

BGIA-Report 4/2008

Belastung der Lendenwirbelsäule bei Schaufeltätigkeiten

Verfasser: Ulrich Glitsch, Hans-Jürgen Ottersbach, Rolf Ellegast
BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung, Sankt Augustin

Kirsten Sawatzki, Jürgen Voß, Alwin Luttmann, Matthias Jäger
Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität
Dortmund – IfADo

Gerald Rehme
Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Böblingen

Redaktion: Zentralbereich des BGIA

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
Alte Heerstr. 111, D-53757 Sankt Augustin
Telefon: +49 / 02241 / 231 – 01
Telefax: +49 / 02241 / 231 – 1333
Internet: www.dguv.de

– Mai 2008 –

ISBN: 978-3-88383-732-1

ISSN: 1869-3491

Belastung der Lendenwirbelsäule bei Schaufeltätigkeiten

Kurzfassung

Die Belastung der Lendenwirbelsäule durch Schaufeltätigkeiten wurde seitens der Unfallversicherungsträger in Feststellungsverfahren der Berufskrankheit (BK) 2108 „Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule“ bisher sehr unterschiedlich beurteilt. Eine einheitliche Beurteilungsgrundlage stand nicht zur Verfügung. Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes wurden daher mithilfe biomechanischer Bewegungs- und Belastungsmessungen die äußeren Muskel-Skelett-Belastungen beim Schaufeln bestimmt. Diese Messungen fanden in praxisnahen Arbeitssituationen unter Laborbedingungen mit fünf erfahrenen Fachkräften aus unterschiedlichen Bereichen des Baugewerbes statt. Das Untersuchungskonzept umfasste fünf Schüttgüter und drei Arbeitsanforderungen an Wurfdistanz und -höhe. Aus den Messdaten wurden die zugehörigen Kompressionskräfte an der untersten lumbalen Bandscheibe mit dem biomechanischen Modell „Der Dortmundener“ berechnet. Die Untersuchungsergebnisse zeigten eine ausgeprägt dreidimensionale Belastungssituation des Muskel-Skelett-Systems beim Schaufeln. Die Schaufeltechniken der Probanden waren individuell sehr verschieden. Nach ihrem Arbeitstempo konnten sie in die zwei Gruppen „Regelfall“ und „Sonderfall“ – wie es bei Akkordarbeit z. B. bei Estrichlegern vorkommt – eingeteilt werden. Dementsprechend differierten auch die maximalen Bandscheibenkompressionskräfte von im Mittel ca. $3\frac{1}{2}$ bzw. $6\frac{1}{4}$ kN. Die zugehörigen Belastungsdauern im Schaufelzyklus waren umkehrt zum Arbeitstempo von rund 2 auf $1\frac{1}{2}$ s verkürzt. Eine generelle Abhängigkeit der Kompressionskräfte von Schüttgut, Wurfdistanz bzw. -höhe konnte nicht gefunden werden.

Stress upon the lumbar spine during shovelling tasks

Abstract

In the past, the accident insurance institutions have inconsistently assessed the loads on the lumbar spine caused by shovelling tasks in the course of their investigations of formally recognized occupational disease (BK) 2108 (degenerative lumbar disc disease). The results differed widely owing to the lack of a uniform basis for assessment. In the course of the research project presented here, biomechanical motion and force measurements were therefore conducted in order to determine the external musculoskeletal loads which arise during shovelling work. The measurements were performed upon five experienced, skilled test subjects from different areas of the construction sector, in realistic work situations and under laboratory conditions. The study concept covered five bulk products and three work tasks in terms of the throw distance and height. The associated compression forces on the lowest lumbar intervertebral disc were calculated from the measured data by means of the "Dortmunder" biomechanical model. The results of the study revealed a distinctly three-dimensional load situation in the musculoskeletal system during shovelling activity. The shovelling techniques of the test subjects differed widely. They were divided into two groups, "standard case" and "exceptional case", the latter typical for piece work performed by composition floor layers, for instance. The maximum intervertebral disc compression forces varied accordingly, at mean values of approximately $3\frac{1}{2}$ and $6\frac{1}{4}$ kN respectively. The corresponding duration of load exposure in the shovelling cycle was inversely proportional to the pace of work, falling from about 2 to $1\frac{1}{2}$ s. No generic relationship was observed between the compression forces on the one hand and the bulk product type and throw distance and height on the other.

Sollicitation de la colonne lombaire lors de travaux de pelletage

Résumé

Au cours des procédures de constatation de la maladie professionnelle 2108 « Pathologies lombaires dues aux disques intervertébraux », les organismes d'assurance accidents ont, jusqu'à présent, évalué très différemment la sollicitation de la colonne lombaire lors de travaux de pelletage. En effet, une base d'évaluation commune n'existait pas. C'est pourquoi le projet de recherche présenté dans ce compte rendu avait pour objet de déterminer les sollicitations extérieures du système musculosquelettique lors du pelletage au moyen de mesures biomécaniques de mouvements et de contraintes. Ces mesures ont été effectuées en laboratoire dans des conditions rencontrées dans la pratique, avec cinq ouvriers qualifiés expérimentés travaillant dans différents secteurs du bâtiment. L'étude portait sur cinq vracs ainsi que trois distances et hauteurs de pelletage. Les forces de compression engendrées au niveau du disque intervertébral lombaire le plus bas ont été calculées à l'aide des valeurs mesurées et du modèle biomécanique « Le Dortmundois ». Les résultats de l'étude ont mis en évidence une sollicitation tridimensionnelle prononcée du système musculosquelettique lors du pelletage. Les techniques de pelletage utilisées par les sujets d'expérience étaient très diverses. En fonction de leur rythme de travail, ceux-ci pouvaient être classés dans deux groupes : ceux travaillant à un « cas normal » et ceux travaillant à un « cas extraordinaire » – situation que l'on rencontre dans le cas du travail à la tâche, par ex. lors de la pose de chapes. En conséquence, les forces maximales de compression du disque intervertébral différaient en moyenne d'environ 3 ½ ou 6 ¼ kN. Les durées de sollicitation dans le cycle de pelletage, inversement proportionnelles au rythme de travail, étaient comprises entre 2 et 1 ½ s. Une corrélation générale entre les forces de compression et la nature du vrac ainsi que la distance et la hauteur de pelletage n'a pas pu être établie.

Carga dorsolumbar al realizar trabajos con la pala

Resumen

A la hora de verificar la enfermedad profesional (BK 2108) „Trastornos dorsolumbares originados por problemas relacionados con los discos intervertebrales“, las entidades de seguros contra accidentes, hasta ahora, evaluaban de manera muy distinta la carga dorsolumbar al realizar trabajos con la pala. No se disponía de un criterio de valoración uniforme. Por eso, en el marco del proyecto de investigación aquí presentado, se determinaron las cargas externas sobre el sistema musculoesquelético, con la ayuda de mediciones de los movimientos y de las cargas biomecánicas. Dichas mediciones se llevaron a cabo en laboratorio, bajo condiciones reales de trabajo, con cinco profesionales muy experimentados de diferentes sectores de la construcción. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando cinco productos a granel y aplicando tres modalidades diferentes en lo referente a distancia y altura del paleaje. Las fuerzas de compresión que actúan en el disco lumbar inferior fueron calculadas en base a los datos de medición, utilizando el modelo biomecánico „El Dortmunder“. Los resultados indicaron una carga tridimensional pronunciada que incide en el sistema musculoesquelético al realizar trabajos con la pala. Los probandos utilizaban técnicas individuales muy diferentes. En base a su ritmo de trabajo se pudieron diferenciar dos grupos, los que trabajaban a „caso normal“ y los que trabajaban a „caso especial“ -como cuando se trabaja a destajo, por ejemplo, en el caso de trabajos de solería-. En consecuencia, también las fuerzas máximas de compresión en el disco intervertebral diferían entre valores medios de aproximadamente $3\frac{1}{2}$ y $6\frac{1}{4}$ kN. Los valores referentes a los periodos de esfuerzo correspondientes resultaban de aproximadamente 2 y $1\frac{1}{2}$ segundos, ósea eran más cortos cuantos más acelerado era el ritmo de trabajo. No se pudo determinar una dependencia general entre las fuerzas de compresión y el producto a granel, así como la distancia o bien la altura del paleaje.

Danksagung

Die Autoren danken der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, der Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen sowie der damaligen Großhandels- und Lagerei-Berufsgenossenschaft für deren Befürwortung des Projektes.

Für die Unterstützung im Vorfeld des Projektes bzw. bei der Umsetzung danken die Autoren insbesondere den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft:

Gustav Jark Ebermann, Sonja Gütschow, Edda Hirschl, Ulrich-Toni Kuth, Andreas Lutz, Richard Paul (i. R.), Reinhold Schäfer, Wolfgang Specht, Erwin Stengelin, Ulrich Slavik.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Methodik	15
2.1	Design der Laboruntersuchung.....	15
2.2	Biomechanisches Modell „Der Dortmund“	16
2.3	Versuchspersonen.....	16
2.4	Arbeitsplatzbeobachtung	20
2.5	Befragung zur Einschätzung der Belastung beim Schaufeln	21
2.6	Aufbau und Durchführung der Laboruntersuchung.....	22
2.6.1	Laboreinrichtung	22
2.6.2	Dreidimensionale Bewegungserfassung.....	26
2.6.3	Druckmesspad am Oberschenkel.....	28
2.7	Aufbau der Messschaufel	30
2.7.1	Sensorik, Geometrie und Massenverteilung der Messschaufel	30
2.7.2	Bestimmung der Handkräfte	33
2.8	Isometrische Maximalkraftmessungen.....	34
2.9	Messdatenerfassung und Auswertung.....	35
2.10	Erläuterungen zur Datenerhebung, zur Datenstruktur und zum Datentransfer	39
2.10.1	Prinzipielle Dateienstrukturen	41
2.10.2	Transferdatei.....	42
2.10.3	Tätigkeitsdatei.....	42
3	Ergebnisse	45
3.1	Ergebnisse der Befragung	47
3.2	Maximalkraftmessungen der Probanden	49
3.3	Vergleichende Analyse der Kinematik unterschiedlicher Schaufeltechniken	51
3.4	Aktionsdauer beim Schaufeln	56
3.5	Schüttgutmassen beim Schaufeln	60
3.6	Vergleichende Analyse der Kinetik unterschiedlicher Schaufeltechniken	61
3.7	Boxplots der Handkräfte beim Schaufeln.....	72
3.8	Boxplots der Kräfte am Oberschenkel	76

3.9	Boxplots der Gelenkmomentbelastung an der LWS (L5/S1).....	78
3.10	Kompressionskräfte an der LWS (L5/S1).....	82
4	Zusammenfassung.....	87
5	Literatur.....	91



1 Einleitung

Zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im Feststellungsverfahren zur Berufskrankheit (BK) 2108 wird von den Unfallversicherungs(UV)-Trägern seit einigen Jahren das Mainz-Dortmunder-Dosismodell (MDD) angewandt. Dies ist übergreifend für alle Gewerbebezüge für eine einheitliche Belastungsbewertung konzipiert [1 bis 3]. In diesem kumulativen Dosismodell werden zur Beschreibung der Belastungsdauer Angaben zur Häufigkeit von Belastungsvorgängen sowie zur jeweiligen Dauer verwendet; als Maß für die Belastungshöhe wird im MDD das zeitliche Maximum der Kompressionskraft auf die unterste lumbale Bandscheibe während eines Vorgangs herangezogen. Wenn *„sich die genaue Ermittlung der für die Berechnung einer Belastungsdosis relevanten Parameter sehr schwierig“* gestaltet, insbesondere wenn *„exakte Angaben zu den jeweiligen zeitabhängigen Körperhaltungen in der Regel nicht mehr oder nur noch bedingt ermittelt werden“* können [4], stehen *„als standardisierte Methode“* sieben Bestimmungsgleichungen für die retrospektive Abschätzung der Belastungshöhe für Hebe- und Tragetätigkeiten sowie Arbeiten in extremer Rumpfbeugehaltung zur Verfügung [2]. Die Belastungssituation beim Schaufeln kann mit den im MDD vorgestellten Bestimmungsgleichungen biomechanisch nicht adäquat abgebildet werden, da es sich hier um einen sehr dynamischen Vorgang handelt, bei dem zwar relativ geringe Lastgewichte sehr körperfern, aber mit asymmetrischer Lastverteilung, Kraftrichtung und Körperhaltung gehandhabt werden. Die einzigen aus der Literatur verfügbaren quantitativen Aussagen zu Wirbelsäulenbelastungen beim Schaufeln finden sich in einem vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaft (HVBG, seit Juli 2007: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) geförderten Forschungsprojekt, der Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 2 [5]. In der vom Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund (IfADo) durchgeführten Untersuchung wurden u. a. Schaufeltätigkeiten mit einer im IfADo entwickelten „Messschaufel“ analysiert und entsprechende quantitative Angaben zur lumbalen Wirbelsäulenbelastung mithilfe des biomechanischen Menschmodells „Der Dortmunder“ [6; 7] abgeleitet. Im Rahmen der Untersuchung wurden für exemplarische Schaufeltätigkeiten ungeübter Personen in Abhängigkeit von Material und Schaufelblattform Wirbelsäulenbelastungen mit Spitzenwerten zwischen 4 und 6 kN ermittelt. Auf der Basis der Ergebnisse einer Person ergab sich



als Mittelwert, unter Berücksichtigung der jeweiligen Zeitanteile für das Einstechen und Anheben, eine Druckkraft von etwa $4 \frac{1}{2}$ kN [8]. Die Experten der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) führen diese hohen Belastungen auf die Versuchsbedingungen (ungeübte Versuchspersonen mit ungeschickter Handhabung der durch Sensoren schwereren Schaufel) zurück. Aus diesem Grund und wegen der derzeit sehr unterschiedlichen Bewertungspraxis von Schaufeltätigkeiten in BK-2108-Feststellungsverfahren sollten Messungen mit geübten Bauarbeitern als Probanden klären, welche Druckkräfte und Vorgangsdauern bei der Tätigkeit des Schaufelns realistisch angesetzt werden können.

Das projektbegleitende Konsortium aus Vertretern der BG BAU, des IfADo und des BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung legte folgende Eckdaten für das geplante Forschungsvorhaben fest:

- Als Probanden wurden fünf geübte Bauarbeiter aus verschiedenen Branchen mit mindestens fünf Jahren Berufserfahrung ausgewählt.
- Die Untersuchung wurde mit einer Frankfurter Schaufel bei freier Wahl der eingesetzten Schaufeltechnik durchgeführt.
- Es wurden fünf unterschiedliche Schüttgüter (Sand, Beton, Kies, Schotter und Erde) geschaufelt.
- Die Schaufeltätigkeit wurde hinsichtlich Wurfweite und -höhe (praxisnahe Varianten des Schaufelns) variiert.
- Die Belastungsmessungen fanden unter Laborbedingungen im BGIA statt.
- Aus den im Labor gemessenen Belastungswerten wurden Bandscheibenkompressionskräfte an der untersten lumbalen Bandscheibe mit dem biomechanischen Modell „Der Dortmunder“ am IfADo ermittelt.

Aufgrund der Zielstellung wurde der Fokus in dieser Studie auf die Ermittlung der Bandscheibenkompressionskräfte gelegt und andere Aspekte, wie ergonomisches Schaufeldesign oder ergonomische Bewertung unterschiedlicher Schaufeltechniken, zunächst in den Hintergrund gestellt.



Dieses Projekt richtet sich nicht nur an die BG BAU, sondern auch an andere UV-Träger, deren Versicherte Schaufeltätigkeiten ausüben, wie beispielsweise in Teilen der Chemieindustrie, der Landwirtschaft und des Öffentlichen Dienstes.

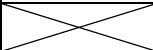
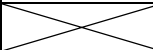
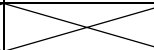


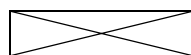
2 Methodik

2.1 Design der Laboruntersuchung

Das Design der Laboruntersuchung war gemäß der Aufgabenstellung als explorative Querschnittstudie angelegt. Es sollten fünf verschiedene Schüttgüter – Flusssand, Kies (0-32), Erde (feucht), Beton (B 15 K1 mit Verzögerer) und Mineralbeton (Schotter 0-45) – bei drei unterschiedlichen Aufgabenstellungen geschaufelt werden. Dabei variierten Wurfdistanz (kurz: etwa 1,5 m, weit: etwa 3 m) und -höhe (ebenerdig und 1,2 m nach oben – Ladeflächenhöhe eines Lkw – bei etwa 2,5 m Weite). Da nicht alle Kombinationen der Versuchsvariablen praxisnah sind, wurde das Versuchsdesign auf zwölf verschiedene praxisnahe Schüttgut-Schaufel-Konstellationen beschränkt (Tabelle 2.1). Die Wurfdistanzvorgaben wurden anhand der Praxisbeobachtungen konkretisiert (siehe Abschnitt 2.4, Seite 20).

Tabelle 2.1:
Versuchsdesign der Untersuchung mit zwölf Konstellationen,
die Ziffern geben die Versuchs-Nr. nach Tabelle 2.2 an

Schüttgut Ausführung	Sand (Rheinsand)	Kies (0-32)	Erde (feucht)	Beton B 15 K1	Schotter (0-45)
ebenerdig, kurz	1	6	10	4	8
ebenerdig, weit	3		12		
nach oben, kurz	2	7	11	5	9



Kombination entfällt

Die Reihenfolge der zu absolvierenden Versuchskonstellationen wurde sowohl nach organisatorischen als auch nach Ermüdungsaspekten zusammengestellt (Tabelle 2.2, siehe Seite 16). So wurde mit dem am einfachsten zu schaufelnden Schüttgut Sand begonnen und danach zwischen den „schwereren“ und den „leichteren“ Schüttgütern abgewechselt. Beton war das zweite Schüttgut in der Versuchsreihe, da er an den Versuchstagen jeweils neu angeliefert wurde und frisch geschaufelt werden sollte.



Tabelle 2.2:
Reihenfolge der Versuche

Versuchs-Nr.	Schüttgut	Distanz	Beschreibung
1	SA	E1	Sand, eben, kurz
2	SA	UO	Sand, nach oben, kurz
3	SA	E2	Sand, eben, weit
4	BT	E1	Beton, eben, kurz
5	BT	UO	Beton, nach oben, kurz
6	KS	E1	Kies, eben, kurz
7	KS	UO	Kies, nach oben, kurz
8	ST	E1	Schotter, eben, kurz
9	ST	UO	Schotter, nach oben, kurz
10	ED	E1	Erde, eben, kurz
11	ED	UO	Erde, nach oben, kurz
12	ED	E2	Erde, eben, weit

Insgesamt umfasste ein Versuch einer Konstellation 20 Schaufelvorgänge in praxistypischer Arbeitsgeschwindigkeit. Die Probanden wurden entsprechend den einzuhaltenden Wiederholbedingungen instruiert, konnten jedoch ihr individuelles Arbeitstempo frei wählen. Zwischen den Versuchen lagen mindestens fünf Minuten Pause, um eine ausreichende Erholung der Probanden zu gewährleisten.

2.2 Biomechanisches Modell „Der Dortmund“

Auf der Grundlage der messtechnischen Erhebungen im BGIA zu Körperhaltungen und Aktionskräften an den Händen wurden Kenngrößen der mechanischen Belastung der Lendenwirbelsäule mithilfe biomechanischer Modellrechnungen mit dem Analysewerkzeug „Der Dortmund“ [6; 7] bestimmt. Dieses System basiert auf Modellierungen insbesondere von Skelett, Muskulatur, Bauchraum-Innendruck-Wirkung und Bewegungsprofilen, bei denen aus den Eingabedaten zur Körperhaltung, zu ausgeübten Aktionskräften und zur Anthropometrie Druck- und Scherkräfte sowie Beuge- und Torsionsmomente an den fünf Bandscheiben der Lendenwirbelsäule (L1/L2 ... L5/S1) berechnet werden können. Details zum „Dortmund“ enthalten die oben genannten Publikationen; im Folgenden sind dennoch einige



Beschreibungen aufgeführt, die dem Verständnis der wesentlichen Eigenschaften und Zusammenhänge dienen sollen:

Das Muskel-Skelett-System des Menschen wird im „Dortmunder“ durch 30 Körpersegmente nachgebildet, die als „starre Körper“ im Sinne der Mechanik verstanden werden und für die auch bei Bewegung demzufolge keine Verformung unterstellt wird. Als Körper wurden Füße, Unter- und Oberschenkel, Hände, Unter-, Oberarme sowie Schultergürtel, Becken, mehrere Rumpfssegmente und Kopf „modelliert“. Dabei werden für diese Körperteile räumliche Massenverteilungen angenommen und durch Länge, Radius, Gewicht und Lage des Schwerpunktes zum benachbarten Gelenk beschrieben. Zur kinematischen Rekonstruktion realer Körperhaltungen und -bewegungen, die durch die jeweilige Stellung eines jeden Segmentes in Bezug auf die Raumrichtungen gekennzeichnet werden, sind die Körperteile über insgesamt 27 als punktförmig angenommene Gelenke miteinander verbunden. Die Bandscheiben im Rumpfbereich zwischen Kreuzbein und Nacken (L5/S1 bis T3/T4) sind als Gelenke modelliert und ermöglichen somit die Nachstellung unterschiedlicher Wirbelsäulenbewegungen mit von der natürlichen S-Form abweichenden Krümmungen nach vorn und zur Seite („sagittal“ bzw. „lateral“) sowie von Torsionsbewegungen.

Als „Erweiterung des Muskel-Skelett-Systems“ ermöglicht der „Dortmunder“ die Berücksichtigung von sogenannten Lastsegmenten, die – analog zu den Oberarmen an den Schultergelenken, den Unterarmen an den Ellenbogengelenken bzw. den Händen an den Handgelenken – an den Greifpunkten der Hände angekoppelt sind. Diese Lastsegmente wurden in früheren Erhebungen zur Nachbildung von in den Händen gehaltenen Werkzeugen genutzt oder dann, wenn ein Lastobjekt nicht in dessen Schwerpunkt gefasst wurde. Diese Systemeigenschaft wurde in diesem Forschungsvorhaben dazu verwendet, anthropometrische Unterschiede in den Muskel-Skelett-Modellen des BGIA und des IfADo in biomechanisch wesentlichen Aspekten zu kompensieren. Aufgrund der zeitlichen Restriktionen der Studie wurde bei den Berechnungen im IfADo auf standardisierte, d. h. aus der Literatur abgeleitete Körperproportionen in Abhängigkeit von der Körpergröße im „Dortmunder“ zurückgegriffen und die markergestützten individuellen Proportionen in den BGIA-Erhebungen nicht einbezogen bzw. nicht im „Dortmunder-Modell“ umgesetzt. Mit dieser Vorgehensweise wurde zwar die exakte Schwerpunktlage der einzelnen



Körperteile nicht berücksichtigt, jedoch die (sehr viel wesentlichere) genaue Position der Kraftangriffspunkte in den Händen und somit die „Hebelarme“ der schaufelbedingten Aktionskräfte relativ zur Wirbelsäule „abgeglichen“, d. h. zur Identität gebracht.

Die Muskulatur im unteren Rumpfbereich wird im „Dortmunder“ dahingehend nachgebildet, dass durch neun „muskeläquivalente Kraftvektoren“ die Wirkung von insgesamt 14 Muskelsträngen zur Bestimmung der körperinternen Muskelkräfte berücksichtigt wird. Diese Modellierung ermöglicht insbesondere auch die Analyse der Wirkung von unsymmetrischen Körperhaltungen bzw. -bewegungen oder Aktionskräften, wie sie für Schaufelarbeiten generell zu unterstellen sind.

Auf die Nutzung der Bewegungsmodellierung im „Dortmunder“, mit deren Hilfe die Körperbewegung bzw. der Bewegungsverlauf der Körperteile aus einzelnen Segmentstellungen „prognostiziert“ und die beschleunigungsbedingte Wirkung abgeschätzt werden kann, wurde im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet. Die Prognose der räumlichen Bewegungen wird insbesondere dann genutzt, wenn Bewegungen – im Gegensatz zum vorliegenden Forschungsvorhaben – nicht messtechnisch gestützt dokumentiert werden. Demzufolge wurde „Der Dortmunder“ „quasistatisch“ angewendet, indem die Wirkung der Körperhaltung und Aktionskräfte zu jedem Zeitpunkt berücksichtigt wurde, jedoch die durch die Beschleunigung der Körperteile bedingten Belastungsanteile nicht einbezogen wurden. Aufgrund der zeitlichen Restriktionen dieses Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer Schnittstelle, die insbesondere auch die Datenübergabe und -transformation der segmentbezogenen Beschleunigungen aus dem im BGIA aktuell erarbeiteten Format in das für das bestehende IfADo-Modell erforderliche Format gewährleistet, nicht möglich.

Die zu unterstellende „stützende Wirkung“ des Bauchraum-Innendrucks bei Lastenhandhabungen wurde bei den hier zu untersuchenden Schaufeltätigkeiten entsprechend der Modellierung im „Dortmunder“ berücksichtigt.

Insgesamt stützte sich die Bestimmung der Bandscheiben-Druckkräfte ausschließlich auf die im BGIA durchgeführten Datenerhebungen zu Körperhaltungen und Aktionskräften sowie die Angaben zu Körperhöhe und -gewicht der Probanden (siehe



Abschnitt 2.3). Demzufolge waren für die biomechanischen Modellrechnungen mit dem „Dortmunder“ keine Einflussgrößen zu berücksichtigen, die über den vom BGIA an das IfADo übertragenen und somit als vollständig anzusehenden Datenumfang hinausgingen. Die Einflussgrößen waren größtenteils bereits im Vorfeld abgestimmt und entsprechende Aspekte des Messaufbaus im BGIA wurden auf die für den „Dortmunder“ erforderlichen Eingabedaten ausgerichtet. Dies ist bei den Aktionskräften darauf zurückzuführen, dass die beim Schaufeln auf den Körper über die Hände einwirkenden Kräfte beidseitig mithilfe von dreiachsigen Kraftmessaufnehmern an der Schaufel aufgenommen wurden und die Messdaten somit insbesondere auch die Richtung und Verteilung der Aktionskräfte enthalten.

2.3 Versuchspersonen

Die an der Untersuchung beteiligten Bauarbeiter wurden auf freiwilliger Basis von der BG BAU nach folgenden Kriterien ausgesucht:

- mindestens fünf Jahre Berufserfahrung (Ältere wurden nicht ausgeschlossen)
- Body-Mass-Index (BMI) $< 30 \text{ kg/m}^2$ ¹
- keine Beschwerden am Muskel-Skelett-System
- verschiedene Körpergrößen zwischen 170 und 190 cm
- unterschiedliche Gewerke: Straßenbau, Estrichlegearbeiten, Garten-/Landschaftsbau, Pflasterarbeiten und Maurerarbeiten (mindestens je ein Proband, alle männlich)

Tabelle 2.3 (siehe Seite 20) gibt eine Übersicht über die Probanden. Hinsichtlich Alter und Berufsjahren war eine sehr große Spannweite abgedeckt. Bei den Körpermaßen Größe und Gewicht lagen die Werte eher im mittleren Bereich, weshalb der BMI bei einem Mittelwert von $24,9 \text{ kg/m}^2$ nur eine geringe Varianz aufwies.

¹ BMI = Körpergewicht in kg/(Körpergröße in m)²



Tabelle 2.3:
Probandenübersicht

VP-Nr.	Gewerk	Qualifikation	Berufsjahre	Größe in cm	Gewicht in kg	BMI in kg/m ²	Alter in Jahren
1	Maurerarbeiten	Facharbeiter, Maurer	28	186	85	24,6	44
2	Straßenbau	Landwirt	39	170	70	24,2	59
3	Estrichlegearbeiten	Fliesenleger	6	185	90	26,3	31
4	Garten- und Landschaftsbau	Geselle	6	180	75	23,1	22
5	Pflasterarbeiten	ungelernt	18	175	80	26,1	33
Mittelwert			19,4	179,2	80,0	24,9	37,8

2.4 Arbeitsplatzbeobachtung

Im Vorfeld der Laboruntersuchung wurden für deren Planung Expertenmeinungen der Präventionsdienste der BG BAU eingeholt. Außerdem wurden die ausgewählten Probanden zur Versuchsanordnung befragt und beim Schaufeln beobachtet. Im Fall des Estrichlegers (Abbildung 2.1, Seite 21) konnte der Arbeitsplatz auf einer Baustelle beobachtet werden.

Die anderen Probanden wurden im Vorfeld der Messungen ins BGIA eingeladen und dort beim Schaufeln beobachtet. Die Dokumentation erfolgte ausschließlich mit Foto- und Videokamera. Die zentralen Fragen dieser Beobachtung waren:

- Wie und an welchen Stellen wird die Schaufel gehalten?
- Wird die Schaufel mit dem Oberschenkel (rechts/links) abgestützt?
- Wie ist die Person unter den verschiedenen Schaufelaufgaben zum Schüttgut positioniert (siehe Abschnitt 2.1)?
- Wie ist das typische Arbeitstempo beim Schaufeln?



Abbildung 2.1:
Estrichleger mit typischer Schaufelhandhabung
beim Befüllen der Estrichmaschine:
weite Distanz (oben), kurze Distanz (unten)

Aus diesen Informationen wurden die Wannenstandorte, die Anordnung der Kraftsensoren am Schaufelstiel und die Befestigung des Druckmesspads am Oberschenkel festgelegt (siehe Abschnitte 2.6 und 2.7). Das Arbeitstempo wurde rein qualitativ aus den Videoaufzeichnungen bestimmt, um bei den Labormessungen ein in etwa gleiches Arbeitstempo anstreben zu können.

2.5 Befragung zur Einschätzung der Belastung beim Schaufeln

Zur Erfassung der Arbeitsumfänge und der subjektiven Belastungsempfindungen in Zusammenhang mit Schaufeltätigkeiten wurde ein standardisierter Fragebogen (Abbildung 2.2, siehe Seite 22) entwickelt, den die fünf Probanden (siehe Tabelle 2.3) im Rahmen der Laboruntersuchung ausfüllten.



Abbildung 2.2:
Fragebogen zur Erfassung der Arbeitsumfänge und der subjektiven Belastungsempfindungen in Zusammenhang mit Schaufeltätigkeiten

Angaben zur Person: VP-Nr.			
Körpergröße:		Körpergewicht:	
Alter:		Berufsjahre:	
Männlich <input checked="" type="checkbox"/>			

Schaufeln:
Wie viele Stunden müssen Sie durchschnittlich pro Woche Schaufeln?
Welches Schüttgut schaufeln Sie am häufigsten?
Wie belastend (körperlich anstrengend) empfinden Sie das Schaufeln in Ihrem Beruf? (Bitte ein <input type="radio"/> ankreuzen) sehr belastend <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> wenig belastend

Welche Art des Schaufelns empfinden Sie als am meisten belastend für Ihren Körper?
Schüttgut / Schaufelaufgabe.

Markieren Sie anhand der nachfolgenden Skizze und Bezeichnungen die Stelle, an der Sie die höchste Belastung beim Schaufeln empfinden.

<p><small>Abb. 1.1: Übersicht des ganzen Körpers, Vorderseite und linke Seite</small></p>	Kopf	<p><small>von Rückseite und rechte Seite</small></p>	
	vorne		hinten
	Nacken		
	Schulter		
	vorne		hinten
	Brustkorb		
	Oberer Rücken		
	Ellbogen		
	innen		ausßen
	Hand		
	beugeseitig		streckseitig
	Unterer Rücken		
	links		rechts
	Kreuz/Gesäß		
	links		rechts
	Hüften		
links	rechts		
Knie			
vorne	hinten		
links	rechts		
Unterschenkel			
vorne	hinten		
Füße			
innen	außen		

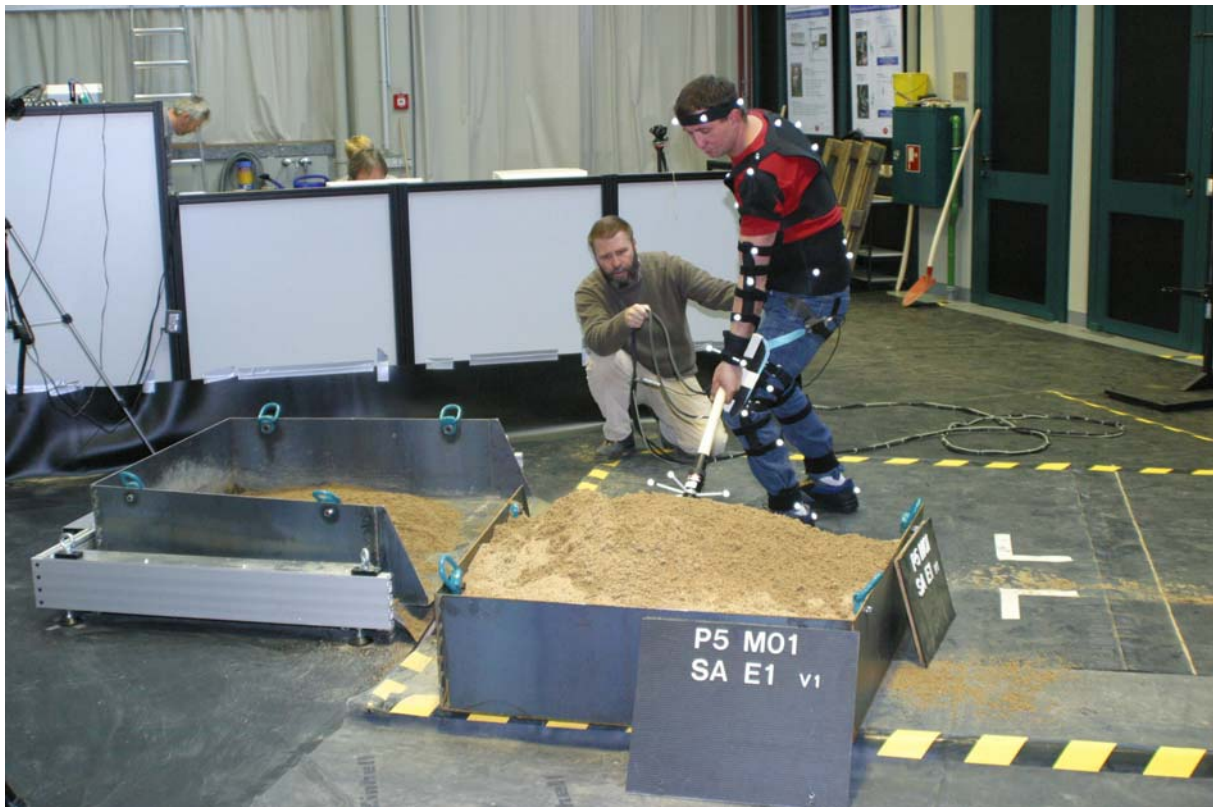
2.6 Aufbau und Durchführung der Laboruntersuchung

2.6.1 Laboreinrichtung

Die Untersuchung wurde im Ergonomie/Biomechaniklabor des BGIA durchgeführt, das für die Ausführung von Schaufeltätigkeiten speziell hergerichtet worden war. Dazu gehörte ein freier ebener Arbeitsbereich mit einer Größe von ca. 4 x 4 m, in dem

die Schüttgüter in Stahlwannen, gemäß der jeweiligen Schaufelaufgabe, angeordnet werden konnten (Abbildung 2.3). Die Laboreinrichtung wurde mit Kunststoffolie und Stellwänden vor Verschmutzung und Beschädigung geschützt. Abbildung 2.3 zeigt einen typischen Schaufelvorgang bei ebenerdiger Wannenkongstellatlon und kurzer Schaufeldistanz mit dem Schüttgut Sand.

Abbildung 2.3:
Messfeld zur Untersuchung von Schaufelvorgängen in unterschiedlichen Konstellationen mit Schüttgütern, die in einer Stahlwanne deponiert und in eine andere Wanne umgeschaufelt werden konnten

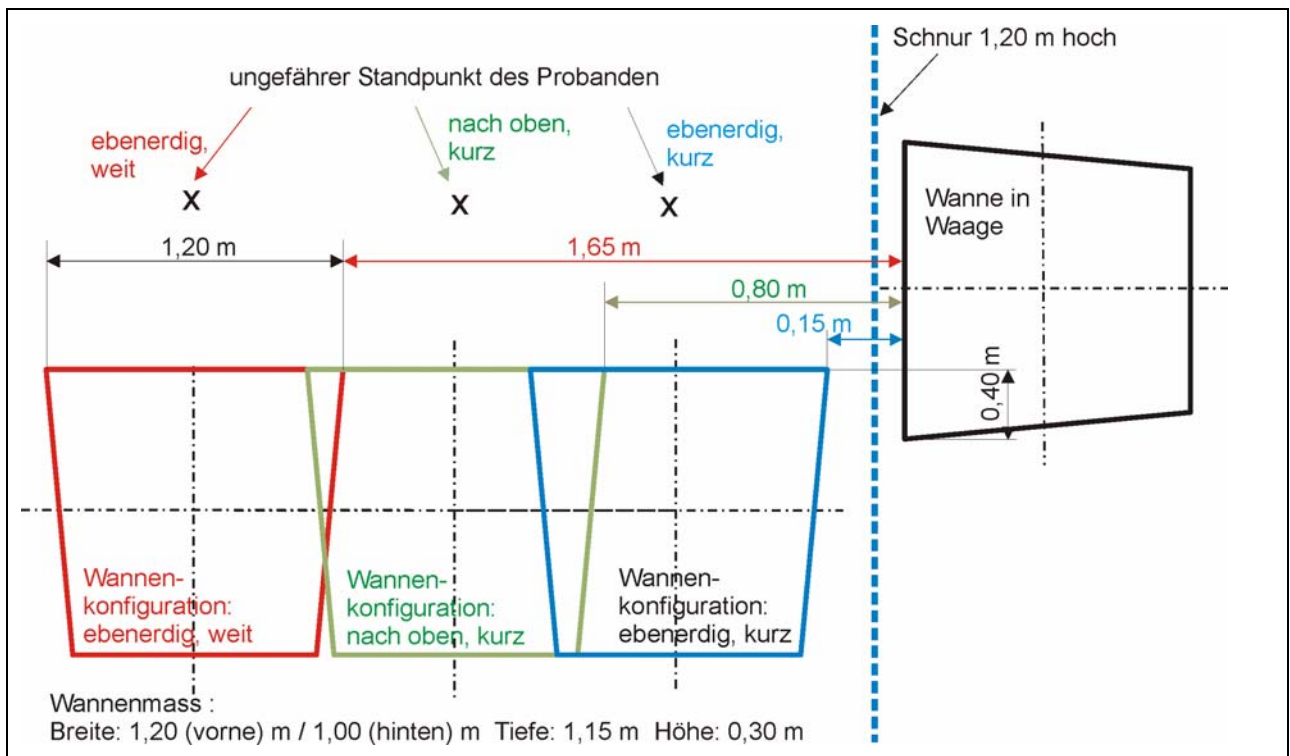


Die Wannn wurden für jede der drei Schaufelaufgaben so angeordnet, dass die Versuchsperson die jeweilige Schaufeltätigkeit in ihrer persönlich bevorzugten Haltung ausführen konnte. Bei der Aufgabenstellung „nach oben schaufeln“ wurde in 1,2 m Höhe eine Schnur gespannt, um die Ladekante eines Lkws anzudeuten (siehe auch Abbildung auf Seite 27). Dies hatte den Vorteil, dass keine Höhenanpassung mit einem Podest und keine Umsetzmanöver mit dem Laborkran notwendig waren. Außerdem blieb so der Messraum ohne Sichtbehinderung für die Messkameras frei.



Die angewendeten drei Wannenkonstellationen sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Entsprechend dem Versuchskonzept wurde jeweils eine der drei Wannenkonstellationen mit fester Positionierung eingerichtet, wobei die Wannen, zwischen denen das Schüttgut umgeschaufelt wurde, zueinander orthogonal ausgerichtet wurden.

Abbildung 2.4:
Maße der Wannenkonfigurationen bei den drei Versuchsvarianten



Die Grundflächen der Wannen betragen etwa $1,25 \text{ m}^2$ und die Seitenwände waren $0,3 \text{ m}$ hoch. In eine Wanne wurde ca. $0,4 \text{ m}^3$ des zu schaufelnden Schüttgutes gefüllt, was etwa 50 bis 70 Vollschaufeln entspricht (Tabelle 2.4). Von diesem Schüttgut konnten dann praxisgerecht 20 Einzelschaufeln in die leere Wanne umgeschaufelt werden. Der Konstruktionsaufbau einer leeren Wanne ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Die Maße der Wannenpositionen (farbig markiert) können Abbildung 2.4 entnommen werden. Aus der Arbeitsplatzanalyse und den Vorversuchen im Labor mit den fünf Probanden wurde zur praxisgerechten Einrichtung der Schaufeltätigkeiten ein seitlicher Versatz zwischen der Frontlinie der Wannen für die umzuschaufelnden Schütt-

güter und der Ecke der Wanne für die Aufnahme des Schüttgutes von 40 cm eingerichtet. Die ungefähren Standpunkte der Probanden sind in Abbildung 2.4 mit einem Kreuz gekennzeichnet.

Tabelle 2.4:
Schüttgutbefüllungen der Wannen

Schüttgüter	Dichte der Schüttgüter (unverdichtet) in kg/dm ³	Volumen in m ³	Schüttgutmasse in kg
Sand (Rheinsand)	1,6	0,4	640
Kies (0-32)	2,0	0,4	800
Erde (feucht)	1,5	0,4	600
Beton (B 15 K1)	2,0	0,4	800
Schotter (0-45)	1,6	0,4	640

Abbildung 2.5:
Schüttgutwaage mit Wanne



Das Gewicht des umgeschaukelten Schüttgutes wurde mit einer speziell konstruierten Waage genau erfasst (Abbildung 2.5). Dabei wurde die Wanne zur Aufnahme des umgeschaukelten Schüttgutes auf einen Rahmen aus Aluminiumprofilen, der etwa 1 cm Distanz zum Boden hatte, aufgesetzt. Der Rahmen war über vier piezoelektrische Kraftmesszellen in einem äußeren Gestell eingehängt. Der innere Rahmen zur Aufnahme der Stahlwanne wurde in der Grundebene in beiden Richtungen mit etwas Spiel fixiert. Die Wannengrundfläche befand sich etwa 40 mm über dem Boden. Da die Wannen für die umzuschaukelnden Schüttgüter auf einer mit Folie

abgedeckten Holzplattform von etwa 30 mm Dicke standen, war der Höhenunterschied zu der in der Waage aufliegenden Wanne nur sehr gering und hatte keinen Einfluss auf die Schaufeltätigkeiten. Die Kraftsensorik wurde mit Blechen gegenüber Stößen und spritzendem Schüttgut geschützt.

Die der einwirkenden Kraft proportionalen Ladungen der Sensoren wurden summiert, über einen Ladungsmessverstärker in kraftproportionale Spannungen umgewandelt und synchron mit den Messsignalen der Körperhaltungen aufgezeichnet. Die Gewichte der Schüttgutmassen wurden mit einem maximalen Fehler von ± 200 g gemessen. Durch die Aufzeichnungen wurden die Gewichte der Schüttgutmassen jedes einzelnen Schaufelvorgangs erfasst und zeitsynchron dokumentiert.

2.6.2 Dreidimensionale Bewegungserfassung

Um die dreidimensionalen Körperhaltungen und Bewegungen beim Schaufeln zu erfassen, wurde das opto-elektronische Messsystem VICON (VICON 612) mit acht Kameras eingesetzt (Abbildung 2.6).

Abbildung 2.6:
Opto-elektronisches Bewegungsmesssystem VICON
zur Analyse dreidimensionaler Bewegungsabläufe





Die Versuchsperson und die Schaufel wurden mit passiven reflektierenden Markern (14 mm Durchmesser) bestückt, um eine dreidimensionale kinematische Rekonstruktion der zu erfassenden Körperteile und Schaufelpositionen zu ermöglichen (Abbildung 2.7). Die Anzahl von acht Kameras gewährleistete nicht nur die dreidimensionale Rekonstruktion, sondern sicherte die Markererkennung auch in optisch schwierigen Situationen bei Verdeckungen von Markern durch Körperteile oder durch die Schaufel. Die Messfrequenz der Kameras betrug 100 Hz: So konnten auch die teils sehr dynamischen Bewegungen eines Schaufelvorgangs in zeitlich guter Auflösung erfasst werden. Die räumliche Auflösung des Messvolumens von ca. 8 (2 x 2 x 2) m³ betrug ca. 1 mm.

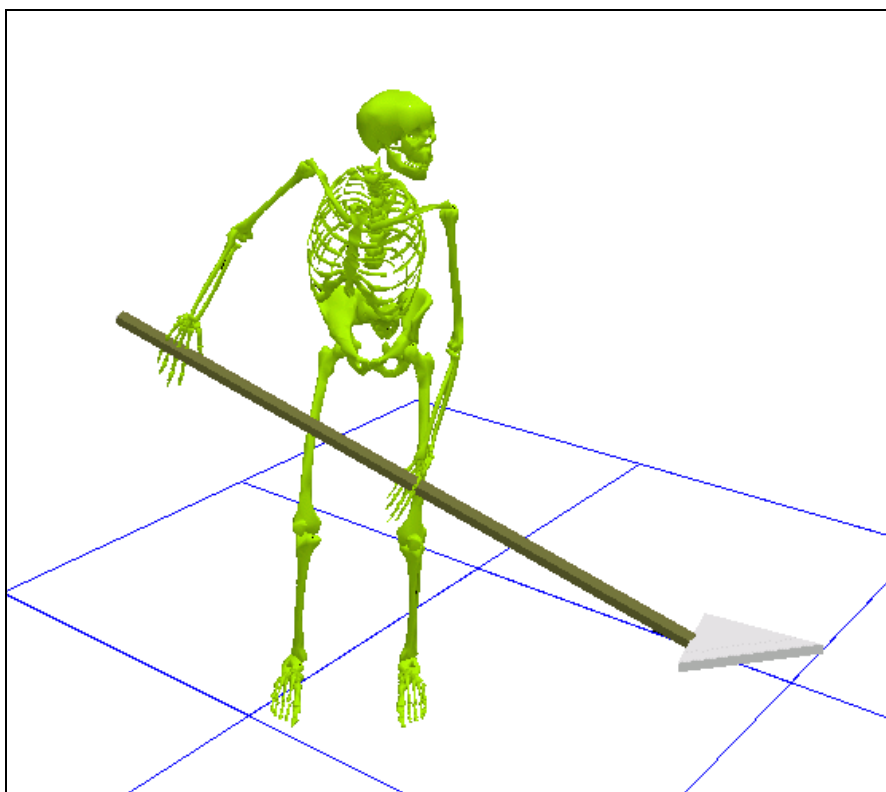
Abbildung 2.7:
Mit reflektierenden Marken bestückte Versuchsperson beim Schaufeln mit der Messschaufel; hier Messkonstellation „Kies, nach oben, kurze Distanz“





Im VICON-System wurde ein biomechanisches Menschmodell des Muskel-Skelett-Systems implementiert, das die kinematischen Messgrößen als Eingangsdaten nutzte. Dieses umfasste 15 Segmente, bestehend aus jeweils dreigliedrigen Extremitäten und Rumpf (Becken, Brustkorb und Kopf) (Abbildung 2.8). Die Schaufel wurde als ein eigenständiges dreidimensionales Objekt erfasst.

Abbildung 2.8:
Grafische Animation des biomechanischen Modells des Muskel-Skelett-Systems aus 15 Körpersegmenten und der Schaufel



2.6.3 Druckmesspad am Oberschenkel

Die Auflagekraft der Schaufel auf dem Oberschenkel wurde über ein Druckmesspad, das am jeweils betroffenen Oberschenkel des Probanden mit Klettbindern befestigt wurde, gemessen (Abbildung 2.9). Dieses Messpad (Fa. PAROMED) hat eine Länge von 25 cm und eine Breite von 12 cm mit 24 auf der Fläche gleichmäßig verteilten Druckmesszellen mit einer Fläche von je 5 cm² (Abbildung 2.10).



Abbildung 2.9:
Druckmesspad zur Messung der Auflagekräfte der Schaufel am Oberschenkel
(links); Abstützung des Schaufelstiels beim Schaufeln auf dem Oberschenkel (rechts)

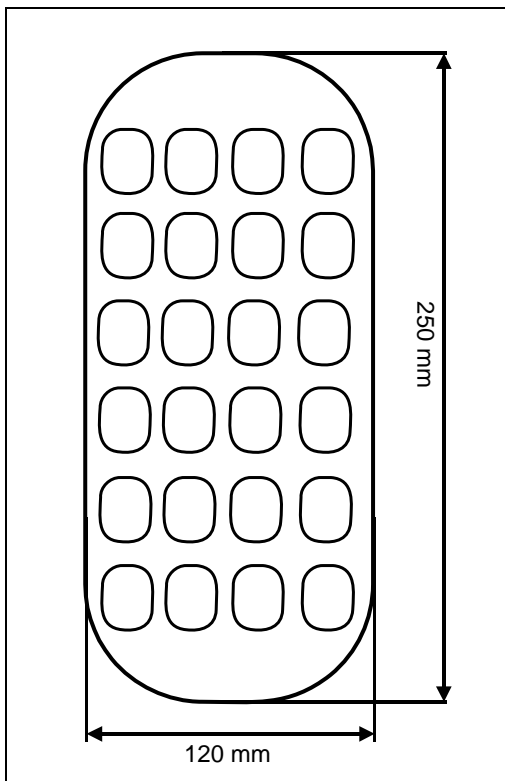
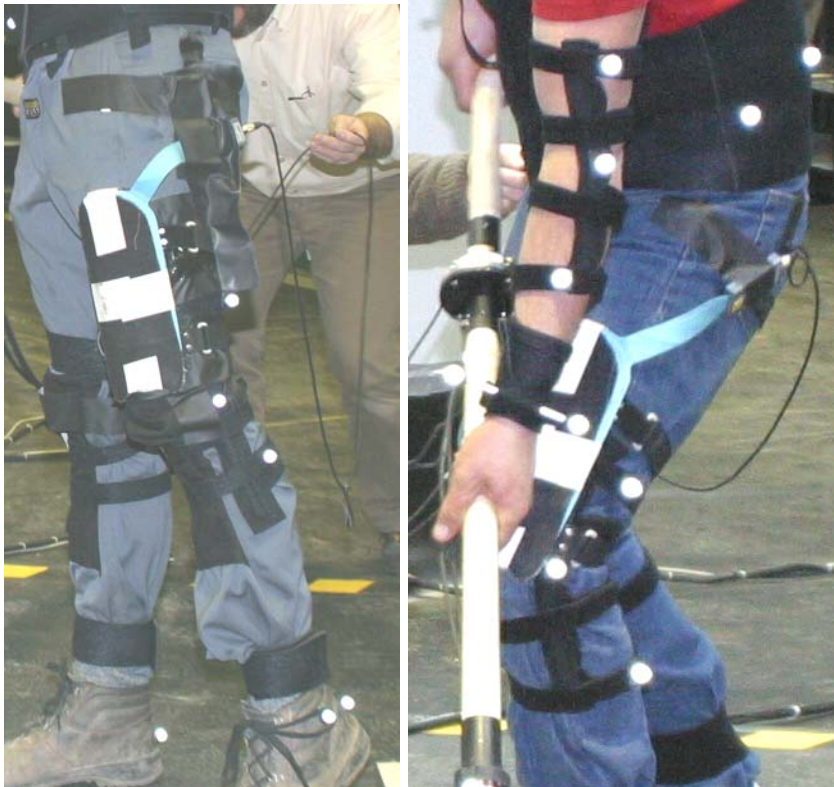


Abbildung 2.10:
Schematischer Aufbau und
Zellanordnung des Druckmesspads



Jede dieser 24 Hydrozellen ist mit Silikonöl gefüllt und enthält einen piezoresistiven Drucksensor. Eine Zelle kann einem Druck bis mindestens 6,25 bar standhalten. Die Vorverstärkung der Drucksensoren führt eine mit der Sohle verbundene Verstärkerelektronik durch. Die Sensoren besitzen eine maximale Abweichung von $\pm 2\%$ vom Endwert und eine Nichtlinearität von $\pm 0,42\%$ (TÜV München, Oktober 1995, Projekt-Nr. 0895-0308).

Durch Summation über die 24 Messzellen wurde unter Berücksichtigung der Zellfläche die Gesamtkraft berechnet. Hierzu wurden sowohl statische als auch dynamische Versuche durchgeführt, um das Messsystem am Oberschenkel zu kalibrieren.

Unter der Annahme, dass die Auflagekraft im Wesentlichen eine Druckkraft (senkrecht zur Auflagefläche) ist, wurde die räumliche Lage der resultierenden Oberschenkelauflagekraft bestimmt. Aus der räumlichen Lage von Schaufelstiel und Oberschenkellängsachse wurde der senkrechte Abstandsvektor der beiden Geraden als Wirkungslinie der Auflagekraft definiert (Abstand zweier windschiefer Geraden). Die Länge des Kraftvektors wurde dabei auf den angezeigten Kraftwert des Messpads gesetzt (weitere Berechnung siehe Abschnitt 2.7.2, Seite 33).

2.7 Aufbau der Messschaufel

2.7.1 Sensorik, Geometrie und Massenverteilung der Messschaufel

In dieser Untersuchung wurde nur der Schaufeltyp „Frankfurter Schaufel“ eingesetzt. In den Abbildungen 2.11 und 2.12 sind die Drauf- und Seitenansicht der Schaufel sowie deren Lagestatus vor Beginn der Messungen dargestellt. In den Schaufelstiel wurden zwei dreiaxiale Kraft- und Momentensensoren eingesetzt, ohne die Länge von 1,62 m zu ändern. Hierzu wurden spezielle Aluminiumbüchsen verwendet, in denen jeweils die Enden der Teilstiele verzapft und mit einer Holzschraube gesichert wurden.

Die Position der Sensoren wurden so bestimmt, dass alle fünf Probanden ihre individuellen Handpositionen beim Schaufeln einnehmen konnten, ohne durch die Sensoren und deren Verkabelung bei den Schaufeltätigkeiten gestört zu werden.



Abbildung 2.11:
Konstruktionszeichnung mit den für das physikalische Modell notwendigen
Maßen zur Handkraftberechnung, Maße des Schaufelblattes und der Teilstücke
des Schaufelstiels sowie Montage/Konstruktionsmaße der Sensorik

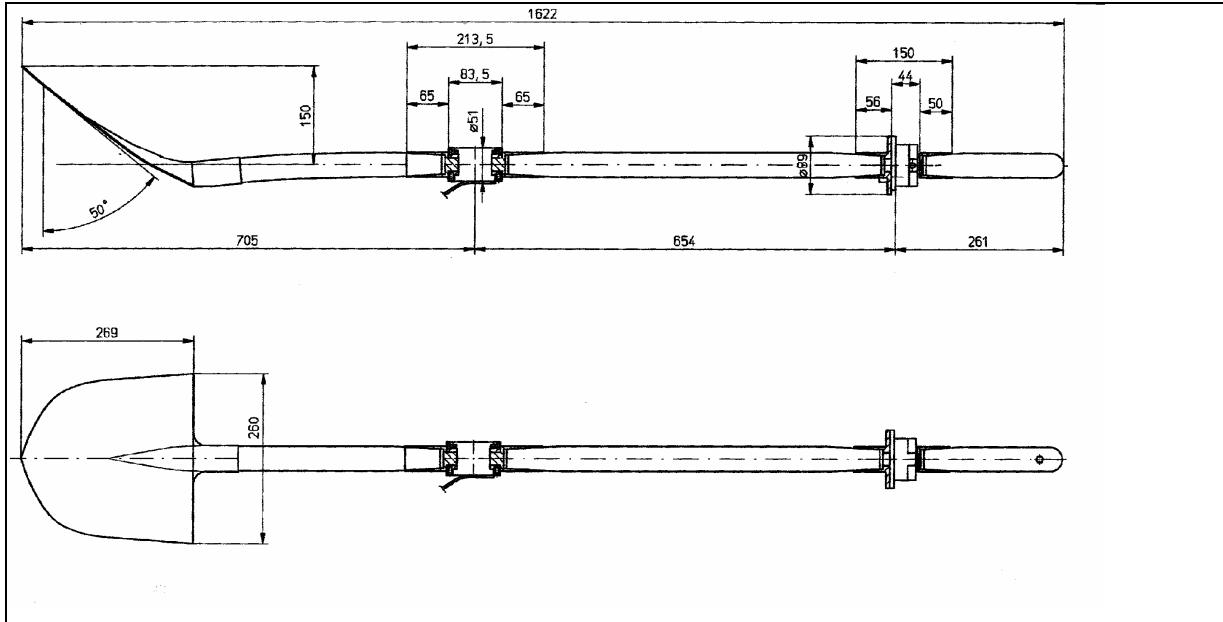


Abbildung 2.12:
Mit Sensoren präparierte Messschaufel aus drei Perspektiven





Zur exakten Erfassung der Querschnittskräfte und -momente mit den Sensoren wurde die Schaufel vor Beginn des Versuchs in einem Rahmengestell aufgehängt. Dabei wurde der mittlere Teilstiel über eine entsprechende Justage der hinteren Auflagepunkte des Schaufelblattes vertikal ausgerichtet. In dieser Ausgangsposition wurden alle Sensorkomponenten auf Null abgeglichen. Zusammen mit den Gewichten der drei Teilstücke der Schaufel (1. Schaufelblatt + unterer Teilstiel + Sensoranteil des unteren Sensors, 2. Gewicht des oberen Teils des unteren Sensors + mittleres Teilstiel + Gewicht des unteren Teils des oberen Sensors, 3. Gewicht des oberen Teils des oberen Sensors + oberster Teilstiel) konnten die Handkräfte nach dem in Abschnitt 2.7.2 beschriebenen physikalischen Modell berechnet werden.

Als Sensoren wurden unten ein dreiaxialer Kraft- und Momentensensor, Typ IF-628, und oben ein dreiaxialer Kraft- und Momentensensor, Typ IF-205, der Fa. FTSS eingesetzt. Alle Kräfte- und Momentenkomponenten der Sensoren sind in Dehnungsmessstreifen(DMS)-Technik gefertigt und wurden mit hochgenauen Brückenmessverstärkern (Fa. GEPA) für die digitale Messdatenerfassung angepasst. Vor der Digitalisierung wurden alle Kräfte- und Momentenkomponenten mit Analog-Antialiasing-tiefpässen gefiltert. Hierbei wurde bei hoher Steilheit eine Grenzfrequenz von 25 Hz eingestellt.

Die messtechnische Anpassung der Sensorkomponenten wurde zunächst auf der Grundlage der Empfindlichkeiten und Randbedingungen nach Kalibrierprotokoll vorgenommen. Es wurden glatte Verstärkungsfaktoren verwendet und daraus die Skalierungswerte für Kräfte und Momente ermittelt. In der VICON-Messdatenerfassungssoftware wurden diese Skalierungswerte zur Berechnung der Kräfte und Momente nach Schaufelmodell verwendet. Die Einstellungen und die Messgenauigkeiten der Kräfte und Momente wurden danach durch Funktionsüberprüfungen mit Gewichten kontrolliert und dokumentiert.

Um die Handkräfte zu bestimmen, ist die Massenverteilung der Messschaufel eine wichtige Voraussetzung. Relevant sind hierbei die Massen zwischen den Messstellen der Kraftsensoren. Durch Kraftmessungen bei unterschiedlicher Lagerung der Schaufel parallel mit den Hauptachsen der Schaufel wurden diese Massenanteile bestimmt (Abbildung 2.13). Mit 3,86 kg ergab sich hierbei ein leicht erhöhter Wert



von rund 0,2 kg gegenüber dem Wiegen der Einzelteile, was wesentlich durch die zusätzliche Masse der frei hängenden Messkabel (ca. 2 m Länge) bedingt war.

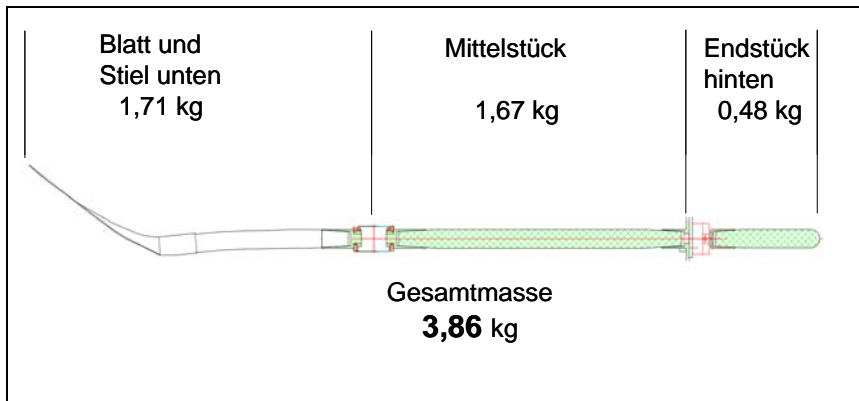
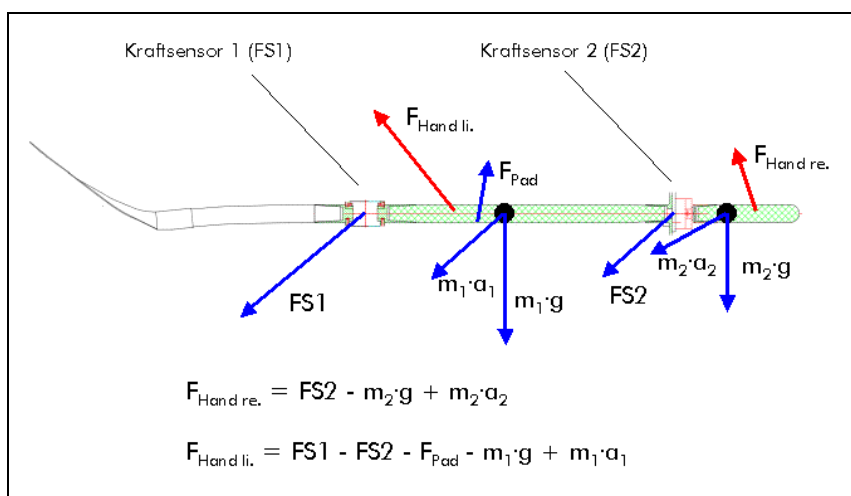


Abbildung 2.13: Massenverteilung der Messschaufel zwischen den Messstellen der Kraftsensoren

2.7.2 Bestimmung der Handkräfte

Die dreidimensionale Bestimmung der Handkräfte basiert auf dem Schnittprinzip und berücksichtigt alle auf die Schaufel einwirkenden Kräfte in drei Komponenten. Neben den gemessenen Sensorkräften sind Gewicht- und Trägheitskräfte der Schaufelteile sowie die eventuell auftretende Auflagekraft des Oberschenkels F_{Pad} zu berücksichtigen (Abbildung 2.14). Die Betrachtung des Kräftesystems erfolgt in zwei Schritten – für jeden der beiden Sensormesspunkte getrennt.

Abbildung 2.14: Kräftegleichungen für die Messschaufel zur dreidimensionalen Bestimmung der Handkräfte, m = Masse, a = Beschleunigung für den betreffenden Schaufelteil, g = Erdbeschleunigung





Damit erhält man zwei eindeutige Gleichungen für die Handkraft der rechten und linken Hand. Die Drehmomente an den Hand-Schaufel-Kontaktstellen blieben im Modell unberücksichtigt. Analysen der Torsionseinwirkung der Hände auf den Schaufelstiel ergaben nur sehr geringe Werte von etwa 2 bis 3 Nm, sodass der Einfluss dieser Drehmomente auf die lumbale Belastung als vernachlässigbar betrachtet werden kann.

Die Schaufelmessungen zeigten, dass die zuvor angenommenen reinen Druckkräfte für die Oberschenkelauflagekräfte teilweise höchst unplausible Handkräfte nach sich zogen. Die Oberschenkelauflagekraft wich zum Teil sehr von der Richtung der Sensorkräfte (FS1, FS2) ab, was nicht zum erwarteten Effekt der Reduzierung der Handkräfte führte und oft zusätzlich eine für das Muskel-Skelett-System ergonomisch sehr ungünstige Krafrichtung nach sich zog. Daher wurde aus der mittleren Krafrichtung der Schaufelkraftsensoren und der Druckkrafrichtung des Oberschenkel-Pads (vgl. Abschnitt 2.6.3) die Richtung der Oberschenkelauflagekraft im Verhältnis 2 : 1 neu berechnet. So wurden zu große Abweichungen der Druckkrafrichtung von den anderen Krafrichtungen vermieden und der erwartete Effekt einer Entlastung der Handkräfte besser gewährleistet. Eine genauere räumliche Bestimmung der Auflagekraft war unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht möglich bzw. nicht vertretbar.

2.8 Isometrische Maximalkraftmessungen

Um die Kraftfähigkeiten der Probanden in einer dem Schaufeln ähnlichen Körperhaltung erfassen zu können, wurde gemäß DIN 33411-5 [9] die einarmige Hebekraft (rechts und links) im Form von statischen Maximalkrafttests gemessen (Abbildung 2.15). Hierbei wurde die statische maximale Kraft in vertikaler Richtung an einem in 400 mm über dem Boden fixierten Griff mithilfe eines Kraftmessensors registriert. Die maximale Kraft der rechten und der linken Hand war dabei jeweils über einen Zeitraum von 5 s möglichst konstant aufzubringen; die Körperhaltung war freigestellt. Für beide Seiten wurden je zwei Versuche mit Pausen von je 90 s durchgeführt.

Der Laboraufbau für den statischen Maximalkrafttest ist im rechten Teil der Abbildung 2.15 gezeigt. Der Proband stand auf einer schweren Stahlplatte, an der die beiden Kraftsensoren für die Messung der statischen Maximalkraft des linken und rechten Hand-Arm-Systems befestigt waren. Die Höhen der Kraftangriffspunkte



wurden über Gurtbänder und Standard-Handgriffe eingerichtet. Über die Handgriffe konnten die Probanden ihre maximalen Handkräfte optimal aufbringen.

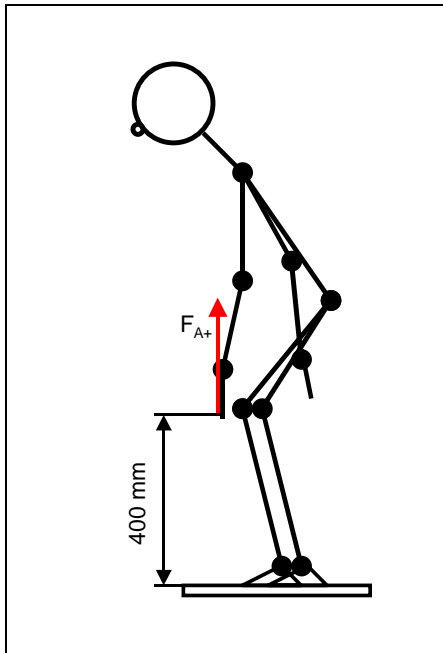


Abbildung 2.15:
Statischer
Maximalkrafttest

Der Proband wurde durch den Untersucher bei der Aufbringung seiner Maximalkraft angeleitet. Dadurch wurden dynamische Überhöhungen vermieden und die Streuungen innerhalb der vier Krafttests pro Proband ausreichend klein gehalten. Die Maximalkrafttests wurden immer vor den Schaufelversuchen durchgeführt, wobei stets eine Pause von ca. 30 Minuten dazwischen lag. Insofern hatte die Versuchsperson genügend Zeit, um sich vor den Schaufelversuchen vollständig zu erholen.

2.9 Messdatenerfassung und Auswertung

Die kinematischen Größen (Markerpositionen) und alle dynamischen Größen (Kraftsignale von Schaufel, Oberschenkel-Pad und Schüttgutwaage) wurden zeitsynchron über das VICON-System erfasst und in einer Versuchsdatei zusammengefasst. Die Abtastfrequenz betrug für alle Messsignale einheitlich 100 Hz.

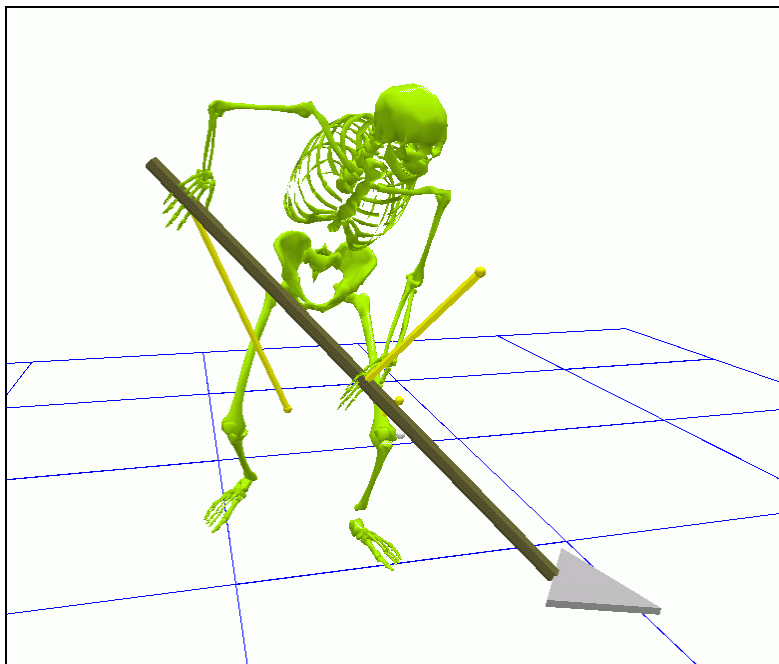
Die zu Dokumentationszwecken mitgeschnittenen Videoaufnahmen aus drei unterschiedlichen Perspektiven wurden mittels eines Foto-Blitzgerätes mit dem Startzeitpunkt einer jeden Messung getriggert. Im Anschluss konnten die Videoaufzeichnungen anhand des Blitzlichtes geschnitten und so mit den Messsignalen synchronisiert werden.



Vor der weiteren Datenverarbeitung wurden die Markerkoordinaten mit einem Spline-Filter (5. Ordnung) und die analogen Signale mit einem Butterworth-Tiefpassfilter (Schaufelsensoren und Pad 10 Hz Grenzfrequenz, Schüttgutwaage 1 Hz Grenzfrequenz) gefiltert.

Die biomechanische Modellierung des Muskel-Skelett-Systems zur Bestimmung der Gelenkmittelpunkte wurde mit dem Programm BodyBuilder (VICON) auf der Grundlage der dort bereits verfügbaren Modellvorgaben durchgeführt. Die Bestimmung des Gelenkmoments um L5/S1 erfolgte aus der kinematischen Kette als Top-Down-Modell, wobei von den Aktionskräften der Hände ausgegangen wurde und über die Arme und den Rumpf bis zur Lendenwirbelsäule gerechnet wurde (Abbildung 2.16).

Abbildung 2.16:
Biomechanisches Modell zur Bestimmung des Gelenkmoments an der Lendenwirbelsäule (L5/S1) aus den Aktionskräften der Hände (gelbe Vektoren) und der Körperhaltung

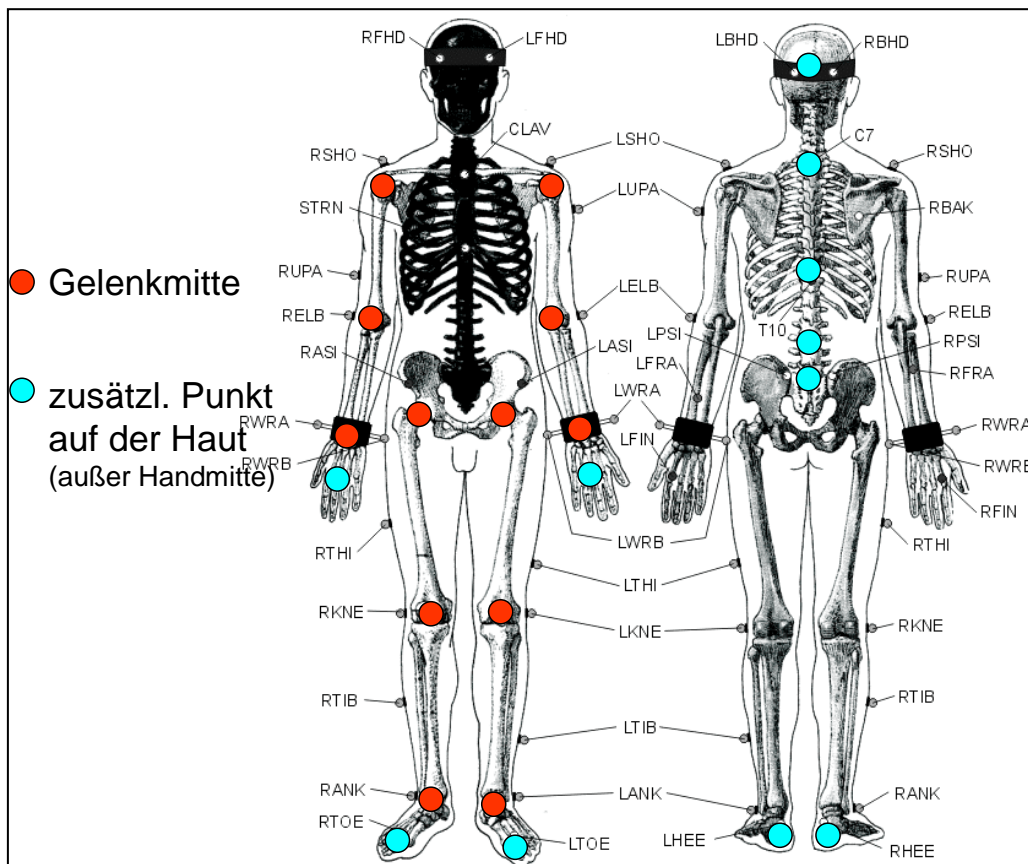


Die aus dem biomechanischen Modell gewonnenen Gelenkmittelpunkte und die Aktionskräfte der Hände bildeten die wesentlichen Eingangsgrößen für das Dortmunder-Modell zur Berechnung der Kompressionskräfte an der Lendenwirbelsäule (Abbildung 2.17). Diese Eingangsgrößen wurden in einem gesonderten ASCII-Datensatz für jeden Versuch zusammengestellt und dem IfADo zur weiteren



Berechnung mit dem Dortmund-Modell übermittelt (Abschnitt 2.2). Da die Gelenkmomente um L5/S1 ebenfalls im „Dortmunder“ berechnet wurden, dienten diese Werte als wichtige Prüfgröße bei der Erstellung der Software-Schnittstelle für das Dortmund-Modell.

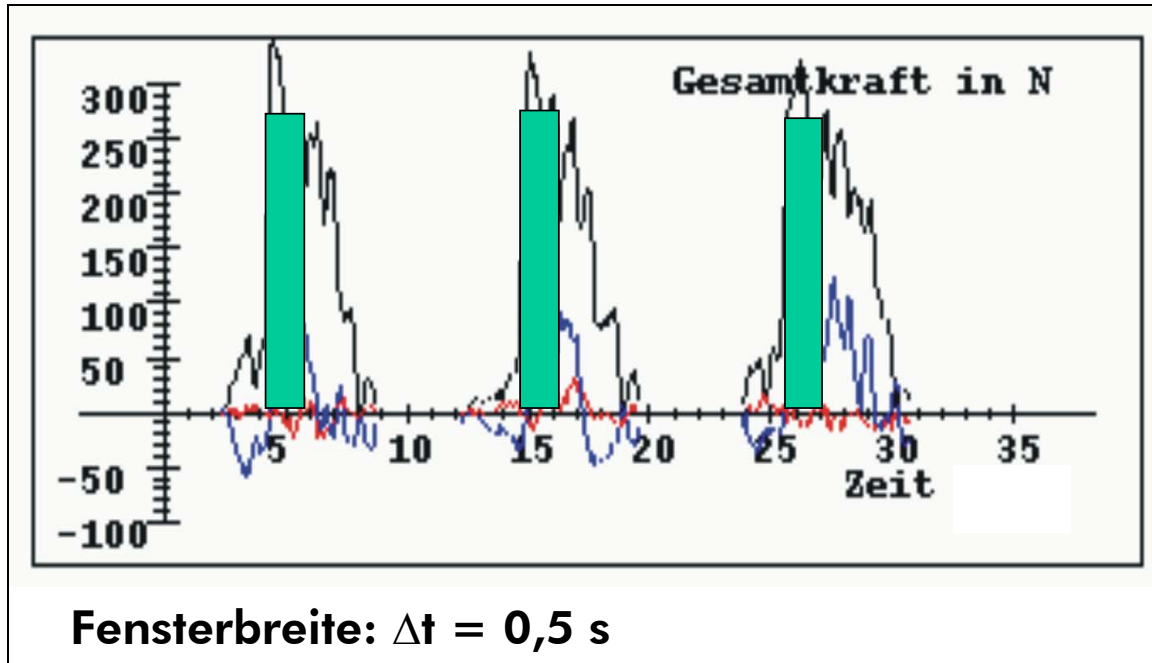
Abbildung 2.17:
Referenzpunkte zur Übertragung der Bewegungsdaten
aus dem VICON-Modell in das Dortmund-Modell



Um einerseits der Dynamik des Schaufelns Rechnung zu tragen und andererseits aber nicht nur einen eventuell isolierten Maximalwert zu betrachten, wurden für alle Ergebnisgrößen die gleitenden Mittelwerte über die Zeit mit einer Fensterbreite von 0,5 s berechnet. Als Repräsentant wurde dann das Maximum des gleitenden Mittelwerts für jeden einzelnen Schaufelvorgang bestimmt (Abbildung 2.18, Seite 38).



Abbildung 2.18:
Verfahren zur Bestimmung der Maxima des gleitenden Mittelwertes mit einer Fensterbreite von 0,5 s über einen Versuch mit mehreren Wiederholungen, hier am Beispiel von drei wiederkehrenden Ereignissen



Sämtliche Daten der Versuchsreihe wurden in eine Datenbank (MS ACCESS 2000) überführt, um für die weiteren statistischen Analysen einen effektiven Datenzugriff auf die überaus großen Datenmengen zu gewährleisten. Die statistischen Analysen der Daten erfolgten mit dem Programm SPSS (Version 14). Zur Beschreibung der Verteilungen der Ergebnisparameter wurden sogenannte Boxplots (Abbildung 2.19) erstellt. In einem Boxplot wird der innere Teil der Wertegruppe durch eine Box dargestellt, deren Grenzen vom 25. und 75. Perzentil der Verteilung gebildet werden, d. h., die Box enthält die inneren 50 % oder anders ausgedrückt den Interquartilbereich IQR der Verteilung. Innerhalb der Box wird als Zentralwert dazu der Median angegeben. Der Median ist der 50. Perzentilwert und ein Mittelwertschätzer, der robust gegen Ausreißer oder Extremwerte ist. Bei der Analyse der einzelnen Wertegruppen werden die außerhalb der IQR-Box liegenden Werte mit einem speziellen Berechnungsverfahren überprüft und es wird geschätzt, ob sie als Extremwerte oder Ausreißer charakterisiert werden müssen. Bei den nachfolgenden Abbildungen wurden zur besseren Übersichtlichkeit die identifizierten Extremwerte und Ausreißer ausgeblendet; diese weisen in der Regel nur auf Sonderfälle bei den Versuchen hin, die für die Ergebnisbewertung unbedeutend sind. Die Eckwerte der verbliebenen und

als zur Wertegruppe gehörenden erkannten Einzelwerte sind im Boxplot durch Whiskers gekennzeichnet; diese können maximal eine Länge vom 1,5-fachen der Boxlänge (IQR) annehmen. Sie entsprechen daher nicht unbedingt den MIN/MAX-Angaben in den Tabellen, die Extremwerte und Ausreißer einbeziehen, sondern zeigen ggf. eine geringere Streuung an.

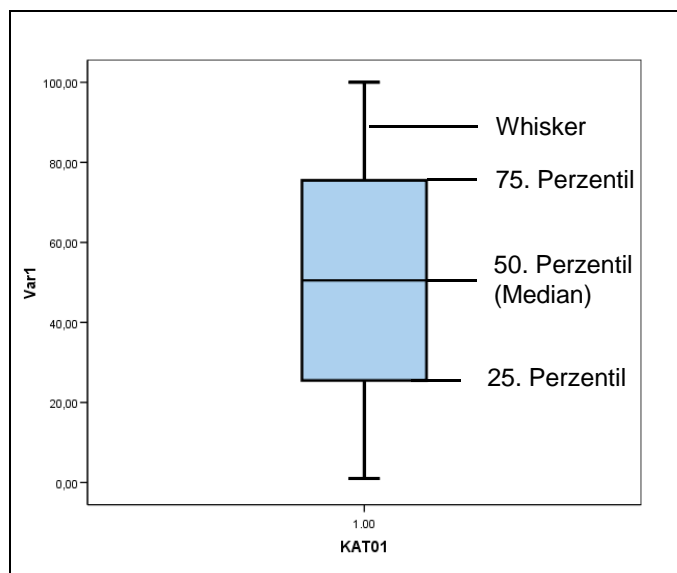


Abbildung 2.19:
Boxplot zur Beschreibung
der Verteilung eines Ergebnis-
parameters

2.10 Erläuterungen zur Datenerhebung, zur Datenstruktur und zum Datentransfer

Aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungsschwerpunkte in diesem Forschungsvorhaben fanden die messtechnischen Erhebungen zu Körperhaltungen und Aktionskräften sowie die darauf aufbauenden Berechnungen von LWS-bezogenen Beuge- und Torsionsmomenten beim Schaufeln im BGIA statt, wohingegen die auf den Messergebnissen basierenden Berechnungen zur Quantifizierung der Bandscheiben-Druckkräfte an der Lendenwirbelsäule im IfADo erfolgten. Dieser kombi-native Ansatz wurde – nach primären Kompatibilitätsprüfungen in Untersuchungen zum Lastentransport mit einer Schubkarre [5] – routinemäßig bisher nur bei Untersuchungen zur Wirbelsäulenbelastung von Flugbegleitpersonal beim Bewegen von Trolleys im Flugzeuggang eingesetzt [10; 11], sodass die prinzipielle Vorgehensweise und einige Kompatibilitätsanpassungen übernommen werden konnten.



Allerdings unterscheidet sich das seinerzeit eingesetzte, am Körper des Probanden getragene Körperhaltungserfassungssystem CUELA (Computerunterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems) [12; 13] grundlegend von dem hier genutzten, im Labor stationär installierten VICON-System: Bei Letzterem werden Raumkoordinaten der Marker, die vorrangig an den Gelenken befestigt sind, erhoben; Körperhaltungsinformationen liegen dabei in Form von xyz-Wertetriplets vor, die – für die Fragestellung dieser Studie von nachrangiger Bedeutung – zusätzlich auch Körperfortbewegungen im Labor repräsentieren (Ortsveränderung des personengebundenen Koordinatensystems). Im Gegensatz dazu werden beim CUELA-System Winkelstellungen der Körperteile aufgezeichnet, insbesondere relative Gelenkwinkel an den Extremitäten und vorrangig absolute Winkel am Rumpf. Im Vergleich dazu werden die Körperhaltungen beim „Dortmunder“ zwar auch winkelbasiert beschrieben, jedoch anhand von Winkeln der Extremitäten gegenüber einem raumfesten Koordinatensystem sowie körperinternen Relativwinkeln zur Kennzeichnung von Wirbelsäulenkrümmungen und -torsionen. Auch wenn sich diese drei Ansätze prinzipiell ineinander überführen lassen und sich naturgemäß beide BGIA-genutzten Datenformen in die Datenstruktur beim „Dortmunder“ umrechnen lassen, waren trotz der Erfahrungen in der Flugbegleiterstudie weitere vielfältige und zeitintensive „bilaterale“ technische Abstimmungen, Interaktionen und Entwicklungen erforderlich. Dieser Sachverhalt ergab sich auch daraus, dass sich die Bewegungsformen und -umfänge beim Schaufeln und beim Bewegen von Trolleys charakteristisch unterscheiden: Letztere erfolgen im Wesentlichen in sagittaler Richtung mit vergleichsweise geringen Bewegungen von Rumpf- und Armsegmenten, während Schaufeln zwar vorrangig ortsfest, jedoch mit beliebiger Positionierung im Raum ausgeführt wird. Dabei können zudem die Körpersegmentstellungen zu den drei Raumrichtungen beliebig orientiert sein und während eines Schaufelvorgangs in den acht Raumoktanten beliebig variieren².

² In einem räumlichen kartesischen Koordinatensystem ergeben Kombinationen positiver oder negativer x-, y- oder z-Koordinatenwerte insgesamt acht „Teilräume“ gleicher Vorzeichenkombinationen, sogenannte Raumoktanten.



2.10.1 Prinzipielle Dateienstrukturen

Insgesamt waren die im BGIA erhobenen Daten zur Körperhaltung und zu Aktionskräften hinsichtlich der erfassten Kenngrößen (siehe auch Abbildung 2.13) und in der Formatierung so anzupassen, dass die BGIA-Messergebnisse als Eingabedaten für die Modellrechnungen im IfADo genutzt und deren Ergebnisse im BGIA verifiziert werden konnten. Für den Datentransfer und -austausch zwischen BGIA und IfADo wurden Dateien mit einer ASCII-Datensatzstruktur verwendet, aus denen die „Dortmunder“-spezifischen, d. h. die jeweilige Tätigkeit beschreibenden Eingabedateien („Tätigkeitsdateien“, „TAET-Dateien“), konfiguriert wurden. Mit dem Ziel einer eindeutigen Beschreibung einer einzelnen Belastungssituation oder eines -vorgangs sind in einer „Tätigkeitsdatei“ alle erforderlichen Angaben enthalten, insbesondere zu Körpergröße und -gewicht, Zeit- und Lasteigenschaften sowie zur Körperhaltung. Aufgrund der vereinbarten Vorgehensweise, auf die im „Dortmunder“ zwar implementierte, allerdings hier nicht sinnvolle Bewegungsprognose zu verzichten (siehe Abschnitt 2.2), wurde für jeden Zeitpunkt während eines Vorgangs eine individuelle Tätigkeitsdatei erstellt. Somit besteht jede Sequenz von 20 Schaufelvorgängen bei einer Dauer von etwa 70 Sekunden und einer Abtastrate von 100 Hz aus etwa 7 000 Tätigkeitsdateien. Zur Bearbeitung derartiger Dateigruppen wurden vormalige Software-Entwicklungen modifiziert (Schichtmonitoring der Wirbelsäulenbelastung innerhalb der „Dortmunder Lumbalbelastungsstudie“ [10; 14]), die letztendlich eine teilautomatisierte Dateneingabe für die Situationssequenzen während einer Schaufelvorgangsfolge ermöglichten.

In der Summe ergeben sich bei 60 „Belastungsfällen“ (5 Probanden x 12 Bedingungen) etwa 420 000 Eingabedateien, ebenso viele Ergebnis-Ausgabedateien („Daten-dateien“, „DAT-Dateien“) sowie 420 000 Grafikdateien („GRF-Dateien“). Die Ergebnisdateien enthalten einerseits kartesische xyz-Gelenk- und -Schwerpunktkoordinaten, die aus den Eingabewinkeln berechnet wurden, und die lumbalen Belastungswerte wie Bandscheibenkräfte und -momente in verschiedenen Koordinatensystemen; diese Dateien wurden im BGIA ausgelesen und zur Ergebnisprüfung und -darstellung genutzt. Die Grafikdateien dienten – vorrangig während der Entwicklung der Schnittstelle zwischen BGIA und IfADo – der Prüfung der „berechneten“ Körperhaltungen und -bewegungen anhand von dreidimensionalen Strichfiguren in



verschiedenen Ansichten sowie dem Überblick über die berechneten Belastungen anhand von Kurvendarstellung der verschiedenen Indikatoren.

2.10.2 Transferdatei

Die zum Datentransfer zwischen BGIA und IfADo vereinbarten Dateien umfassten jeweils die Daten zu Körperhaltungen und Aktionskräften einer einzelnen Schaufelvorgangsfolge, d. h., insgesamt wurden 60 derartige Dateien erstellt. Jede dieser ASCII-Dateien enthielt die auf den Laborraum bezogenen xyz-Koordinaten der etwa 20 Gelenk- bzw. Referenzpunkte auf der Haut sowie die xyz-Komponenten der Aktionskräfte an beiden Händen, aus denen sich etwa 90 Datenspalten ergaben: Im Verlauf der Datenprüfung zeigte sich mehrfach die Notwendigkeit, zusätzliche Referenzpunkte am Rumpf zur eindeutigen Beschreibung der Orientierung des Beckens und der Rumpfkrümmungen zu definieren. Die Anzahl der Zeilen in der Transferdatei entsprach der Anzahl der „Messzeitpunkte“, sodass eine Transferdatei einen Umfang von etwa 90 Spalten mal 7 000 Zeilen aufwies.

2.10.3 Tätigkeitsdatei

Für jeden der etwa 7 000 Zeitpunkte einer jeden Vorgangsfolge, d. h. aus jeder Zeile einer Transferdatei, wurden die xyz-Koordinaten der beiden angrenzenden Gelenke jedes Körperteils sequentiell ausgelesen. Aus diesen kartesischen Koordinatenpaaren wurden die „Eingabewinkel für den Dortmund“ berechnet und in eine eigene Tätigkeitsdatei eingelesen. Diese Eingabewinkel sind entsprechend der Konzeption dieses Werkzeugs in Form von Kugelkoordinaten zur Beschreibung der Orientierung eines jedes Körperteils im Raum konfiguriert (Segmentlänge, zwei Winkel zu Koordinatenachse bzw. -ebene; siehe dazu [15]).

Die Koordinatentransformationen sind für „stabförmige“ Körpersegmente wie Ober- oder Unterschenkel sowie Ober- oder Unterarme vergleichsweise einfach, wenn auch die Uneindeutigkeit der entsprechenden trigonometrischen Funktionen (Arcussinus, Arcuskosinus) bei Raumkoordinaten und die Unstetigkeitsstellen an den Oktantenübergängen zu berücksichtigen sind. Zur Gewährleistung einer lagerichtigen Positionierung von „räumlichen“ Körpersegmenten wie Fuß, Becken oder Kopf waren „nicht-triviale“ Umrechnungen auf der Basis von mehr als nur zwei Gelenkkoordinaten erforderlich. Dies galt vor allem in Hinsicht auf den vielfach segmentierten



Rumpf, bei dem beim Schaufeln im Allgemeinen Überlagerungen von sagittalen und lateralen Wirbelsäulenkrümmungen sowie Torsionen auftreten und die Oktantenübergänge der einzelnen Abschnitte zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Dabei war zu gewährleisten, dass eine niedrigere Anzahl von messtechnisch erfassten Markern am Rumpf in Winkelwerte für eine höhere Anzahl von Rumpfsegmenten zu überführen war, d. h., anhand von gemessenen „Stützstellen“ war die Lage der gekrümmten und tordierten Wirbelsäule anzupassen und der Grad von Krümmungen und Verdrehung abzugleichen.

Prinzipiell bestehen die „Dortmunder“-spezifischen Tätigkeitsdateien aus etwa 300 Zeilen und enthalten alle Angaben zur Körperhaltung, zu einem eventuell gehaltenen oder bewegten Lastobjekt, zu einwirkenden Kräften an den Händen, zu Bewegungszeiten, zur Größe und zum Gewicht des Probanden oder zum gewählten Berechnungsbezugspunkt, hier die Bandscheibe L5/S1. Ein großer Anteil der Datei, etwa 150 Zeilen, umfasst die Körperteilstellungen anhand von Winkelangaben relativ zu den Raumachsen bzw. -ebenen; eine Gruppe von etwa 50 Zeilen enthält Winkelangaben zur Beschreibung eventueller Wirbelsäulenkrümmungen nach vorn bzw. hinten, nach links bzw. rechts sowie zu Wirbelsäulentorsionen, ausgehend von einer „natürlich-normalen“ Doppel-S-Form in der Sagittalebene ohne Verdrehung. Annähernd 100 Zeilen enthalten die Aktionskraftdaten beider Seiten, d. h. die im Allgemeinen zeitvarianten Werte der Komponenten nach vorn bzw. hinten, nach oben bzw. unten sowie nach links bzw. rechts.

Wie zuvor skizziert, weisen die Daten- und Dateienstrukturen in den genutzten Werkzeugen VICON und „Der Dortmunder“ erhebliche Unterschiede auf. Die Entwicklung der vielfältigen Umrechnungsalgorithmen und deren Implementierung in die bestehenden Programmsysteme erforderte einen hohen Kenntnisstand insbesondere zu den Spezifitäten des „Dortmunder“, sodass – entsprechend einer besonderen Absprache – die sehr zeitintensive Erstellung der Tätigkeitsdateien im IfADo erfolgte. Dabei setzte die Prüfung der daraus resultierenden „berechneten Körperhaltungen“ anhand der im BGIA gemessenen Koordinaten biomechanisch verständnisreiche und kollegiale Interaktionen zwischen BGIA und IfADo voraus.



3 Ergebnisse

Insgesamt führten fünf Probanden bei den Messungen 1 195 Schaufelvorgänge aus. Im Verlauf der Datensichtung wurden einzelne Schaufelvorgänge ausgeschlossen, die entweder gegen die Versuchsanforderungen verstießen (z. B. die geforderte Wurfhöhe nicht erreichten oder bei Abstützung des Schaufelstiels außerhalb des Oberschenkelmesspads) oder als sehr atypisch eingestuft wurden, z. B. Hängenbleiben mit der Schaufel an der Schüttgutwanne. Letztlich verblieben 1 168 Schaufelvorgänge für die weitere Datenanalyse.

Tabelle 3.1:
Anzahl gültiger Schaufelvorgänge

VP-Nr.	Versuchs-Nr.	Beschreibung	Anzahl gültiger Schaufelvorgänge
1	1	Sand, eben, kurz	20
1	2	Sand, nach oben, kurz	20
1	3	Sand, eben, weit	20
1	4	Beton, eben, kurz	20
1	5	Beton, nach oben, kurz	19
1	6	Kies, eben, kurz	20
1	7	Kies, nach oben, kurz	21
1	8	Schotter, eben, kurz	18
1	9	Schotter, nach oben, kurz	20
1	10	Erde, eben, kurz	20
1	11	Erde, nach oben, kurz	18
1	12	Erde, eben, weit	19
2	1	Sand, eben, kurz	18
2	2	Sand, nach oben, kurz	20
2	3	Sand, eben, weit	19
2	4	Beton, eben, kurz	20
2	5	Beton, nach oben, kurz	20
2	6	Kies, eben, kurz	20
2	7	Kies, nach oben, kurz	20
2	8	Schotter, eben, kurz	19
2	9	Schotter, nach oben, kurz	20



Tabelle 3.1: Fortsetzung

VP-Nr.	Versuchs-Nr.	Beschreibung	Anzahl gültiger Schaufelvorgänge
2	10	Erde, eben, kurz	19
2	11	Erde, nach oben, kurz	20
2	12	Erde, eben, weit	19
3	1	Sand, eben, kurz	20
3	2	Sand, nach oben, kurz	20
3	3	Sand, eben, weit	20
3	4	Beton, eben, kurz	20
3	5	Beton, nach oben, kurz	20
3	6	Kies, eben, kurz	20
3	7	Kies, nach oben, kurz	20
3	8	Schotter, eben, kurz	20
3	9	Schotter, nach oben, kurz	20
3	10	Erde, eben, kurz	20
3	11	Erde, nach oben, kurz	20
3	12	Erde, eben, weit	20
4	1	Sand, eben, kurz	20
4	2	Sand, nach oben, kurz	20
4	3	Sand, eben, weit	20
4	4	Beton, eben, kurz	19
4	5	Beton, nach oben, kurz	19
4	6	Kies, eben, kurz	20
4	7	Kies, nach oben, kurz	20
4	8	Schotter, eben, kurz	20
4	9	Schotter, nach oben, kurz	19
4	10	Erde, eben, kurz	20
4	11	Erde, nach oben, kurz	20
4	12	Erde, eben, weit	20
5	1	Sand, eben, kurz	20
5	2	Sand, nach oben, kurz	20
5	3	Sand, eben, weit	19
5	4	Beton, eben, kurz	20
5	5	Beton, nach oben, kurz	20



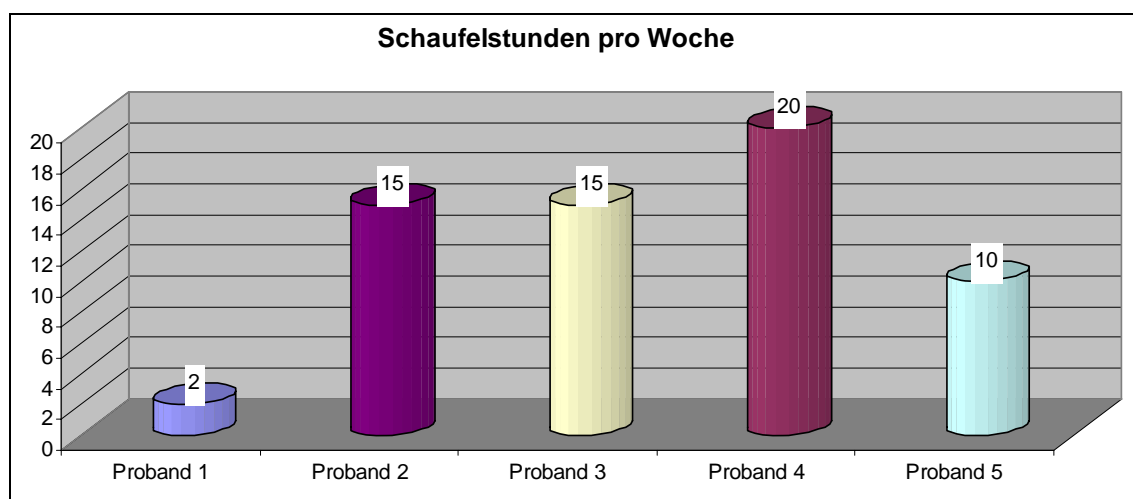
Tabelle 3.1: Fortsetzung

VP-Nr.	Versuchs-Nr.	Beschreibung	Anzahl gültiger Schaufelvorgänge
5	6	Kies, eben, kurz	20
5	7	Kies, nach oben, kurz	19
5	8	Schotter, eben, kurz	14
5	9	Schotter, nach oben, kurz	20
5	10	Erde, eben, kurz	15
5	11	Erde, nach oben, kurz	18
5	12	Erde, eben, weit	17
Gesamt			1 168

3.1 Ergebnisse der Befragung

Die Auswertung der Fragebögen der fünf Probanden ergab für die Dauer der Schaufeltätigkeiten pro Woche Werte zwischen 2 und 20 h (Abbildung 3.1). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Tätigkeiten je nach Qualifikation und Branche sehr unterschiedlich sein können. So ist z. B. das Schaufeln von Sand die Hauptaufgabe eines Estrichlegerhelfers (Proband 3).

Abbildung 3.1:
Angaben der Probanden zu ihren Schaufelstunden pro Woche



Ferner hat die fortschreitende Mechanisierung, z. B. der Einsatz eines Minibaggers auf engstem Raum, die Umfänge von Schaufeltätigkeiten auch in den letzten Jahren



weiter reduziert. Schließlich sind noch nicht näher quantifizierte Pausenzeiten zwischen einzelnen Schaufelphasen zu beachten. Der Estrichlegerhelfer arbeitet in der Regel im Akkord mit einer hohen Schaufelfrequenz, wohingegen Schaufeltätigkeiten in Verbindung mit Maschinenarbeit zur Erledigung von Restarbeiten häufiger und eventuell auch von längeren Unterbrechungen geprägt sein können.

Bei den Angaben zum Schüttgut, das die höchste subjektive Belastung verursacht, lag Schotter mit drei von vier Nennungen an der Spitze, gefolgt von Beton mit einer Nennung (Tabelle 3.2). Der Estrichleger wurde bei dieser Frage ausgenommen, da er praktisch ausschließlich Sand schaufelte.

Tabelle 3.2:
Höchste Belastungsempfindung beim
Schaufeln verschiedener Schüttgüter

Höchste Belastungen bei Schüttgut	Nennungen*
Schotter	3
Beton	1
Sand	0
Erde	0
Kies	0

* Estrichleger keine Nennung

Gewerkspezifisch hatten die Probanden unterschiedliche Schüttgüter zu schaufeln (Tabelle 3.3). Beton und Splitt wurden am häufigsten genannt.

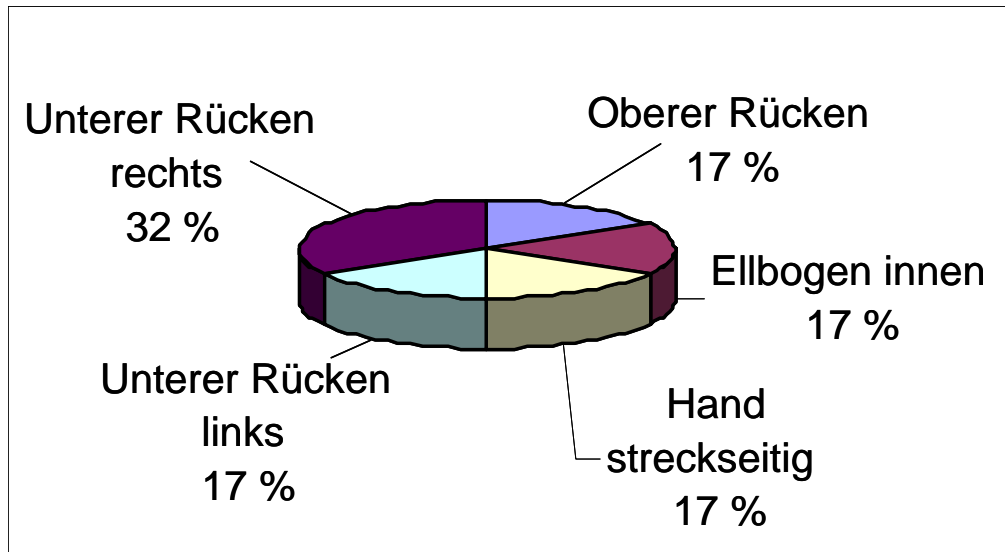
Tabelle 3.3:
Am häufigsten zu schaufelndes Schüttgut der Probanden

VP-Nr.	1	2	3	4	5
Schüttgut	Beton	Beton	Sand	Schotter und Splitt	Splitt

Als Körperregion mit der höchsten Belastungsempfindung wurde mit vier Nennungen der untere Rücken am häufigsten genannt, mit jeweils einer Nennung oberer Rücken, Ellbogen und Hand (Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2:
Angaben der Probanden zu der am höchsten
belasteten Körperregion ($n = 6$ Nennungen)



Als Einschätzung der körperlichen Beanspruchung durch Schaufeln im Vergleich zu den übrigen beruflichen Belastungen gaben alle Probanden einheitlich ein mittleres Belastungsniveau der Stufe 3 an. Diese vielleicht erstaunliche Einschätzung der Probanden ist bei der Beurteilung der lumbalen Wirbelsäulenbelastung beim Schaufeln (Abschnitt 3.10) nochmals mit zu berücksichtigen.

3.2 Maximalkraftmessungen der Probanden

Zur Bestimmung der einarmigen Hebekraft (rechts und links) gemäß DIN 33411-5 wurden die Maxima des gleitenden Mittelwertes der isometrischen Kraftwerte mit einer Fensterbreite von 1,5 s herangezogen. Abbildung 3.3 (siehe Seite 50) zeigt die Aufzeichnung der linken Handkraft von Proband 5. Aus dem Kraftsignal wurde eine statische Maximalkraft für das linke Hand-Arm-System von 735 N berechnet. Für jede Seite des Probanden wurden im Wechsel zwei Versuche durchgeführt. Als resultierende kennzeichnende statische Maximalkraft des Probanden wurde der Mittelwert aus den Werten für die rechte und die linke Hand berechnet.

Die isometrischen Maximalkraftwerte aller Probanden lagen im Bereich von 554 bis 916 N mit einem Mittelwert von 752 N (Tabelle 3.4, siehe Seite 50).



Abbildung 3.3:
 Proband beim Maximalkrafttest zur Bestimmung der einarmigen Hebekraft (links),
 Messmitschrieb und gleitendes Mittelwertverfahren zur Bestimmung der Maximalkraft
 (rechts)

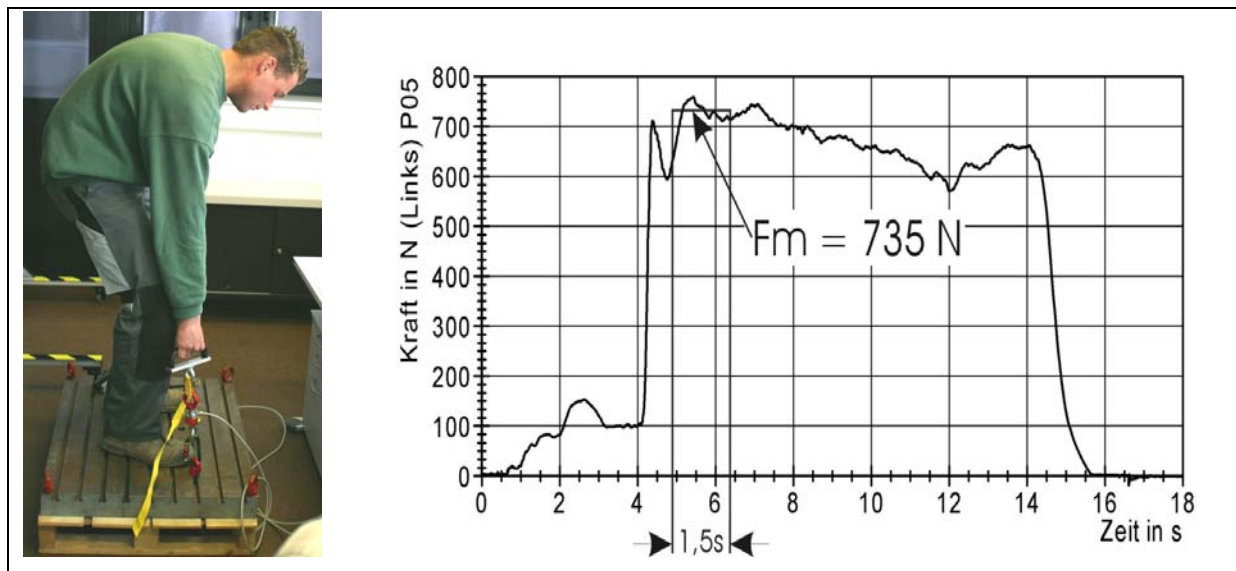


Tabelle 3.4:
 Ergebnisse des einarmigen Hebekrafttests gemäß DIN 33411-5

VP-Nr.	Statische Maximalkraft in N		
	Linker Arm	Rechter Arm	Mittelwert
1	916	898	907
2	554	581	567
3	758	748	753
4	747	839	793
5	731	749	740
		Mittelwert	752
		Standardabweichung	122

Im Vergleich zu den Probandenkollektiven 2 und 3 aus DIN 33411-5 fällt auf, dass die Schaufelprobanden im Durchschnitt deutlich unter dem 50. Perzentil von 829 N liegen (Tabelle 3.5). Nur Proband 1 erreichte mit 907 N einen Kraftwert deutlich über dem 50. Perzentil des männlichen Vergleichskollektivs. Die Kraftwerte von Proband 2 müssen aufgrund seines Alters von 59 Jahren relativiert werden. Zu den Probandenkollektiven 2 und 3 aus DIN 33411-5 sei angemerkt, dass sich diese größtenteils aus einer relativ jungen Landbevölkerung Bayerns aus dem Jahr 1988 rekrutierte.



Tabelle 3.5:
Kraftdaten der Vergleichskollektive 2 (Frauen, $n = 1\,113$, Durchschnittsalter 33 Jahre) und 3 (Männer $n = 1\,967$, Durchschnittsalter 34 Jahre) nach DIN 33411-5 für den einarmigen Hebekrafttest

Kraftrichtung	Kraftperzentile	Kraftwerte in N, Geschlecht	
		weiblich	männlich
+ A (vertikal nach oben)	5.	271	560
	10.	319	634
	15.	350	671
	50.	452	829
	95.	605	1 051

Aus heutiger Sicht waren die Schaufelprobanden im Vergleich zur gegenwärtigen Arbeitsbevölkerung in Deutschland als durchaus körperlich trainiert einzuschätzen.

3.3 Vergleichende Analyse der Kinematik unterschiedlicher Schaufeltechniken

Bei den Schaufelmessungen konnten drei prinzipiell unterschiedliche Schaufeltechniken beobachtet werden. Die auffallendste Technik zeigte der Proband 3 (Estrichleger): Er umgriff den Schaufelstiel mit beiden Händen im Ristgriff (Daumen zur Mitte hin) und hielt sowohl die Arme als auch die Beine während des gesamten Schaufelvorgangs weitgehend gestreckt (Abbildung 3.4, siehe Seite 52). Die erforderliche Flexionsbewegung erfolgte vorrangig aus dem Hüftgelenk und der Wirbelsäule.

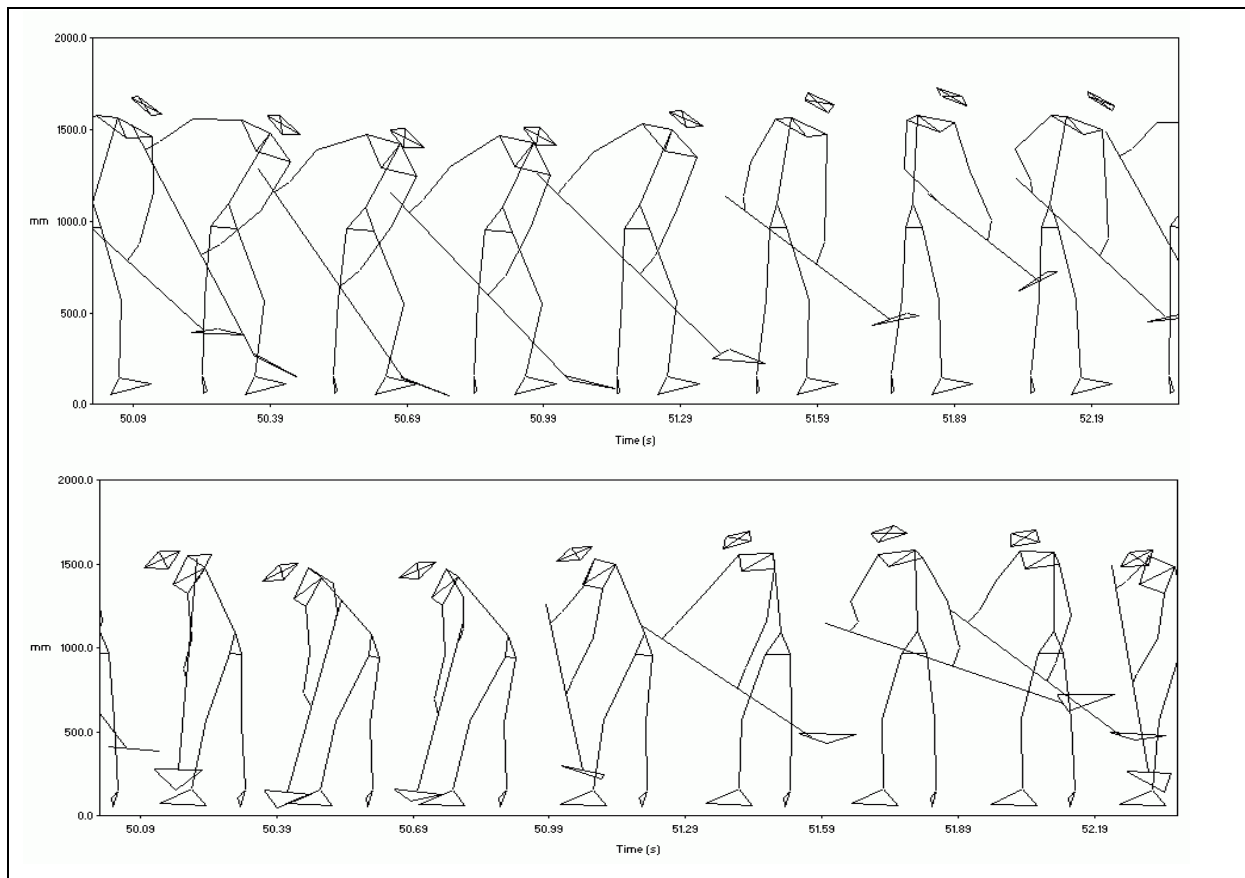
Die Technik war von einem starken Rumpfeinsatz in Form von Torsions- und Rotationsbewegungen geprägt. Der Proband führte die Schaufel in einer flüssigen halbkreisförmigen Bewegung ohne Umkehrpunkte oder Pausen (Abbildung 3.5, siehe Seite 52). Diese Technik wird von Estrichlegerhelfern häufig angewandt und scheint sich unter arbeitsökonomischen Aspekten bewährt zu haben. Jedoch sind in der Literatur bislang keine Hinweise auf arbeitswissenschaftliche Untersuchungen dieser Schaufeltechnik zu finden. Diese Technik fiel auch bei den im Folgenden beschriebenen Ergebnisparametern immer wieder durch Besonderheiten auf.



Abbildung 3.4:
Schaufeltechnik des Probanden 3 (Estrichleger); links: Einstich; rechts: Abwurf



Abbildung 3.5:
Kinegramme eines Schaufelvorgangs des Probanden 3 (Estrichleger) von der Einstichphase bis zum Abwurf (Zeitintervall zwischen zwei Figuren $\Delta t = 0,3$ s) aus zwei Perspektiven; oben: Frontalansicht; unten: Seitansicht





Bei der zweiten Schaufeltechnik handelte es sich um die gemeinhin bekannte Ausführungsweise mit der blattnahen Hand im Ristgriff und der blattfernen Hand am Stielende im Ristgriff (Abbildung 3.6). Beim Einstechen wurde die Schaufel durch den Einsatz des Oberschenkels der blattnahen Seite unterstützt. Die Abwurf- bewegung richtete sich nach vorne („vom Bauch weg“).

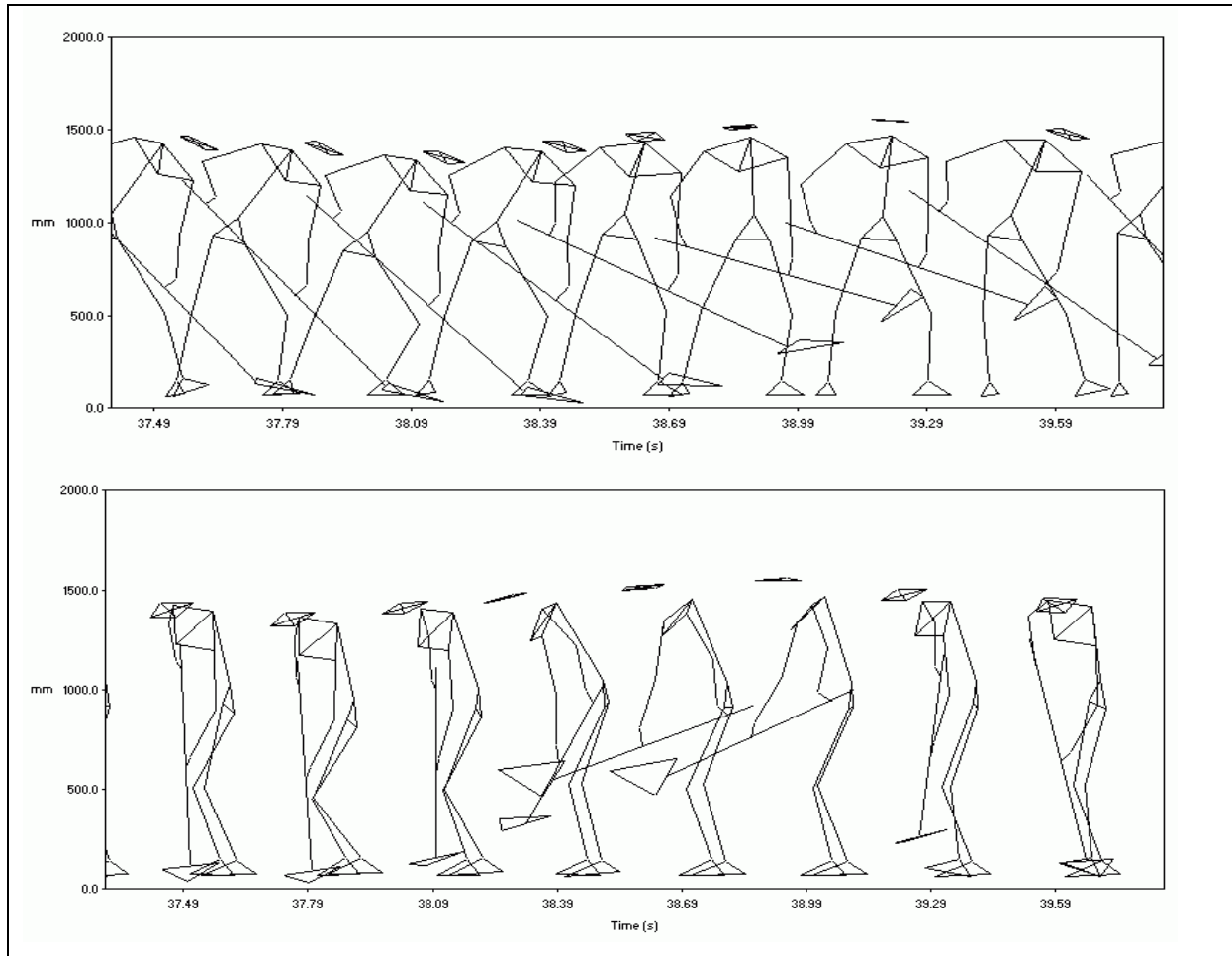
Abbildung 3.6:
Schaufeltechnik „nach vorne“ (vom Bauch weg) von Proband 5;
links: Einstich; rechts: Abwurf



Die Schaufelblattbewegung verlief bei dieser Technik in der Einstichphase eher geradlinig in das Schüttgut hinein (Abbildung 3.7, siehe Seite 54). Das blattnahe Kniegelenk war in dieser Phase etwas mehr gebeugt als bei der Technik des Estrichlegers. Demgegenüber war die Rumpfflexion in der Sagittalebene weniger ausgeprägt (Abbildung 3.7, unten).



Abbildung 3.7:
Kinegramme der Schaufeltechnik „nach vorne“ (Proband 5) von der
Einstichphase bis zum Abwurf (Zeitintervall zwischen zwei Figuren $\Delta t = 0,3$ s)
aus zwei Perspektiven; oben: Frontalansicht; unten: Seitansicht



Die dritte Schaufeltechnik unterschied sich gegenüber der vorherigen praktisch nur durch die Abwurfrichtung nach hinten („vom Rücken weg“) (Abbildungen 3.8 und 3.9). Sicher werden an erster Stelle die jeweiligen Arbeitsbedingungen ausschlaggebend für die Anwendung einer der beiden letztgenannten Schaufeltechniken sein. Dennoch könnte eine der Techniken ergonomisch günstiger sein und wäre dann nach Möglichkeit zu bevorzugen. Aufgrund des vorliegenden Studiendesigns kann hier keine ergonomische Bewertung des Schaufelns vorgenommen werden. Dies sollte aber Gegenstand zukünftiger ergonomischer Untersuchungen zum Schaufeln sein.

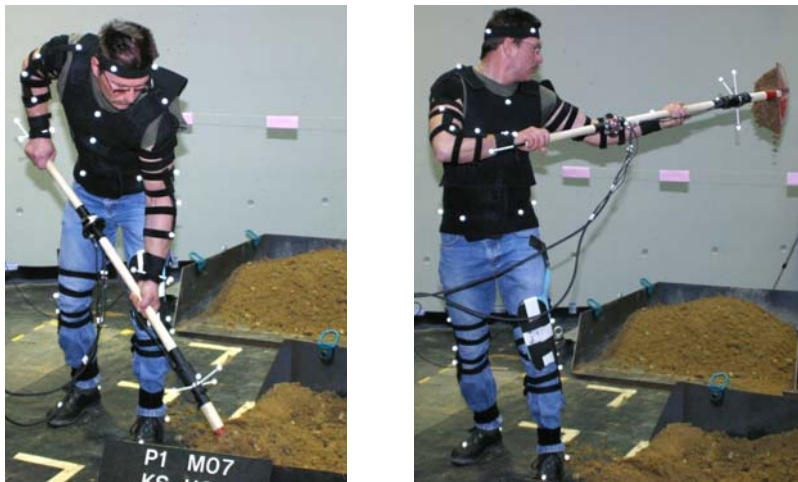
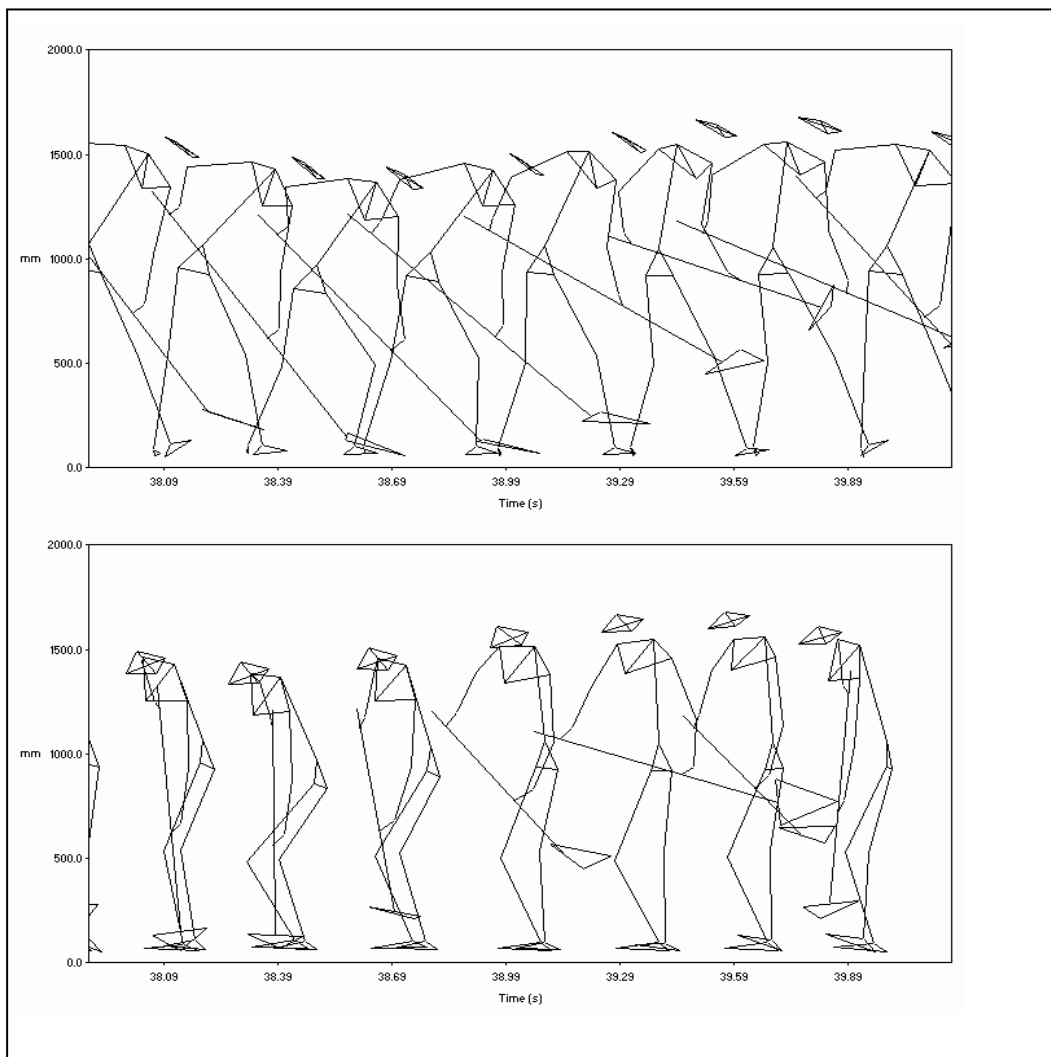


Abbildung 3.8:
Schaufeltechnik „nach hinten“ (vom Rücken weg) von Proband 1; links: Einstich, rechts: Abwurf

Abbildung 3.9:
Kinogramme der Schaufeltechnik „nach hinten“ (Proband 1) von der Einstichphase bis zum Abwurf (Zeitintervall zwischen zwei Figuren $\Delta t = 0,3$ s) aus zwei Perspektiven; oben: Frontalansicht; unten: Seitansicht





3.4 Aktionsdauer beim Schaufeln

Die Aktionsdauer für einen Schaufelvorgang wurde durch das Intervall vom Einstich der Schaufel bis zum Ende des Abwurfs definiert. Die Aktionsdauern der fünf Probanden beim Schaufeln lagen im Mittel bei rund 1,9 s und variierten zwischen 0,8 und 5,4 s (Abbildung 3.10). Je nach Schüttgut und individuellem Arbeitstempo streute die Aktionsdauer. So war bei den schwer zu schaufelnden Schüttgütern wie Beton, Schotter und Erde die Aktionsdauer mitunter länger im Vergleich zu Sand und Kies. In der Regel war in diesen Fällen die Einstichphase verlängert, wobei eine generelle Abhängigkeit der Aktionsdauer von Schüttgut bzw. Schaufelaufgabe nicht festgestellt werden konnte. Auffallend war, dass der Proband 3 (Estrichleger) in fast allen Versuchskonstellationen die kürzeste Aktionsdauer aufwies. Im Mittel waren es ca. 1,3 s, wobei er für Sand, Kies und Erde häufig Zeiten um 1,0 s erreichte. Demgegenüber benötigte Proband 2, mit 59 Jahren der älteste unter den Probanden, mit durchschnittlich 2,3 s die längste Zeit. Allerdings erreichte der mit 22 Jahren jüngste Proband (Proband 4) im Mittel eine Aktionsdauer von 2,0 s. Zu den Zeiten sei angemerkt, dass in der Aufgabenstellung das typische (individuelle) Arbeitstempo gefordert wurde und keine sportlichen Ambitionen verfolgt werden sollten.

Tendenziell führte das Schaufeln von Schotter und Erde bei den Probanden 2, 4 und 5 zu längeren Aktionsdauern und größeren Streuungen. Dies kann durch das erschwerte Einstechen in diese Schüttgüter und die damit verbundene längere Zeitdauer begründet werden. Demgegenüber war eine solche Tendenz bei Proband 1 nicht zu beobachten; er schaufelte unter allen Versuchsbedingungen sehr konstant (Standardabweichung 0,22 s). Auf der Basis der Probandenmittelwerte ergaben sich für die Versuchspersonen 1 und 3 mittlere Aktionsdauer von 1,6 bzw. 1,3 s und für die restlichen Werte von über 2,0 s, sodass hier zwei Gruppen – mit hohem und normalem Arbeitstempo – unterschieden werden können (Tabelle 3.6).

Eine Ermüdungstendenz in Form einer verlängerten Aktionsdauer bei fortschreitender Versuchsdauer konnte nur in Einzelfällen beobachtet werden. Meist dominierte die Streuung der Aktionsdauer innerhalb eines Versuchs gegenüber einer vermeintlichen Ermüdungstendenz (Abbildung 3.11, siehe Seite 58).



Abbildung 3.10:
Boxplots der Aktionsdauern der Schaufelvorgänge aller Probanden
in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation

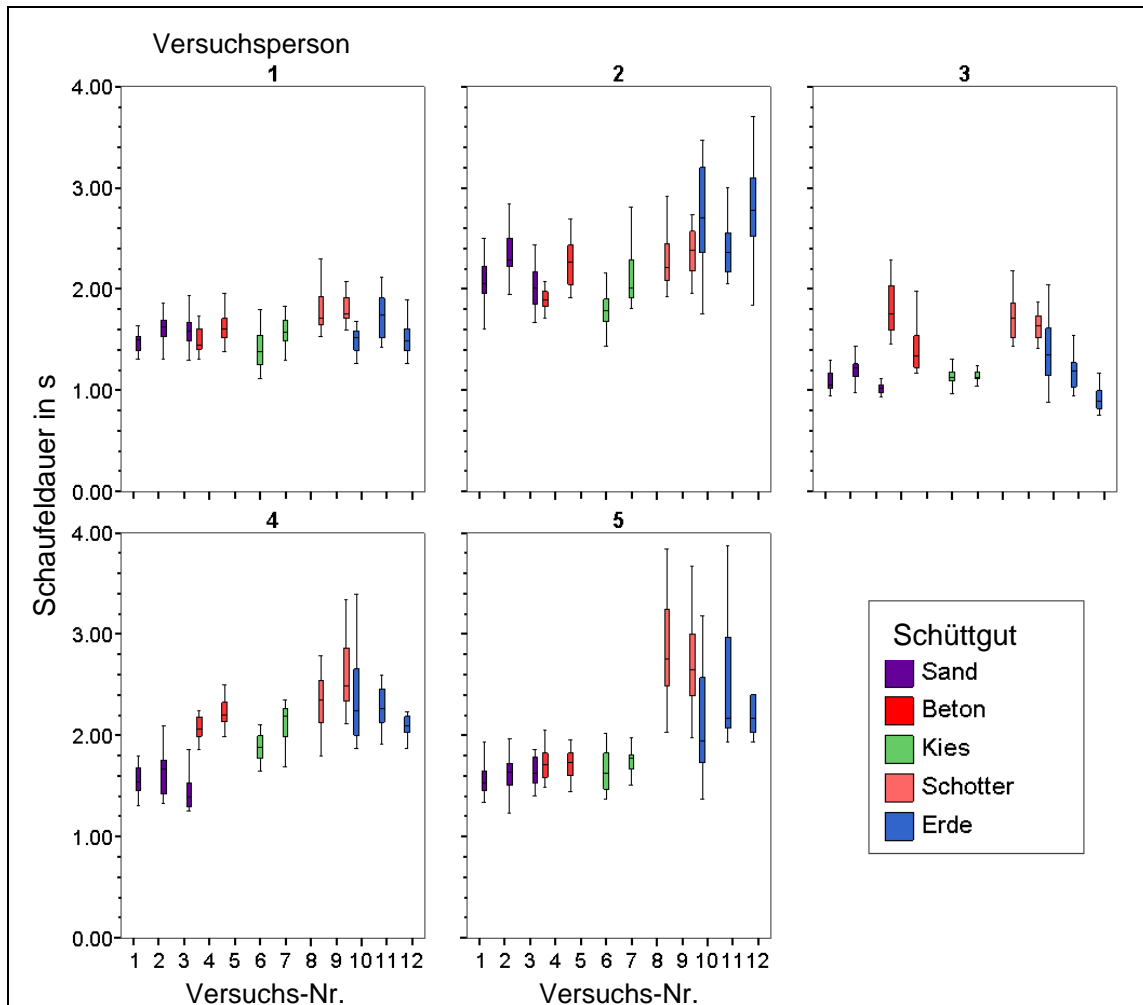
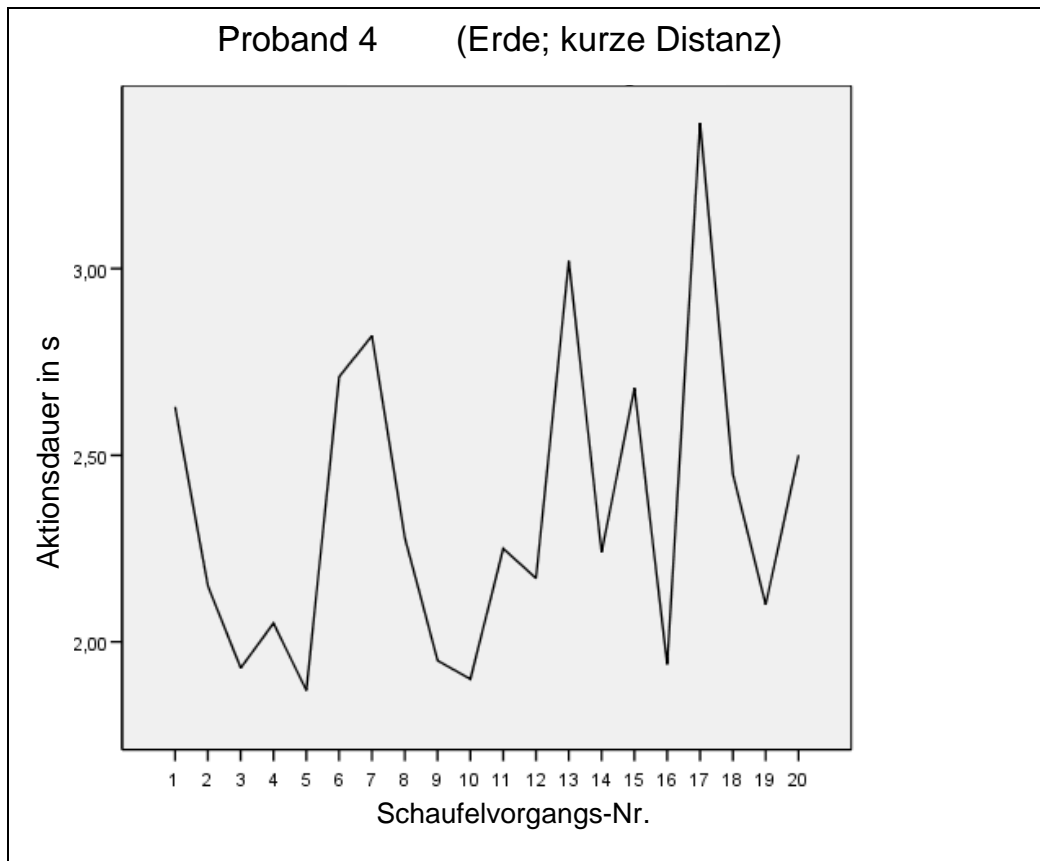


Tabelle 3.6:
Mittlere Aktionsdauer beim Schaufeln für alle Probanden
über alle zwölf Versuchsbedingungen

VP-Nr.	Schaufeldauer in s		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	1,60	0,22	235
2	2,32	0,51	234
3	1,31	0,33	240
4	2,05	0,43	237
5	2,04	0,61	222
Gesamt	1,86	0,57	1 168



Abbildung 3.11:
Entwicklung der Aktionsdauer über die Schaufelvorgänge eines Versuchs



Die Zyklusdauer wurde durch das Zeitintervall zwischen zwei Einstichphasen definiert. Hier ergab sich ein Gesamtmittelwert von 3,0 s und eine Standardabweichung von 1,07 s mit zwangsläufig größeren Streuungen, da situationsbedingte Unterbrechungen meist durch eine notwendige Veränderung der Standposition o. Ä. auftraten (Abbildung 3.12 und Tabelle 3.7). Auch hier konnten die zwei Arbeitstempi – schnell und normal – festgestellt werden. Insofern ist der Gruppenmittelwert für die fünf Probanden nicht repräsentativ für den Mittelwert der zugehörigen Grundgesamtheit.

Insgesamt zeigte sich, dass die Zeitstruktur des Schaufelns sehr individuell geprägt war. Die Aufgabenstellung und das Schüttgut bewirkten zwar Veränderungen auf der intraindividuellen Ebene, wobei diese im Gesamtvergleich eher gering ausfielen. Eine generelle Unterscheidung der Belastungsdauer in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Aufgabenstellung erscheint auf der Grundlage der vorliegenden Messungen nicht erforderlich.



Abbildung 3.12:
Boxplots der Zyklusdauer in Abhängigkeit vom Schüttgut
und von der Versuchskonstellation für alle Probanden

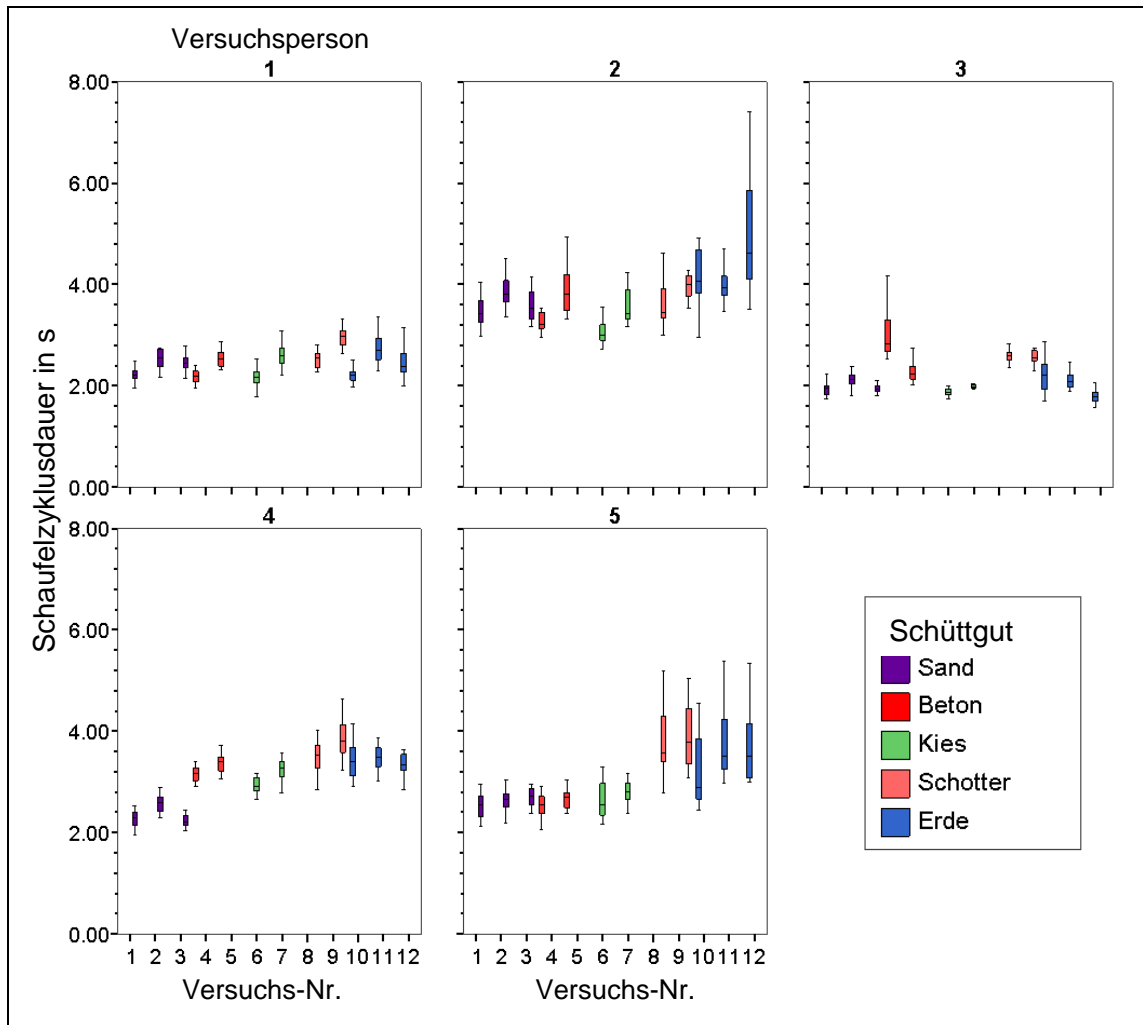


Tabelle 3.7:
Mittlere Zyklusdauer beim Schaufeln für alle Probanden
über alle zwölf Versuchsbedingungen

VP-Nr.	Zyklusdauer in s		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	2,47	0,31	235
2	3,94	1,27	234
3	2,29	0,98	240
4	3,15	0,64	237
5	3,13	1,01	222
Gesamt	2,99	1,07	1 168



3.5 Schüttgutmassen beim Schaufeln

Die Schüttgutmasse je Schaufelvorgang wurde über die Wägeeinrichtung unter der Wanne, in die das Schüttgut geschaufelt werden musste, bestimmt (siehe Abschnitt 2.6.1). Die Schüttgutmasse wird im Wesentlichen durch die Materialdichte und den Schüttgutwinkel limitiert. Die Schaufelexperimente ergaben einen Gruppenmittelwert von 7,68 kg mit einer Standardabweichung von 1,65 kg (Tabelle 3.8). Die Spannweite reichte von 1,2 bis 13,6 kg. Die Massen variierten zwar in Abhängigkeit vom Schüttgut und weniger hinsichtlich der Aufgabenstellung, aber insgesamt überwogen auch hier die interindividuellen Unterschiede bei der Beladung der Schaufel (Abbildung 3.13).

Tendenziell ergab sich mit Schotter die geringste und mit Beton die größte Schaufelbeladung, wobei eine generelle Unterscheidung der Schüttgutmasse je Schaufelvorgang aus den Untersuchungsergebnissen nicht abgeleitet werden konnte.

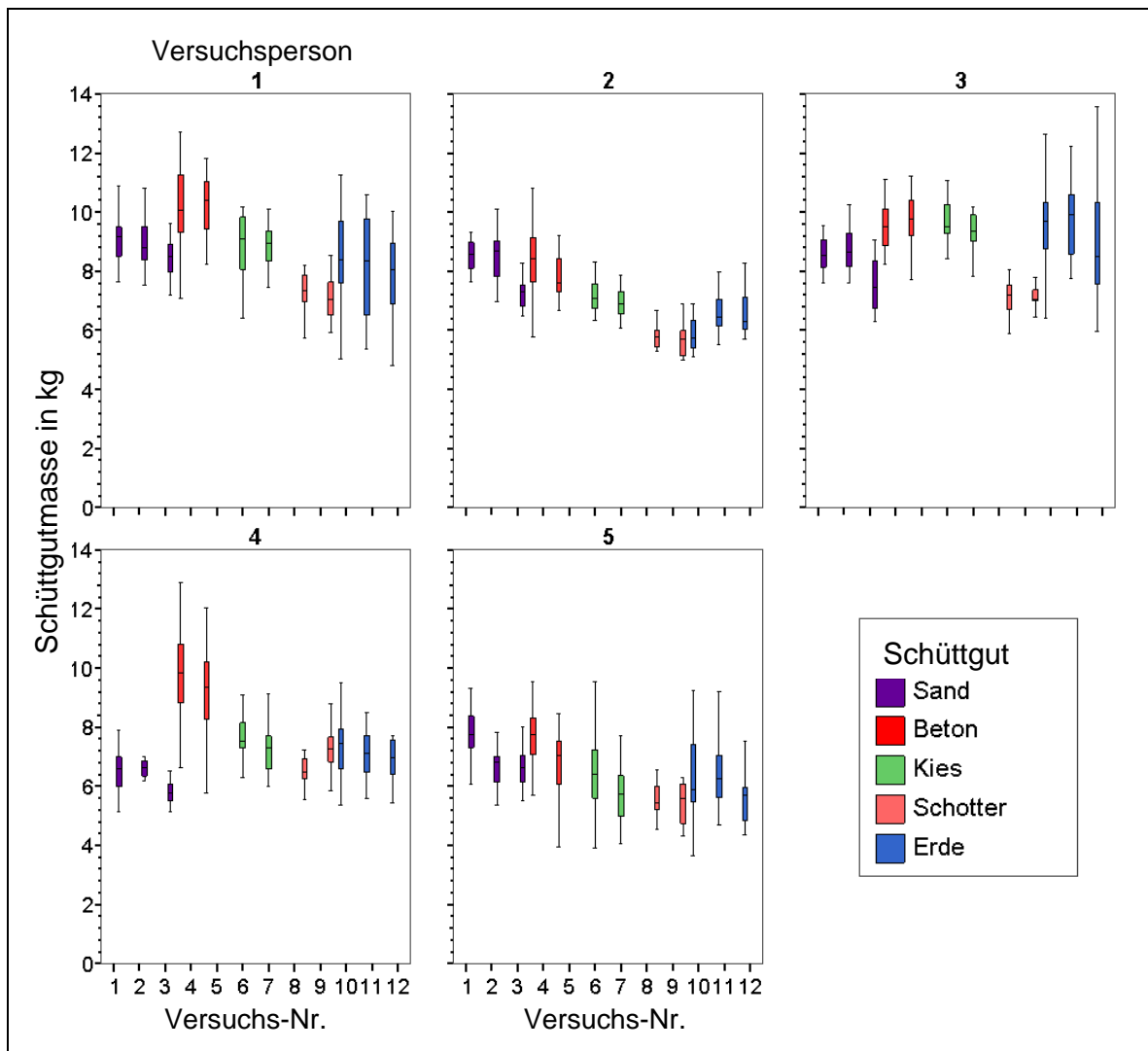
Tabelle 3.8:
Mittlere Schüttgutmasse je Schaufelvorgang für alle Probanden über alle zwölf Versuchsbedingungen

VP-Nr.	Schüttgutmasse in kg		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	8,62	1,47	235
2	7,09	1,24	234
3	8,82	1,46	240
4	7,33	1,43	237
5	6,47	1,28	222
Gesamt	7,68	1,65	1 168

Bemerkenswert erscheint an dieser Stelle, dass der Proband 3 (Estrichleger) mit seiner besonderen Technik und der hohen Schaufelfrequenz auch bei der Schüttgutmasse unter allen Konfigurationen im oberen Bereich der Verteilung zu finden war. Damit erreichte Proband 3 die höchste Arbeitsleistung (geschaufelte Schüttgutmasse pro Zeiteinheit). Zur (physiologischen) Ökonomie oder gar Ergonomie dieser Schaufeltechnik kann damit allerdings noch nichts ausgesagt werden.



Abbildung 3.13:
Boxplots der Schüttgutmasse je Schaufelvorgang in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation für alle Probanden



3.6 Vergleichende Analyse der Kinetik unterschiedlicher Schaufeltechniken

Die fünf untersuchten Probanden zeigten sehr unterschiedliches Verhalten hinsichtlich der Kinetik beim Schaufeln, d. h. der Ausprägung der Handkräfte und der inneren muskulo-skelettalen Belastung. Aufgrund der einseitigen Lastverteilung der beladenen Schaufel ergaben sich zwangsläufig sehr asymmetrische Belastungsmuster des Muskel-Skelett-Systems.

Nachfolgend sind für die Probanden 3, 5 und 1 als Kinetogramm die Körperhaltung und die dabei zugehörigen Aktionskräfte der Hände sowie ggf. auch des Oberschenkels als Bildreihe aus zwei Perspektiven dargestellt (Abbildungen 3.14, 3.18



und 3.22, siehe Seite 63, 66 und 69). Die Ansichten repräsentieren die Seit- und Frontalansicht auf den Probanden in den Phasen „Einstich der Schaufel in das Schüttgut“, „Anheben der Schaufel“ und „Abwurf des Schüttguts“. Neben der äußeren Belastung des Muskel-Skelett-Systems zeigen die Kinetogramme auch qualitativ die inneren Muskel-Skelett-Belastungen (Gelenkmomente) der oberen Extremitäten und des Rumpfes einschließlich Lendenwirbelsäule an.

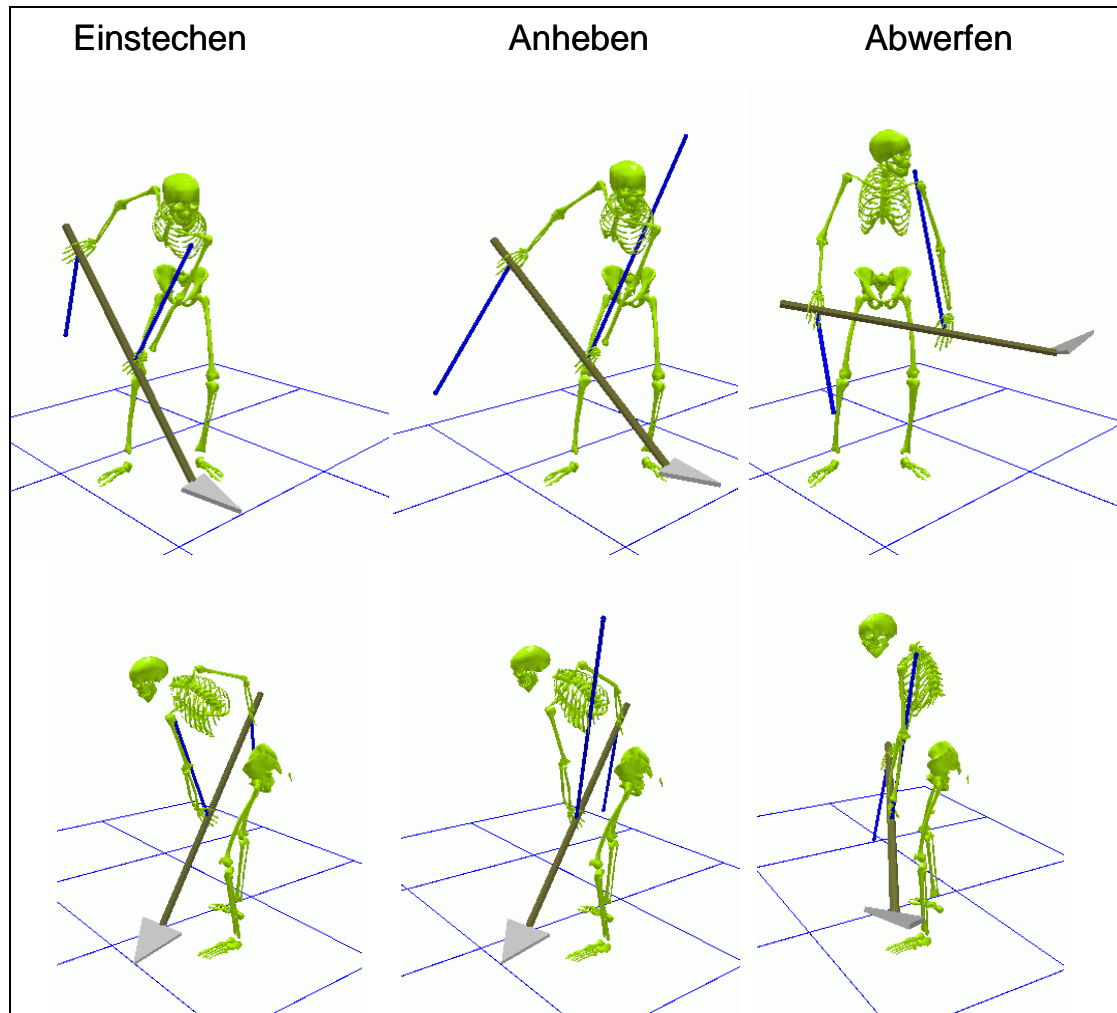
Für die drei ausgewählten Probanden sind in weiteren Abbildungen die Phasen des Schaufelns (Einstich, Anheben und Abwurf) mit den Zeitverläufen der beiden Handkräfte (HandForceL_S und HandForceR_S im Schaufelkoordinatensystem), der Oberschenkelauflagekraft (F_Pad_S im Schaufelkoordinatensystem) und des Lumbalmoments (im Sinne von Nettomuskelkraftmomenten in Segmentkoordinaten) dargestellt (Abbildungen 3.15 bis 3.17, 3.19 bis 3.21 und 3.23 bis 3.25, siehe Seite 64 ff.). Die Zeitverläufe sind über alle 19 Schaufelzyklen (Einstich – Einstich) eines jeden Versuchs gemittelt und bezogen auf die Schaufelzykluszeit in Prozent dargestellt.

Die Schaufeltechnik von Proband 3 – Estrichleger – zeichnete sich in erster Linie dadurch aus, dass der Oberschenkel in keiner Phase des Schaufelvorgangs als unterstützendes Widerlager eingesetzt wurde (Abbildungen 3.14 bis 3.17). Hierdurch waren schon beim Einstechen relativ hohe Kräfte der blattnahen Hand zu verzeichnen.

Die höchsten Handkräfte wurden im Übergang von Einstechen zum Anheben bei beiden Händen in etwa zeitgleich erreicht. Die Maximalkraft an der blattnahen Hand erreichte betraglich knapp 600 N im Mittel für die ersten 19 Schaufelaktionen des Versuchs. Bei der blattfernen Hand waren es knapp 400 N. Generell erfuhr der blattnahe Arm eine Zugbelastung und der blattferne Arm eine Druckbelastung.



Abbildung 3.14:
Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 3 (Estrichleger) beim Schaufeln von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; aus Frontal- (oben) und Seitansicht (unten)



Proband 3 (Estrichleger) wies die höchsten blattnahen Handkräfte auf, wobei die Hubkomponenten (vertikale Kraft im Schaufelkoordinatensystem) mit 400 N relativ konstant über die gesamte Aktionsphase blieb. Die Kraftverläufe der beiden Hände waren ausgesprochen spiegelsymmetrisch.



Abbildung 3.15:
 Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 3 (Estrichleger) beim Einstich in Sand, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende

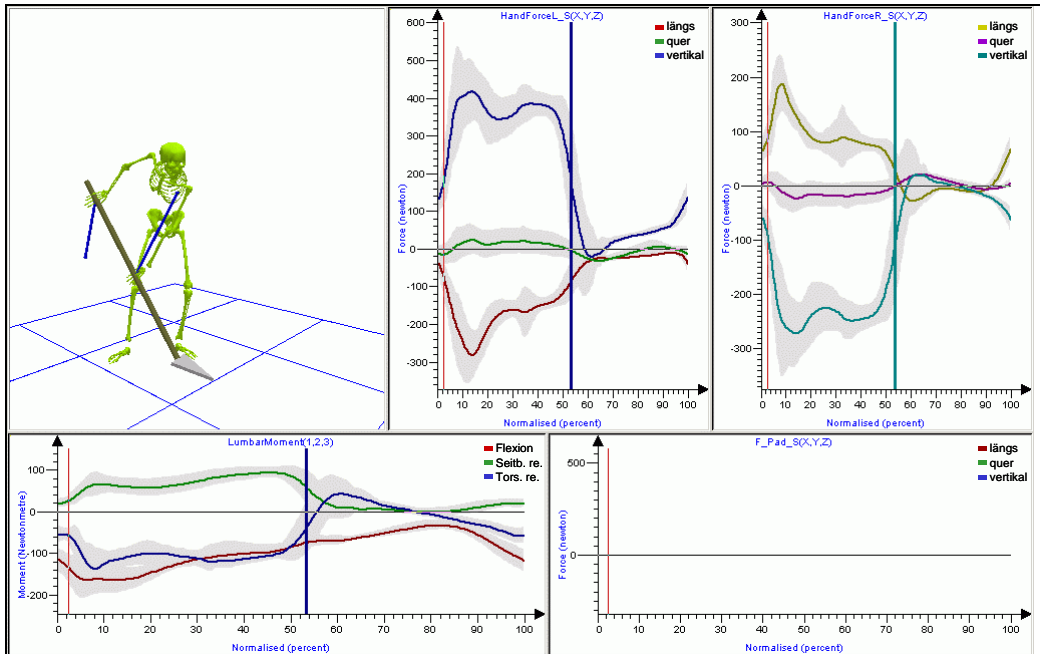


Abbildung 3.16:
 Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 3 (Estrichleger) beim Anheben von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende

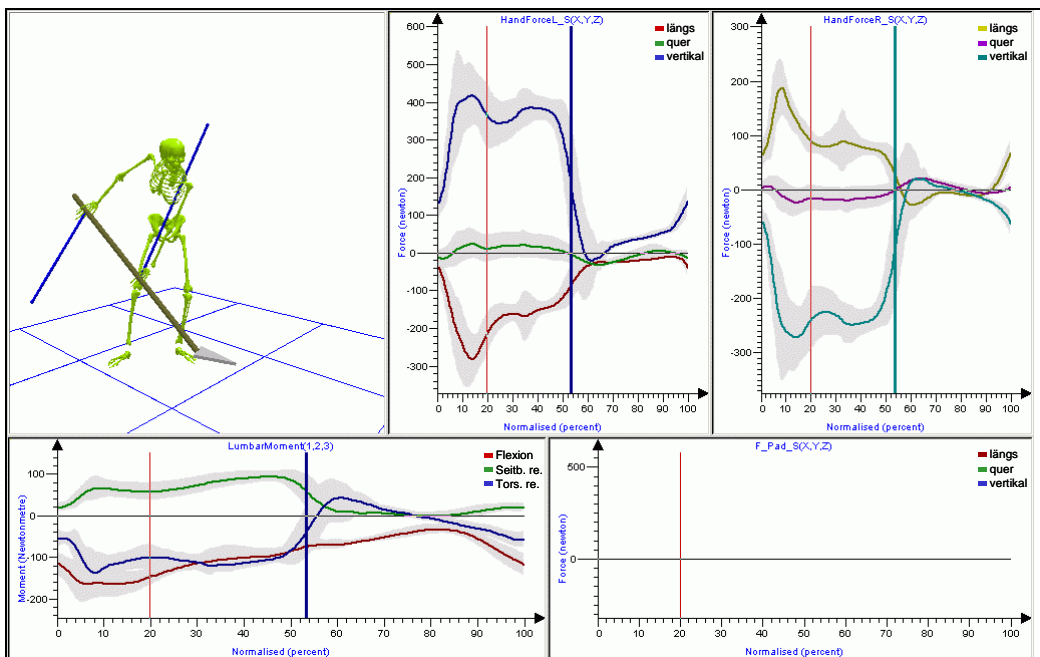
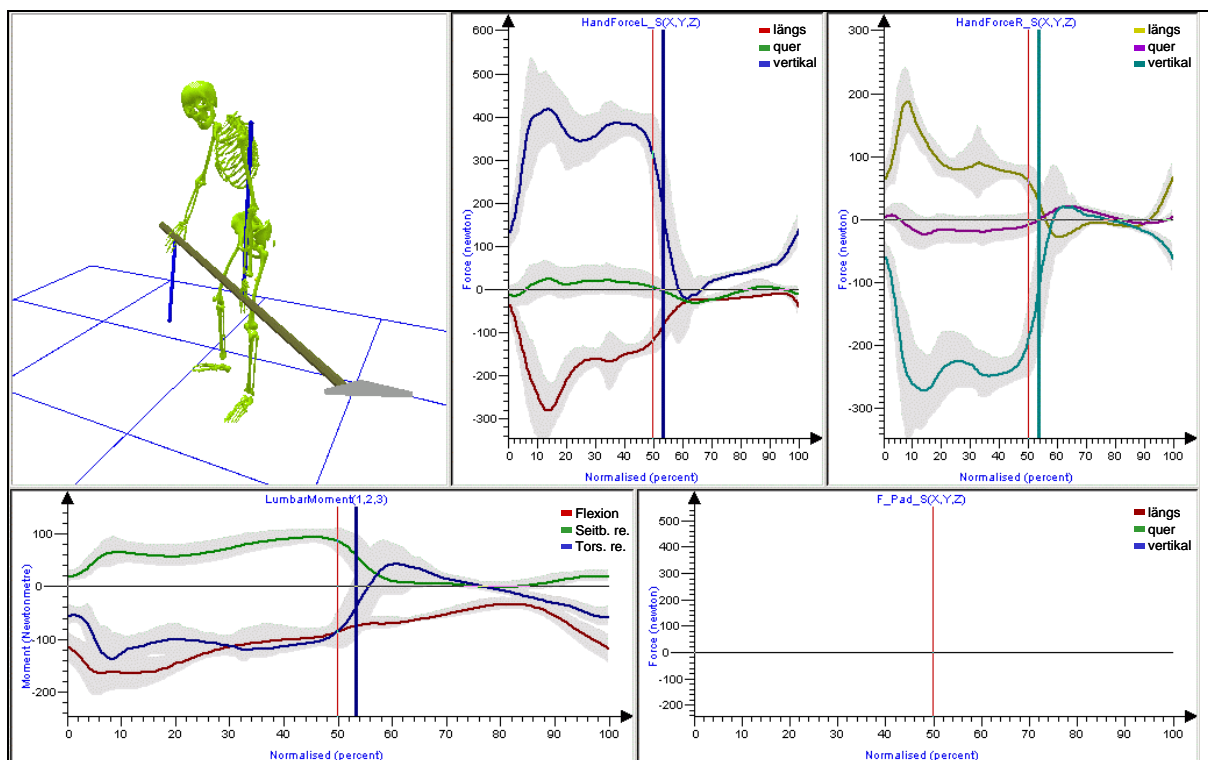




Abbildung 3.17:
 Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 3 (Estrichleger) beim Abwurf von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



Bemerkenswert ist, dass die Aktionskräfte deutlich von der Vertikalen abwichen und nicht ausschließlich der Gewichtskraft entgegen gerichtet waren – ein Indiz für die hohe Bewegungsdynamik von Proband 3 beim Schaufeln. Die Körperhaltung war von einer weitgehend gestreckten Beinhaltung mit einer ausgeprägten Oberkörpervorneigung und zusätzlicher Torsion während des Einstechens und des Anhebens geprägt. Insgesamt deutet das Kinetogramm auf eine hohe Belastung der Lendenwirbelsäule hin, was durch das Lumbalmoment (L5/S1) bestätigt wurde.

Das Lumbalmoment wies in allen drei Komponenten eine erhebliche und vergleichsweise konstante Belastung über die gesamte Aktionsphase des Schaufeln aus (Abbildungen 3.15 bis 3.17). Das Flexionsmoment dominierte mit mittleren Höchstwerten von ca. -130 Nm (d. h. Extensionswirkung). In der Frontalebene wies das Seitbeugemoment nach rechts einen Höchstwert von knapp 100 Nm auf. Schließlich erreichte das Torsionsmoment in der Einstichphase Höchstwerte von rund 120 Nm.



Die Schaufeltechnik von Proband 5 wies einen deutlichen Einsatz des Oberschenkels zur Unterschätzung des Einstichvorgangs auf (Abbildungen 3.8 und 3.19). Die Oberschenkelauflagekraft war im Wesentlichen vorwärts gerichtet und ihr Betrag erreichte etwa 420 N. In dieser Phase waren nur relativ geringe Aktionskräfte der blattnahen Hand von betraglich unter 100 N zu verzeichnen und die blattferne Hand unterstützte das Einstechen durch Schub in Längsrichtung des Schaufelstiels mit rund 200 N.

Abbildung 3.18:
Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 5 beim Schaufeln von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; aus der Frontal- (oben) und Seitansicht (unten); Oberschenkelauflagekraft (roter Vektor)

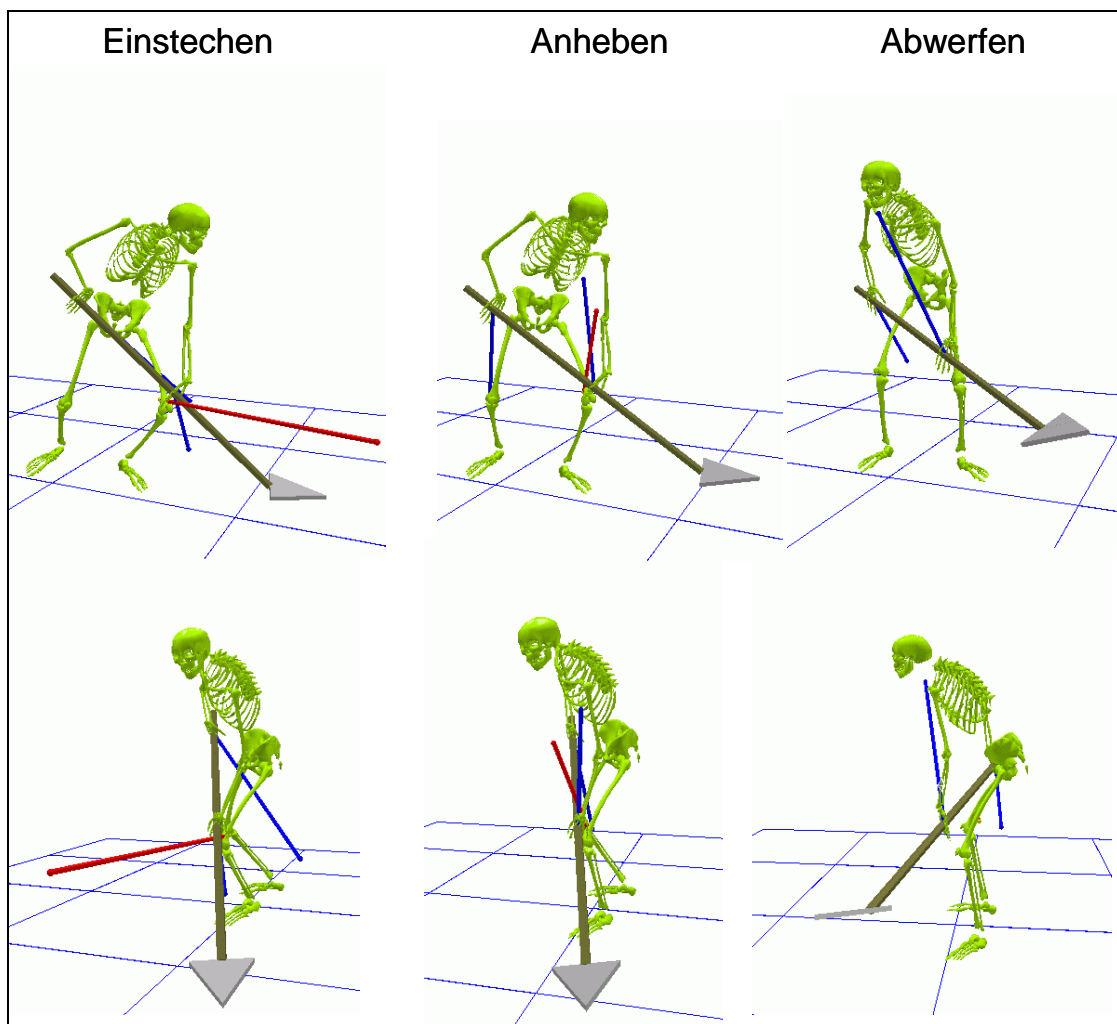
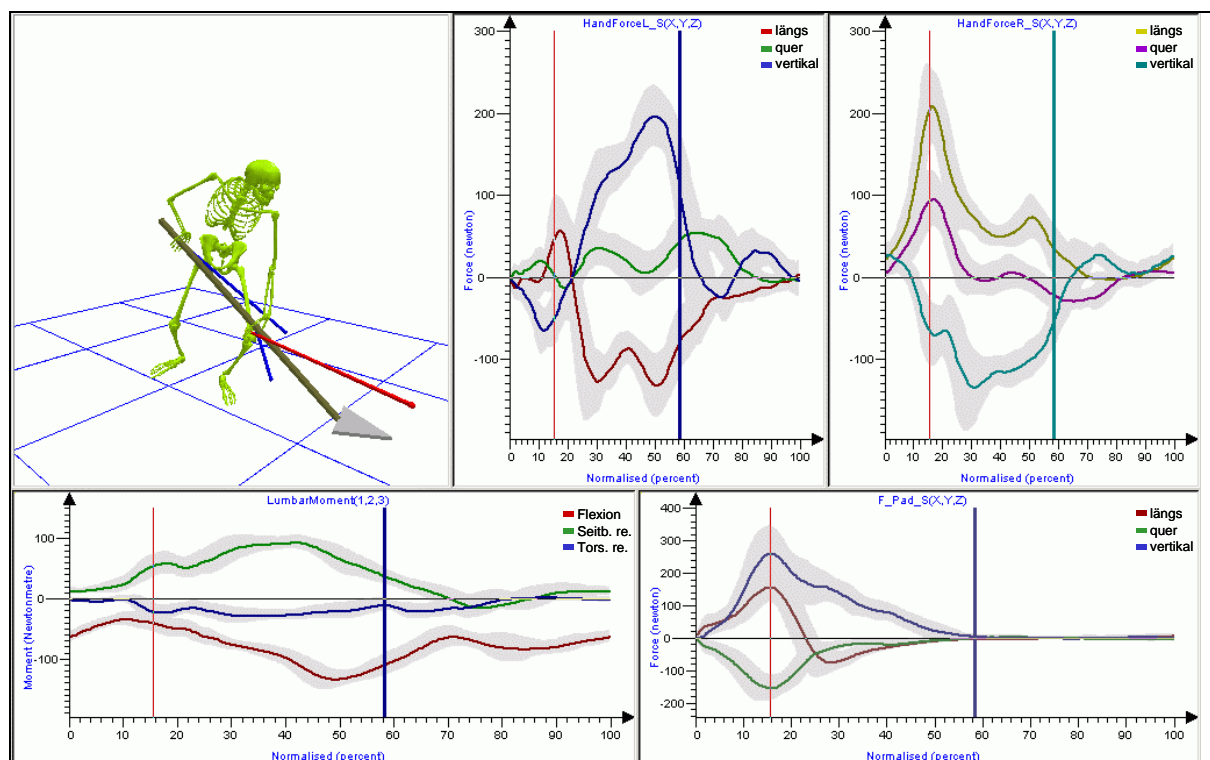




Abbildung 3.19:
 Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 5 beim Einstich in Sand, eben-
 erdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von
 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert;
 roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



Beim Anheben nahm die Oberschenkelauflagekraft zusehends ab und die Belastung der blattnahen Hand wuchs zunehmend bis zum Abwurf auf betraglich etwa 260 N an (Abbildung 3.20, Seite 68). Durch die stärker gebeugten Beine war eine aufrechtere Körperhaltung von Proband 5 festzustellen, was sich anfangs in geringen Aufrichtmomenten von nur rund 40 Nm in der Sagittalebene niederschlug (Abbildung 3.19).

Das Seitbeugemoment variierte während des Schaufelvorgangs wenig zwischen 60 und 90 Nm. In der Abwurfphase („nach vorne“) verstärkte sich die Rumpfvorbeuge, um den notwendigen Impuls auf die Schaufel übertragen zu können. Hierbei erreichte das Aufrichtmoment Werte von rund 130 Nm und resultierend von rund 170 Nm (Abbildung 3.21, Seite 68). Das Zusammenwirken von vorgebeugter Oberkörperhaltung und hohen Handkräften der blattnahen Hand erzeugte in der Abwurfphase das hohe Aufrichtmoment. Daher ist die hier gezeigte Schaufeltechnik „nach vorne“ aus ergonomischer Sicht als nicht optimal zu bezeichnen.



Abbildung 3.20:
 Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 5 beim Anheben von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende

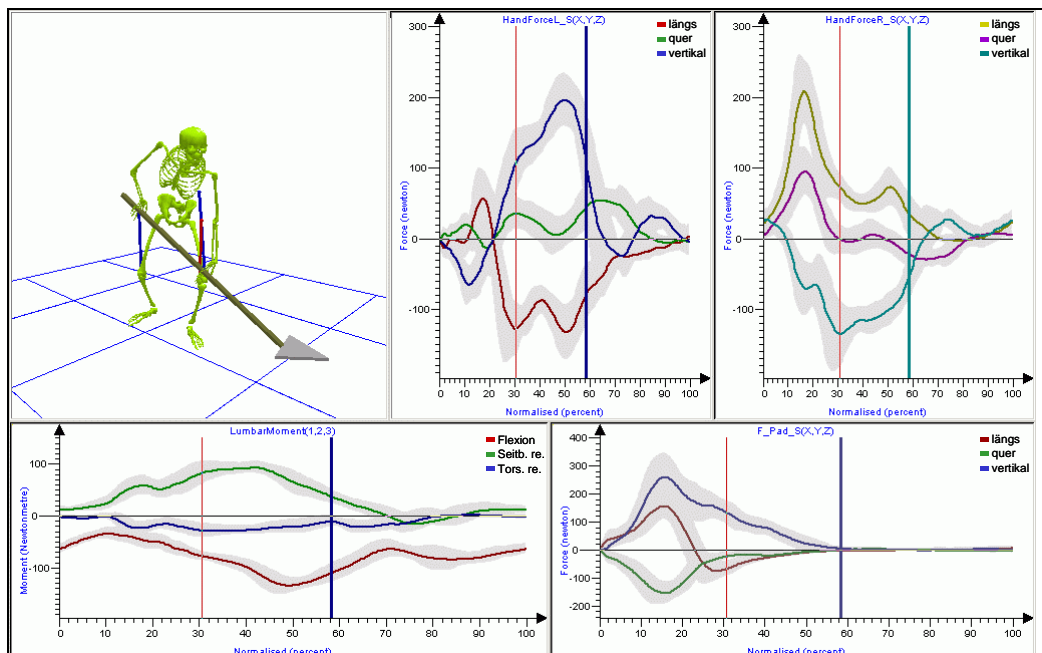
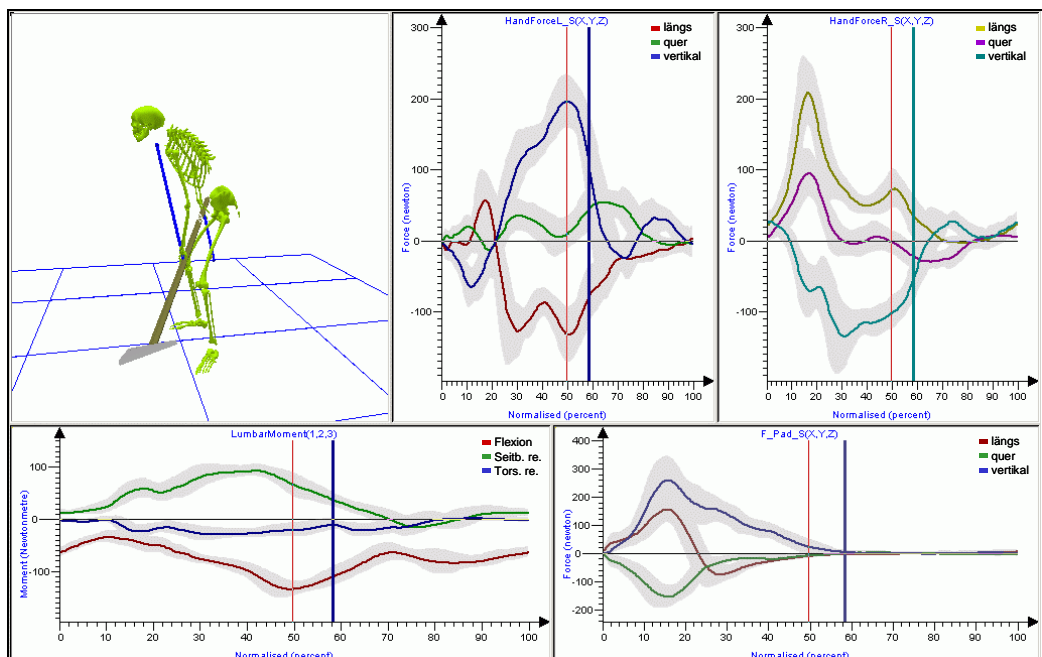


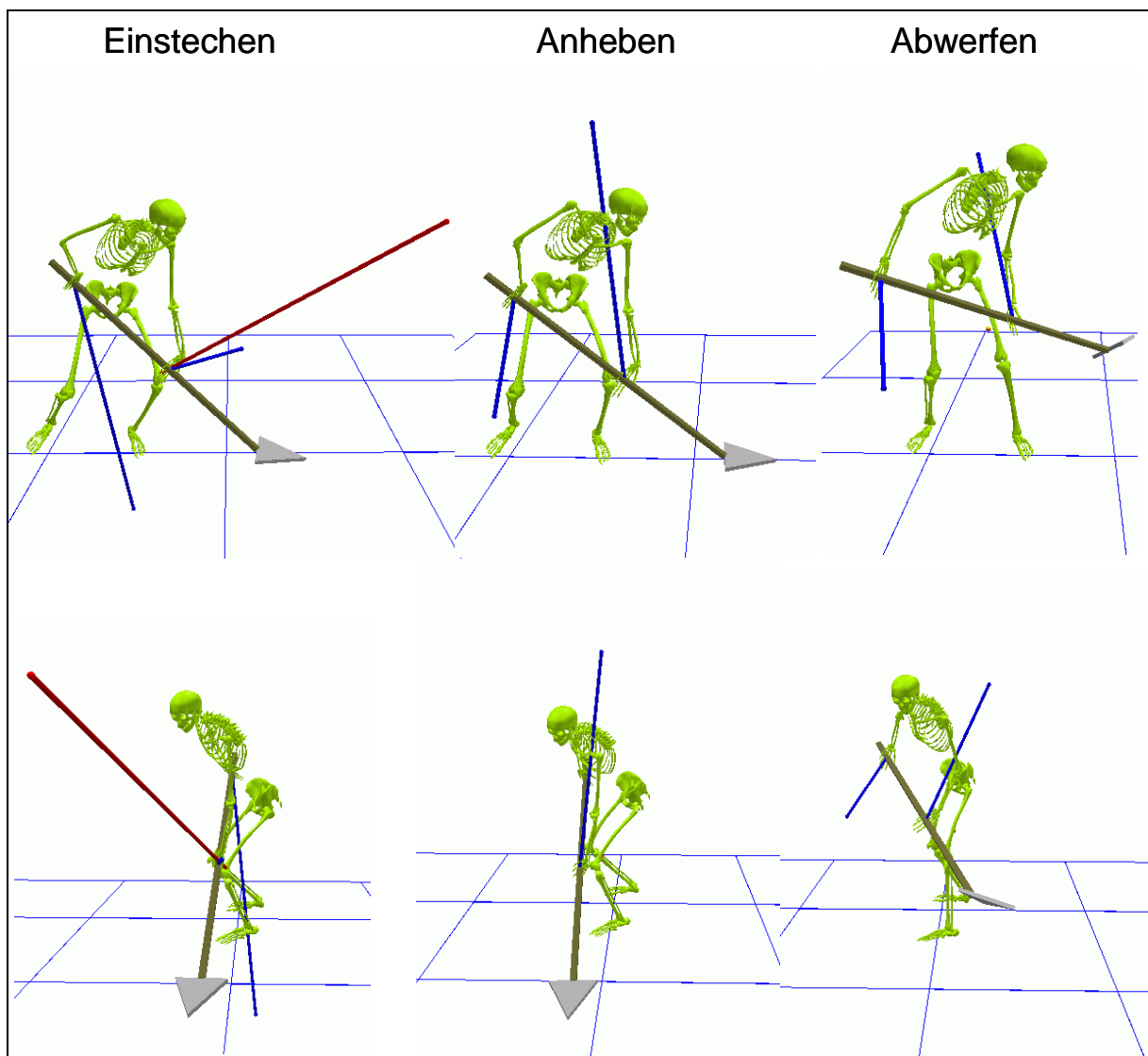
Abbildung 3.21:
 Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 5 beim Abwurf von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende





Die Schaufeltechnik von Proband 1 ähnelte der von Proband 5 im Wesentlichen hinsichtlich des Einsatzes des Oberschenkels. Die Wurfrichtung des Schüttguts war am Ende nach hinten vom Rücken weg gerichtet (Abbildung 3.22).

Abbildung 3.22:
Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 1 beim Schaufeln von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; aus der Frontal- (oben) und Seitansicht (unten); Oberschenkelauflagekraft (roter Vektor)

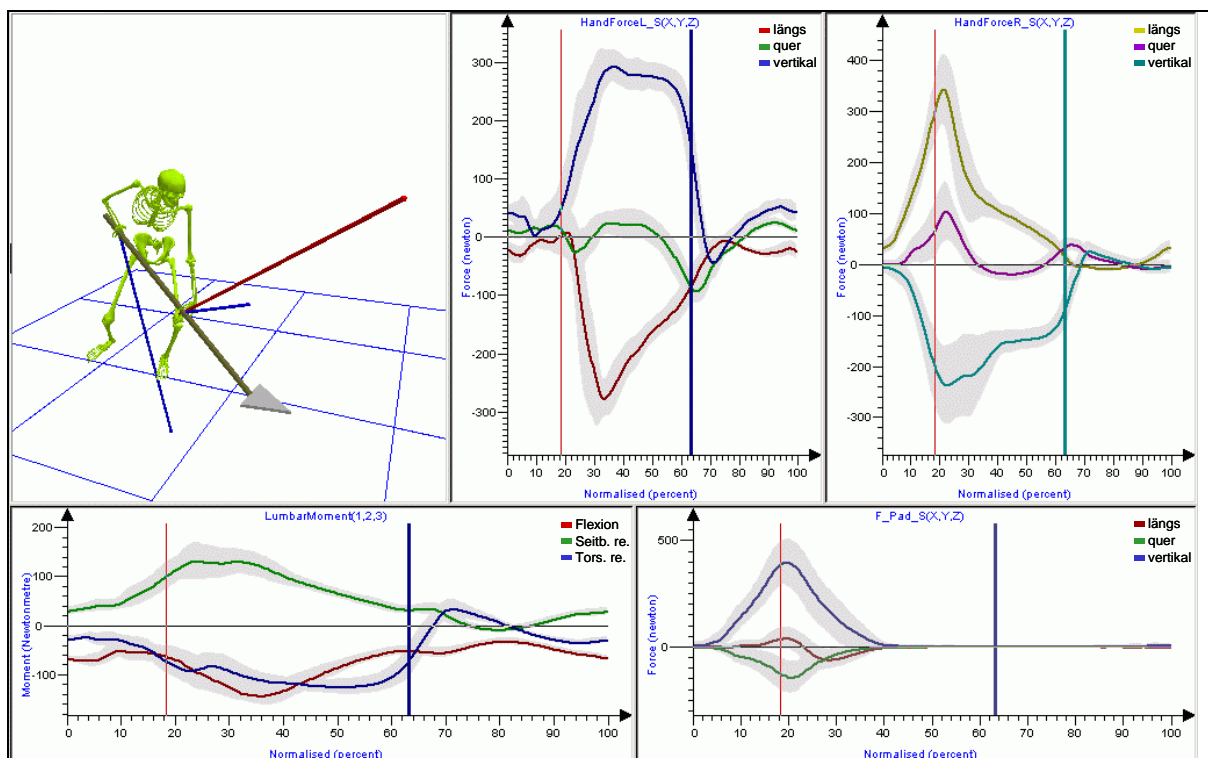


Die wesentlich höheren Kräfte sind Zeichen der vergleichsweise ausgeprägten Dynamik bzw. höherer Schaufelbeladung. Die Oberschenkelauflagekraft erreichte beim Einstich rund 500 N im Betrag (Abbildung 3.23, Seite 70). Die blattnahe Hand war



dabei praktisch völlig entlastet. Die nach schräg vorne unten gerichtete Schubkraft der blattfernen Hand erreichte betraglich ebenfalls rund 500 N.

Abbildung 3.23:
 Dreidimensionale Belastungssituation beim Einstich in Sand von Proband 1, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



Beim Anheben sank die Oberschenkelauflagekraft schnell ab und die Kraft der blatt-nahen Hand erreichte ihr Maximum von betraglich rund 430 N (Abbildung 3.24). Das Aufrichtmoment stieg in dieser Phase auch auf das Maximum von 120 Nm. Das Seit-beugemoment erreichte ebenfalls in dieser Phase das Maximum von 120 Nm. Resul-tierend ergab sich daraus eine Gelenkmomentbelastung von ca. 240 Nm.

Der Abwurf „nach hinten“ ermöglichte Proband 1 eine gleichmäßige fortschreitende Aufrichtbewegung des Oberkörpers. Das Aufrichtmoment fiel in dieser Phase unter 60 Nm ab, allerdings erreichte das Torsionsmoment gleichzeitig sein Maximum von rund 120 Nm. Dennoch erscheint diese Schaufeltechnik unter den drei hier



beobachteten Schaufeltechniken ergonomisch am günstigsten; auch wenn sich dies nicht in einer – absolut gesehen – geringeren Lendenwirbelsäulenbelastung niederschlug.

Der Kräfteinsatz (Aktionskräfte der blattnahen Hand) von Proband 1 war um etwa 60 % höher als bei Proband 5. Demgegenüber war die Gelenkmomentbelastung um L5/S1 nur um 40 % erhöht. Ein absoluter Vergleich der unterschiedlichen Schaufeltechniken ist hier nicht zielführend. Außerdem sah die Aufgabenstellung einen solchen Vergleich nicht vor, weshalb das Studiendesign auch nicht daraufhin ausgerichtet war, die ergonomisch günstigste Schaufeltechnik herauszufinden.

Abbildung 3.24:

Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 1 beim Anheben von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende

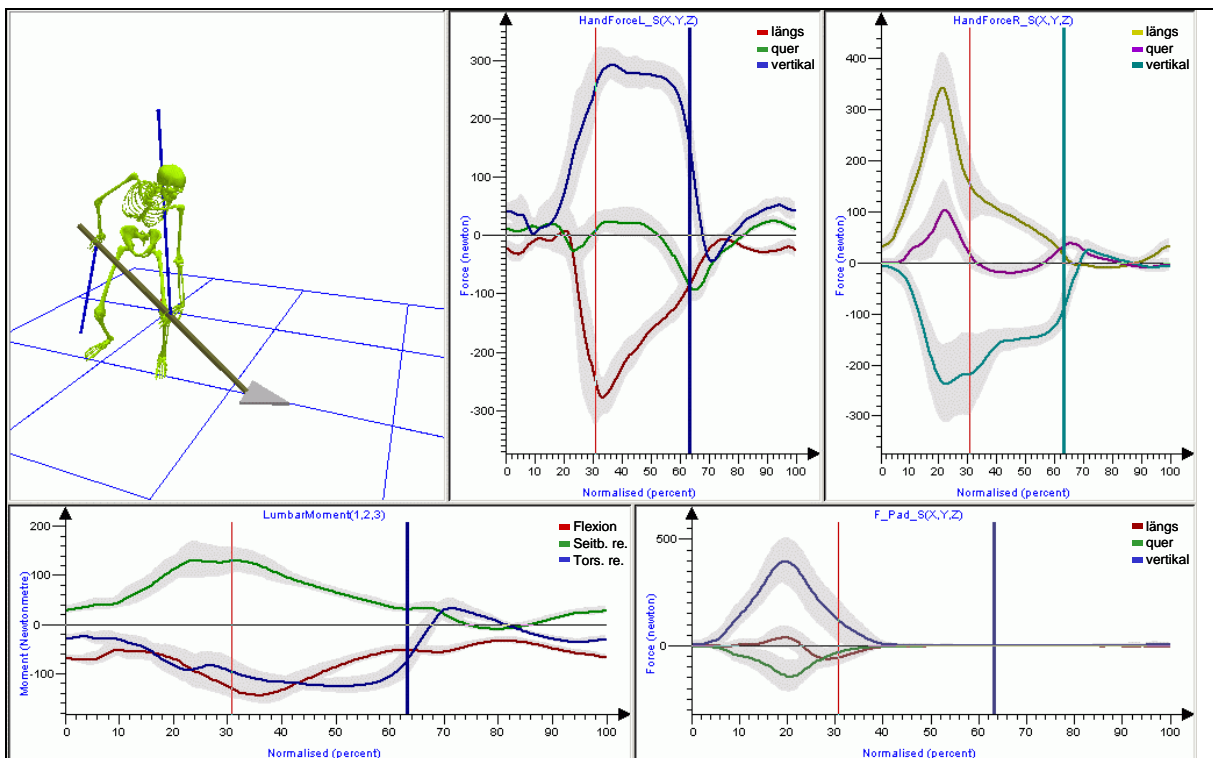
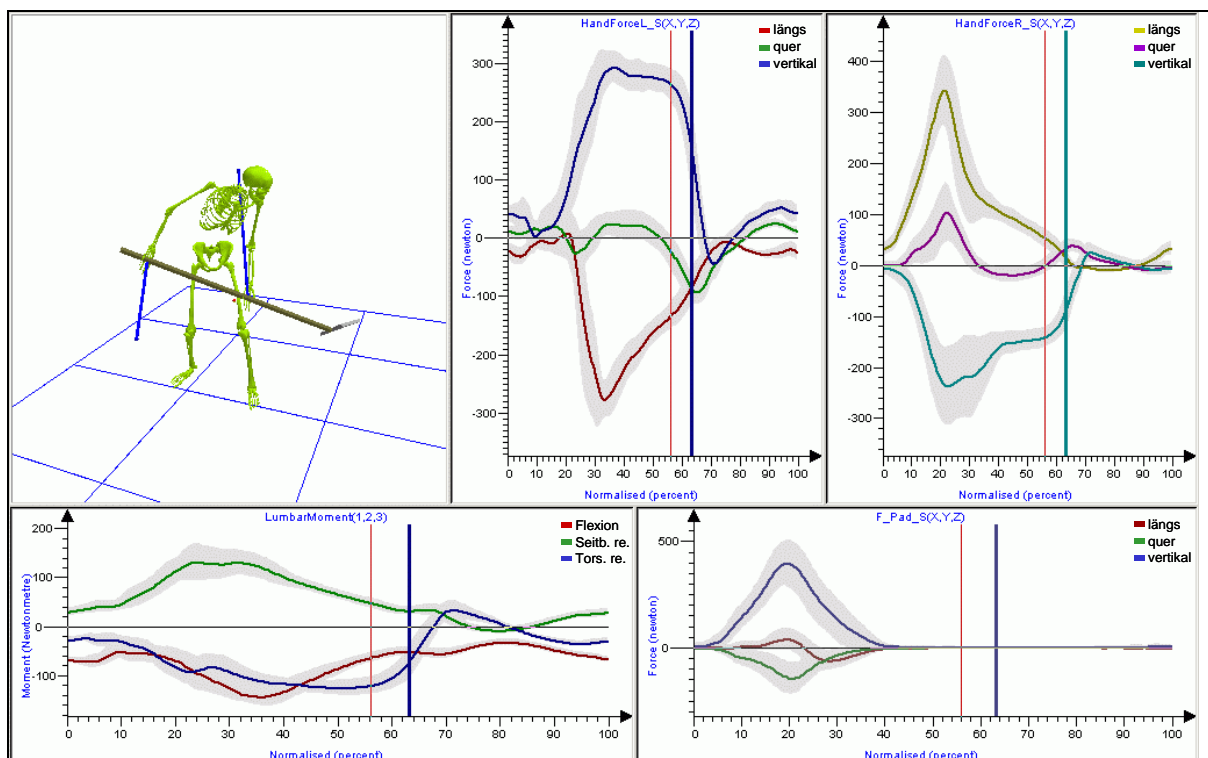




Abbildung 3.25:
 Dreidimensionale Belastungssituation von Proband 1 beim Abwurf von Sand, ebenerdig, kurze Distanz; Kurvenläufe: Mittelwert und Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



Die insgesamt meist nur geringen Standardabweichungen belegen die Stereotypie des Bewegungsablaufs des jeweiligen Probanden beim Schaufeln. In dieser Hinsicht wies Proband 1 die höchste Bewegungskonstanz auf. Dies unterstreicht auch, dass trotz der hohen Kräfte und Gelenkmomente bei Proband 1 keine Ermüdung festgestellt werden konnte.

3.7 Boxplots der Handkräfte beim Schaufeln

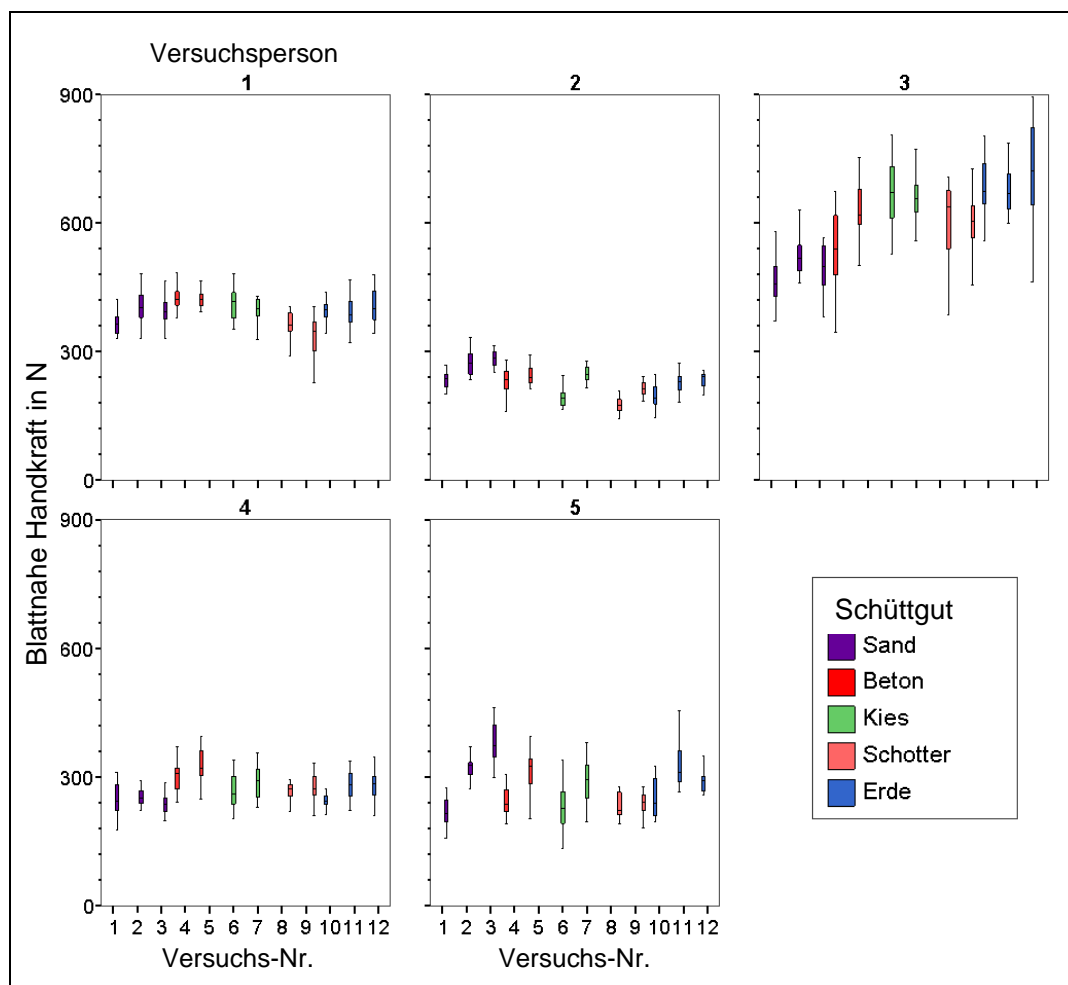
Nachfolgend werden die statistischen Verteilungen der maximalen Handkräfte (Betrag) dargestellt. Unter „maximal“ ist hierbei das Maximum des gleitenden Mittelwertes über ein 0,5-s-Fenster zu verstehen.

Die Aktionskräfte der blattnahen (hier: linken) Hand reichten von ca. 200 N bis fast 900 N (Abbildung 3.26). Der Gruppenmittelwert lag bei etwas über 300 N. Auffallend waren hier die hohen Handkräfte von Proband 3 (Estrichleger): Vielfach erreichten



die Werte das Doppelte der anderen Probanden. Die Ursache hierfür ist in dem hohen Arbeitstempo und der fehlenden Abstützung des Schaufelstiels auf dem Oberschenkel zu sehen.

Abbildung 3.26:
Boxplots der maximalen resultierenden Handkräfte der blattnahen linken Hand in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchsbedingung für alle Probanden

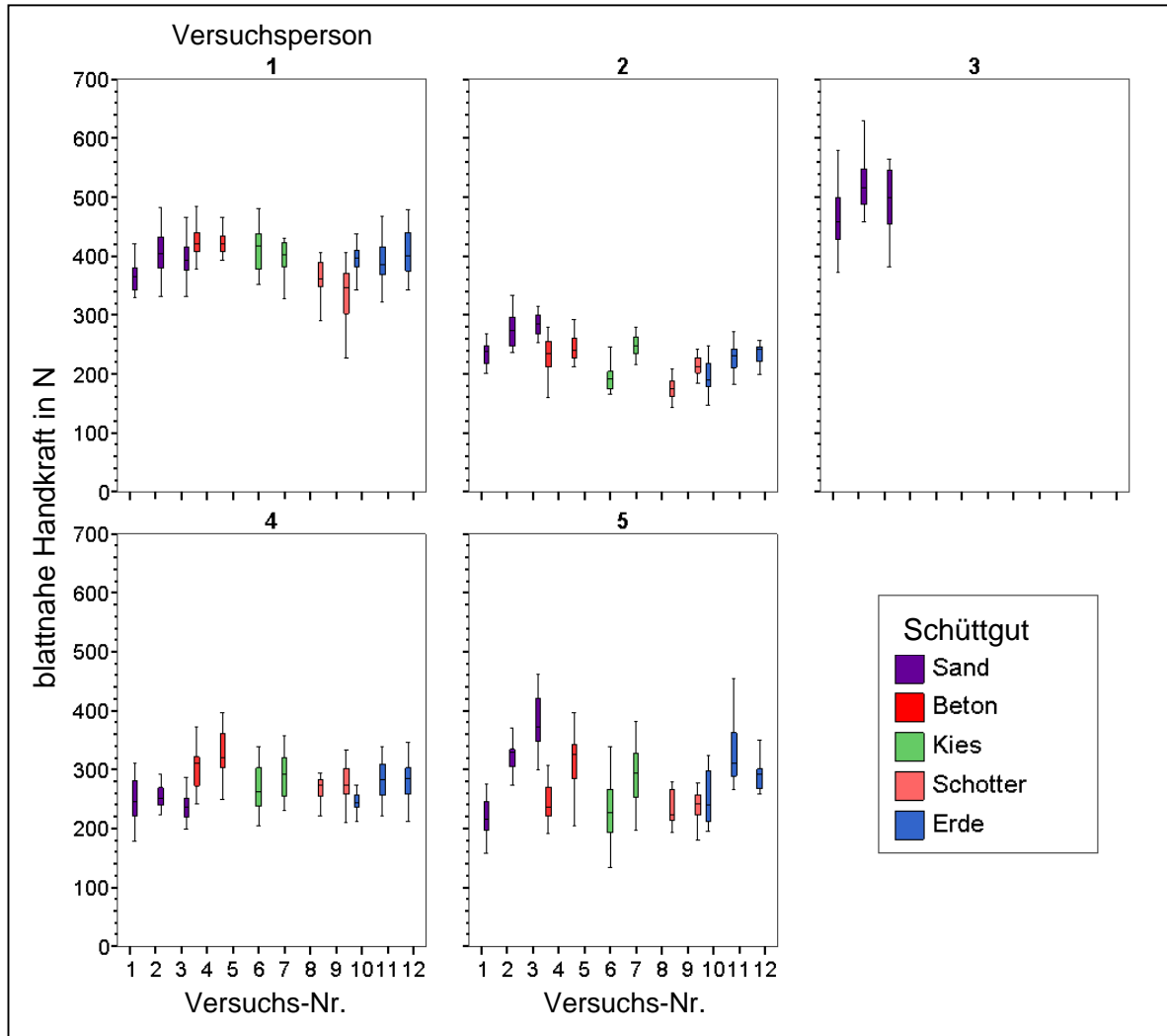


Hinzu kommt, dass die für Estrichleger typische Schaufeltechnik für Sand auch mit den anderen Schüttgütern zur Anwendung kam. Die höchsten Handkräfte ergaben sich mit Erde und Kies.

Daher wurde entschieden, die Versuche mit den für den Estrichleger untypischen Schüttgütern aus der weiteren Analyse herauszunehmen, um Verzerrungen der Ergebnisdarstellungen der Belastungsparameter zu vermeiden (Abbildung 3.27, siehe Seite 74).



Abbildung 3.27:
Boxplots der maximalen resultierenden Handkräfte der blattnahen linken Hand aller Probanden in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche



Alle nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich nur noch auf die praxisnahen Versuchskombinationen, wodurch sich die Gesamtzahl der berücksichtigten Schaufelvorgänge auf 988 reduzierte (siehe Tabelle 3.9).

Gegenüber den überwiegend als Zugkräfte wirkenden Kräfte der blattnahen Hand wirkten die der blattfernen Hand meist als Druckkräfte und erreichten – mit Ausnahme von Proband 1 – etwas geringere Werte (Tabelle 3.10 und Abbildung 3.28, Seite 76). Dies ist durch die asymmetrische Gewichtsverteilung der beladenen Schaufel und die Widerlagerfunktion der blattnahen Hand bedingt. Die Spannweite reichte von knapp 100 bis über 600 N. Hier erreichte Proband 1 auffallend hohe



Kraftwerte mit einem Durchschnittswert von rund 400 N, die bei den anderen Probanden bei Weitem nicht zu finden waren. Im Mittel erreichten die Probanden 2, 4 und 5 nur etwa 200 N.

Insgesamt war die Höhe der Handkräfte mehr personenspezifisch als schüttgut- oder aufgabenspezifisch. Man könnte auch sagen, dass die Probanden weitgehend so schaufelten, dass die Handkräfte im Bereich ihres persönlich bevorzugten Belastungsniveaus blieben.

Tabelle 3.9:
Mittlere Maximalkräfte der blattnahen Hand für alle Probanden über die praxisnahen Versuche

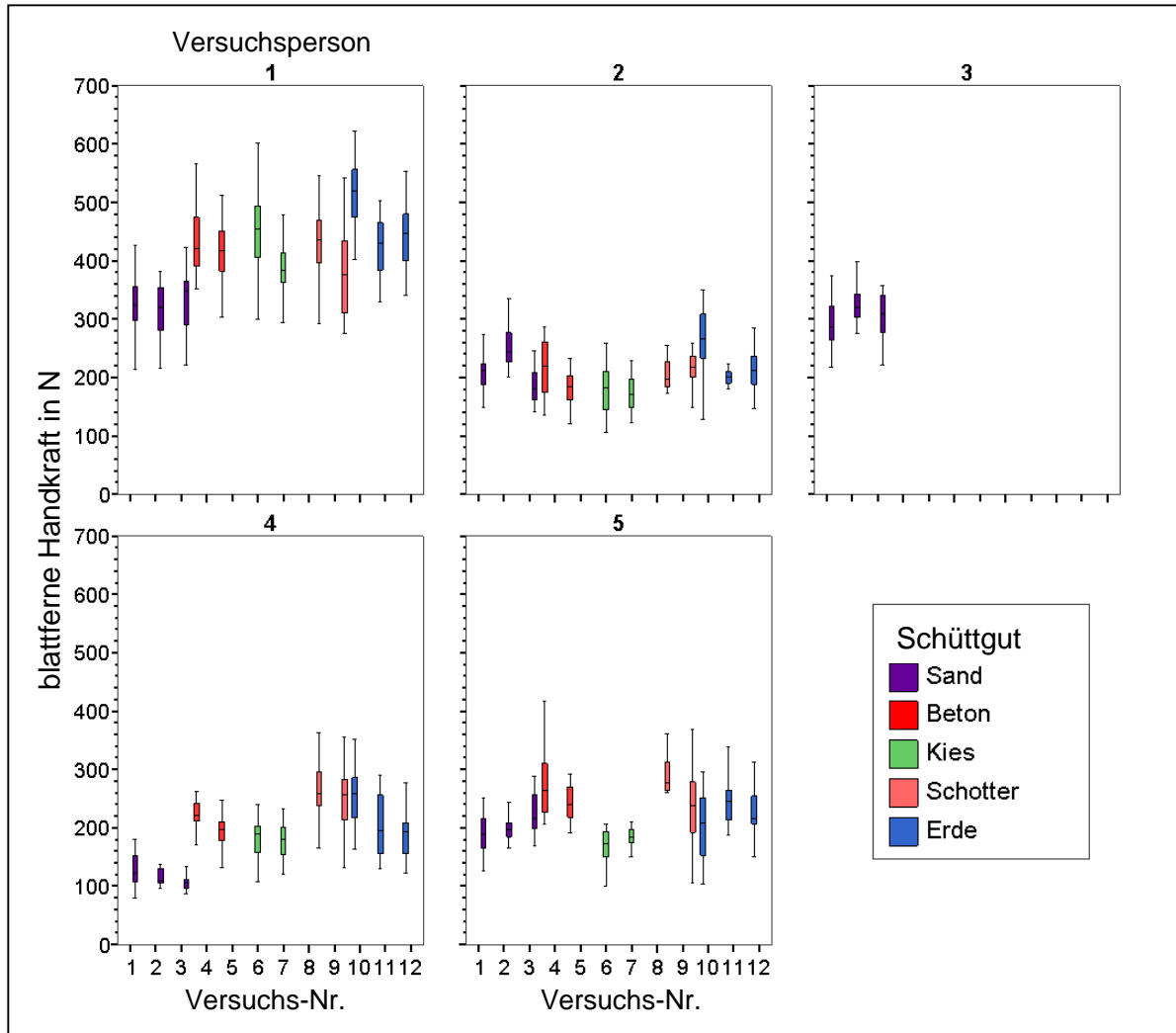
VP-Nr.	Maximale blattnahe Handkraft in N		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	392	44	235
2	230	38	234
3	497	59	60
4	274	41	237
5	281	66	222
Gesamt	307	90	988

Tabelle 3.10:
Mittlere Maximalkräfte der blattfernen Hand für alle Probanden über die praxisnahen Versuche

VP-Nr.	Maximale blattferne Handkraft in N		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	405	81	235
2	208	46	234
3	309	43	60
4	192	66	237
5	224	57	222
Gesamt	261	105	988



Abbildung 3.28:
Boxplots der maximalen Handkräfte der blattfernen rechten Hand aller Probanden in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche



3.8 Boxplots der Kräfte am Oberschenkel

Nachfolgend werden die statistischen Verteilungen der maximalen Auflagekräfte des Schaufelstiels auf dem Oberschenkel (Betrag) dargestellt. Unter „maximal“ ist hierbei das Maximum des gleitenden Mittelwertes über ein 0,5-s-Fenster zu verstehen.

Bis auf Proband 3 – Estrichleger – setzten alle Probanden den Oberschenkel mehr oder minder stark als Widerlager für die Schaufel über die Phase vom Einstechen bis hin zum Beginn des Anhebens ein. Die Kräfte erreichten im Mittel rund 250 N, wobei



in Einzelfällen auch über 600 N erreicht wurden (Abbildung 3.29 und Tabelle 3.11). Insbesondere Proband 1 erreichte überdurchschnittlich hohe Auflagekräfte mit einem Mittelwert von über 400 N. Die anderen drei Probanden erreichten im Mittel knapp 200 N, was vermutlich näher am Mittelwert der Grundgesamtheit liegt als an dem der Probandengruppe.

Abbildung 3.29:
Boxplots der maximalen Auflagekräfte am Oberschenkel aller Probanden in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche

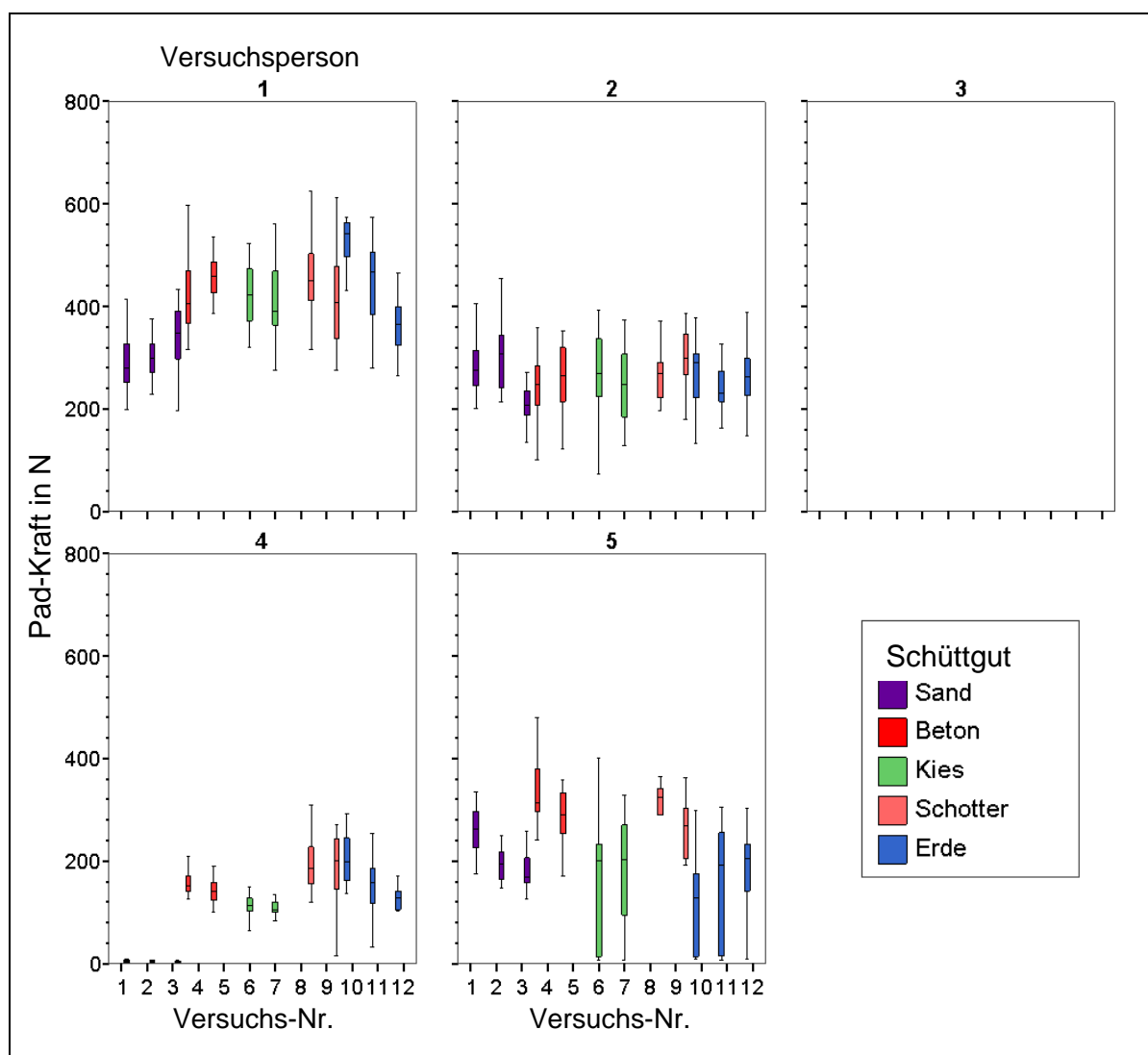




Tabelle 3.11:
Mittlere Maximalwerte der Oberschenkelauflagekraft für alle
Probanden über die praxisnahen Versuche

VP-Nr.	Maximale Pad-Kraft am Oberschenkel in N		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	408	105	235
2	262	66	234
3	---	---	60
4	115	82	237
5	216	107	222
Gesamt	251	140	988

3.9 Boxplots der Gelenkmomentbelastung an der LWS (L5/S1)

Nachfolgend werden die statistischen Verteilungen der maximalen Gelenkmomente um L5/S1 bezogen auf die drei orthogonalen Hauptebenen des Körpers beim Schaufeln dargestellt. Unter „maximal“ ist hierbei das Maximum des Absolutbetrages des gleitenden Mittelwertes über ein 0,5-s-Fenster der jeweiligen Gelenkmomentkomponente mit nachträglicher Berücksichtigung des Vorzeichens zu verstehen. Damit soll die Zuordnung der Hauptwirkrichtung des Drehmoments im Sinne von Flexion/Extension oder auch Links/Rechts-Torsion gewährleistet bleiben.

Die Maximalwerte des Flexions-/Extensionsmoments wiesen aufgrund des negativen Vorzeichens immer auf eine Extensionswirkung der Rückenmuskeln hin, d. h. eine überwiegende Aktivität der Rückenstrecker (Abbildung 3.30, siehe Seite 79). Die Werte reichen von knapp -100 Nm bis deutlich unter -200 Nm bei einem Gruppenmittelwert von rund -150 Nm (Tabelle 3.12, Seite 79). Über die zwölf Versuche offenbarten die Probanden zwei unterschiedliche Verhaltensweisen: Die Probanden 1 und 4 zeigten ein eher gleiches Belastungsverhalten unter den verschiedenen Schaufelbedingungen, wohingegen die Probanden 2 und 5 (auch 3) stark unterschiedliche Belastungswerte – auch innerhalb eines Schüttguts – aufwiesen. Der Mittelwert der Probanden pendelte sich jedoch jeweils nah um -150 Nm ein.



Abbildung 3.30:
Boxplots der maximalen Flexions-/Extensionsmomente um L5/S1 aller Probanden in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche

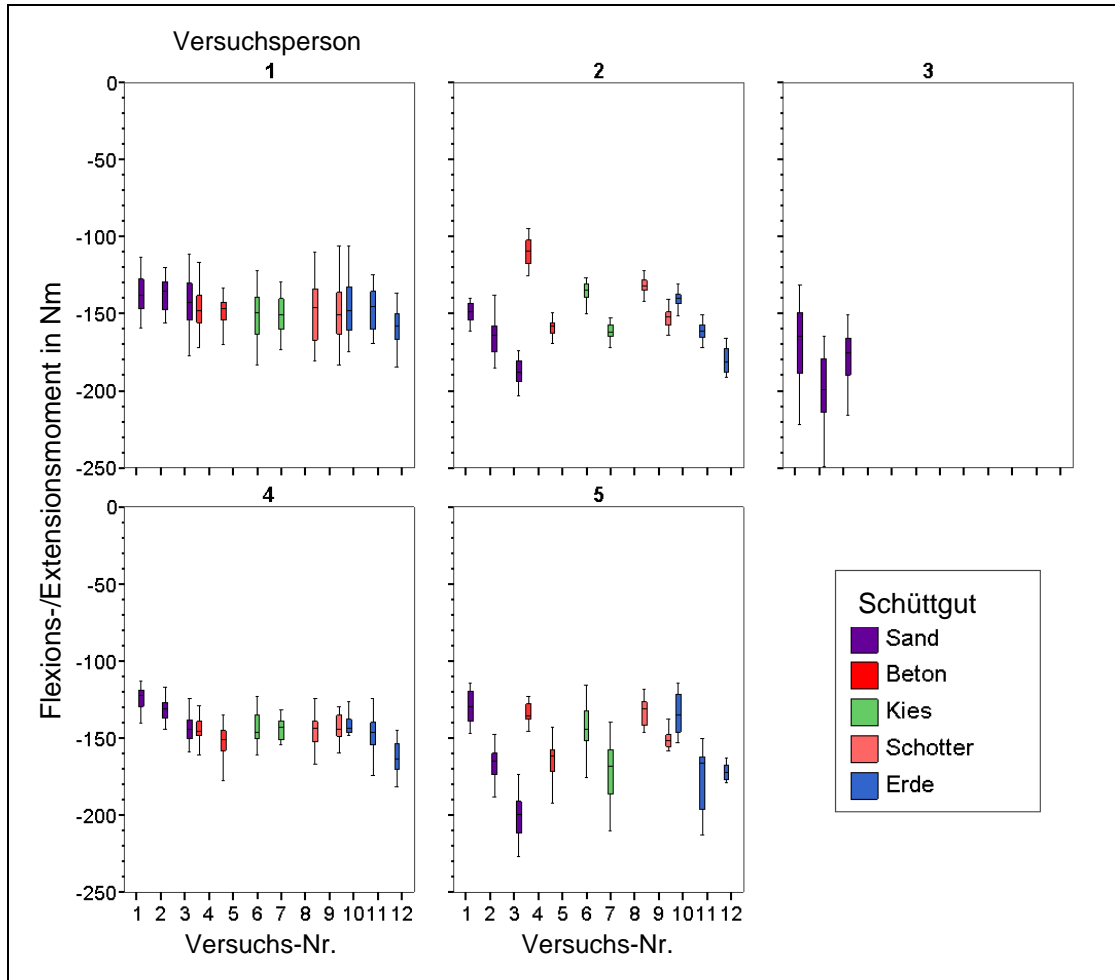


Tabelle 3.12:

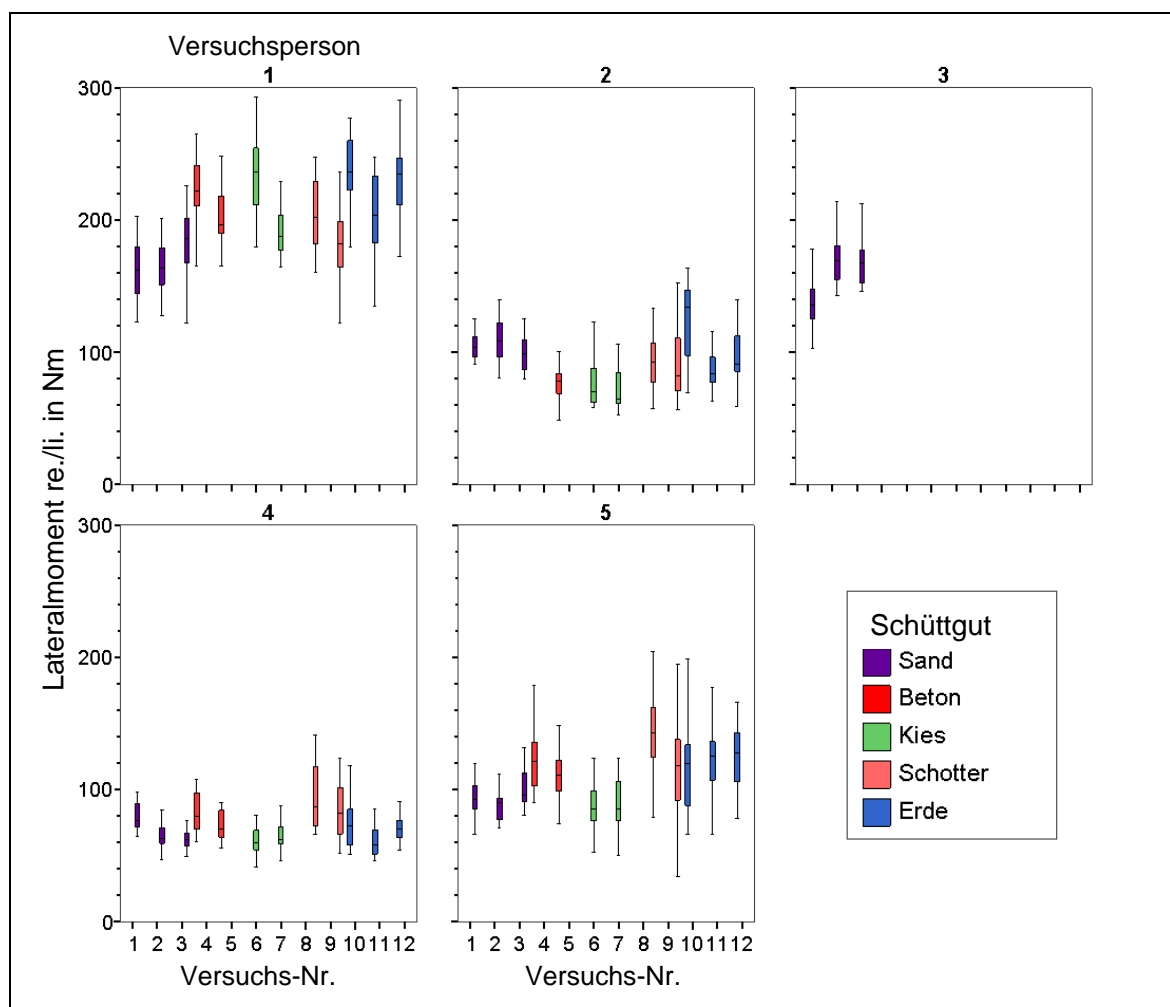
Mittlere Maximalwerte des Extensionsmoments um L5/S1 für alle Probanden über die praxisnahen Versuche beim Schaufeln

VP-Nr.	Maximale Extensionsmomente um L5/S1 in Nm		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	147	17	235
2	147	17	234
3	182	26	60
4	143	13	237
5	159	27	222
Gesamt	152	23	988



Beim Lateralmoment überwog bei allen Probanden, trotz unterschiedlicher Schaufel-techniken (Abschnitte 3.3 und 3.6), die Lateralflexion nach rechts (Abbildung 3.31). Die Werte reichten von rund 20 Nm bis knapp über 300 Nm. Diese extremen interindividuellen Unterschiede erlauben keine repräsentative Gruppenmittelwertsbildung. Allenfalls können prinzipiell zwei Belastungsniveaus von 60 bis 100 Nm für die Probanden 2, 4 und 5 und von 150 bis über 200 Nm für die Probanden 1 und 3 mit dem hohen Arbeitstempo identifiziert werden (Tabelle 3.13).

Abbildung 3.31:
Boxplots der maximalen Lateralmomente um L5/S1 aller Probanden in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche



Im Vergleich zu den Flexions-/Extensionsmomente wies das Lateralmoment eine ähnliche Größenordnung auf und belegt damit die ausgesprochen dreidimensionale Belastungssituation der Lumbalregion beim Schaufeln.



Tabelle 3.13:
Mittlere Maximalwerte des Lateralmoments um L5/S1 beim Schaufeln
für alle Probanden über die praxisnahen Versuche

VP-Nr.	Maximale Lateralmomente um L5/S1 in Nm		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	200	37	235
2	72	74	234
3	158	25	60
4	73	18	237
5	109	30	222

Die Maxima des Torsionsmoments zeigten eine sehr individuell geprägte Verteilung (Abbildung 3.32, siehe Seite 82). Mehrheitlich erreichten die Torsionsmomente Werte zwischen ± 50 Nm (Tabelle 3.14).

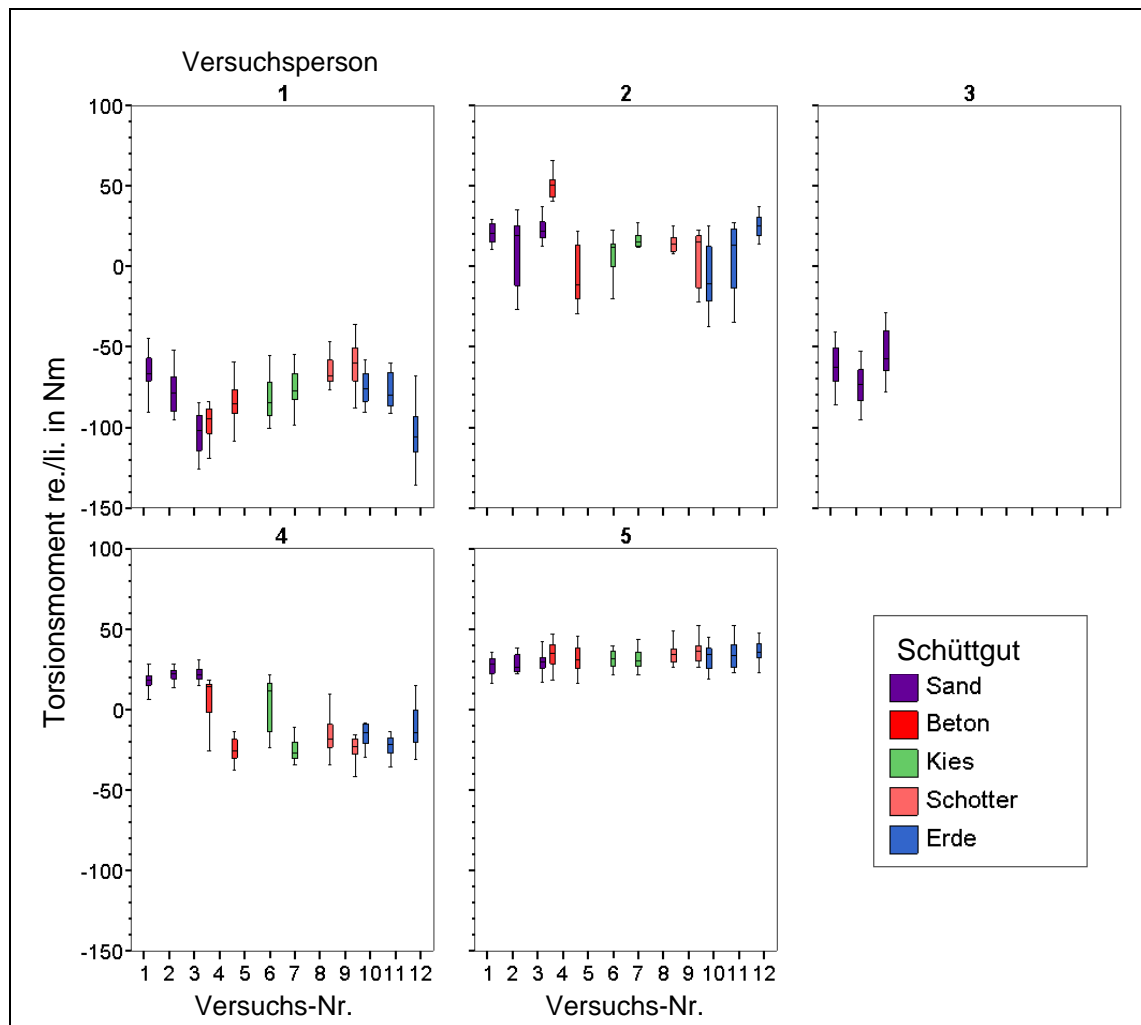
Nur die Probanden 1 und 3 erreichten deutliche höhere Torsionsmomente zwischen -50 und -100 Nm (Linksrotation). Bei diesen beiden und bei Proband 5 ergab sich eine Richtungsübereinstimmung von Abwurfrichtung und Vorzeichen des maximalen Torsionsmoments.

Tabelle 3.14:
Mittlere Maximalwerte des Torsionsmoments um L5/S1 beim Schaufeln
für alle Probanden über die praxisnahen Versuche

VP-Nr.	Maximale Torsionsmomente um L5/S1 in Nm		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	-81	18	235
2	12	22	234
3	-64	17	60
4	-5	21	237
5	32	11	222



Abbildung 3.32:
Boxplots der maximalen Torsionsmomente um L5/S1 aller Probanden in Abhängigkeit vom Schüttgut und von der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche



3.10 Kompressionskräfte an der LWS (L5/S1)

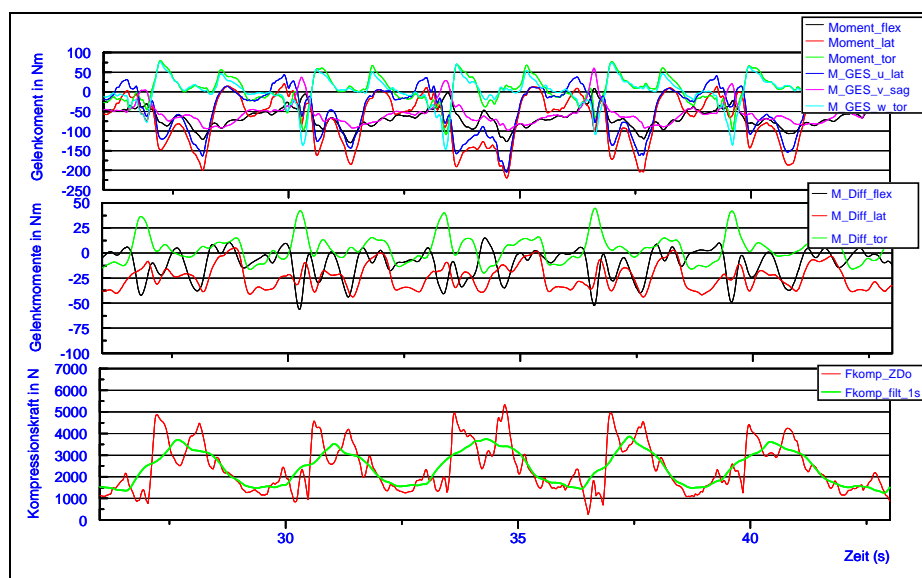
Um die Vorgehensweise bei der Ermittlung der für die spätere Anwendung nutzbaren Bandscheiben-Druckkräfte zu verdeutlichen, sind in Abbildung 3.33 mehrere Kenngrößen der LWS-Belastung anhand eines typischen Ausschnittes von etwa 20 Sekunden dargestellt, der fünf aufeinander folgende Schaufelvorgänge repräsentiert. Der obere Teil enthält die Zeitverläufe der im BGIA und IfADo erhobenen Momente bezüglich der Bandscheibe L5/S1. Erstere repräsentieren die Wirkungen von Aktionskräften und Körperbewegungen, letztere die Wirkungen von Aktionskräften und Körperhaltungen. Dies bedeutet, dass aufgrund der vereinbarten Vorgehensweise in dieser Studie bei den BGIA-Momenten die beschleunigungsinduzierten Trägheits-



effekte für die oberen Körpersegmente berücksichtigt sind, bei den IfADo-Momenten unberücksichtigt (quasistatischer Ansatz, siehe auch Abschnitt 2.2).

Das Beugemoment in der Sagittalebene (Flexion/Extension => positive/negative Werte) wird durch die v-sag- bzw. flex-Verläufe, das Seitbeugemoment (nach rechts/links => positiv/negativ) durch die u-lat- bzw. lat-Verläufe und das Torsionsmoment (nach links/rechts => positiv/negativ) durch die w-tor- bzw. tor-Verläufe repräsentiert. Wie die Zeitverläufe in Abbildung 3.33 zeigen, lassen sich die einzelnen Schaufelvorgänge eindeutig identifizieren und die jeweils korrespondierenden Kurvenpaare weisen deutliche Ähnlichkeiten auf. Jedoch zeigen sich besonders an den „Umkehrpunkten der Kurven“, d. h. an den lokalen Minima und Maxima, zum Teil auch deutliche Unterschiede, die im Wesentlichen auf die Körperteil-Massenträgheit zurückgeführt werden. Zur Verdeutlichung dieses Aspekts zeigt das mittlere Diagramm die Zeitverläufe der Momentendifferenzen (Momente aus BGIA minus IfADo); dabei ergaben sich für den gewählten Ausschnitt Differenzen bis zu etwa 50 Nm, vorrangig in der Phase des Einstechens, die zum einen auf die unterschiedliche Skelettmodellierung in BGIA und IfADo und zum anderen auf die Massenträgheit zurückzuführen sind.

Abbildung 3.33:
Gleitendes Mittelwertfahren zur Bestimmung der maximalen Kompressionskraftverläufe an L5/S1 am Beispiel von Proband 2, Versuch 4





Das untere Diagramm in Abbildung 3.33 enthält zwei Zeitverläufe für die aus den IfADo-Modellrechnungen resultierende Bandscheiben-Druckkraft; der stark spitzenbehaftete Zeitverlauf repräsentiert die Sequenz von Berechnungsergebnissen im Abstand von 10 ms, der andere dieselben Ergebnisse nach einer zeitlich gleitenden Mittelung mit einem Zeitfenster von einer Sekunde. Diese „Tiefpassfilterung“ wurde vorgenommen, um die kurzzeitigen Spitzenwerte einerseits hinsichtlich der biomechanischen Wirkung nicht überzubewerten und andererseits den methodischen „Unzulänglichkeiten“ der Vernachlässigung der Massenträgheit bei der Druckkraftbestimmung Rechnung zu tragen. Bei den hier untersuchten Schaufelbewegungen ist davon auszugehen, dass einige Belastungsindikatoren, insbesondere das Torsionsmoment beim Einstechen, durch die Massenträgheit verringert wird, d. h. bei Vernachlässigung dieses Effekts in den Modellrechnungen dieser Belastungsanteil – und daraus folgend auch die Bandscheibenkompression – eher überschätzt wird. Derartig bedingte Belastungsspitzen werden durch die zeitlich gleitende Mittelung „geglättet“. In diesem Zusammenhang stellt die gewählte Zeitfensterlänge einen konservativen Kompromiss dahingehend dar, dass eine Dauer von beispielsweise 0,5 s die Verlaufsspitzen über-, längere Dauern wie zum Beispiel 1,5 s unterbewerten. Wie der entsprechende gefilterte Zeitverlauf insgesamt zeigt, ergaben sich dann für dieses Beispiel Spitzenwerte der Bandscheiben-Druckkraft um etwa 3 ½ kN.

Eine Zusammenstellung derartiger Spitzenwerte aus gefilterten Druckkraft-Zeitverläufen ist in Abbildung 3.34 für die zwölf verschiedenen Versuchsbedingungen und fünf Probanden dargestellt. Dabei ergaben sich vergleichsweise hohe Werte – Spitzenwerte im Mittel zwischen etwa 6 und 6 ½ kN – für die Probanden 1 und 3; dies wird bei beiden Personen auf die vergleichsweise hohen Aktionskräfte (Abbildung 3.28 und Tabelle 3.10), zum Teil überlagert von hohen Seitbeugemomenten (Abbildung 3.32), zurückgeführt. Für die drei anderen Probanden wurden Druckkraftspitzen im Bereich um etwa 3 ½ kN im Mittel erhoben. Die Abhängigkeit vom Schaufelgut wird als eher gering eingeschätzt, wenn auch beispielsweise für Proband 1 diesbezügliche Unterschiede von etwa 1 kN auftreten (vgl. Bedingungen 1 und 12: Sand, eben, kurz vs. Erde, eben, weit). Insgesamt wurde je nach Schaufelgut und Proband ein großer Wertebereich für die Druckkraftspitzen zwischen etwa 2 ½ und 7 ½ kN ermittelt. Wie Tabelle 3.15 zeigt, weisen die Druckkraftwerte bei den Probanden 1 und 3 nicht nur höhere Mittelwerte, sondern auch höhere Streuungen auf.



Abbildung 3.34:
Boxplotverteilung der maximalen Kompressionskräfte an L5/S1 aller Probanden über die praxisnahen Versuche

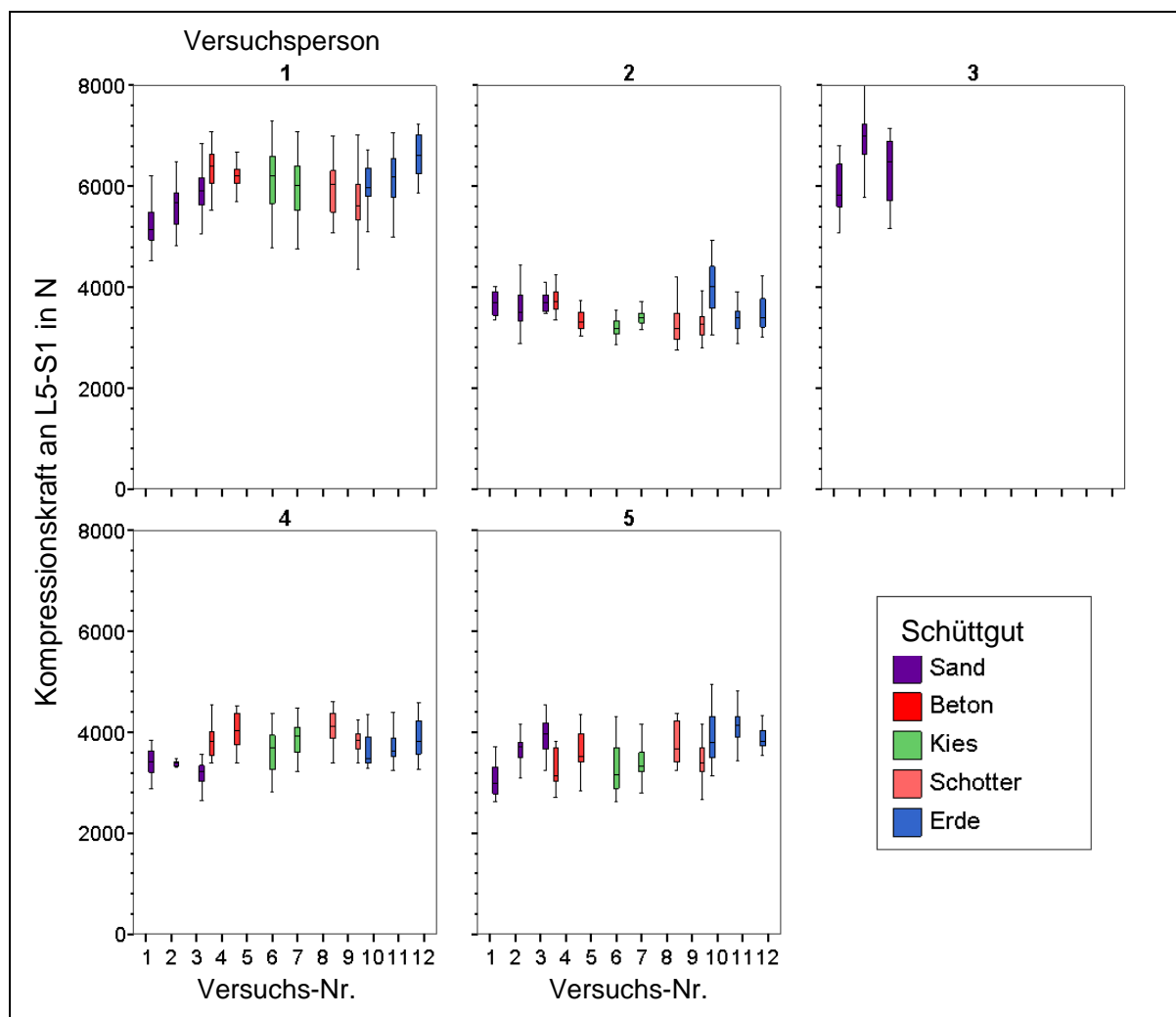


Tabelle 3.15:
Kennwerte der maximalen Kompressionskräfte auf L5/S1 beim Schaufeln der praxisnahen Versuche

VP-Nr.	Maximale Druckkräfte auf L5/S1 in kN		
	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl
1	6,0	0,61	235
2	3,5	0,42	234
3	6,4	0,69	60
4	3,7	0,43	237
5	3,6	0,52	222



4 Zusammenfassung

Anlass der vorliegenden Studie war die kontroverse Diskussion in berufsgenossenschaftlichen Fachkreisen über die Höhe der lumbalen Bandscheibenbelastung beim Schaufeln in Zusammenhang mit der Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen in BK-2108-Feststellungsverfahren. Hierzu lagen bislang nur sehr wenige und kaum repräsentative Belastungsangaben vor. Einerseits wurde ein Belastungswert von 2,9 kN durch Anwendung einer der „Gleichungen zur retrospektiven Abschätzung der Druckkraft an der Lendenwirbelsäule“ aus dem Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) abgeleitet, und andererseits wiesen biomechanische Analysen mit im Schaufeln ungeübten Personen auf maximale Bandscheibenkompressionskräfte zwischen 4 und 6 kN bei einem Mittelwert von etwa $4\frac{1}{2}$ kN [8] hin.

Auf Initiative von Experten der BG BAU sollte daher in einem vom HVBG (seit 1. Juli 2007 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) geförderten Forschungsprojekt die Bandscheibenbelastung bei geübten Fachkräften aus dem Baugewerbe biomechanisch ermittelt werden. Das Studiendesign sah explorative Messungen mit fünf Fachkräften (Mauer, Pflasterer, Gartenbauer, Straßenbauer und Estrichleger), fünf verschiedenen Schüttgütern (Sand, Beton, Kies, Schotter und Erde) und einem Schaufeltyp (Frankfurter Schaufel) in drei unterschiedlichen Aufgabenstellungen (kurze, weite Distanz, 1,2 m nach oben) – also insgesamt zwölf Versuchskonstellationen – vor. In Zusammenarbeit von IfADo und BGIA wurden die biomechanischen Messungen und die darauf aufbauenden Modellrechnungen zur Kompressionskraftermittlung durchgeführt. In einer speziell eingerichteten Arbeitsumgebung fanden im BGIA unter Laborbedingungen dreidimensionale Bewegungs- und Kraftmessungen in Verbindung mit einer sensorpräparierten Messschaufel statt. In jeder Versuchsanordnung führten die Probanden im Rahmen eines Arbeitszyklus 20 Schaufelvorgänge aus. Insgesamt wurden 1 168 mit den Versuchsbedingungen konforme Schaufelvorgänge zeitkontinuierlich erfasst und für diese die Kompressionskraft an der untersten Bandscheibe mit dem Modell „Der Dortmunder“ im IfADo berechnet.

In einer zur Laboruntersuchung parallelen Befragung zu den subjektiven Belastungsempfindungen nannten die Probanden mehrheitlich den unteren Rücken als die beim Schaufeln am höchsten belastete Körperregion. In der Gesamtschau aller



berufsspezifischen Tätigkeiten wiesen alle Probanden dem Schaufeln einheitlich ein mittleres Beanspruchungsniveau zu. Dieses Ergebnis steht in keinem Widerspruch zu den ermittelten Bandscheiben-Kompressionskräften. Es belegt vielmehr die Unabhängigkeit von subjektiver Belastungsempfindung und objektiv ermittelter mechanischer Belastung.

Bei den Laborversuchen konnten die Probanden ihr Arbeitstempo nach ihrer gewohnten Arbeitsanforderung frei wählen, was durch Arbeitsplatzbeobachtung (Estrichleger) und Vorversuche dokumentiert wurde. Die Häufigkeitsverteilung der Aktionsdauer (Zeitspanne zwischen Einstich und Abwurf) der fünf Probanden wies eindeutig zwei Gruppen unterschiedlichen Arbeitstempos – „Regelfall“ von etwa 2 s und „Sonderfall“ von 1 ½ s – aus. Insbesondere der Estrichleger zeichnete sich durch die kürzeste Aktionsdauer aus. Im Mittel betrug die Aktionsdauer, d. h. die Belastungsdauer, etwa 62 % der Zeitspanne zwischen zwei Schaufelvorgängen (von Einstich bis Einstich).

Die geschaufelte Schüttgutmasse je Vorgang betrug im Mittel 7,7 kg (Standardabweichung 1,7 kg). Ein genereller Zusammenhang von Schaufelbeladung und Schüttgut konnte nicht gefunden werden. Tendenziell ergaben sich die höheren Beladungen für Beton und die niedrigeren für Schotter.

Die Probanden zeichneten sich durch unterschiedliche Schaufeltechniken hinsichtlich Handhaltung, Abwurfrichtung und Abstützung des Schaufelstiels auf dem Oberschenkel aus. Sämtliche Techniken waren im höchsten Maße „räumlich ausgreifend“ und von asymmetrischen Belastungen des Muskel-Skelett-Systems geprägt. Die Hand-Arm-Kräfte waren überwiegend gegengleich gerichtet, indem die blattnahe Hand eine Zug- und die blattferne Hand eine Druckbelastung erfuhr. Bei den Probanden mit „normalem Arbeitstempo“ lag die maximale Kraft der blattnahen Hand um 250 N, bei Probanden mit „hohem Arbeitstempo“ zwischen 400 und 500 N. An der blattfernen Hand war die Belastung generell geringer bei etwa 200 N im „Regelfall“, 300 bis 400 N im „Sonderfall“. Die maximale Auflagekraft des Schaufelstiels auf dem Oberschenkel war sehr stark durch die individuelle Schaufeltechnik geprägt und erreichte einen mittleren Maximalwert von etwa 250 N, bei einem Probanden sogar 400 N im Mittel über alle zwölf Versuchsbedingungen. Der Aspekt der Abstützung



der Schaufel auf dem Oberschenkel ist ein sehr bedeutsames Ausführungsmerkmal, das einerseits die resultierende Kraft auf die Schaufel beim Einstechen und der ersten Phase des Anhebens deutlich erhöhen kann und andererseits einen Teil der Belastung des Muskel-Skelett-Systems über den Oberschenkel ableitet und somit die Belastung der Wirbelsäule reduziert.

Die asymmetrische Belastungssituation spiegelte sich deutlich in den drei Komponenten des Gelenkmoments um L5/S1 wider, indem in allen drei anatomischen Ebenen des Rumpfes beträchtliche Belastungen zu verzeichnen waren. In der Sagittalebene betrug das maximale Extensionsmoment der Rückenstreckmuskeln im Mittel etwa 150 Nm (Standardabweichung 23 Nm). In der Frontalebene lagen die Werte ausfahrungsabhängig zwischen 70 und 200 Nm, ebenso die Torsionsmomente mit Werten bis zu 80 Nm. Insgesamt wurden für den „Regelfall“ maximale Druckkräfte um $3\frac{1}{2}$ kN und für den „Sonderfall“ Werte von etwa $6\frac{1}{4}$ kN erhoben.

Hinsichtlich der Anwendung der Studienergebnisse zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen in BK-2108-Feststellungsverfahren ist festzustellen, dass für das Schaufeln nicht nur ein einziger Belastungswert pauschal angesetzt werden sollte. Die vorliegenden Messungen weisen auf zwei Belastungsniveaus hin, die offensichtlich mit Belastungsdauer/Arbeitstempo im Zusammenhang stehen. Daraus ergibt sich für die praktische Anwendung in Feststellungsverfahren zur BK 2108 die Empfehlung, Wertepaare von Druckkraft und Einwirkungsdauer zu verwenden. Für das Schaufeln im „Regelfall“ ist dies das Wertepaar $3\frac{1}{2}$ kN und 2 s sowie für das Schaufeln im „Sonderfall“, entsprechend der Arbeitsweise eines Estrichlegermaschinen bei Akkordarbeit, das Wertepaar $6\frac{1}{4}$ kN und 1,5 s. Insofern empfehlen die Autoren der Studie, einen Arbeitskreis aus Experten einzurichten, der eine Zuordnung von Schaufeltätigkeiten/Gewerken und dem typischen Arbeitstempo vornimmt und damit eine Handlungsanleitung für die BK-Sachbearbeitung zum Thema „Schaufeltätigkeit“ erstellen kann.

Detaillierte Präventionsempfehlungen für das Schaufeln wurden aufgrund des Studiendesigns nicht abgeleitet. Die Studienergebnisse belegen, dass sehr unterschiedliche Schaufeltechniken durchaus zu den gleichen Belastungswerten führen können.



Offensichtliche Zusammenhänge zwischen Schüttgütern/Beladung und Wirbelsäulenbelastung haben sich nicht ergeben. Allgemein ist zu empfehlen, die Schaufel eher moderat und nicht maximal zu beladen. Der Schaufelstiel sollte beim Einstecken und während der ersten Phase des Anhebens auf dem Oberschenkel abgestützt werden. Hierbei sollte der Körper in allen Gelenken gleichmäßig gebeugt sein und der Rücken möglichst gerade, d. h. ohne ausgeprägte Krümmungen und Torsionen, gehalten werden. Eine aufrechte Rückenhaltung führt zwar zu geringeren Belastungen der Wirbelsäule, kann aber auf der anderen Seite, z. B. bei starker Kniegelenksbeugung, dort hohe Belastungen hervorrufen. Insofern ist an dieser Stelle ein Kompromiss zu empfehlen. Als Schaufelrichtung ist diejenige „vom Rücken weg“ der „nach vorne“ vorzuziehen, da hier der Rücken leichter gerade und aufrecht gehalten werden kann. Abschließend ist darüber hinaus zu empfehlen, dass in zukünftigen ergonomischen Analysen des Schaufelns die vergleichende Bewertung unterschiedlicher Schaufeltechniken mehr Beachtung finden sollte.



5 Literatur

- [1] *Jäger, M.; Luttmann, A.; Bolm-Audorff, U.; Schäfer, K.; Hartung, E.; Kuhn, S.; Paul, R.; Francks, H.-P.*: 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: Retrospektive Belastungsermittlung für risikobehaftete Tätigkeitsfelder. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* 34 (1999), S. 101-111
- [2] *Hartung, E.; Schäfer, K.; Jäger, M.; Luttmann, A.; Bolm-Audorff, U.; Kuhn, S.; Paul, R.; Francks, H. P.*: 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 (1999), S. 112-122
- [3] *Schäfer, K.; Hartung, E.*: 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 3: Vorschlag zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren bei kombinierter Belastung mit Ganzkörper-Schwingungen. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* 34 (1999), S. 143-147
- [4] *Hartung, E.; Schäfer, K.; Jäger, M.; Luttmann, A.; Bolm-Audorff, U.; Kuhn, S.; Paul, R.; Francks, H.-P.*: Methode zur einheitlichen Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen der BK 2108 nach dem Mainz-Dortmunder Dosismodell MDD. In: *Konietzko, J.; Dupuis, H.* (Hrsg.): *Handbuch der Arbeitsmedizin* Kap. IV.7.8.3.1.2., S. 1-24. Ecomed Verlagsgesellschaft, 25. Erg.-Lfg., Landsberg am Lech 2000
- [5] *Jäger, M.; Jordan, C.; Theilmeier, A.; Luttmann, A.*: Dortmund Lumbalbelastungsstudie 2: Ermittlung und Beurteilung vergleichbarer Teiltätigkeiten



- hinsichtlich der Körperhaltung und der Wirbelsäulenbelastung bei verschiedenen beruflichen Tätigkeiten. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2001
- [6] *Jäger, M.; Luttmann, A.; Laurig, W.*: Ein computergestütztes Werkzeug zur biomechanischen Analyse der Belastung der Wirbelsäule bei Lastenmanipulationen: „Der Dortmunder“. *Med.-orthop. Tech.* 112 (1992), S. 305-313
- [7] *Jäger, M.; Luttmann, A.; Göllner, R.; Laurig, W.*: Der Dortmunder – Biomechanische Modellbildung zur Bestimmung und Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule bei Lastenhandhabung. In: *Radandt, S.; Grieshaber, R.; Schneider, W.* (Hrsg.): Prävention von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Erkrankungen; 6. Erfurter Tage. monade, Leipzig 2000, S. 105-124
- [8] *Theilmeier, A.; Jordan, C.; Jäger, M.; Luttmann, A.*: Belastung der Lendenwirbelsäule beim Lastentransport mit der Schubkarre und beim Schaufeln von Schüttgütern. In: *Schäcke, G.; Lüth, P.* (Hrsg.): Arbeitsmedizin im Wandel – bewährte Strategien und Herausforderungen. Tagungsband der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM), Lübeck 2000
- [9] DIN 33411-5: Körperkräfte des Menschen – Teil 5: Maximale statische Aktionskräfte, Werte (11/99). Beuth, Berlin 1999
- [10] *Glitsch, U.; Ottersbach, H.-J.; Ellegast, R.; Hermanns, I.; Feldges, W.; Schaub, K.; Berg, K.; Winter, G.; Sawatzki, K.; Voß, J.; Göllner, R.; Jäger, M.; Franz, G.*: Untersuchungen der Belastung von Flugbegleiterinnen und Flugbegleitern beim Schieben und Ziehen von Trolleys in Flugzeugen. BIA-Report 5/2004. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 2004
- [11] *Sawatzki, K.; Jäger, M.*: Untersuchungen zur Identifikation von Kriterien für eine wirbelsäulenschonendere Handhabung von Trolleys in Flugzeugen. Hrsg.: Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen, Dortmund, Hamburg 2006.
www.ifado.de/forschung/biomech/Lastenhandhabung/Ergaenzungsstudie.pdf



- [12] *Ellegast, R.*: Personengebundenes Messsystem zur automatisierten Erfassung von Wirbelsäulenbelastungen bei beruflichen Hebe- und Tragetätigkeiten. BIA-Report 5/98. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1998
- [13] *Ellegast, R.*: Ermittlung und Bewertung der Belastung des Muskel-Skelettsystems bei beruflichen Tätigkeiten. In: *Coenen, W.; Kentner, M.; Schiele, R.; Valentin, H.; Zober, A.* (Hrsg.): *arbeitsmedizin und arbeitsschutz aktuell – ein Loseblattwerk für die Praxis*. Lfg. 47/2000. Urban & Fischer, München 1999
- [14] *Jäger, M.; Jordan, C.; Luttmann, A.; Dettmer, U.; Bongwald, O.; Laurig, W.*: Dortmunder Lumbalbelastungsstudie: Ermittlung der Belastung der Wirbelsäule bei ausgewählten beruflichen Tätigkeiten. Hrsg.: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin 1998
- [15] *Jäger, M.; Jordan, C.; Theilmeier, A.; Luttmann, A.*: Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 3: Ermittlung der Belastung der Lendenwirbelsäule bei ausgewählten Pflegeetätigkeiten mit Patiententransfer. Teil 1: Entwicklung und exemplarische Anwendung der Methodik. Shaker, Aachen 2003