim Abnehmen	25 s	4,8 kN
Trommelschlauchbetankung 10 m		
Ausziehen (2,5'')	70 s	2,8 kN
Heben und Halten zum Anschließen	35 s	4,8 kN
Senken und Halten beim Abschießen	35 s	4,8 kN
Zurückziehen (2,5'')	70 s	3,4 kN
Halten beim Aufrollen	105 s	1,8 kN
Trommelschlauchbetankung Ausnahme 15 m		
Ausziehen (2,5'')	15 s	3,1 kN
Heben und Halten zum Anschließen	5 s	4,8 kN
Senken und Halten beim Abschießen	5 s	4,8 kN
Zurückziehen (2,5'')	15 s	3,4 kN
Halten beim Aufrollen	15 s	1,8 kN
Hydranteneingangsschlauch		
Zum Pit ziehen	70 s	2,0 kN
Zum Fahrzeug zurückziehen	70 s	2,0 kN
Befüllschläuche, je 2 Schläuche		
Heben und Halten zum Anschließen	20 s	3,3 kN
Heben und Halten beim Abschießen	20 s	3,3 kN
Kumulative Dosis		
Tagesdosis	3,67 kNh	
Jahresdosis, 220 Tage	807 kNh	
Lebensdosis, 20 Jahre	16,1 MNh	
Lebensdosis, 30 Jahre	24,2 MNh	

Tab. 7 Tätigkeitsdauern, Reaktionskräfte an der Wirbelsäule für die einzelnen Tätigkeiten sowie Tages-, Jahres- und Lebensdosiswerte nach der Durchführung der Präventionsmaßnahmen

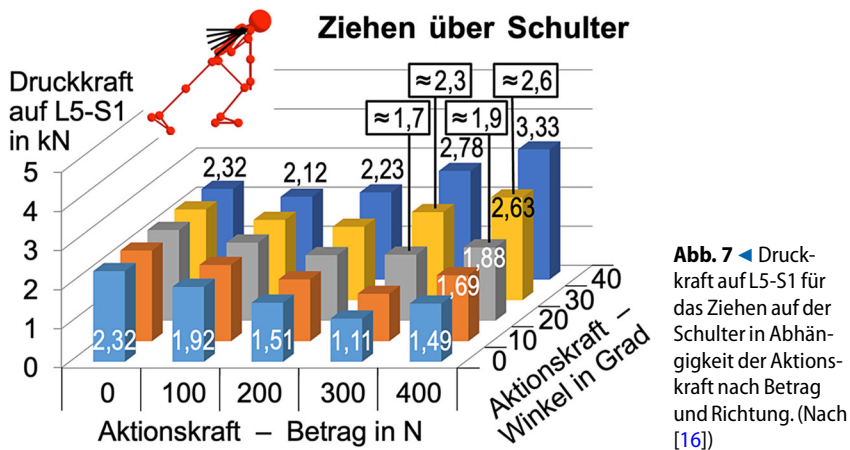
Einzelaktivität und kumulative Belastungsmaße	Kumulierte Dauer pro Tag	Maximale Druckkräfte an der Wirbelsäule
Deckschlauchbetankung		
Heben und Halten zum Anschließen	25 s	4,8 kN
Senken und Halten beim Abnehmen	25 s	4,8 kN
Trommelschlauchbetankung		
Ausziehen (2'')	80 s	2,7 kN
Heben und Halten zum Anschließen	40 s	4,8 kN
Senken und Halten beim Abschießen	40 s	4,8 kN
Halten beim Aufrollen	120 s	1,8 kN
Hydranteneingangsschlauch		
Zum Pit ziehen	70 s	2,0 kN
Befüllschläuche, je 2 Schläuche		
Heben und Halten zum Anschließen	20 s	3,3 kN
Heben und Halten beim Abschießen	20 s	3,3 kN
Kumulative Dosis		
Tagesdosis	3,23 kNh	
Jahresdosis, 220 Tage	710 kNh	
Lebensdosis, 20 Jahre	14,2 MNh	
Lebensdosis, 30 Jahre>	21,3 MNh	

auf Basis von biomechanischen Simulationsrechnungen Bandscheibendruck- und -scherkräfte sowohl beim Ziehen als auch beim Heben vorgestellt, die unter Berücksichtigung der ggf. verschiedenen Voraussetzungen für die vorgesehenen Vergleiche herangezogen werden können.

5.1.1 Ziehen von Schläuchen

a) Ausziehen des Tankschlauhes. Von den verschiedenen typischen Belastungsfällen beim Ziehen betrifft eine Situation im MEGAPHYS-Bericht das Ziehen eines auf der Schulter liegenden Seils o. Ä., das in einer Körperhaltung mit deutlicher Rumpfeigung nach vorn gezogen wird; diese ist um etwa 10 Grad höher, als sie beim Ausziehen von Schläuchen für die Flugzeug-Betankung für das Vorgangsende erhoben wurde (siehe Abschn. 4.5.1). Wie **Abb. 7** zeigt, wurden die Druckkräfte überblicksartig in Abhängigkeit von Betrag und Richtung der Aktionskraft in 100-N- bzw. in 10-Grad-Schritten dargestellt [16]. Sind die Aktionskräfte bekannt wie nach den Erhebungen im vorliegenden Beitrag, kann die Bandscheibenkompressionskraft abgegriffen werden.

Wie in Abschn. 4.1 beschrieben, betragen die maximalen Aktionskräfte beim Ausziehen eines 2''-Schlauches am Vorgangsende 330 N, als typische Winkel zur Horizontalen wurden 20 bis 30° abgeschätzt (siehe Abschn. 4.5.1). Auf Basis der Wertepaare für Aktionskraftbetrag und -winkel für die vier Konfigurationen 300 N || 20°; 300 N || 30°; 400 N || 20°; 400 N || 30° ergeben sich aus **Abb. 7** Kompressionskräfte von ca. 1,7; 2,3; 1,9; 2,6 kN, aus denen sich für eine Aktionskraft von 330 N Bandscheibendruckkräfte von ca. 1,7 bis 2,4 kN ableiten lassen (bei linearer Interpolation genauer Ablesewerte). Dieser Wertebereich liegt ein wenig unterhalb der in Abschn. 4.5.7 angegebenen Kompressionskräfte von ca. 2,0 bis 2,7 kN (**Tab. 5**). Dies wird im Wesentlichen darauf zurückgeführt, dass beim Ziehen des Schlauches ein auf der Schulter liegendes Gewicht von 15 kg berücksichtigt wurde (siehe Abschn. 4.5.1), während bei den MEGAPHYS-Annahmen ausschließlich die Zugkräfte im Seil, d.h.



ohne Berücksichtigung eines Seil- bzw. Schlauchgewichtes in die Analysen eingingen. Demgegenüber ist die Position der Kraftübertragung an der Schulter weiter medial als bei den Annahmen der MEGAPHYS-Analysen – etwa ein Drittel oder die Hälfte des Abstands Wirbelsäule-Schultergelenk bei den Fällen A bzw. B in Abschn. 4.5.1 gegenüber etwa zwei Drittel. Dieser geringere seitliche Abstand resultiert ebenso tendenziell in geringeren Belastungswerten wie auch die eingangs erwähnte etwas geringere Rumpfneigung.

Analog zur Darstellung der Bandscheibendruckkräfte werden im MEGAPHYS-Bericht auch Übersichtsgrafiken zu Scherkräften dargestellt; daraus lässt sich ein Wertebereich von etwa 0,5 bis 0,6 kN ableiten, der – gleichwohl gerundet – mit den entsprechenden Werten in **Tab. 3** übereinstimmt (0,51–0,64 kN).

Insgesamt lässt sich aus diesen Vergleichen schließen, dass die für das Ausziehen der Schläuche ermittelten Druck- und Scherkräfte an der Lendenwirbelsäule ähnliche Wertebereiche wie die in der Literatur gefundenen Werte darstellen, wenn auch Unterschiede in den Kraftübertragungsbedingungen bzw. Körperhaltungsannahmen bei der Bestimmung der Bandscheibenkräfte zu geringfügig anderen Werten führen. Somit stellen Literaturangaben wie die dargestellte Übersichtsgrafik aus dem MEGAPHYS-Bericht vergleichsweise schnell und einfach Orientierungswerte der Belastung zur Verfügung – ohne aufwendige Messungen und nachfolgende Berechnungen durchzuführen –, doch sollte stets die Übertragbarkeit der vormaligen Annah-

men und Voraussetzungen auf die Bedingungen einer aktuellen Belastungssituation geprüft werden.

b) Zurückziehen des Tankschlauches zum Flugfeldtankwagen. Im Projekt MEGAPHYS wurde auch das einhändige Ziehen eines Gegenstands neben dem Körper beim Gehen nach vorn adressiert. Jener Belastungsfall spiegelt beispielsweise das Ziehen eines mit Rädern versehenen Müllbehälters wider, wobei der nach unten gehaltene Arm ein wenig nach hinten und erkennbar nach außen ausgestellt war und eine ausgeprägtere Beckendrehung um die Hochachse (ca. 10°) aufgrund der Schreitbewegung als bei den Analysen des Ziehens des Tankschlauches (0°) unterstellt wurde. Analog zum Ziehen eines Seils o. Ä. über der Schulter wurde ein Aktionskraftspektrum mit Beträgen von 0 bis 400 N und Winkeln von 0 bis 40 Grad nach oben unterstellt. Für horizontale Aktionskräfte nach vorn (0°) zwischen 100 und 340 N lassen sich aus den entsprechenden Diagrammen Druckkräfte von 1,9 bis 4,9 kN und Scherkräfte von 0,25 bis 0,37 kN abgreifen bzw. – nach Interpolation für die obere Bereichsgrenze von 340 N – ableiten. Im Vergleich dazu ergaben die Erhebungen für das Zurückziehen des Tankschlauches zum Flugfeldtankwagen (FTKW) Druckkräfte auf die Bandscheibe L5-S1 von 1,4 bis 3,4 kN und Scherkräfte zwischen 0,29 und 0,56 kN (**Tab. 4**). Die Druckkraftwerte sind deutlich niedriger als die bei den Analysen bei MEGAPHYS (um 0,5 bis 1,5 kN), was im Wesentlichen auf den dort größe-

ren seitlichen Abstand der Aktionskraft durch Ausstellen des Oberarms mit daraus resultierenden erhöhten Muskelaktivierungen im Lumbalraum zu dessen Stabilisierung zurückgeführt wird. Die Scherkräfte sind ähnlich (MEGAPHYS 0,25–0,37 kN vs. Schlauchziehen 0,29–0,56 kN), wenn sich auch für hohe Aktionskräfte erkennbare Unterschiede für die sagittalen Scherkräfte ergaben. Diese Unterschiede resultieren vorwiegend aus der verdrehten versus nichtverdrehten Beckenstellung beim Ziehen nach vorn, sodass sich die Aktionskräfte bei Beckenverdrehung weniger stark in der Bandscheibenschwerkraft abbilden als bei Nichtverdrehung.

c) Verziehen des Hydranteneingangsschlauches. Diese Teiltätigkeit wurde bezüglich der Körperhaltung und Zugrichtung dem Zurückziehen eines Tankschlauches gleichgesetzt (siehe Abschn. 4.5.5), allerdings waren die gemessenen Aktionskräfte mit maximal 170 N deutlich geringer; die Bandscheibendruck- und -scherkräfte wurden zu 2,0 bzw. 0,37 kN erhoben. Aus den korrespondierenden Erhebungen bei MEGAPHYS lassen sich dazu Bandscheibendruck- und -scherkräfte von 2,8 bzw. 0,28 kN ableiten, d.h. analog zu obigen Erläuterungen höhere Druck- und geringere Scherkräfte aufgrund der unterschiedlichen Körperhaltungen und damit einhergehenden verschiedenen Positionen und Hebelarmen der Aktionskraft zur Bezugsbandscheibe.

5.1.2 Anheben und Halten der Kupplung

a) Anheben der Kupplung am Flugzeug.

Im zuvor zitierten Abschlussbericht des Verbundprojekts MEGAPHYS [16] findet sich auch eine Vielzahl von Analyseergebnissen zum beidhändig-symmetrischen Heben von Lasten in der Sagittalebene von verschiedenen Aufnahme- zu unterschiedlichen Absetzhöhen zwischen dem Boden und Schulterhöhe. Dies bedeutet, dass das Heben auf etwa Stirnhöhe wie beim Anheben der Schlauchkupplung an den Stützen unter die Flugzeug-Tragfläche nur unter einem gewissen Vorbehalt verglichen werden kann. Wie in Abschn. 4.5.2 erläutert, können

für das körpernahe Anheben aus etwa Taillenhöhe drei typische Arbeitsweisen unterschieden werden, eine durchgängig symmetrische sowie zwei unsymmetrische aufgrund einer etwas seitlichen Aufnahmeposition. Im Folgenden wird zunächst auf das symmetrische Heben eingegangen, für das sich Bandscheibendruckkräfte von etwa 2,1 bis 2,8 kN und Scherkräfte um 0,4 kN für Vorgangsdauern von 2 bis 1 s bei einer gemessenen Aktionskraft von 200 N ergaben (siehe Abschn. 4.5.2).

Für die entsprechenden, mit einem kürzeren Hubweg verbundenen Hebeaufgaben einer Last von 20 kg, entsprechend einem Messwert der Aktionskraft von 200 N, von Taillen- auf Schulterhöhe finden sich bei MEGAPHYS Bandscheibendruckkräfte von 1,9 bis 2,1 kN und -scherkräfte um 0,3 kN. Wird in Ermangelung von Ergebnissen zum Heben von Taillen- auf Stirnhöhe bei MEGAPHYS ersatzweise ein etwas längerer Hubweg von Hüft- auf Schulterhöhe angenommen, ergeben sich Druckkraftwerte von 2,1 bis 2,5 kN bzw. um 0,4 kN für Scherkräfte. Der verbliebene Unterschied von 2,5 zu 2,8 kN bei einer Vorgangsausführung innerhalb einer Sekunde lässt sich auf verschiedene Hubdistanzen zurückführen (Hüft- auf Schulterhöhe 50 cm, Taillen- auf Stirnhöhe 60 cm); dieser Aspekt bewirkt, dass neben der Last auch die betreffenden Körperteilmassen über längere Wege in gleicher Zeit bewegt werden und somit höhere „Dynamikanteile“ aufgrund der Massenträgheit resultieren. Insgesamt zeigt somit der Vergleich der erhobenen Druck- und Scherkräfte beim symmetrischen Anheben der Schlauchkupplung am Flugzeug mit Werten bei ähnlichen, als typisch angenommenen Hebeaufgaben eine recht gute Entsprechung.

Mit Bezug auf das Anheben der Kupplung am Flugzeug bei unsymmetrischer Bewegung aufgrund einer nicht-mittigen Lastaufnahme bei Bewegungsbeginn finden sich ansatzweise ähnliche Erhebungen in einer kürzlich erschienenen Zusammenstellung von Wirbelsäulenbelastungen, einem sogenannten Lumbalbelastungsatlas [39]. Für das beidhändige Heben einer Last von 20 kg werden 3,7 bis 4,2 kN für die Bandscheibendruckkraft

angegeben, für die Scherkraft 0,47 bis 0,57 kN. Die dort untersuchten Hebevorgänge sind allerdings auch von Hubwegen zwischen Taillen- und Schulterhöhe geprägt und somit von kürzeren Hubdistanzen als die beim Anheben der Kupplung am Flugzeug. Dies führt prinzipiell zu einer niedrigeren Belastung. Zudem wurde für die dortigen Erhebungen zwar auch eine Lastaufnahme vor der Schulter bzw. in einer Schultersagittalebene unterstellt, jedoch war die Anfangsposition des Lastobjekts etwa 20 cm weiter vorn vor dem Körper im Vergleich zur Schlauchaufnahmeposition bei den Erhebungen des vorliegenden Beitrags, was prinzipiell zu höheren Belastungswerten führt. Unter Berücksichtigung der ähnlichen, jedoch nicht sämtlich übereinstimmenden und die Belastung „gegenläufig“ beeinflussenden Analysebedingungen werden die im Lumbalbelastungsatlas dargestellten Ergebnisse zu Bandscheibendruck- und -scherkräften von 3,7 bis 4,2 kN bzw. 0,5 bis 0,6 kN je nach Vorgangsdauer (2 || 1,5 || 1 s) als plausible, aber insgesamt auch etwas belastungsunterschätzende Entsprechung zu den Angaben in Abschn. 4.5.2 zum Anheben des Tankschlauches gesehen (3,9–4,8 kN bzw. 0,6–0,7 kN) – vorrangig aufgrund der deutlich geringeren Hubdistanz.

b) Halten der Kupplung am Flugfeld-tankwagen. Wie in Abschn. 4.5.4 ausgeführt, erfolgt nach dem Tankvorgang in Form einer Trommelschlauchbetankung das Einziehen des Schlauches, wobei dessen Ende an der Kupplung mit einer Hand neben dem Körper gehalten wird. Für diese Situation ergaben sich Bandscheibendruck- und -scherkräfte zu 1,8 bzw. 0,34 kN. Entsprechende Belastungswerte lassen sich aus Angaben früherer Erhebungen in der Literatur ableiten. In der betreffenden Untersuchung [25] wurde die Auswirkung der Verschiebung des Lastschwerpunktes von mittig bis schultersagittal auf die resultierende Wirbelsäulenbelastung für verschiedene Lastgewichte (0 || 10 || 20 kg) und Körperhaltungen (0° || 45° || 90° vorgeneigt; Arme hängend || gebeugt || vorgestreckt) abgeschätzt. Als Kenngrößen der Belastung wurden insbesondere auch die Druck- und

Scherkräfte an der lumbosakralen Bandscheibe L5-S1 verwendet. Bei Annahme eines Lastgewichts von 15 kg (entsprechend 150 N gemessener Aktionskraft) und einhändiger Lasthandhabung (entsprechend 100 % „lateral load shift“) ergeben sich etwa 1,6 kN bzw. 0,4 kN für Druck- und Scherkraft und somit sehr ähnliche Werte wie die im vorliegenden Beitrag erhobenen (1,8 kN bzw. 0,34 kN). Bei diesem Vergleich ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Körperhaltungen bezüglich der Kopfstellung unterscheiden: deutlich vorgeneigt wie in [Abb. 4d](#) dargestellt versus ohne Vorneigung in der Literaturquelle, sodass die dortigen Druckkraftwerte eher als unterschätzend bzgl. des Haltens der Kupplung angesehen werden.

5.2 Bewertung der Wirbelsäulenbelastungen anhand von Richtwerten der Literatur

5.2.1 Druckkraftgrenzen

a) Empfehlungen in der Normung. In der Norm ISO 11228-2 „Schieben und Ziehen“ aus dem Jahr 2007 sind, getrennt für unterschiedliche Populationen, Angaben zu Druckkraftgrenzen bezüglich der Lendenwirbelsäule enthalten [29], die auf der Kompressionsfestigkeit der Lendenwirbelsäule beruhen [33]. Für das „Gesamtkollektiv“ 20- bis 64-jähriger erwachsener männlicher Beschäftigter in den USA wird beispielsweise eine lumbale Druckkraftgrenze von 3,9 kN genannt. Für „ältere Beschäftigte“ von 56 bis 64 Jahren werden für Männer 3,1 kN als Maximalwert empfohlen. Diese Werte sollen nicht überschritten werden, um Überlastungen des Rückens und insbesondere der Wirbelsäule zu vermeiden.

Der Vergleich der in der Norm angegebenen Richtwerte mit den für das Betanken von Flugzeugen erhobenen Werten aus den [Tab. 6 und 7](#) zeigt, dass mit maximalen Bandscheibendruckkräften bis zu fast 5 kN beim Heben und Senken von Schläuchen die vorgenannten Richtwerte der Norm sowohl für das Gesamtkollektiv (Richtwert 3,9 kN) als auch für die Population der 56- bis 64-Jährigen (Richtwert 3,1 kN) deutlich überschritten werden. Ähnlich hohe Druckkräfte werden bei den anderen Einzeltätigkeiten nicht

Tab. 8 „Revidierte Dortmunder Richtwerte“, hier für Männer Empfehlungen zu maximalen Druckkräften in der Lendenwirbelsäule beim manuellen Handhaben von Lasten, vorgesehen für Fragestellungen der Arbeitsgestaltung zur Verminderung des biomechanischen Überlastungsrisikos des unteren Rückens. (Nach [38])

Alter	Männer
20 Jahre	5,4 kN
30 Jahre	5,0 kN
40 Jahre	4,0 kN
50 Jahre	3,1 kN
≥ 60 Jahre	2,2 kN

erreicht. Allerdings werden beim Heben der kürzeren und somit leichteren Befüllschläuche am Pit sowie beim Zurückziehen der 2,5''-Schläuche Druckkräfte in der Wirbelsäule oberhalb des ISO-Richtwertes für Ältere bewirkt (3,3 bzw. 3,4 kN vs. 3,1 kN).

b) Aktuellere Empfehlungen. Anhand von zahlreichen in der Literatur beschriebenen Festigkeitsuntersuchungen von Segmenten der Lendenwirbelsäule – wie einzelne Wirbelkörper oder Bandscheiben sowie Wirbelkörper-Bandscheiben-Konfigurationen verschiedener Länge bis hin zu kompletten Lendenwirbelsäulen – wurden im Jahr 2001 die sogenannten Dortmunder Richtwerte abgeleitet [33], deren Datenbasis auch für die Erstellung der o. g. ISO-Norm herangezogen wurden. Diese Empfehlungen wurden 2018 aufgrund der zwischenzeitlich erweiterten Datenlage angepasst und als „Revidierte Dortmunder Richtwerte“ publiziert [38]. Diese Referenzwerte berücksichtigen die ausgeprägte Alters- und Geschlechtsabhängigkeit der Strukturfestigkeit der Lendenwirbelsäule und sind als altersabhängige Richtwerte für tolerable maximale Kompressionsbelastungen für erwachsene Männer bzw. Frauen zu verstehen. Die aktuellen Richtwerte für Männer sind in [Tab. 8](#) dargestellt.

Nach [Tab. 8](#) variieren die Richtwerte zwischen 5,4 kN bei 20-Jährigen und 2,2 kN bei Männern ab 60 Jahren. Somit wird eine deutliche Abnahme der empfohlenen maximalen Druckkräfte mit zunehmendem Alter von nahezu 1 kN je Dekade vorgeschlagen; eine Ausnahme

stellt die Differenz zwischen den Richtwerten für 20- und 30-Jährige dar, die präventionsorientiert geringer gewählt wurde, d. h. der Richtwert für 20-Jährige wurde im Rahmen der Revision von vormals 6,0 kN auf 5,4 kN verringert [33, 38].

Der Vergleich der erhobenen Bandscheibendruckkräfte für die Tätigkeiten beim Betanken von Flugzeugen mit den Revidierten Dortmunder Richtwerten zeigt, dass auch diese empfohlenen Maximalwerte bei mehreren Einzeltätigkeiten – je nach Alter der Beschäftigten in unterschiedlichem Ausmaß – überschritten werden. Dies betrifft vor allem das Anheben, Halten und Anschließen der Tankschläuche am Flugzeug bei biomechanisch ungünstiger seitlicher Aufnahme des Schlauches zu Hebebeginn bzw. seitlicher Ablage zum Ende des Absenkvorgangs mit Bandscheibendruckkräften bis etwa 4,8 kN. Auch das Zurückziehen von 2,5''-Schläuchen bei der Trommelschlauchbetankung führte in der Vergangenheit – d. h. vor der Umsetzung der „erhebungsbedingten“ Präventionsmaßnahmen (siehe Abschn. 4.4) – zu Druckkräften oberhalb des Richtwerts für Personen üblichen Alters (3,4 kN vs. 3,1 kN für 50-Jährige; [Tab. 6](#)).

Im Vergleich zu den Werten der ISO 11228-2 liegen die aktuellen Dortmunder Richtwerte für das Kollektiv der 20- und 30-Jährigen höher als der allgemeine Richtwert der ISO-Norm (5,4 und 5,0 kN gegenüber 3,9 kN). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die ISO-Norm – im Gegensatz zu den Revidierten Dortmunder Werten für 20- bzw. 30-Jährige – den gesamten Altersbereich abdeckt und somit eine Art Mittelwert einschließlich sowohl der hohen Festigkeitswerte Jüngerer als auch der niedrigen Werte Älterer darstellt. Analog ergibt sich daraus auch, dass der Revidierte Dortmunder Richtwert für das Kollektiv der 40-Jährigen etwa dem Richtwert des Gesamtkollektivs entspricht (4,0 kN gegenüber 3,9 kN), d. h. die Annahme eines mittleren Alters von 40 Jahren spiegelt sich in einem mittleren Wert der Festigkeit und somit einem mittelhohen Richtwert wider. Der aktuelle Dortmunder Richtwert der 50-Jährigen ist identisch mit dem Richtwert des ISO-Kollektivs „Ältere“ (3,1 kN). Für die

Gruppe der Ab-60-Jährigen ist der Revidierte Dortmunder Richtwert mit 2,2 kN deutlich niedriger als der ISO-Richtwert für das „ältere Kollektiv“ der 56- bis 64-Jährigen mit 3,1 kN, da auch die Festigkeitswerte der Über-64-Jährigen (obere Altersgrenze bei ISO) einbezogen wurden.

5.2.2 Tagesdosisgrenzen

Auf Basis der Ergebnisse der beiden sogenannten Deutschen Wirbelsäulenstudien [9, 10, 19, 35, 61–63] zu Dosis-Risiko-Zusammenhängen zwischen der kumulierten lumbalen Belastung im Berufsleben und degenerativen Erkrankungen der Lendenwirbelsäule für etwa 900 erkrankte Erwachsene und 900 Kontrollpersonen der Bevölkerung ohne derartige Erkrankungen wurden geschlechtsspezifische Empfehlungen für maximale Tagesdosiswerte zur lumbalen Kompressionsbelastung abgeleitet [39]. Dazu wurde die innerhalb des durchschnittlich etwa 20-jährigen Berufslebens aufsummierte Belastung der Kontrollpersonen fiktiv auf 45 Jahre je 220 Arbeitstagen verteilt und mit den realen Tagesdosisverteilungen der Erkrankten verglichen. Daraus ergab sich für Männer eine maximale Tagesdosis von 3,4 kNh bei einem Präventionsniveau von 85 % und von 2,9 kNh bei 90 %; diese beiden Präventionsperzentile werden üblicherweise in ergonomischen oder arbeitsmedizinischen Fragestellungen verwendet [29, 51].

Vor der Umsetzung der Präventionsmaßnahmen ergab sich aus den Tätigkeiten beim Betanken von Flugzeugen eine Tagesdosis von 3,7 kNh. Diese liegt deutlich über der empfohlenen maximalen Tagesdosis von 2,9 kNh bei einem Präventionsniveau für das 90. Perzentil und auch etwas oberhalb des höheren, mit niedrigerer Schutzfunktion verbundenen Richtwertes von 3,4 kNh. Nach Umsetzung der „erhebungsbedingten“ Präventionsmaßnahmen für die Tätigkeiten des Betankens von Flugzeugen (siehe Abschn. 4.4) konnte die Tagesdosis auf 3,2 kNh und somit auf einen Wert reduziert werden, der zwischen den beiden Richtwerten zur maximalen Tagesdosis für Männer liegt. Für die beiden theoretischen Extremfälle, dass nach

Umsetzung der Präventionsmaßnahmen nur Deckschlauch- bzw. ausschließlich Trommelschlauchbetankungen durchgeführt würden, errechneten sich Tagesdosen von 2,9 bzw. 3,4 kNh. Diese beiden Werte entsprechen insofern gerade den beiden Richtwerten der Präventionsperzentile. Es ist allerdings zu bedenken, dass zur Berechnung der Tagesdosen in diesem Beitrag im Sinne eines Worst-Case-Szenarios stets die maximalen Werte für die typische Dauer je Einzelschritt und, sofern Druckkraftbereiche erhoben wurden, stets auch deren obere Bereichsgrenze berücksichtigt wurden. Insofern können die abgeleiteten Tagesdosen als „doppeltes Worst-Case-Szenario“ angesehen werden.

5.2.3 Lebensdosisgrenzen

Das Mainz-Dortmunder Dosismodell – MDD [26, 31] wurde zur einheitlichen Vorgehensweise bei der Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen in Feststellungsverfahren zur Berufskrankheit BK 2108 [6, 7] entwickelt, die auf Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch Heben und Tragen schwerer Lasten sowie Arbeiten in extremer Rumpfbeugehaltung abhebt. Bei Anwendung des MDD wird aus den Belastungen bei den beruflich BK-relevanten Tätigkeiten sowie der Dauer und Höhe der Einzelbelastung eine kumulative Lebensdosis berechnet. In der ursprünglichen Version wurde eine kumulative Belastung von 25 MNh als Richtwert für die Möglichkeit einer Anerkennung der BK 2108 festgelegt, welche im Jahre 2003 auf eine kumulative Belastung von mindestens 12,5 MNh als sogenannte Auslöseschwelle für weitere Prüfungen reduziert wurde [12].

Mit Bezug auf die erhobene Lebensdosis beim Betanken von Flugzeugen würde vor Umsetzung der Präventionsmaßnahmen bereits nach 20 Jahren eine Dosis von etwa 16 MNh erreicht (■ Tab. 6). Diese kumulative Wirbelsäulenbelastung läge deutlich über der Lebensdosis-Auslöseschwelle von 12,5 MNh, und nach 30 Jahren mit gleichem Tätigkeitsinhalt würde die Lebensdosis mit etwa 24 MNh annähernd den Lebensdosis-Richtwert von 25 MNh nach dem Mainz-Dortmunder Dosismodell erreichen. Allerdings ist da-

bei zu berücksichtigen, dass im Sinne von sog. schweren Lasten in der Definition der Berufskrankheit nur Druckkräfte ab 2,7 kN in die Dosiskumulation eingehen [12]. Bei entsprechender Anpassung ergäbe sich eine Tagesdosis von 3,37 kNh und eine 20-Jahr-Lebensdosis von etwa 14,8 MNh. Somit gälte bereits nach weniger als 20 Jahren in dieser Tätigkeit eine arbeitsbedingte degenerative Erkrankung der Wirbelsäule als möglicherweise berufsbedingt.

Für die Tätigkeitsbedingungen nach Umsetzung der aufgeführten Präventionsmaßnahmen ergibt sich eine Tagesdosis von 3,23 kNh und nach 20 Jahren eine Lebensdosis von 14,2 MNh, die sich nach o. g. BK-bezogenen Reduzierungen auf 2,99 kNh für die Tagesdosis und von 13,1 MNh für 20-jährige Tätigkeit unter Annahme gleicher Bedingungen verringern; letzterer Lebensdosiswert liegt somit im Bereich des Schwellenwerts von 12,5 MNh. Für die Annahme, dass ausschließlich Deckschlauch- bzw. nur Trommelschlauchbetankungen durchgeführt würden, errechneten sich entsprechend der BK-bezogenen Anpassungen Tagesdosen von 2,58 bzw. 3,23 kNh und 11,4 bzw. 14,2 MNh für eine 20-jährige Tätigkeit.

Dies bedeutet aber auch, dass bei längerer Berufsausübung mit diesen Tätigkeitsinhalten trotz der zwischenzeitlich eingeführten Präventionsmaßnahmen davon auszugehen ist, dass die Entwicklung bandscheibenbedingter Erkrankungen der Lendenwirbelsäule nicht a priori ausgeschlossen werden kann. Analog zur Schlussanmerkung im vorigen Abschn. 5.2.2 gilt auch in diesem Zusammenhang der Lebensdosisbestimmung und Wertung in Hinsicht auf das Erkrankungsrisiko, dass jeweils die maximalen Werte der Dauer und Bandscheibendruckkraft der Einzeltätigkeiten in die Berechnungen eingehen.

5.2.4 Scherkraftgrenzen

Die Erkenntnisse über mögliche Auswirkungen von Scherkräften auf die Elemente der Wirbelsäule in Hinsicht auf das Risiko von Rückenüberlastungen und -erkrankungen sind im Vergleich zu Kompressionsbelastungen deutlich geringer [29, 30], dennoch wird häu-

fig auch die Scherbelastung als mögliche Schädigungsursache angesehen und zumindest nicht ausgeschlossen [50]. Zur Erweiterung des in diesem Beitrag verwendeten Evaluierungsansatzes wurden deshalb die zuvor angeführten druckkraftbezogenen Ergebnisse durch scherkraftbezogene Erhebungen ergänzt, die im Folgenden durch Vergleich mit entsprechenden Richtwerten hinsichtlich des Überlastungsrisikos bewertet werden.

Auf Basis einer Literaturdurchsicht leiteten Gallagher und Marras [21] zwei verschiedene Belastungsbegrenzungen in Abhängigkeit der Häufigkeit von Belastungsfällen je Arbeitstag ab, was in gewisser Weise einen kumulativen Dosisansatz widerspiegelt. Im Gegensatz zu den kompressionsbezogenen Richtwerten ergab die Datenlage jedoch nicht die Möglichkeit, auf Geschlecht und Alter der Personen abzuheben. Entsprechend dieser derzeit als am besten gesichert angesehenen Empfehlung gilt eine Scherkraftgrenze von 1 kN bei gelegentlichen Expositionen bis zu 100 je Tag als akzeptabel; treten Scherbelastungen bis zu 1000-mal pro Tag auf, sollte jedoch ein Maximalwert von 0,7 kN eingehalten werden, was von Gallagher und Marras für die meisten Arbeitspersonen als noch angemessene Exposition interpretiert wird.

Wie die auftretenden Scherbelastungen bei den verschiedenen Tätigkeiten beim Betanken von Flugzeugen zeigt (■ Tab. 5), werden die genannten Scherkraft-Richtwerte ausnahmslos eingehalten, unabhängig von der mit den Empfehlungen verknüpften Häufigkeit. Allerdings wird bei dem Ausnahmefall des Ausziehens eines 2,5"-Schlauches auf 15 m bei der Trommelschlauchbetankung eine Scherkraft von 0,73 kN erreicht, gerundet 0,7 kN. Jedoch können auch andere Tätigkeiten Scherbelastungen bis zu diesem Richtwert generieren: beispielsweise bei ungünstigen Arbeitsweisen beim Anheben der Kupplung am Flugzeug oder aus ungünstigen Aktionskraftwinkeln oder lateralen Positionen der Kraftübertragung beim Ziehen der Schläuche, was sich an den oberen Bereichsgrenzen der Angaben in ■ Tab. 5 widerspiegelt (0,69 kN, gerundet 0,7 kN).

Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Auftretenshäufigkeiten der Einzeltätigkeiten von unter 10 pro Tag (**Tab. 2**) und der Angaben zu akzeptablen Richtwertüberschreitungen von 100 bzw. 1000 pro Tag nach [21] deuten die Expositionen beim Betanken von Flugzeugen darauf hin, dass die induzierten Scherbelastungen für den unteren Rücken kein nennenswertes Überlastungsrisiko darstellen.

5.3 Limitationen

Die im Rahmen dieses Beitrags abgeleiteten Bandscheibenkräfte und die errechneten Dosiswerte zur quantitativen Beschreibung der resultierenden Rückenbelastung sind mit verschiedenen Annahmen und Unsicherheiten verbunden. So sind die beschriebenen Tätigkeiten und Körperhaltungen lediglich an zwei Flughäfen in Deutschland und an wenigen Probanden erfasst und ermittelt worden. Gegebenenfalls stark voneinander abweichende Ausführungsbedingungen wurden nicht explizit untersucht, auf diese wurde auch nicht fokussiert. Vielmehr wurden „typische Ausführungsbedingungen“ ermittelt, um „typische Belastungen“ einschließlich oberer Bereichsgrenzen („Worst-Case-Szenario“) ableiten und ausweisen zu können.

Weiterhin unterliegen die errechneten Druck- und Scherkräfte an der Bezugsscheibe (L5-S1) der Unsicherheit, dass sowohl die Körperhaltungen als auch die Winkel der Aktionskräfte nicht messtechnisch vor Ort erfasst worden sind, sondern anhand der vorliegenden Bilder durch Schätzung im Nachgang bestimmt wurden. Es wurden somit keine exakten Werte angegeben, wie sie beispielsweise im Laborversuch erreichbar sind, sondern es wurden vielmehr „typische Werte“ abgeschätzt. In den Bestimmungen und Berechnungen der Bandscheibenkräfte wurden daher für einige Tätigkeiten mehrere Körperhaltungen und -bewegungen, Aktionskraftwinkel oder auch Lastangriffspunkte berücksichtigt. Dies führt dazu, dass für die einzelnen Lastenhandhabungen – wie Heben, Senken, Halten und Ziehen – oftmals Be-

reiche für die Bandscheibenkräfte bzw. ungefähre Werte angegeben wurden.

Weitere Limitationen betreffen die biomechanische Methodik sowie die bei der Anwendung unterstellten Voraussetzungen. In der Einleitung dieses Beitrags wurde darauf hingewiesen, dass der hier verwendete Ansatz – aufgrund der zu untersuchenden Tätigkeiten im Bereich des Handhabens von Lasten – eine „Engpassbetrachtung“ darstellt, die allerdings in Ergonomie und Arbeitsmedizin als zumindest nicht unüblich angesehen werden kann [9, 13, 32, 51, 52]. Bei derartigen biomechanischen Analysen mit dem Ziel der Bestimmung von Kräften im unteren Abschnitt der Wirbelsäule bleiben Belastungen in anderen Körperpartien ebenso unberücksichtigt wie auch Beanspruchungen infolge muskulärer Ermüdung.

Zur Ermittlung lumbaler Kräfte werden gemeinhin keine invasiven Messungen vorgenommen [46, 54, 67] – wie sie allenfalls in klinischen Untersuchungen durchgeführt werden können –, sondern durch Simulationsrechnungen bestimmt. Das den aktuellen Erhebungen zugrundeliegende biomechanische Modell [34] ist zwar dreidimensional-dynamisch konzipiert, ist als „autarkes“ Softwarewerkzeug auch ohne Motion-capture-Verfahren [24, 27, 47] anwendbar, wurde vielfältigen Validierungen unterzogen [34] und erlaubt somit prinzipiell die Analyse der bei Flugfeldtankwarten auftretenden Belastungssituationen und -vorgänge. Allerdings wurden durch den Verzicht auf vorgangsspezifische Bewegungsanalysen mögliche individuelle Ausprägungen bzw. Bewegungsmuster nicht untersucht. Zudem wurden einheitliche anthropometrische Eigenschaften (z. B. Körperhöhe 175 cm, Körpergewicht 75 kg), modellimmanente Körperteillängen, -umfänge, -gewichte und -schwerpunktpositionen sowie Zugrichtungen und Abstände der beteiligten Muskeln zum überspannten Gelenk vorausgesetzt, sodass individuelle Maße, Gewichte und Verteilungen unberücksichtigt blieben. Des Weiteren wurde, wie durchaus üblich, auf die unterste Bandscheibe der Wirbelsäule am Lenden-Kreuzbein-Übergang fokussiert und somit auf lokale Belastungsmuster nicht

eingegangen. Zu Auswirkungen derartiger Unterschiede von Modellannahmen bei typischen Wirbelsäulenbelastungen durch Lastenhandhabung wird auf einen aktuellen Lumbalbelastungsatlas [39] verwiesen.

Im Folgenden wird auf Limitationen der angewendeten Grenzen bzw. Richtwerte zur Bewertung von Kräften in der Lendenwirbelsäule und von daraus abgeleiteten kumulativen Dosismaßen in Bezug auf potenzielle Überlastungen hingewiesen. Sowohl die angeführten Richtwerte zu lumbalen Druckkräften [29, 33, 38] als auch zu Scherkräften [21] basieren auf Festigkeitsuntersuchungen an Autopsiematerial. Einerseits ergeben sich daraus Fragen nach der Übertragbarkeit der Werte auf den lebenden Organismus, andererseits ist offensichtlich, dass sich direkte Messungen wie bei mechanischen Strukturanalysen in der Materialprüfung aufgrund des nichtzerstörungsfreien Prinzips am lebenden Menschen verbieten. Dieser Sachverhalt einer nicht-anwendbaren Methodik am Lebenden kann aus wissenschaftlicher Sicht als kritisch gewertet werden, jedoch sind Festigkeitsmessungen an Leichenpräparaten zumindest als mögliche und vermutlich als bestmögliche Vorgehensweise zur Ableitung eines verlässlichen Surrogatindikators für die Belastbarkeit im realen Leben anzusehen. In diesem Zusammenhang wird darauf verwiesen, dass das Prinzip des Vergleiches von Belastungs- und Belastbarkeitswerten, die in Ermangelung „direkter“ Messverfahren via Modellrechnung bzw. an Autopsiematerial „indirekt“ ermittelt werden, seit Jahrzehnten in ergonomischen und arbeitsmedizinischen Fragestellungen [6, 9, 51, 55, 62] und auch in der internationalen Normung genutzt wird [28, 29]. Bei Anwendung einer derartig diskussionsanregenden Methodik sollte allerdings eine umfassende und vertrauenswürdige Datengrundlage vorliegen – zur Verhinderung vermeidbarer Kritik sowie mit dem Ziel einer hohen wissenschaftlichen Qualität. Die in diesem Beitrag verwendete Datensammlung zur lumbalen Kompressionsbelastbarkeit gilt als weitestgehend aktuell, umfangreich, zugänglich, intensiv geprüft und insgesamt zuverlässig [38]. Im Vergleich dazu ist die

Datengrundlage zur Scherbelastbarkeit der Lendenwirbelsäule [21] zwar weniger umfangreich und weniger detailliert, gilt aber dennoch in Fachkreisen als die beste vorliegende; weitere Forschungsaktivitäten zu diesem Aspekt wären wünschenswert und hilfreich.

Mit Bezug auf die Bewertung der kumulierten Belastungen über einen typischen Arbeitstag sowie über Zeiträume von 20 und 30 Jahren wurde in den betreffenden Kapiteln darauf hingewiesen, dass im Sinne eines Worst-Case-Szenarios maximale Werte in die Abschätzung eingegangen sind. Maximalwerte betreffen zum einen die Belastungsdauer je Einzelvorgang und, bei Angabe von Druckkraftbereichen aufgrund der Annahme verschiedener Ausführungsbedingungen, ggf. auch die Belastungshöhe in Form der oberen Bereichsgrenze. Werden auf dieser Grundlage auch Belastungen über Jahrzehnte abgeschätzt, ist davon auszugehen, dass die realen Belastungen vermutlich niedriger sind und somit das Überlastungsrisiko eher zu hoch eingeschätzt wurde. Eine realistisch(er)e Belastungsermittlung und -bewertung setzt daher weitere Untersuchungen und Messungen an mehreren Flughäfen an einer größeren Zahl von Arbeitspersonen voraus, was jedoch mit der vorliegenden pilotartigen Erhebung nicht intendiert war: typische bzw. nicht untypische Belastungen konnten identifiziert, quantitativ beschrieben und in Hinsicht auf das tätigkeitsinduzierte Risiko muskuloskeletaler Überlastungen bewertet werden.

5.4 Ansätze für weitere Präventionsmaßnahmen

Erste Präventionsmaßnahmen wurden unmittelbar nach den vor Ort durchgeführten Erhebungen und Messungen umgesetzt. So wurden beispielsweise 2,5''-Schläuche und „schlechte Fahrzeuge“ ersetzt sowie das Zurückziehen der Schläuche zum Fahrzeug durch technische Maßnahmen unterstützt. Dadurch konnte die Tagesdosis bereits von etwa 3,7 auf 3,2 kNh reduziert werden.

Wie Abschn. 4.5.2 zu entnehmen ist, ist das seitliche Anheben der Schläuche am Flugzeug mit den mit Abstand höch-

ten Bandscheibendruckkräften von bis zu etwa 4,8 kN verbunden. Um die Wirbelsäulenbelastung bei einzelnen Handhabungsvorgängen und die kumulative Belastungsdosis weiter zu reduzieren, sollten daher weitere Präventionsmaßnahmen insbesondere an diesen Tätigkeiten ansetzen. Eine Maßnahme könnte beispielsweise die technische Unterstützung beim Anheben der Schläuche sein, so dass durch die Flugfeldtankwarte geringere Kräfte aufgebracht werden müssen.

Ein wesentlicher Aspekt für die hohe Bandscheibendruckkraft war die seitliche Aufnahme der Schläuche. Ein möglicher präventiver Ansatz ist daher auch die Information und die praktische Unterweisung der Flugfeldtankwarte zum symmetrischen und körpernahen Heben und Halten der Schläuche. Würden beim Anheben und Absenken der Schläuche diese mittig vor dem Körper, d. h. symmetrisch gehandhabt und nicht seitlich am Körper aufgenommen, könnten die Bandscheibendruckkräfte erheblich von etwa 4,8 auf 2,8 kN und damit auch die Tagesdosis von 3,2 auf 2,5 kNh reduziert werden. Dadurch könnten die „hohen Spitzen“ der Bandscheibenkräfte für die Flugfeldtankwarte sowie die hohen kumulativen Belastungswerte vermieden werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist das Befüllen der FTKW mit Hilfe der Befüllschläuche. Diesen Handhabungen wurden Bandscheibendruckkräfte von 3,3 kN zugeordnet. Um diese Belastungen zu vermindern, könnten beispielsweise technische Hebehilfen wie Tragewecke oder Schwenkkräne installiert werden, die die Flugfeldtankwarte beim Handhaben der Schläuche unterstützen und somit die Belastung beim Heben und Halten der Befüllschläuche sowie das biomechanische Überlastungsrisiko reduzieren.

Fazit für die Praxis

- Technische Unterstützung beim Heben, Senken und Halten der Schläuche am Flugzeug ist anzustreben.
- Technische Unterstützung ist auch beim Befüllen der Flugfeldtankwagen mit Hilfe der Befüllschläuche anzustreben, beispielsweise durch Tragewecke oder Schwenkkräne.

- Das seitliche Anheben der Schläuche am Flugzeug ist zu vermeiden, nach Möglichkeit sollten die Schläuche körpernah und bei symmetrischer Körperhaltung gehandhabt werden.
- 2,5''-Schläuche sollten nach Möglichkeit nicht verwendet werden.
- Das Ziehen der Schläuche sollte über möglichst kurze Distanzen erfolgen.
- Flugfeldtankwarte sollten in der ergonomischen Handhabung von Lasten unterwiesen werden.

Korrespondenzadresse

Klaus Schäfer

Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik
M 5, 7, 68161 Mannheim, Deutschland
k.schaefer@bghw.de

Danksagung. Die Autoren danken der AFS Aviation Fuel Services GmbH, Fachabteilung HSSE – Arbeitssicherheit (Hamburg) für die freundliche Unterstützung bei der Konzeption und Durchführung der Studie, ohne deren bereitwilliges Engagement die grundlegenden Ergebnisse nicht hätten erarbeitet werden können. Dabei gebührt Herrn Hartmut Gentsch ein besonderer Dank für die vielfältige und zielführende Mitarbeit.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. K. Schäfer, I. Schalk, F. Rokosch und M. Jäger geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die nicht-kommerzielle Nutzung, Vervielfältigung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die Lizenz gibt Ihnen nicht das Recht, bearbeitete oder sonst wie umgestaltete Fassungen dieses Werkes zu verbreiten oder öffentlich wiederzugeben. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz

entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Literatur

- Backhaus C, Homann H, Jäger M (2020) Manuelles Umsetzen mobilitätseingeschränkter Personen in Verkehrsflugzeugen – Entwicklung und Evaluation eines Hilfsmittels. *Zbl Arbeitsmed* 70:164–172
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2019) MEGAPHYS: Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt von BAuA und DGUV – Band 1. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2022) BAuA-Basis-Check zum Erkennen körperlicher Belastung am Arbeitsplatz – Version 2.0. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund
- Bendtsen KM, Bengtson E, Saber AT, Vogel U (2021) A review of health effects associated with exposure to jet engine emissions in and around airports. *Environ Health* 20:10
- Bernard BP, Fine LJ (1997) Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors—A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Cincinnati Dept Health Hum Serv (Publ. No. 97B141)
- BK 2108, Berufskrankheit Nr 2108 BKV, Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch langjähriges Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch langjährige Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung, die zu chronischen oder chronisch-rezidivierenden Beschwerden und Funktionseinschränkungen (der Lendenwirbelsäule) geführt haben. Siebtes Gesetz zur Änderung des Vierten Buches Sozialgesetzbuch und anderer Gesetze vom 12. Juni 2020, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 28, ausgegeben zu Bonn am 23. Juni 2020
- BMA, Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung (1992) Zweite Verordnung zur Änderung der Berufskrankheiten-Verordnung. Bundesgesetzblatt (59):2343–2344
- BMA, Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung (1996) Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit (Lastenhandhabungsverordnung – LasthandhabV). Bundesgesetzblatt: 1841 (Teil I, Nr. 63)
- Bolm-Audorff U, Ditchen D, Ellegast R et al (2007) Epidemiologische Fall-Kontroll-Studie zur Untersuchung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei der Berufskrankheit 2108 (Deutsche Wirbelsäulenstudie). Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften HVBG, Sankt Augustin
- Bolm-Audorff U, Bergmann A, Ditchen D et al (2007) Zusammenhang zwischen manueller Lastenhandhabung und lumbaler Chondrose – Ergebnisse der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl Arbeitsmed* 57:304–316
- Brütting M, Hermanns I, Nienhaus A, Ellegast R (2017) Muskel-Skelett-Belastungen beim Schieben und Ziehen von Krankenbetten und Rollstühlen. *Zbl Arbmed* 67:64–77
- Bundessozialgericht, AZ.: B 2 U 4/06 R, Urteil vom 30. Okt. 2007
- Chaffin DB (1969) A computerized biomechanical model—development of and use in studying gross body actions. *J Biomech* 2:429–441
- da Costa BR, Vieira ER (2010) Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. *Am J Ind Med* 53:285–323
- Daynard D, Yassi A, Cooper JE et al (2001) Biomechanical analysis of peak and cumulative spinal loads during simulated patient-handling activities: a substudy of a randomized controlled trial to prevent lift and transfer injury of health care workers. *Appl Ergon* 32:199–214
- DGUV, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020) MEGAPHYS: Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt von BAuA und DGUV – Band 2. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin
- DGUV, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2022) DGUV-Information 208-033: Muskel-Skelett-Belastung – erkennen und beurteilen – Anhang 1: Checkliste. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin
- EG, Europäische Gemeinschaften (1990) Über die Mindestvorschriften bezüglich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der manuellen Handhabung von Lasten, die für die Arbeitnehmer insbesondere eine Gefährdung der Lendenwirbelsäule mit sich bringt. Richtlinie 90/269/EWG. Amtsbl Eur Gemeinschaften (vom 21. Juni 1990, Nr. L 156/9)
- Ellegast R, Ditchen D, Bergmann A et al (2007) Erhebungen zur beruflichen Wirbelsäulenexposition durch die Technischen Aufsichtsdiene der Unfallversicherungsträger im Rahmen der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl Arbeitsmed* 57:251–263
- Fox RR, Lu M, Occhipinti E, Jaeger M (2019) Understanding outcome metrics of the revised NIOSH lifting equation. *Appl Ergon* 81:102897
- Gallagher S, Marras WS (2012) Tolerance of the lumbar spine to shear: a review and recommended exposure limits. *Clin Biomech* 27:973–978
- Garg A, Owen B, Beller D, Banaag J (1991) A biomechanical and ergonomic evaluation of patient transferring tasks: bed to wheelchair and wheelchair to bed. *Ergonomics* 34:289–312
- Glitsch U, Ottersbach H-J, Ellegast R et al (2008) Belastung der Lendenwirbelsäule bei Schaufeltätigkeiten. BGIA-Report 4/2008. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV, Sankt Augustin
- Grünvogel SM (2024) Einführung in die Computermanimation – Methoden, Algorithmen, Grundlagen. Springer Vieweg, Wiesbaden
- Hafez H, Jäger M (1997) Lumbar load associated with symmetrical holding of asymmetrical loads. In: Seppälä P, Luopajarvi T, Nygård C-H, Mattila M (Hrsg) Musculoskeletal Disorders, Rehabilitation, Bd. 4. Finnish Inst Occup Health, Helsinki FIN, S S 506–508
- Hartung E, Schäfer K, Jäger M et al (1999) Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) zur Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule durch Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung bei Verdacht auf Berufskrankheit Nr. 2108, Teil 2: Vorschlag zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 34:112–122
- Holzgreve F, Maurer-Grubinger C, Fraeuln L et al (2024) Motion Capture Vacuuming – MoCapVac: Studienbeschreibung und Zusammenfassung erster Bewegungsanalyseergebnisse. *Zbl Arbeitsmed* 74:33–42
- ISO 11228-1, International Organization for Standardization (2021) Ergonomics—Manual handling—Part 1: Lifting, lowering and carrying, 2. Aufl. International Organization for Standardization, Geneva CH
- ISO 11228-2, International Organization for Standardization (2007) Ergonomics—Manual handling—Part 2: Pushing and pulling. International Organization for Standardization, Geneva CH
- Jäger M, Luttmann A (1992) The load on the lumbar spine during asymmetrical bi-manual materials handling. *Ergonomics* 35:783–805
- Jäger M, Luttmann A, Bolm-Audorff U et al (1999) Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) zur Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule durch Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung bei Verdacht auf Berufskrankheit Nr. 2108, Teil 1: Restrospektive Belastungsermittlung für risikobehaftete Tätigkeitsfelder. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 34:101–111
- Jäger M, Jordan C, Luttmann A et al (2000) Evaluation and assessment of lumbar load during total shifts for occupational manual materials handling jobs within the Dortmund Lumbar Load Study—DOLLY. *Int J Indust Ergon* 25:553–571
- Jäger M (2001) Belastung und Belastbarkeit der Lendenwirbelsäule im Berufsalltag – ein interdisziplinärer Ansatz für eine ergonomische Arbeitsgestaltung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 17, Nr 208. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Jäger M, Luttmann A, Gollner R, Laurig W (2001) The Dortmund—Biomechanical model for quantification and assessment of the load on the lumbar spine. *SAE Trans* 110:2163–2171
- Jäger M, Geiß O, Bergmann A et al (2007) Biomechanische Analysen zur Belastung der Lendenwirbelsäule innerhalb der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl Arbeitsmed* 45:264–276
- Jäger M, Sawatzki K, Glitsch U et al (2007) Load on the lumbar spine of flight attendants during pushing and pulling trolleys aboard aircraft. *Int J Ind Ergon* 37:863–876
- Jäger M, Jordan C, Theilmeier A et al (2013) Lumbar-load analysis of manual patient-handling activities for biomechanical overload prevention among healthcare workers. *Ann Occup Hyg* 57:528–544
- Jäger M (2018) Extended compilation of autopsy-material measurements on lumbar ultimate compressive strength for deriving reference values in ergonomic work design: The Revised Dortmund Recommendations. *EXCLI J* 17:362–385
- Jäger M (2023) The Dortmund Lumbar Load Atlas—A contribution to objectifying lumbar load and load-bearing capacity for an ergonomic work design of manual materials handling. Springer, Cham CH
- Johnson Law Offices Hearing loss in the airline industry and among airport workers in the US. <https://www.johnsonlawoffices.net>. Zugriffen: 3. Dez. 2023
- Kittelmann M, Adolph L, Michel A et al (2021) Handbuch Gefährdungsbeurteilung. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund
- Kumar S (1990) Cumulative load as a risk factor for back pain. *Spine* 15:1311–1316
- LASI, Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (2001) Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Heben und Tragen von Lasten, LV 9. Vierte, überarbeitete

- Auflage. Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Potsdam
44. Lastenhandhabungsverordnung (2020) Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit. Lastenhandhabungsverordnung vom 04.12.1996 (BGBl. I S. 1841, 1842), zuletzt geändert durch Artikel 294 der Verordnung vom 19.06.2020 (BGBl. I S. 1328)
45. LASI, Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (2002) Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Ziehen und Schieben von Lasten, LV 29. Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Potsdam
46. Li JQ, Kwong WH, Chan YL, Kawabata M (2022) Comparison of in vivo intradiscal pressure between sitting and standing in human lumbar spine: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Life* 12(457):1–18
47. Ligris U, Pérez-Soto M, Michaud F et al (2024) Human motion capture, reconstruction, and musculoskeletal analysis in real time. *Multibody Syst Dyn* 60:3–25
48. Marras WS, Davis KG, Kirking BC, Bertsche PK (1999) A comprehensive analysis of low-back disorder risk and spinal loading during the transferring and repositioning of patients using different techniques. *Ergonomics* 42:904–926
49. Marras WS, Knapik GG, Ferguson S (2009) Lumbar spine forces during manoeuvring of ceiling-based and floor-based patient transfer devices. *Ergonomics* 52:384–397
50. McGill SM, Norman RW, Yingling VR et al (1998) Shear Happens! Suggested guidelines for ergonomists to reduce the risk of low back injury from shear loading. In: The 30th Annual Conference of the Human Factors Association of Canada (HFAC). Mississauga ON, Canada, S.S. 157–S. 161
51. Mital A, Nicholson AS, Ayoub MM (1997) A guide to manual materials handling, 2. Aufl. Taylor & Francis, London UK
52. Morris JM, Lucas DB, Bresler B (1961) Role of the trunk in stability of the spine. *J Bone Joint Surg Br* 43A:327–351
53. Mühlemeyer C, Schäfer A, Serafin P et al (2024) Manuelles Ziehen und Schieben von Lasten – Gefährdungsbeurteilung mit der Leitmerkmal-methode. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg) Dortmund
54. Nachemson A, Morris JM (1964) In vivo measurements of intradiscal pressure. *J Bone Joint Surg* 46A:1077–1092
55. NIOSH, National Institute of Occupational Safety and Health (1981) Work Practices Guide for Manual Lifting. Publ. No. 81–122. Dept Health Hum Services, Cincinnati OH, USA
56. Norman R, Wells R, Neumann P et al (1998) A comparison of peak vs cumulative physical work exposure risk factors for the reporting of low back pain in the automotive industry. *Clin Biomech* 13:561–573
57. Rodríguez-Díaz A, Adenso-Díaz B, González-Torre PL (2017) A review of the impact of noise restrictions at airports, Transportation Research, Part D. *Transport Environ* 50:144–153
58. Schaub K, Berg K, Winter G et al (2007) Muscular capabilities and workload of flight attendants for pushing and pulling trolleys aboard aircraft. *Int J Ind Ergon* 37:883–892
59. Schibye B, Hansen AF, Hye-Knudsen CT et al (2003) Biomechanical analysis of the effect of changing patient-handling technique. *Appl Ergon* 34:115–123
60. Schiefer C, Griemsmann S, Hermanns I et al (2022) Auswirkungen von alternativen Hilfsmitteln auf die körperlichen Belastungen beim Patienten-transport im Rettungsdienst. *Z Arbwiss* 76:118–128
61. Seidler A, Bergmann A, Ditchen D et al (2007) Zusammenhang zwischen lumbalen Prolapserkrankungen und der kumulativen Wirbelsäulenbelastung durch Lastenhandhabungen und Tätigkeiten in Rumpfbeugehaltung – Ergebnisse der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl Arbeits-med* 57:290–303
62. Seidler A, Bergmann A, Bolm-Audorff U et al (2012) Forschungsvorhaben „Erweiterte Auswertung der Deutschen Wirbelsäulenstudie mit dem Ziel der Ableitung geeigneter Richtwerte“, Abschlussbericht. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Sankt Augustin
63. Seidler A, Bergmann A, Bolm-Audorff U et al (2014) Dosis-Wirkung-Zusammenhang zwischen physischen Belastungen und lumbalen Bandscheibenerkrankungen. Ergebnisse der DWS-Richtwertstudie. *Zbl Arbeitsmed* 64:239–257
64. Serafin P, Schäfer A, Klußmann A et al (2022) Manuelles Heben, Halten und Tragen – Gefährdungsbeurteilung mit der Leitmerkmal-methode. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg), Dortmund
65. Skotte JH, Essendrop M, Hansen AF, Schibye B (2002) A dynamic 3D biomechanical evaluation of the load on the low back during different patient-handling tasks. *J Biomech* 35:1357–1366
66. Waters TR, Putz-Anderson V, Garg A, Fine LJ (1993) Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics* 36:749–776
67. Wilke H-J, Neef P, Caimi M et al (1999) New in vivo measurements of pressures in the intervertebral disc in daily life. *Spine* 24:755–762

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.