

Zbl Arbeitsmed 2014 · 64:258–269  
 DOI 10.1007/s40664-014-0036-2  
 Online publiziert: 23. Juli 2014  
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

D. Ditchen<sup>1</sup> · N. Lundershausen<sup>1</sup> · A. Bergmann<sup>2</sup> · U. Bolm-Audorff<sup>3</sup> · J. Haerting<sup>2</sup> · E. Haufe<sup>4</sup> · N. Kersten<sup>5</sup> · A. Luttmann<sup>6</sup> · P. Morfeld<sup>7</sup> · K. Schäfer<sup>8</sup> · A. Seidler<sup>4</sup> · J. Voß<sup>6</sup> · M. Jäger<sup>6</sup> · R. Ellegast<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin

<sup>2</sup> Institut für Medizinische Epidemiologie, Biometrie und Informatik, Universität Halle-Wittenberg, Halle

<sup>3</sup> Dezernat Landesgewerbeamt, Regierungspräsidium Darmstadt, Wiesbaden

<sup>4</sup> Institut und Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin, TU Dresden

<sup>5</sup> Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Berlin

<sup>6</sup> Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo), Dortmund

<sup>7</sup> Institut für Epidemiologie und Risikobewertung in der Arbeitswelt (IERA), Evonik Services, Essen

<sup>8</sup> Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution (BGHW), Mannheim

## Abschätzung von lumbalen Bandscheiben-Druckkräften in BK-2108-Verfahren

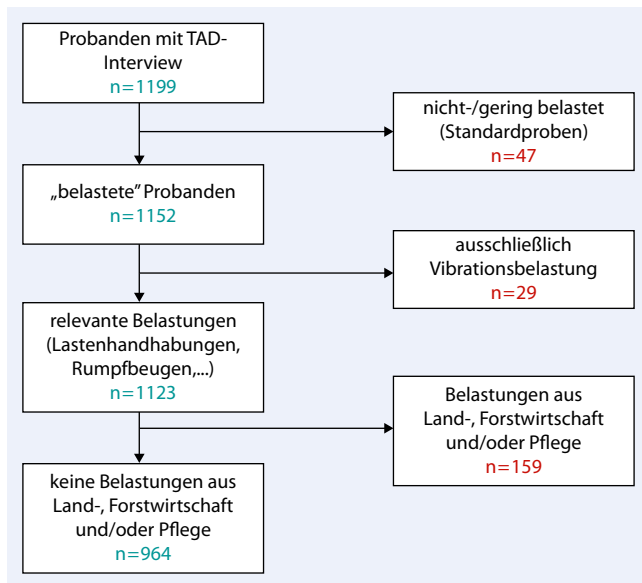
### Entwicklung eines Instruments innerhalb der DWS-Richtwertstudie

Seit Einführung der Berufskrankheit (BK) Nr. 2108 der Berufskrankheiten-Verordnung (BKV) „Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch langjähriges Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch langjährige Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung (...)“ [3, 4] stellt die retrospektive Ermittlung der arbeitstechnischen Voraussetzungen eine große Herausforderung dar. Im Rahmen dieser Ermittlungen sind von den zuständigen Trägern der gesetzlichen Unfallversicherung detaillierte Informationen zu beruflichen Tätigkeiten zu erheben, die zum Teil Jahrzehnte zurückliegen. Eine zusätzliche Schwierigkeit liegt in der Tatsache, dass die zu ermittelnden Expositionen sehr heterogen sein können und hinsichtlich ihrer Belastungshöhe schwierig einzustufen sind. Im Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD; [13]) wird mit der Bandscheiben-Druckkraft auf die unterste Bandscheibe (L5/S1) ein Expositionsmaß verwendet, mit dem die unterschiedlichen Expositionen zusammengeführt und – unter Berücksichtigung von Expositionsdauer und -häufigkeit – die Wirbelsäulenbelastung in Form einer Dosis wiedergegeben werden können. Die Abschätzung

der Bandscheiben-Druckkraft für unterschiedliche Tätigkeiten beruht dabei auf biomechanischen Modellierungen mithilfe des Simulationsprogramms „Der Dortmunder“ [14]. Da derartige Modellierungen sehr aufwendig sind und nicht flächendeckend für den Einsatz in BK-Feststellungsverfahren zur Verfügung stehen können, boten die Autoren des MDD ein einfaches, auf 7 Bestimmungsgleichungen basierendes Verfahren zur Abschätzung der Bandscheibendruckkraft im BK-Verfahren an [2, 12]. Dieses Verfahren zählte zu den 10 Dosismodellen, die im Rahmen der Deutschen Wirbelsäulenstudie (DWS1; [5, 6, 20, 22]) hinsichtlich der Fähigkeit zur Beschreibung eines Dosis-Wirkung-Zusammenhangs bei der BK 2108 untersucht wurden. Die als bevölkerungsbezogene Fall-Kontroll-Studie angelegte DWS1 zeichnete sich u. a. durch den hohen Aufwand, der hinsichtlich der retrospektiven Ermittlung der beruflichen Exposition durch manuelle Lastenhandhabung und belastungsintensive Körperhaltungen betrieben wurde [8], sowie die anschließende biomechanische Modellierung der jeweiligen internen Wirbelsäulenbelastung in Form von

Bandscheiben-Druckkräften aus [17]. Als Ergebnis der Studie zeigte sich, dass mehrere der untersuchten Modelle eine Dosis-Wirkung-Beziehung beschreiben konnten, sich aber kein einheitliches, für alle untersuchten Fallgruppen bestanpassendes Dosismodell finden ließ. In der hier beschriebenen Reanalyse der DWS1-Daten, der DWS-Richtwertstudie (DWS2; [23], sowie die Beiträge von Bergmann et al. [1], Jäger et al. [18], Morfeld et al. [21] und Seidler et al. [24]), konnte nun auf der Grundlage einer kontinuierlichen Datenauswertung und der Anwendung komplexer Mittelungsverfahren jeweils ein „Bestmodell“ für Männer und Frauen identifiziert werden. Gleichzeitig war es ein Ziel der DWS2, die gefundenen Dosis-Wirkung-Beziehungen auch mithilfe eines auf Bestimmungsgleichungen basierenden Modells möglichst gut zu beschreiben, um auf diese Weise ein für die BK-Praxis geeignetes Verfahren zu entwickeln. Aufgrund von durchgeführten Sensitivitätsanalysen konnten grundlegende

Die DWS-Richtwertstudie wurde gefördert durch die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV).



**Abb. 1** ▲ Datengrundlage in der DWS-Richtwertestudie zur Ableitung von Bestimmungsgleichungen für die formelbasierte Abschätzung der lumbosakralen Bandscheiben-Druckkraft in Feststellungsverfahren zur Berufskrankheit Nr. 2108 (Flow-Chart). DWS Deutsche Wirbelsäulenstudie, TAD Technische Aufsichtsdienste der gesetzlichen Unfallversicherungsträger. (Aus Seidler et al. [23]; mit freundlicher Genehmigung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e. V.)

Prinzipien des MDD bestätigt werden (Jäger et al. [18]). Hierzu gehören die Einführung von Schwellenwerten für die Bandscheiben-Druckkraft, Tagesdosis und Lebensdosis, die überproportionale (quadratische) Wichtung der Einwirkungshöhe (Druckkraft) gegenüber der Einwirkungsdauer sowie die Vorgehensweise bei der Berechnung einer Tagesdosis auf Grundlage von Einzelexpositionen (Wurzel über der Summe der Einzelexpositionen). Bei der Entwicklung eines Praxisverfahrens waren demnach folgende Kriterien zu berücksichtigen.

- Übernahme der Grundprinzipien des MDD,
- Ableitung von Bestimmungsgleichungen für die Abschätzung von Bandscheiben-Druckkräften bei unterschiedlichen Belastungsarten auf Grundlage der biomechanischen Modellierungen,
- Reduzierung der Anzahl von Bestimmungsgleichungen für die Anwendung in BK-Feststellungsverfahren bei gleichzeitiger Prüfung der Validität der Berechnungsergebnisse anhand eines Vergleichs mit den Ergebnissen der biomechanischen Modellierung.

Somit war es das erklärte Ziel dieser Berechnungen, einen Kompromiss zwischen der benötigten Genauigkeit der Abschätzung der Wirbelsäulenbelastung auf der einen Seite und der branchenübergreifenden und flächendeckenden Einsetzbarkeit des Verfahrens in der BK-Praxis auf der anderen Seite zu finden.

## Methoden

### Ausgangspunkt: Deutsche Wirbelsäulenstudie

Grundlage für die Ableitung von Bestimmungsgleichungen zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft in unterschiedlichen Körperhaltungen und bei verschiedenen Arten manueller Lastenhandhabung waren Daten zur beruflichen Exposition hinsichtlich physischer Belastungen, die im Rahmen der DWSI erhoben worden waren [5]. Bei der DWSI handelt es sich um eine bevölkerungsbezogene Fall-Kontroll-Studie zur Untersuchung von Dosis-Wirkung-Beziehungen bei der BK Nr. 2108. Zu diesem Zweck wurde für 915 Patienten mit bandscheibenbedingten Erkrankungen der Lendenwirbelsäule – nach Geschlecht und

Krankheitsbild (Prolaps, Chondrose) in 4 Fallgruppen unterteilt – und 901 Kontrollprobanden aus der Bevölkerung die physische Exposition über das gesamte Berufsleben in einem aufwendigen, zweistufigen Verfahren ermittelt. Die erste Stufe bestand aus einer standardisierten Befragung durch Laieninterviewer, in der alle Probanden Angaben zu ihren Berufen, gehandhabten Lastgewichten und Arbeiten in definierten Körperhaltungen machten. Diese Befragung diente sowohl zur Einteilung der Probanden in nicht, gering und relevant belastete Personen als auch zur Festlegung von Branchenexperten in der zweiten Stufe der Expositionsermittlung. Bei dieser zweiten Stufe handelte es sich um ein semistandardisiertes, ausführliches Interview durch branchenspezifisch zugeordnete Experten aus den Technischen Aufsichtsdiensten der gesetzlichen Unfallversicherungsträger. In diesem Interview wurden alle relevant belasteten Probanden sowie Stichproben der nicht und gering belasteten Probanden zu ihrer beruflichen Exposition befragt, insgesamt 1199 Personen. Inhalte der Expositionsermittlung waren Belastungen durch Heben, Umsetzen, Tragen, Halten, Ziehen, Schieben, Fangen, Werfen und Schaufeln von Lasten, Arbeiten in belastungsintensiven Körperhaltungen wie unterschiedlich stark ausgeprägten Rumpfvorneigungen, -seitneigungen und -torsionen, Belastungen durch Ganzkörperschwingungen sowie branchenspezifische Belastungen in der Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Kranken- und Altenpflege. Diese Daten der externen Wirbelsäulenbelastung wurden anschließend zur biomechanischen Modellierung mithilfe des Simulationsprogramms „Der Dortmunder“ von Bandscheiben-Druckkräften als Werte der körperinternen Wirbelsäulenbelastung genutzt.

Ausführliche Beschreibungen der in der DWSI eingesetzten Methoden finden sich bei Bolm-Audorff et al. [5], Ellegast et al. [8] sowie Jäger et al. [17],[18].

### Datengrundlage

Von den 1199 DWS-Probanden mit intensiver Expositionsermittlung erfüllten 964 Datensätze die Voraussetzungen für die Ableitung von Bestimmungsglei-

D. Ditchen · N. Lundershausen · A. Bergmann · U. Bolm-Audorff · J. Haerting · E. Haufe · N. Kersten · A. Luttmann · P. Morfeld · K. Schäfer · A. Seidler · J. Voß · M. Jäger · R. Ellegast

## Abschätzung von lumbalen Bandscheiben-Druckkräften in BK-2108-Verfahren. Entwicklung eines Instruments innerhalb der DWS-Richtwertstudie

### Zusammenfassung

**Hintergrund.** Die Anamnese der arbeits-technischen Voraussetzungen bei der Berufskrankheit Nr. 2108 der Berufskrankheiten-Verordnung (BKV) stützt sich in der Regel auf eine detaillierte retrospektive Expositions-ermittlung. Das zu diesem Zweck entwickelte Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) bietet eine standardisierte Methode zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft auf Basis von 6 Bestimmungsgleichungen für das Heben und Tragen von Lasten sowie 1 Bestimmungsgleichung für Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung. Das MDD zählte in der Deutschen Wirbelsäulenstudie (DWS1) nicht zu den besten Dosismodellen, sodass es ein Ziel der DWS-Reanalyse oder DWS-Richtwertstudie (DWS2) war, modifizierte Bestimmungsgleichungen zur Abschätzung lumbosakraler Bandscheiben-Druckkräfte abzuleiten und somit ein für die Berufskrankheiten-praxis verbessertes Instrument zu entwickeln.

**Material und Methoden.** Die Ableitung der Bestimmungsgleichungen erfolgte auf Grundlage der DWS1, in der die berufliche Exposition von etwa 1200 Probanden detail-

liert per Experteninterview und anschließender individueller biomechanischer Modellierung der Bandscheiben-Druckkräfte ermittelt wurde. Der Datensatz beinhaltete insgesamt etwa 1900 verschiedene Belastungskombinationen für Hebe-, Absenk-, Umsetz-, Halte- und Tragevorgänge, aus denen sich mittels linearer Regression Bestimmungsgleichungen zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft ableiten ließen. Um einen in der Praxis anwendbaren Satz an Bestimmungsgleichungen zu erhalten, waren die Kombinationen durch repräsentative Auswahl und sinnvolle Zusammenlegung entsprechend zu reduzieren. Zur Validierung der formelbasier-ten Druckkraftabschätzung erfolgte ein Methodenvergleich durch Gegenüberstellung der formelbasierten und der biomechanisch modellierten vorgangsspezifischen Expositionen (via des Simulationsprogramms „Der Dortmunder“) für insgesamt 4450 Arbeitsschichten.

**Ergebnisse.** Nach Prüfung einzelner Zwischenschritte konnte ein finaler Formelsatz abgeleitet werden, der aus insgesamt 11 Be-

stimmungsgleichungen für Hebe-, Halte- und Tragevorgänge sowie 4 Faktoren zur Beschreibung einhändiger, körperferner oder asymmetrischer Lastenhandhabung besteht. Die Prüfung auf Validität der entsprechend berechneten Expositionen ergab gute bis akzeptable Übereinstimmungen mit den als Referenz definierten Berechnungen auf der Grundlage vorgangsspezifischer biomechanischer Simulationsrechnungen.

**Schlussfolgerung.** Die Kernergebnisse der vorliegenden Reanalyse lassen sich mit dem finalen Formelsatz gut reproduzieren und die Anzahl von 11 Bestimmungsgleichungen und 4 Faktoren für manuelle Lastenhandhabungen erscheint praxistauglich. Die Anwendung der abgeleiteten Berechnungsformeln kann unabhängig von der Diskussion um die Einführung und Höhe von Richtwerten bei der BK Nr. 2108 erfolgen.

### Schlüsselwörter

Berufliche Exposition · Biomechanische Phänomene · Bandscheibenbedingte Erkrankung · Statistik · Berufskrankheiten

## Assessment of lumbar-disc compressive forces in German occupational disease no. 2108. Development of an instrument within the EPILIFT Exposure Criteria Study

### Abstract

**Background.** The assessment procedure of occupational disease no. 2108 (lumbar spine disease) is usually based on a detailed retrospective exposure analysis. The Mainz-Dortmund Dose Model (MDD), specifically developed for this purpose, provides a standardized method to estimate the lumbar disc-compressive forces based on six equations for lifting and carrying of objects and one for extremely trunk-flexed postures. As the MDD was not among the best dose models in the German Spine Study (EPILIFT), within the framework of a reanalysis of that study (EPILIFT Exposure Criteria Study or EPILIFT 2), it was attempted to modify the equations and develop an improved instrument suitable for application in the procedures related to occupational disease no. 2108.

**Materials and methods.** The equations were deduced based on the EPILIFT study, in which the occupational exposure of approximately 1,200 participants was assessed through the use of expert interviews and subsequent in-

dividual biomechanical modeling of the lumbar disc-compressive forces. The data set included approximately 1,900 different load combinations of lifting, lowering, transferring, holding, and carrying sequences that allowed for the deduction of formulas to estimate lumbar disc-compressive forces by using linear regression. In order to create a praxis-orientated set of equations, the combinations had to be reduced by representative selections and meaningful grouping. To validate the equation-based compressive force estimation, a method comparison was performed for the equation-based exposures and the biomechanically modeled action-specific exposures (via “The Dortmunder” simulation program) for a total of 4,450 work shifts.

**Results.** After assessing several intermediate steps, a final equation set was derived, which consisted of 11 equations for lifting, holding, and carrying tasks in addition to four factors for the description of one-handed, over-

head, or asymmetrical load carrying. In the examination of the validity of the relevant exposures for different dose levels, good to acceptable conformity was found for the comparison with calculations based on biomechanical simulation defined as the “reference standard.”

**Conclusions.** The key results of the EPILIFT 2 study were adequately reproducible, with the “final” equation set and the 11 equations and four factors for manual load handling appearing to be suitable for practical use. The derived equations can be applied independently of the discussion on the definition of critical values of occupational disease no. 2108.

### Keywords

Occupational exposure · Biomechanical phenomena · Intervertebral disc disease · Statistics · Occupational diseases

**Tab. 1** Zuordnung konstanter Werte der Bandscheiben-Druckkraft auf die unterste Bandscheibe der Wirbelsäule L5/S1 zu definierten Oberkörperhaltungen. (Modifiziert nach Seidler et al. [23])

Oberkörperhaltung	Bandscheiben-Druckkraft L5/S1 (kN)
Aufrecht (etwa 0°)	0,6
Vorgeneigt (etwa 20°)	1,2
Vorgeneigt (etwa 45°)	1,7
Vorgeneigt (etwa 75°)	1,9
Extrem vorgeneigt (≥90°)	1,7
Aufrecht und verdreht	0,8
Zur Seite gebeugt	1,1
Vorgeneigt/verdreht oder vorgeneigt/seitlich gebeugt	2,0

kN Kilonewton.

chungen (Abb. 1). Der Ausschluss von Probanden wurde mit fehlender relevanter Belastung (z. B. nicht belastet oder ausschließliche Einwirkung von Ganzkörperschwingungen) bzw. abweichender Expositionsermittlung (z. B. Spezialfragebögen in Pflege und Landwirtschaft) begründet. Der endgültige Datensatz zur Ableitung von Bestimmungsgleichungen umfasste insgesamt 4450 Arbeitsschichten.

## Entwicklung von Bestimmungsgleichungen

Um ein Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft für einzelne Belastungssituationen zu entwickeln, wurden die ursprünglich berechneten Bandscheiben-Druckkräfte wieder den zugehörigen Belastungssituationen zugeordnet. Da der Datensatz allein zum Heben und Tragen von Lasten über 1700 Belastungskombinationen enthielt, war in einem zweiten Schritt eine deutliche Reduzierung entsprechender Bestimmungsgleichungen durch Vereinfachung und Kombination verschiedener Situationen notwendig.

Für diesen Zweck kamen unterschiedliche Strategien zum Einsatz. Bei einem Teil der Belastungssituationen konnten konstante, über biomechanische Modellierungen gewonnene Druckkraftwerte

direkt zugeordnet werden. Hierzu zählen etwa Schaufeltätigkeiten ([10]), Pflegetätigkeiten ([16, 19, 25, 28]) oder Rumpfbeugehaltungen (Tab. 1). In anderen Situationen konnten bereits existierende Bestimmungsgleichungen aus der Literatur genutzt werden, z. B. für das Ziehen und Schieben von Lasten [15].

Für weitere manuelle Lastenhandhabungen mussten dagegen spezifische Bestimmungsgleichungen aus den Expositionsdaten abgeleitet werden. Zur Beschreibung der Belastungsarten Heben, Absenken, Umsetzen, Halten und Tragen von Lasten enthielt der DWSI-Datensatz neben Angaben zum Lastgewicht auch Daten zu Oberkörperhaltung und Lastposition (Abb. 2) sowie zur Händigkeit. Insgesamt ergaben sich dadurch 1878 real vorkommende Belastungssituationen (Heben: 1738, Tragen: 65, Halten: 75).

Um aus den für die genannten Belastungssituationen in der DWSI ermittelten Druckkraftwerten Bestimmungsgleichungen zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft ableiten zu können, war es in einem ersten Schritt notwendig, Regressionsgleichungen der Form  $F=mx+b$  aufzustellen, wobei „F“ die Bandscheiben-Druckkraft bezüglich L5/S1, „m“ den Lastgewichtskoeffizienten, „x“ das Lastgewicht in kg und „b“ die Komponente der Oberkörperhaltung beschreiben. Dazu wurden diejenigen Belastungssituationen (Kombinationen) ausgewählt, für die mindestens 3 verschiedene Lastgewichte vorlagen. Insgesamt erfüllten 554 Belastungskombinationen diese Bedingung. Um den Datensatz weiter zu reduzieren, wurden lediglich diejenigen Kombinationen als relevant eingestuft, die mindestens zehnmal im Datensatz vorkamen (Vorkommen  $\geq 10$ ), sodass sich die Anzahl der Kombinationen auf insgesamt 271 verringerte. Aus den entsprechenden Masse-Kraft-Paaren wurden mittels linearer Regression Formeln für die Berechnung der Bandscheiben-Druckkraft bei gleicher Handhabung von unterschiedlichen Lastgewichten aufgestellt. Die entsprechenden Kombinationsmöglichkeiten für die einzelnen Belastungskategorien sind in Tab. 2 dargestellt.

Da 271 verschiedene Gleichungen zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft in unterschiedlichen Belastungs-










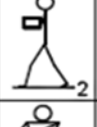
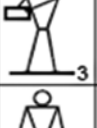






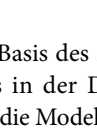
situationen in der Praxis nicht anwendbar sind, wurde diese Anzahl an Formeln durch den Einsatz folgender Methoden schrittweise reduziert.

- Sinnvolles Zusammenfassen ähnlicher Belastungssituationen, z. B. aller Situationen mit Last auf Rücken oder Schulter;
- Zusammenfassen der Formeln für Anheben und Absenken von Lasten zum Heben aufgrund ähnlicher Ergebnisse;
- Sinnvolles Zusammenfassen verschiedener Rumpfbeugeklassen;
- Sinnvolles Zusammenfassen verschiedener Lasthöhen, z. B. Brusthöhe und Hüfthöhe.

Um die sich durch diese Reduzierungsschritte zwangsweise ergebenden Ungenauigkeiten bei der Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft auszugleichen, wurden zusätzlich zu den Bestimmungsgleichungen mehrere Faktoren für besondere Belastungssituationen aus den Daten abgeleitet. Auf diese Weise konnte die Genauigkeit der Abschätzungen für einhändige, körperferne und asymmetrische Lastenhandhabungen verbessert werden. Die einzelnen Reduzierungsschritte werden in Seidler et al. [23] genau dargestellt.

## Validierung der Bestimmungsgleichungen

Aus den im vorigen Kapitel beschriebenen Schritten zur Reduzierung der Formelanzahl standen als Zwischenergebnisse jeweils unterschiedlich große Formelsätze zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft zur Verfügung. Um die Güte der Expositionswerte bzw. Tagesdosen, die auf Grundlage dieser Formeln berechnet wurden ( $TD_{\text{Formel}}$ ), zu bestimmen, sollten diese jeweils mit den aus der biomechanischen Modellierung berechneten Expositionswerten ( $TD_{\text{Modell}}$ ) verglichen werden. Dieser Vergleich der Expositionswerte, in den insgesamt 4450 typische Arbeitsschichten aus dem DWSI-Datensatz einbezogen werden konnten, fand neben der hier dargestellten Ebene der Tagesdosen auch auf den Ebenen der Lebensdosen und der „odds ratios“ (OR) statt [23]. Grundlage für die Vergleiche war jeweils eine Berechnung

		Oberkörperhaltung							
OL-Piktogramme		aufrecht	vorgeneigt (etwa 20°)	vorgeneigt (etwa 45°)	vorgeneigt (etwa 75°)	extrem vorgeneigt (etwa 90° oder mehr)	aufrecht und verdreht	zur Seite gebeugt	vorgeneigt / verdreht oder vorgeneigt/ seitlich gebeugt
(Oberkörperhaltung-Lastposition)									
Lastposition	Last vor dem Körper, Arme weit nach vorne 	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
	Last vor dem Körper, Arme dicht am Körper 	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
	Last auf einer Seite, beidhändig 	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8
	Last auf einer Seite, einhändig 	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8
	Lasten beiderseits des Körpers 	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
	Last über Kopf 	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8
	Last auf einer Schulter 	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8
	Last auf beiden Schultern 	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8
	Last auf dem Rücken, ohne Einsatz der Arme 	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8
	Last auf dem Rücken, mit Einsatz der Arme 	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8

**Abb. 2** ◀ Matrix zur Darstellung der möglichen Kombinationen von Oberkörperhaltungen und Lastpositionen in der Deutschen Wirbelsäulenstudie (DWS1). (Aus [5])

der Dosen auf Basis des Dosismodells 5 der DWS1, das in der DWS2 als Ausgangspunkt für die Modellfindung diente (Grundmodell). Das Grundmodell zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus: Alle Rumpfbeugehaltungen ohne Lastenhandhabung ab einem Vorneigungswinkel von 45° werden berücksichtigt sowie alle durch Heben, Halten oder Tragen von Lasten hervorgerufene Bandscheiben-Druckkräfte ab 2,0 kN. Eine Tagesdosischwelle ist nicht vorhanden, sodass

alle Tagesdosiswerte unabhängig von der Expositionshöhe in die Berechnung einer Lebensdosis eingehen. Neben dem Heben oder Tragen von Lasten werden auch Expositionen durch Ziehen, Schieben, Fangen, Werfen von Lasten oder Kraftaufwendungen bei der Berechnung der Tagesdosis berücksichtigt.

Die Berechnung der Tagesdosis erfolgte nach der im Mainz-Dortmunder Dosismodell beschriebenen Art und Weise durch Summierung der Teildosen von

Einzelvorgängen pro Schicht unter quadratischer Wichtung der Einwirkungshöhe (Druckkraft F auf Bandscheibe L5/S1) gegenüber der Einwirkungsdauer eines Einzelvorgangs ( $t_i$ ) und einer Normalisierung auf eine Arbeitsschicht von 8 h Dauer nach folgender Formel [13]:

$$D_r = \sqrt{\frac{\sum_i (F_i^2 \cdot t_i)}{8h}} \cdot 8h$$



**Tab. 2** Anzahl der vorkommenden Belastungskombinationen zum Heben, Absenken, Umsetzen, Halten und Tragen von Lasten in der Deutschen Wirbelsäulenstudie (DWS1). (Modifiziert nach Seidler et al. [23])

		Anzahl Kombinationen (n) gesamt (n)	Anzahl Kombinationen (n) mit Lastgewichten $\geq 3$	Anzahl Kombinationen (n) mit Lastgewichten $\geq 3$ und Vorkommen $\geq 10$
Heben	Beidhändig	545	163	79
	Einhändig	316	86	38
Absenken	Beidhändig	388	119	54
	Einhändig	220	47	23
Umsetzen	Beidhändig	190	54	24
	Einhändig	79	20	7
Halten	Beidhändig	55	28	17
	Einhändig	20	7	5
Tragen	Beidhändig	46	20	15
	Einhändig	19	10	9
<b>Gesamt</b>		<b>1878</b>	<b>554</b>	<b>271</b>

mit

$D_r$  = schichtbezogene Beurteilungsdosis (Tagesdosis),

$i$  = Teiltätigkeit, Zeitintervall,

$F_i$  = Bandscheiben-Druckkraft L5/S1,

$t_i$  = Dauer von  $i$ .

Wie der Formel zu entnehmen ist, weist die berechnete Beurteilungs- oder Tagesdosis die Einheit Newtonstunden (Nh) auf.

Der Vergleich der Dosiswerte erfolgte nach verschiedenen Reduzierungsschritten insgesamt 3-mal, wobei sich insgesamt 3 unterschiedlich große Formelsätze ergaben, die für die Validierungsuntersuchungen genutzt wurden.

**Formelsatz 45.** Dieser Formelsatz bestand aus 45 Bestimmungsgleichungen zum Heben, Halten, Umsetzen und Tragen von Lasten sowie 2 zusätzlichen Faktoren für körperfernes und asymmetrisches Heben oder Umsetzen. Die aus diesem Datensatz berechneten Tagesdosen werden im Folgenden als  $TD_{\text{Formel}_{45}}$  bezeichnet.

**Formelsatz 22.** Dieser aus einer weiteren Vereinfachung hervorgegangene Formelsatz bestand aus 22 Bestimmungsgleichungen (6 Formeln für einhändiges Heben, Absenken oder Umsetzen, 6 Formeln für beidhändiges Heben, Absenken oder Umsetzen, 5 Formeln für Tragen, 5 Formeln für Halten) sowie 2 Faktoren für körperfernes und asymmetrisches Heben, Absenken oder Umsetzen. Die entsprechend berechneten Tagesdosen

werden im Folgenden als  $TD_{\text{Formel}_{22}}$  bezeichnet.

**Formelsatz 11.** Die letzte Reduzierungsstufe ergab einen Formelsatz bestehend aus 11 Bestimmungsgleichungen (6 Formeln für Heben, Absenken und Umsetzen; 3 Formeln für Tragen und 2 Formeln für Halten), ergänzt um 4 Faktoren für einhändiges, asymmetrisches und körperfernes Heben, Absenken oder Umsetzen von Lasten, letztere Handhabungsart wiederum unterteilt in 2 verschiedene Rumpfbeugeklassen. Die aus diesem Datensatz berechneten Tagesdosen werden im Folgenden als  $TD_{\text{Formel}_{11}}$  bezeichnet.

Die jeweilige Übereinstimmung der Ergebnisse aus biomechanischer Simulation und Formelberechnung wurde statistisch mithilfe der Intraklassenkorrelation (ICC) und linearer Regression (Bestimmtheitsmaß  $R^2$ ) bzw. grafisch unter Verwendung von Regressionsgeraden und Bland-Altman-Plots [26, 27] überprüft. Die Bland-Altman-Diagramme erlauben einen schnellen Überblick über das Verhältnis positiver und negativer Abweichungen der formelbasiert berechneten Werte von den spezifisch modellierten Werten (Referenz) sowie über den Einfluss der Expositionshöhe auf die Güte der Berechnung. In den Diagrammen werden jeweils die Differenzen aus beiden Wertepaaren (formelbasiert berechnet bzw. spezifisch modelliert) gegen den Mittelwert aus beiden Methoden aufgetragen. Aus den Plots lassen sich wei-













terhin die durchschnittliche Differenz der Wertepaare (Verzerrung) ablesen sowie die sog. oberen und unteren Übereinstimmungsgrenzen. Letztere berechnen sich aus der Verzerrung zu- bzw. abzüglich etwa der doppelten Standardabweichung ( $SD \pm 1,96$ ). Der Bereich zwischen oberer und unterer Übereinstimmungsgrenze umfasst bei hinreichend symmetrischer Verteilung der Differenzpaare etwa 95% aller Werte und gibt somit Hinweise auf die Spannweite der Abweichungen. Hinweise zu den Vor- und Nachteilen der einzelnen Verfahren sind bei Grouven et al. [11] zusammengestellt.

Um einen etwas praxisnäheren Bezug für die Güte der formelgestützten Tagesdosiswerte zu erhalten, wurden zusätzlich die prozentualen Abweichungen zwischen beiden Verfahren berechnet und als Anteil der Datensätze, die in einem Bereich von  $\pm 10\%$  Abweichung vom Modellwert via spezifischer Simulation liegen, angegeben.

## Ergebnisse

### Bestimmungsgleichungen zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft

Der in der Studie abgeleitete Formelsatz zur Abschätzung der Druckkraft auf die unterste Bandscheibe L5/S1 bei verschiedenen Formen der Lastenhandhabung umfasst insgesamt 11 Bestimmungsgleichungen und 4 Faktoren. Die Bestimmungsgleichungen unterteilen sich in 6 Gleichungen für beidhändiges Heben, Absenken oder Umsetzen von Lasten (■ **Abb. 3**, G1–G6), 3 Gleichungen für verschiedene Formen des Tragens von Lasten (■ **Abb. 4**, G7 bis G9) sowie 2 Gleichungen für unterschiedliche Arten des Haltens von Lasten (■ **Abb. 4**, G10 und G11). Dem Einfluss besonderer Formen des Hebens, Absenkens oder Umsetzens von Lasten – wie einhändige Ausführung, asymmetrische Verteilung der Last oder körperferne Positionierung der Last in unterschiedlichen Körperhaltungen – wurde durch 4 zusätzlich zu den Bestimmungsgleichungen eingeführten Faktoren Rechnung getragen (■ **Tab. 3**). Diese Faktoren beziehen sich jeweils nur auf die Lastgewichtskomponente (Steig-

Nr.	von	nach	Bestimmungsgleichung in der Form $F=b+m \cdot L$
G1	 aufrecht	 aufrecht	$F=800 N+45 N/kg \cdot L$
G2	 leicht gebeugt	 aufrecht	$F=1.100 N+80 N/kg \cdot L$
G3	 stark gebeugt	 aufrecht	$F=1.900 N+70 N/kg \cdot L$
G4	 leicht gebeugt	 leicht gebeugt	$F=1.100 N+75 N/kg \cdot L$
G5	 stark gebeugt	 leicht gebeugt	$F=1.900 N+65 N/kg \cdot L$
G6	 stark gebeugt	 stark gebeugt	$F=1.900 N+60 N/kg \cdot L$

**Anwendungsbeispiel „Heben/Absenken/Umsetzen von Lasten“.** Die Bandscheiben-Druckkraft  $F$  für das beidhändige, symmetrische und körpernahe Anheben einer 15 kg schweren Last aus einem stark vorgebeugten Rumpf heraus in eine aufrechte Position errechnet sich nach Bestimmungsgleichung G3 wie folgt:  
 $F=1.900 N+70 N/kg \cdot 15 kg=2.950 N=3,0 kN$ .  
 $F$  Bandscheiben-Druckkraft L5/S1 (N),  $b$  Komponente der Oberkörperhaltung,  $m$  Lastgewichtskomponente (N/kg),  $L$  Masse des Lastobjekts (kg); *von* Rumpfhaltung in Ausgangsposition, *nach* Rumpfhaltung in Endposition

**Abb. 3** ▲ Bestimmungsgleichungen zum beidhändigen Heben/Absenken/Umsetzen von Lasten (Schreibweise analog Mainz-Dortmunder Dosismodell [12]) mit Anwendungsbeispiel. (Modifiziert nach Seidler et al. [23]. Mit freundlicher Genehmigung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e. V.)

gung  $m$ ) der Bestimmungsgleichungen, nicht auf die Komponente der Oberkörperhaltung ( $y$ -Achsenabschnitt  $b$ ). Das Verfahren sieht keine Kombinationen von Faktoren vor. Liegen 2 Merkmale gleichzeitig vor (z. B. einhändige und körperferne Handhabung), ist lediglich der höherwertige Faktor einzusetzen. Zum besseren Verständnis der Anwendung der Bestimmungsgleichungen sind **Abb. 3, 4** und **Tab. 3** jeweils ein Rechenbeispiel beigefügt.

### Validierung der Bestimmungsgleichungen

In **Abb. 5** sind die linearen Regressionsgeraden für den Vergleich der unterschiedlich berechneten Tagesdosen von 4450 typischen Arbeitsschichten dargestellt. Dabei steht  $TD_{\text{Modell}}$  jeweils für eine Tagesdosis, die auf der Grundlage der biomechanisch modellierten Bandscheiben-Druckkräfte zu einzelnen Belastungssituationen berechnet wurde, während  $TD_{\text{Formel}}$  bedeutet, dass die Tagesdosis auf Bandscheiben-Druckkräf-

ten basiert, die mithilfe der in der Studie entwickelten Bestimmungsgleichungen abgeleitet wurden. Die Regressionsgeraden sind jeweils für die 3 verschiedenen Formelsätze mit 45, 22 bzw. 11 Formeln dargestellt (**Abb. 5**). In gleicher Weise zeigt **Abb. 6** die entsprechenden Ergebnisse der Tagesdosisvergleiche als Bland-Altman-Diagramme.

### Formelsatz 45

Wie **Abb. 5a** zu entnehmen ist, ergab sich für den Vergleich der Datensätze  $TD_{\text{Modell}}$  und  $TD_{\text{Formel}_45}$  eine große Übereinstimmung, die sich neben der grafischen Darstellung auch in den statistischen Kenngrößen widerspiegelt ( $R^2=0,94$ ;  $ICC=0,97$ ).

Das entsprechende Bland-Altman-Diagramm (**Abb. 6a**) verdeutlicht, dass die Güte der Übereinstimmung nicht unbedingt vom Wertebereich abhängig ist, da über den gesamten Bereich gute bis sehr gute Übereinstimmungen (Nullwerte auf der  $y$ -Achse) zu finden sind.






Die durchschnittliche Abweichung zwischen beiden Datensätzen beträgt 23 Nh ( $\pm 1,1$  kNh) und die Übereinstimmungsgrenzen reichen von etwa  $-2,1$  kNh bis etwa  $+2,1$  kNh.

Hinsichtlich der prozentualen Abweichungen zwischen beiden Verfahren lagen etwa 91% der formelbasiert berechneten Daten (4061 Daten) in einem Bereich von  $\pm 10\%$  Abweichung von den entsprechenden spezifisch modellierten Werten.

### Formelsatz 22

Nach Reduzierung des Formelsatzes von 45 auf 22 Gleichungen wurde wiederum ein Vergleich der Datensätze  $TD_{\text{Modell}}$  und  $TD_{\text{Formel}_22}$  durchgeführt, wobei die entsprechenden Korrelationswerte immer noch als gut einzustufen sind ( $R^2=0,88$ ;  $ICC=0,93$ ). Die zugehörige Regressionsgerade ist in **Abb. 5b** dargestellt.

Der Vergleich nach der Bland-Altman-Methode ergab ein ähnliches Bild (**Abb. 6b**). Die Ergebnisse sind etwas schlechter einzustufen als die Resultate des Formelsatzes 45, aber immer noch als akzeptabel anzusehen. So beträgt die durchschnittliche Abweichung zwischen beiden Datensätzen  $-173$  Nh ( $\pm 1,5$  kNh) und die Übereinstimmungsgrenzen reichen von etwa  $-3,2$  kNh bis etwa  $+2,9$  kNh.

Nr.	Ausführung	Bestimmungsgleichung in der Form $F=b+m \cdot L$
<b>Tragen von Lasten</b>		
G7	 vor dem Körper oder beidseits des Körpers	$F=800 N+95 N/kg \cdot L$
G8	 auf einer Seite oder einhändig	$F=800 N+180 N/kg \cdot L$
G9	 auf Schulter(n) oder Rücken	$F=1.100 N + 60 N/kg \cdot L$
<b>Halten von Lasten</b>		
G10	 vor dem Körper, beidseits des Körpers oder auf Schulter(n) bzw. Rücken	$F=800 N + 45 N/kg \cdot L$
G11	 auf einer Seite oder einhändig	$F=800 N+85 N/kg \cdot L$
<p><b>Anwendungsbeispiel „Tragen von Lasten“:</b> Die Bandscheiben-Druckkraft <math>F</math> für das Tragen einer 40 kg schweren Last auf der Schulter errechnet sich nach Gleichung G9 wie folgt:  <math>F=1.100 N+60 N/kg \cdot 40 kg=3.500 N=3,5 kN</math>.</p> <p><b>Anwendungsbeispiel „Halten von Lasten“:</b> Die Bandscheiben-Druckkraft <math>F</math> für das Halten einer 40 kg schweren Last vor dem Körper errechnet sich nach Gleichung G10 wie folgt:  <math>F=800 N+45 N/kg \cdot 40 kg=2.600 N=2,6 kN</math>.</p> <p><math>F</math> Bandscheiben-Druckkraft L5/S1 (N); <math>b</math> Komponente der Oberkörperhaltung, <math>m</math> Lastgewichtskomponente (N/kg); <math>L</math> Masse des Lastobjekts (kg); <i>von</i> Rumpfhaltung in Ausgangsposition, <i>nach</i> Rumpfhaltung in Endposition</p>		

**Abb. 4** ▲ Bestimmungsgleichungen zum Tragen und Halten von Lasten (Schreibweise analog Mainz-Dortmunder Dosismodell [12]) mit Anwendungsbeispiel

Nr.	Ausführung	Rumpfhaltung	Faktor
F1	Einhändig	Alle	1,9
F2	Asymmetrisch	Alle	1,9
F3	Körperfern	Aufrecht bis leicht gebeugt <sup>a</sup>	1,3
F4	Körperfern	Stark gebeugt <sup>b</sup>	1,1

**Anwendungsbeispiel „Heben/Absenken/Umsetzen von Lasten mit Faktor“:** Die Bandscheiben-Druckkraft  $F$  für das einhändige Anheben einer 15 kg schweren Last aus einer stark gebeugten Rumpfbeuge heraus in eine aufrechte Position errechnet sich nach Gleichung G3 und Faktor F1 wie folgt:  
 $F = 1900 N + 1,9 \cdot 70 N/kg \cdot 15 kg = 3895 N \geq F = 3,9 kN$

<sup>a</sup>Gilt für alle „von-nach“-Kombinationen, bei denen keine starke Rumpfbeugung vorliegt. <sup>b</sup>Gilt für alle „von-nach“-Kombinationen, bei denen der Rumpf mindestens in einer Position stark gebeugt ist.

Die Berechnung der prozentualen Abweichungen zwischen beiden Datensätzen ergab für den Formelsatz 22 eine leichte Verschlechterung gegenüber dem Vorgängerdatensatz (Formelsatz 45). So lagen 3502 Werte (etwa 79%) im Bereich von  $\pm 10\%$  Abweichung gegenüber der biomechanischen Simulationsrechnung.

### Formelsatz 11

Nach einer weiteren Reduktion auf insgesamt 11 Bestimmungsgleichungen ergaben sich für den Vergleich der Datensätze  $TD_{\text{Modell}}$  und  $TD_{\text{Formel}_11}$  ähnlich gute Übereinstimmungen zwischen beiden Variationen der Tagesdosismessung wie für den Formelsatz 45 und den Formelsatz 22. Die Korrelation zwischen beiden Datensätzen lässt sich mit  $R^2=0,87$  bzw.  $ICC=0,93$  weiterhin als gut einstufen. Die entsprechende Regressionsgerade zeigt keine größeren Ausreißer (Abb. 5c).

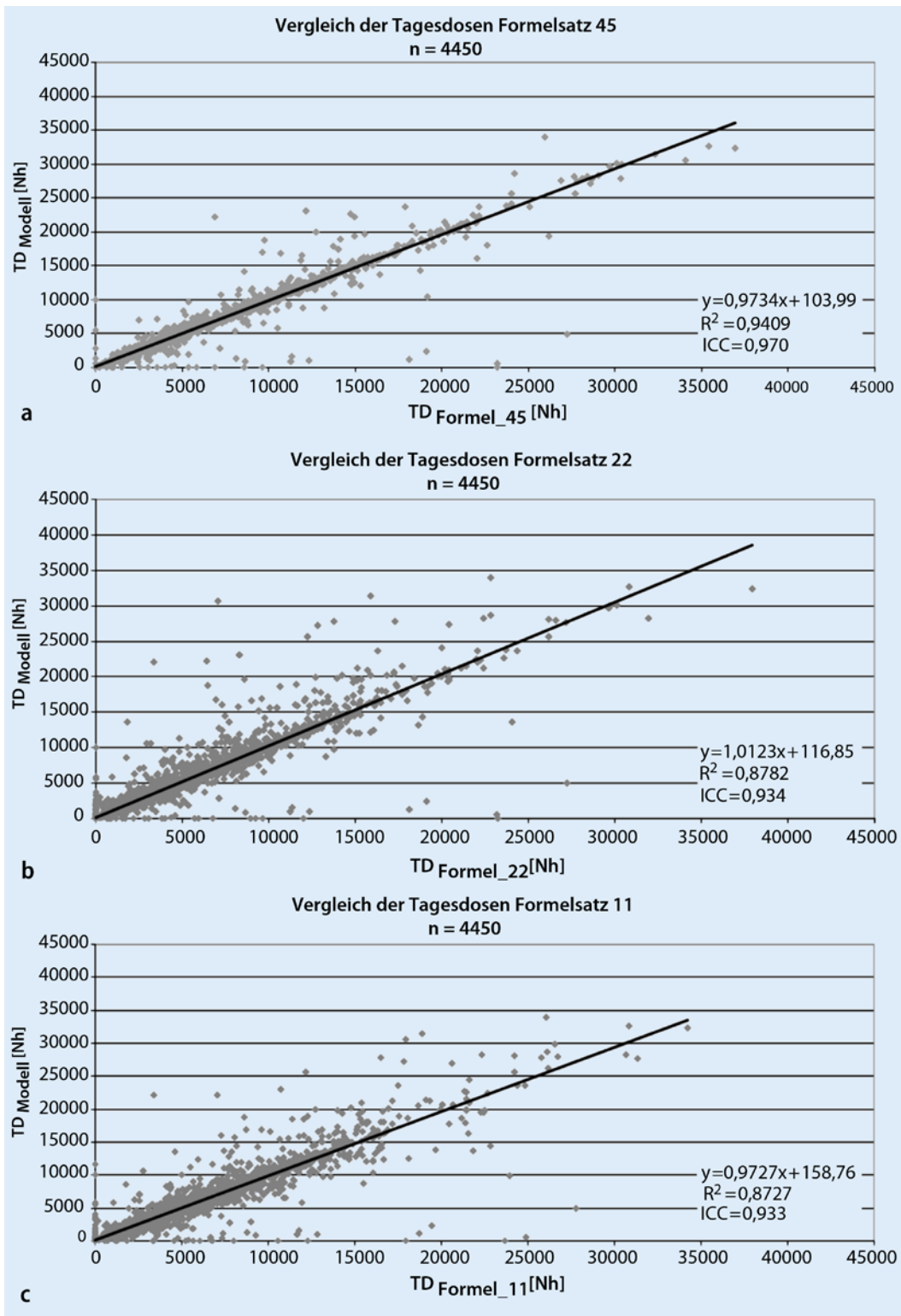
Das zugehörige Bland-Altman-Diagramm (Abb. 6c) unterstützt diese Ergebnisse. Die durchschnittliche Abweichung zwischen beiden Verfahren liegt bei lediglich  $-30 N_h$  ( $\pm 1,5 kN_h$ ), allerdings zeigt das Diagramm stärkere Ausreißer. Dies drückt sich auch in den deutlich erweiterten Übereinstimmungsgrenzen aus (etwa  $-3,1$  bis etwa  $+3,0 kN_h$ ). Erwartungsgemäß ergibt sich für die prozentualen Abweichungen gegenüber den Vorgängerdatensätzen ein Rückgang der Genauigkeit, angezeigt durch einen Anteil von etwa 72% der formelbasiert berechneten Daten (3213 Werte) in einem Bereich von  $\pm 10\%$  Abweichung gegenüber der Referenz „Der Dortmunder“.

## Diskussion

### Ableitung von Bestimmungsgleichungen

Für die Bewertung der arbeitstechnischen Voraussetzungen in Feststellungsverfahren zur BK Nr. 2108 BKV wird seit Jahren das vom ehemaligen Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften empfohlene MDD eingesetzt. Die grundsätzliche Eignung dieses Modells bei der Untersuchung der relevanten Expositionen konnte auch das Bundessozialgericht in seinem Urteil vom 30.10.2007 bestäti-



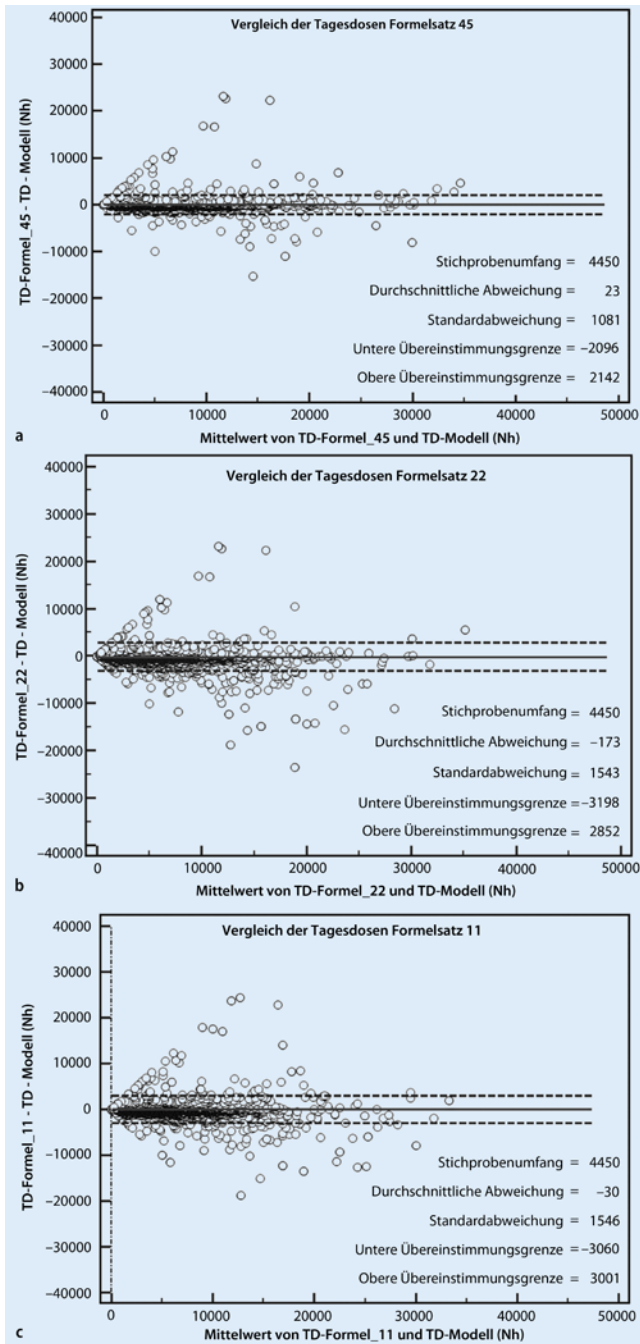


**Abb. 5** ◀ Lineare Regression, Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und Intraklassenkorrelation (ICC) für den Vergleich der Tagesdosen auf Grundlage der vorgangsspezifisch biomechanisch modellierten Tagesdosis ( $TD_{\text{Modell}}$ ) und der formelbasierten Tagesdosis ( $TD_{\text{Formel}}$ ) mit jeweils **a** 45, **b** 22 und **c** 11 Bestimmungsgleichungen. Nh Newtonstunden

gen [7]. In diesem Urteil wurden zwar die dem MDD zugrunde liegenden Schwellenwerte kritisiert, die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Berechnung der Belastungsparameter Bandscheiben-Druckkraft und Lebensdosis aber nicht in Frage gestellt. Demnach ist das Prin-

zip der Umwandlung externer physischer Belastungen durch Heben und Tragen von Lasten bzw. Arbeiten in extremer Rumpfbeuge in Kenngrößen der internen Belastung (Bandscheiben-Druckkräfte) geeignet, unterschiedliche Belastungen zusammenzuführen und zu kumulieren.

Durch entsprechende Berücksichtigung von Zeitauern und Häufigkeiten einzelner Belastungsvorgänge über das gesamte Berufsleben lässt sich weiterhin ein Maß für die Lebensdosis berechnen, welches als geeignet erscheint, einen Kausal-



**Abb. 6** ◀ Bland-Altman-Diagramme für den Vergleich der Tagesdosen auf Grundlage der vorgangsspezifisch biomechanisch modellierten Tagesdosiswerte ( $TD_{\text{Modell}}$ ) und der formelbasierten Tagesdosiswerte ( $TD_{\text{Formel}}$ ) mit jeweils **a** 45, **b** 22 und **c** 11 Bestimmungsgleichungen. *Nh* Newtonstunden

zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankung bewerten zu können.

Die DWSI nahm diesen Gedanken auf und versuchte, Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei der BK 2108 zu untersuchen, indem in einer Fall-Kontroll-Studie mehrere Dosismodellalternativen zur Bestimmung der Exposition miteinander verglichen wurden. Das MDD als eine der untersuchten Möglichkeiten gehörte dabei nicht zu den besten Modellen zur Darstellung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung. Hierfür erschienen zweierlei Ursachen als

plausibel, einerseits die im MDD verwendeten Schwellenwerte für Bandscheiben-Druckkraft, Rumpfbeugegrad, Tagesdosis und Lebensdosis; andererseits die im Vergleich zu den übrigen Dosismodellen einfache, formelbasierte Berechnung der Bandscheiben-Druckkräfte. Während bei allen anderen in der DWSI verwendeten Dosismodellen die Bandscheiben-Druckkräfte auf individuellen vorgangsspezifischen biomechanischen Simulationsrechnungen beruhten, wurden für das MDD die für das Modell entwickelten 6 Bestim-

mungsgleichungen zur Abschätzung der Druckkraft beim Heben und Tragen von Lasten verwendet.

Die Autoren des MDD hatten bereits darauf hingewiesen, dass die Komplexität der relevanten physischen Belastungen nicht 1:1 durch eine Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft auf Basis von insgesamt 7 Bestimmungsgleichungen abzubilden ist. Die entsprechenden Bestimmungsgleichungen sollten lediglich eine Hilfe für die Beurteilung von Tätigkeiten darstellen, insbesondere für nicht mehr exakt nachprüfbare Tätigkeitsbilder bei nicht mehr bestehenden Arbeitsplätzen, während sie „detaillierte biomechanische Untersuchungen zur Ermittlung der tatsächlichen Belastung nicht ersetzen“ [12] können und sollen. Da die in Berufskrankheiten-Verfahren zu beurteilenden Tätigkeiten an aktuellen Arbeitsplätzen häufig nicht mehr oder in veränderter Form existieren, wird weiterhin ein standardisiertes Instrument zur retrospektiven Expositionsermittlung benötigt.

Mit dem in dieser Studie entwickelten Formelsatz sollte ein solches Instrument für die Berufskrankheiten-Praxis in Anlehnung an die Bestimmungsgleichungen des MDD zur Verfügung gestellt werden. Die für diesen Ansatz gewählte Methodik beruhte dabei auf zwei Überlegungen. Zum einen sollten die Eigenschaften des biomechanischen Simulationsmodells „Der Dortmunder“ möglichst gut in ein formelbasiertes Berechnungsmodell transformiert werden, zum anderen sollten die in das Berechnungsmodell der DWS2 zu integrierenden Vorgänge oder Einzeltätigkeiten nicht auf theoretischen Konstrukten, sondern auf dem konkreten, als repräsentativ angesehenen Datensatz der DWS1 basieren.

### Validierung der Bestimmungsgleichungen

Durch die im Rahmen der DWSI durchgeführte intensive Expositionsermittlung, die über die Vorgaben der BK Nr. 2108 hinausging und die anschließende biomechanische Modellierung der Bandscheiben-Druckkräfte war es nun erstmalig möglich, die formelbasierte Bandscheiben-Druckkraft einer Referenz gegenüberzustellen und dadurch die Güte der

abgebildeten Exposition zu testen. Für die Druckkraft-Zuordnung aus den Bereichen belastungsintensive Körperhaltungen, Schaufeln, Ziehen, Schieben sowie Tätigkeiten aus den Bereichen Pflege, Land- und Forstwirtschaft konnte dazu auf biomechanisch fundierte und bereits in der Praxis bewährte Tabellenwerte zurückgegriffen werden.

Für den Bereich der klassischen manuellen Lastenhandhabungen (Heben, Absenken, Umsetzen, Tragen und Halten von Lasten) war es dagegen notwendig, die im Datensatz der DWS1 vorkommende Zahl von insgesamt etwa 1900 verschiedenen Belastungskombinationen stark zu reduzieren, um ein praxistaugliches Instrument zu entwickeln. Zur Gewährleistung einer biomechanischen Validität und Repräsentativität der Bestimmungsgleichungen wurden nur solche Kombinationen in die Ableitung der Gleichungen einbezogen, die in gewisser Häufigkeit im Datensatz zu finden waren. Die anschließende weitere Reduzierung des immer noch umfangreichen Formelsatzes erfolgte durch sinnvolle Zusammenfassung ähnlicher Belastungsvorgänge.

Die Diskrepanz zwischen möglichst genauer Wiedergabe der Ergebnisse mithilfe von vorgangsspezifischen Modellierungen mit dem Simulationswerkzeug „Der Dortmund“ bei gleichzeitiger Reduzierung des Formelsatzes hin zu einem praxistauglichen Instrument zeigt sich wie erwartet in den Untersuchungen zur Validität der Berechnungsergebnisse. Mit der Reduzierung der Anzahl der Bestimmungsgleichungen sank unvermeidbar auch die Güte der mit diesen durchgeführten Druckkraft-Schätzungen bzw. der daraus resultierenden Tagesdosiswerte. Letzten Endes stellt der finale Formelsatz mit insgesamt 11 Bestimmungsgleichungen und 4 zusätzlichen Faktoren einen Kompromiss zwischen der gewünschten Genauigkeit der Expositionsabschätzung und der benötigten Einfachheit zum praktikablen Einsatz in der Berufskrankheiten-Anamnese dar. Die bei der Reduzierung der Formeln betrachteten Zwischenschritte mit 45 bzw. 22 Formeln erschienen für den Einsatz in der Praxis als zu komplex. Da der durch weitere Reduzierung erzeugte Formel-

satz 11 praxistauglich erschien und die Vergleichsparameter gegenüber dem Formelsatz 22 sich nicht oder nur geringfügig verschlechterten (ICC-Koeffizient jeweils 0,93; Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gesunken von 0,88 auf 0,87), wurde auf weitere Reduzierungsschritte verzichtet. Da beim Formelsatz 11 immer noch etwa 72% der berechneten Tagesdosen in einem Abweichungsbereich von weniger als  $\pm 10\%$  zur Referenz lagen, kann weiterhin von einer relativ guten Abschätzung der Exposition auf Grundlage der Bestimmungsgleichungen ausgegangen werden. Dies wird auch durch die durchschnittliche Abweichung zwischen den formelbasiert berechneten Tagesdosen und der Referenz unterstützt (Abb. 6c), die mit 0,03 kNh ( $\pm 1,5$  kNh) einen sehr geringen Wert einnimmt (zum Vergleich: der MDD-Richtwert der Tagesdosis für Männer liegt bei 5,5 kNh).

Eine Ausreißeranalyse für den finalen Formelsatz [23] ergab, dass die Tagesdosen mit extremen Abweichungen (s. obere und untere Übereinstimmungsgrenzen in Abb. 6c) zum größten Teil auf in der beruflichen Praxis relativ selten vorkommenden Belastungsarten wie Tragen von Rucksäcken oder Halten von Lasten mit verdrehtem Oberkörper zurückzuführen sind. Aus diesem Grund kann der Formelsatz 11 auch in dieser Hinsicht als geeignet für die Berufskrankheiten-Expositionsermittlung angesehen werden.

Schließlich lässt sich die generelle Eignung des finalen Formelsatzes auch durch die Ergebnisse aus Projektteil 1 der DWS2 bestätigen ([18, 21, 23, 24]). Es zeigte sich, dass die Berechnung der Lebensdosen auf Basis der biomechanisch modellierten Bandscheiben-Druckkräfte sehr ähnliche Ergebnisse lieferte wie die entsprechende Berechnung auf Basis der formelbasierten Bandscheiben-Druckkräfte. Dies gilt auch für die daraus abgeleiteten Verlaufskurven der OR sowie der entsprechenden AIC-Werte (Akaike-Informationskriterium, [9]).

### Stärken und Schwächen der Untersuchung

Hinsichtlich der Validierung des Formelsatzes ist darauf hinzuweisen, dass nicht alle in der DWS1 ermittelten Arbeitsschichten in diese Untersuchungen

einfließen konnten. Dies ist dadurch begründet, dass die ursprüngliche Expositionsermittlung für bestimmte Arbeitsbereiche Spezial-Erhebungsbögen einsetzte, um den spezifischen Anforderungen in den Bereichen Landwirtschaft, Forstwirtschaft sowie Alten- und Krankenpflege gerecht zu werden. Aus diesem Grund wurden Arbeitsschichten, die derartige Tätigkeiten enthielten, nicht in diese Untersuchungen mit aufgenommen. Da für die Berechnungen aber immer noch Daten zu 4450 Arbeitsschichten einbezogen werden konnten, ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Überprüfung als statistisch gut belegt angesehen werden können.

Ein möglicher Kritikpunkt könnte darin gesehen werden, dass die Validierungsberechnungen mit dem sog. Grundmodell der DWS2 (entsprechend Dosismodell 5 der DWS1) durchgeführt wurden und nicht mit dem finalen Modell der DWS2 (s. Morfeld et al. [21] und Seidler et al. [24]). Dieser Umstand ist damit begründet, dass die Ableitung der Bestimmungsgleichungen und die Validierung parallel zu der Dosismodellentwicklung der DWS2 stattfanden. Da die Berechnungsart der Tagesdosis prinzipiell gleich ist und lediglich die unterschiedlichen Druckkraft-Schwellen einen Einfluss auf den Absolutwert der berechneten Tagesdosen haben, erwarten wir keine großen Unterschiede beim Vergleich zwischen formelbasiert berechneten und spezifisch modellierten Werten.

Analog zum MDD gelten selbstverständlich auch für das in dieser Studie abgeleitete Instrument der formelbasierten Druckkraft-Abschätzung die Grenzen retrospektiver und vereinfachter Expositionsermittlungen.

### Fazit

- Mit der Ableitung von Bestimmungsgleichungen zur formelbasierten Abschätzung der lumbosakralen Bandscheiben-Druckkraft auf der Grundlage biomechanischer Simulationsrechnungen und realer Expositionsdaten aus einer Fall-Kontroll-Studie wurde in diesem Forschungsvorhaben ein neuer Ansatz verfolgt, biomechanische Vorgänge praxisge-

recht aufzuarbeiten. Die hier vorgestellten Bestimmungsgleichungen zur Abschätzung der Bandscheiben-Druckkraft weisen gegenüber dem im MDD verwendeten Formelsatz eine höhere Genauigkeit und Flexibilität hinsichtlich der Berücksichtigung von Einflussfaktoren wie Körperhaltung, Position und beidseitiger Verteilung einer gehandhabten Last auf.

- Die neuen Bestimmungsgleichungen können unabhängig von der Diskussion um Dosismodelle oder Richtwerte eingesetzt werden und stehen nun für Tests in der Praxis zur Verfügung.

## Korrespondenzadresse

### Dr. D. Ditchen

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)  
Alte Heerstr. 111, 53757 Sankt Augustin  
dirk.ditchen@dguv.de

**Danksagung.** Diese Forschungsarbeit wurde mit Mitteln der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e. V. unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** D. Ditchen, N. Lundershausen, A. Bergmann, U. Bolm-Audorff, J. Haerting, E. Haufe, N. Kersten, A. Luttmann, P. Morfeld, K. Schäfer, A. Seidler, J. Voß, M. Jäger und R. Ellegast geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine Studien an Menschen oder Tieren.

## Literatur

- Bergmann A, Bolm-Audorff U, Ditchen D et al (2014) Lumbaler Bandscheibenvorfall mit Radikulärsyndrom und fortgeschrittene Osteochondrose. Prävalenzschätzung im Rahmen der DWS-Richtwertstudie in der Allgemeinbevölkerung. *Zbl Arbeitsmed* 64:233–238
- HVBG, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (Hrsg) (2004) BK-Report 2/03: Wirbelsäulenerkrankungen (BK-Nrn. 2108 bis 2110). Sankt Augustin
- BMA, Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung (Hrsg) (1993) Merkblatt für die ärztliche Untersuchung zu Nr. 2108 Anlage 1 Berufskrankheiten-Verordnung (BKV). *Bundesarbeitsblatt H* 3:50–53
- BMAS, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg) (2006) Merkblatt für die ärztliche Untersuchung zu Nr. 2108 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung (BKV) *Bundesarbeitsblatt H* 10:30–35
- Bolm-Audorff U, Bergmann A, Ditchen D et al (2007) Epidemiologische Fall-Kontroll-Studie zur Untersuchung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei der Berufskrankheit 2108 (Deutsche Wirbelsäulenstudie). Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 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
- BSG, Bundessozialgericht (2007) AZ.: B 2 U 4/06 R, Urteil vom 30.10.2007
- Ellegast R, Ditchen D, Bergmann A et al (2007) Erhebungen zur beruflichen Wirbelsäulenexposition durch die Technischen Aufsichtsämter der Unfallversicherungsträger im Rahmen der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl Arbeitsmed* 57:251–263
- Fleiß J (1981) *Statistical methods for rates and proportions*, 2. Aufl. John Wiley & Sons, New York
- Glitsch U, Ottersbach HJ, Ellegast R et al (2008) Belastungen der Lendenwirbelsäule bei Schaufeltätigkeiten. BGIA-Report 4/2008. DGUV, Sankt Augustin
- Grouven U, Bender R, Ziegler A, Lange S (2007) Vergleich von Messmethoden. *Dtsch Med Wochenschr* 132:e69–e73. doi:10.1055/s-2007-959047
- 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: Vorschlag zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 34:112–122
- 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: Retrospektive Belastungsermittlung für risikobehaftete Tätigkeitsfelder. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 34:101–111
- Jäger M, Luttmann A, Göllner R, Laurig W (2000) Der Dortmunder: Biomechanische Modellbildung zur Bestimmung und Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule bei Lastenhandhabungen. In: Radandt S, Grieshaber R, Schneider W (Hrsg) *Prävention von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Erkrankungen*. Monade, Leipzig, S 105–124
- Jäger M, Jordan C, Theilmeier A, Luttmann A (2001) Ermittlung und Beurteilung vergleichbarer Teiltätigkeiten hinsichtlich der Körperhaltung und der Wirbelsäulenbelastung bei verschiedenen beruflichen Tätigkeiten – Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 2. Wissenschaftlicher Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin
- Jäger M, Theilmeier A, Jordan C, Luttmann A (2005) Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 3 – Ermittlung der Belastung der Lendenwirbelsäule bei ausgewählten Pflegeleistungen mit Patiententransfer. Teil 2: Belastungskennwerte von sicher gefährdenden Tätigkeiten im Sinne der BK 2108. Shaker, Aachen
- Jäger M, Geiß O, Bergmann A et al (2007) Biomechanische Analysen zur Belastung der Lendenwirbelsäule innerhalb der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl Arbeitsmed* 57:264–276
- Jäger M, Jordan C, Voß J et al (2014) Erweiterte Auswertung der Deutschen Wirbelsäulenstudie. Hintergrund und Vorgehensweise der DWS-Richtwertstudie. *Zbl Arbeitsmed* 64:151–168
- Kuhn S, Baumann W, Lang R, Wortmann N (2001) MDD-Pflege – Vorläufige Dosisberechnung (Gesundheitsdienst). Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), Hamburg
- Linhardt O, Bolm-Audorff U, Bergmann A et al (2007) Studiendesign der Deutschen Wirbelsäulenstudie. *Zbl Arbeitsmed* 57:243–250
- Morfeld P, Ellegast R, Ditchen D et al (2014) Ableitung kumulativer Dosismodelle zur Auswertung physischer Belastungen. Methodik der Multi-Modell-Analyse innerhalb der DWS-Richtwertstudie. *Zbl Arbeitsmed* 64:169–183
- Seidler A, Bergmann A, Ditchen D et al (2007) Zusammenhang zwischen lumbalen Prolaps-erkrankungen und der kumulativen Wirbelsäulenbelastung durch Lastenhandhabungen und Tätigkeiten in Rumpfbeugehaltung – Ergebnisse der Deutschen Wirbelsäulenstudie (DWS). *Zbl Arbeitsmed* 57:290–303
- Seidler A, Bergmann A, Bolm-Audorff U et al (2012) Erweiterte Auswertung der Deutschen Wirbelsäulenstudie mit dem Ziel der Ableitung geeigneter Richtwerte – „DWS-Richtwerteableitung“. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FF-FB0155A. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin
- 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
- Theilmeier A, Jordan C, Wortmann N et al (2006) Belastung der Lendenwirbelsäule von Pflegepersonen bei Patiententransfers – Kennwerte zur Nutzung in Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren. *Zbl Arbeitsmed* 56:228–251
- Bland JM, Altman DG (1986) Regression analysis. *Lancet* 19:908–909
- Bland JM, Altman DG (1995) Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading. *Lancet* 346:1085–1087
- Jäger M, Jordan C, Theilmeier A et al (2014) Analyse der Lumbalbelastung beim manuellen Bewegen von Patienten zur Prävention biomechanischer Überlastungen von Beschäftigten im Gesundheitswesen. *Zbl. Arbeitsmed* 64:98–112