

Belastung der Lendenwirbelsäule bei Schaufeltätigkeiten

U. Glitsch, H.-J. Ottersbach, R. Ellegast,
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz –
BGIA

K. Sawatzki, J. Voß, A. Luttmann, M. Jäger
Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität
Dortmund – IfADo

G. Rehme
Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft – BG BAU

Danksagung

Die Autoren danken der Berufsgenossenschaft Chemie, der Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen sowie der 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 BG BAU:

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	1
2	Methodik	3
2.1	Design der Laboruntersuchung	3
2.2	Biomechanisches Modell „Der Dortmund“	4
2.3	Versuchspersonen	7
2.4	Arbeitsplatzbeobachtung	8
2.5	Befragung zur Einschätzung der Belastung beim Schaufeln	9
2.6	Aufbau und Durchführung der Laboruntersuchung	10
2.6.1	Laboreinrichtung	10
2.6.2	Dreidimensionale Bewegungserfassung	14
2.6.3	Druckmess-Pad am Oberschenkel	17
2.7	Aufbau der Messschaufel	20
2.7.1	Sensorik, Geometrie und Massenverteilung der Messschaufel	20
2.7.2	Bestimmung der Handkräfte	23
2.8	Isometrische Maximalkraftmessungen	25
2.9	Messdatenerfassung und Auswertung	26
2.10	Erläuterungen zur Datenerhebung, zur Datenstruktur und zum Datentransfer	30
2.10.1	Prinzipielle Dateienstrukturen	32
2.10.2	Transferdatei	33
2.10.3	Tätigkeitsdatei	33
3	Ergebnisse	37
3.1	Ergebnisse der Befragung	38
3.2	Maximalkraftmessungen der Probanden	41
3.3	Vergleichende Analyse der Kinematik unterschiedlicher Schaufeltechniken	43

3.4	Aktionsdauer beim Schaufeln	48
3.5	Schüttgutmassen beim Schaufeln	53
3.6	Vergleichende Analyse der Kinetik unterschiedlicher Schaufeltechniken	56
3.7	Boxplots der Handkräfte beim Schaufeln	68
3.8	Boxplots der Kräfte am Oberschenkel	74
3.9	Boxplots der Gelenkmomentbelastung an der LWS (L5/S1)	76
3.10	Kompressionskräfte an der LWS (L5/S1)	81
4	Zusammenfassung	85
5	Literaturverzeichnis	89

1 Einleitung

Zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im BK 2108-Feststellungsverfahren wird von den UV-Trägern seit einigen Jahren das Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) angewandt, welches für eine einheitliche Belastungsbewertung übergreifend für alle Gewerbebezüge konzipiert wurde (Jäger et al. 1999a, Hartung et al. 1999, Schäfer und Hartung 1999). In diesem kumulativen Dosismodell werden zur Beschreibung der Belastungsdauer Angaben zur Häufigkeit von Belastungsvorgängen sowie der 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 (Hartung et al. 2000), stehen „als standardisierte Methode“ sieben Bestimmungsgleichungen für die retrospektive Abschätzung der Belastungshöhe für Hebe- und Tragetätigkeiten sowie Arbeiten in extremer Rumpfbeugehaltung zur Verfügung (Hartung et al. 1999). Die Belastungssituation des Schaufelns 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 diese mit asymmetrischer Lastverteilung, Krafrichtung und Körperhaltung gehandhabt werden. Die einzigen aus der Literatur verfügbaren quantitativen Aussagen zu Wirbelsäulenbelastungen beim Schaufeln finden sich in einem vom HVBG geförderten Forschungsprojekt, der Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 2 (Jäger et al. 2001). In der vom Institut für Arbeitsphysiologie (IfADo) durchgeführten Untersuchung wurden u. a. Schaufeltätigkeiten mit einer im IfADo entwickelten „Messschaufel“ analysiert und entsprechende quantitative Angaben zur lumbalen Wirbelsäulenbelastung mit Hilfe des biomechanischen Menschmodells „Der Dortmunder“ (Jäger et al. 1992, 2000) abgeleitet. Im Rahmen der Untersuchung wurden Wirbelsäulenbelastungen für exemplarische Schaufeltätigkeiten, welche von ungeübten Personen durchgeführt wurden, in Abhängigkeit von Material und Schaufelblattform mit Spitzenwerten zwischen 4 kN und 6 kN ermittelt. Auf Basis der

Ergebnisse einer Person ergab sich als Mittelwert, unter Berücksichtigung der jeweiligen Zeitanteile für das Einstechen und Anheben, eine Druckkraft von etwa 4 1/2 kN (Theilmeier et al. 2000). 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, an denen geübte Bauarbeiter als Probanden teilnehmen, klären, welche Druckkräfte bei der Tätigkeit des Schaufelns realistisch angesetzt werden können. Das projektbegleitende Konsortium aus Vertretern der BG BAU, IfADo und BGIA legte nachfolgende 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 wurden unter Laborbedingungen im BGIA durchgeführt.
- 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 im Rahmen 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 Unfallversicherungsträger, deren Versicherte Schaufeltätigkeiten durchführen. Schaufeltätigkeiten kommen beispielsweise auch in Teilen der Chemieindustrie, der Landwirtschaft und des Öffentlichen Dienstes vor.

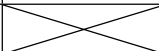
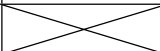
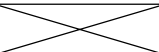
2 Methodik

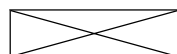
2.1 Design der Laboruntersuchung

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. Die unterschiedlichen Aufgabenstellungen variierten in 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 gerade beschriebenen Versuchsvariablen praxisnah sind, wurde das Versuchsdesign auf 12 unterschiedliche, praxisnahe Schüttgut/Schaufeltätigkeits-Konstellationen beschränkt (Tabelle 2-1). Die Wurfdistanzvorgaben wurden anhand der Praxisbeobachtungen konkretisiert (Kap. 2.4).

Tabelle 2-1:

Versuchsdesign der Untersuchung mit 12 Konstellationen. Die Ziffern geben die Reihenfolge der Versuche an (Tabelle 2-2)

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 wie auch nach Ermüdungsaspekten zusammengestellt (Tabelle 2-2). So wurde mit dem am einfachsten zu schaufelnden Schüttgut Sand begonnen und danach zwischen den „schwereren“ und den „leichteren“ Schüttgütern abgewechselt. Der Beton bildete das zweite Schüttgut in der Versuchsreihe, da er zu 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
3	SA	E2	Sand weit
4	BT	E1	Beton eben kurz
5	BT	UO	Beton nach oben
6	KS	E1	Kies eben kurz
7	KS	UO	Kies nach oben
8	ST	E1	Schotter kurz
9	ST	UO	Schotter hoch
10	ED	E1	Erde kurz
11	ED	UO	Erde nach oben
12	ED	E2	Erde weit

Insgesamt umfasste ein Versuch einer Konstellation 20 Schaufelvorgänge in einer praxistypischen Arbeitsgeschwindigkeit. Die Probanden wurden entsprechend den einzuhaltenden Wiederholbedingungen instruiert, konnten sich 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 Dortmunder“

Auf Grundlage der messtechnischen Erhebungen im BGIA zu Körperhaltungen und Aktionskräften an den Händen wurden Kenngrößen der mechanischen Belastung der Lendenwirbelsäule mit Hilfe biomechanischer Modellrechnungen mit dem Analysewerkzeug DER DORTMUNDER (Jäger et al. 1992; 2000) 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 5 Bandscheiben der Lendenwirbelsäule (L1/L2 ... L5/S1) berechnet werden können. Details zum DORTMUNDER sind in oben genannten Publikationen enthalten; 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 punktförmig angenommenen Gelenken 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 so genannten 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 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 somit 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 Schaufel-bedingten Aktionskräfte relativ zur Wirbelsäule „abgeglichen“, d.h. zur Identität gebracht.

Die Muskulatur im unteren Rumpfbereich wird im DORTMUNDER dahingehend nachgebildet, dass durch 9 „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 zu jedem Zeitpunkt die Wirkung der Körperhaltung und Aktionskräfte 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 den Angaben zu Körperhöhe und -gewicht der Probanden (s.

Kap. 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, da die Einflussgrößen größtenteils bereits im Vorfeld abgestimmt und die entsprechenden Aspekte des Messaufbaus im BGIA auf die für den DORTMUNDER erforderlichen Eingabedaten ausgerichtet wurden. Dies ist bezüglich der Aktionskräfte 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 somit insbesondere auch die Richtung und Verteilung der Aktionskräfte in den Messdaten enthalten sind.

2.3 Versuchspersonen

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

- mindestens 5 Jahre Berufserfahrung (Ältere wurden nicht ausgeschlossen)
- Body-Maß-Index (BMI) $< 30 \text{ kg/m}^2$
- keine Beschwerden am Muskel-Skelett-System
- verschiedene Körpergrößen zwischen 170 cm und 190 cm
- unterschiedliche Gewerke: Straßenbauer, Estrichleger, Garten-/Landschaftsbau, Pflasterer und Maurer (mind. je ein Proband, alle männlich)

In Tabelle 2-3 ist eine Übersicht über die Probanden dargestellt. Sowohl 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 geringe Varianzen aufwies.

Tabelle 2-3:

Probandenübersicht

VP-Nr.	Gewerk	Qualifikation	Berufsjahre in Jahren	Größe in cm	Gewicht in kg	BMI in kg/m ²	Alter in Jahren
1	Maurer	Facharbeiter Maurer	28	186	85	24.6	44
2	Straßenbau	Landwirt	39	170	70	24.2	59
3	Estrichleger	Fliesenleger	6	185	90	26.3	31
4	Garten- und Landschaftsbauer	Geselle	6	180	75	23.1	22
5	Pflasterer	ungelernt	18	175	80	26.1	33
	Mittelwert		19.4	179.2	80.0	24.9	37.8

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

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 konnte eine Arbeitsplatzbeobachtung auf einer Baustelle durchgeführt 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 Positionierung der Person zum Schüttgut unter den verschiedenen Schaufelaufgaben (Kap. 2.1)?
- Wie ist das typische Arbeitstempo beim Schaufeln?

Abbildung 2-1:

Estrichleger mit typischer Schaufelhandhabung beim Befüllen der Estrichmaschine:
kurze Distanz (links), weite Distanz (rechts)



Aus diesen Informationen wurden die Wannenstandorte, die Anordnung der Kraftsensoren am Schaufelstiel und die Befestigung des Druckmess-Pad am Oberschenkel festgelegt (Kap. 2.6 und 2.7). Die Bestimmung des Arbeitstempos erfolgte rein qualitativ aus den Videoaufzeichnungen, um bei den Labormessungen ein in etwa gleiches Arbeitstempo anstreben zu können.

2.5 Befragung zur Einschätzung der Belastung beim Schaufeln

Zur Erfassung der Umfänge und der subjektiven Belastungsempfindungen in Zusammenhang mit Schaufeltätigkeiten wurde ein standardisierter Fragebogen entwickelt (Abbildung 2-2). Im Rahmen der Laboruntersuchung wurde dieser von den fünf Probanden ausgefüllt. (weitere Angaben zu den Probanden siehe Tabelle 2-3).

Abbildung 2-2:

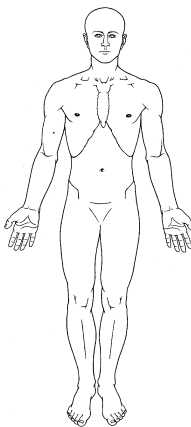
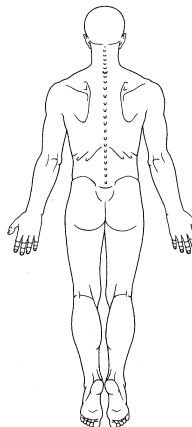
Fragebogen zur Erfassung der Umfänge und der subjektiven Belastungsempfindungen in Zusammenhang mit Schaufeltätigkeiten

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"/> <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.

	Kopf	vorne	hinten	
		Nacken		
	Schulter	vorne	hinten	
		Brustkorb		
	Oberer Rücken			
	Ellbogen	innen	aussen	
	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 Durchführung von Schaufeltätigkeiten speziell hergerichtet worden war. Dazu gehörte ein freier ebener Arbeitsbereich von ca. 4 x 4 m, in dem die

verschiedenen Schüttgüter in Stahlwannen, gemäß der jeweiligen Schaufelaufgabe, platziert werden konnten (Abbildung 2-3). Die Laboreinrichtung wurde mit Kunststoffolie und Stellwänden vor Verschmutzung und Beschädigung geschützt. In der (Abbildung 2-3) ist ein typischer Schaufelvorgang bei ebenerdiger Wannenkombination und kurzer Schaufeldistanz dargestellt. Als Schüttgut wurde hier Sand umgeschaufelt. Ergänzend zu einem geringen Wannenaufstand wurden die beiden anderen genannten Konstellationen durchgeführt.

Abbildung 2-3:

Messfeld zur Untersuchung von Schaufelvorgängen in unterschiedlichen Konstellationen mit Schüttgütern, die in einer Stahlwanne deponiert und dann in eine andere Wanne umgeschaufelt werden konnten. Hier Versuchskonstellation: Sand, ebenerdig, kurze Wurfdistanz



Die Wannen wurden für jede der drei Schaufelarten so angeordnet, dass die Versuchsperson die jeweilige Schaufeltätigkeit in ihrer persönlich bevorzugten Schaufelhaltung durchführen konnte. Bei der Aufgabenstellung „nach oben schaufeln“

wurde eine Schnur in 1,2 m Höhe gespannt, um die Ladekante eines LKW anzudeuten (Abbildung 2-7). Dies hatte den Vorteil, dass keine Höhenanpassung mit einem extra Podest und so keine zusätzlichen Umsetzmanöver mit dem Laborkran notwendig waren. Außerdem konnte so der Messraum ohne weitere Sichtbehinderung für die Messkameras frei bleiben.

Die angewendeten drei Wannenkongstellationen sind in der Abbildung 2-4 dargestellt. Entsprechend dem Versuchskonzept wurde jeweils eine der drei dargestellten Wannenkongstellationen mit fester Positionierung eingerichtet, wobei die beiden jeweils beteiligten Wannn, zwischen denen das Schüttgut umgeschaufelt wurde, zueinander orthogonal ausgerichtet wurden.

Tabelle 2-4:
Schüttgutbefüllungen der Wannn

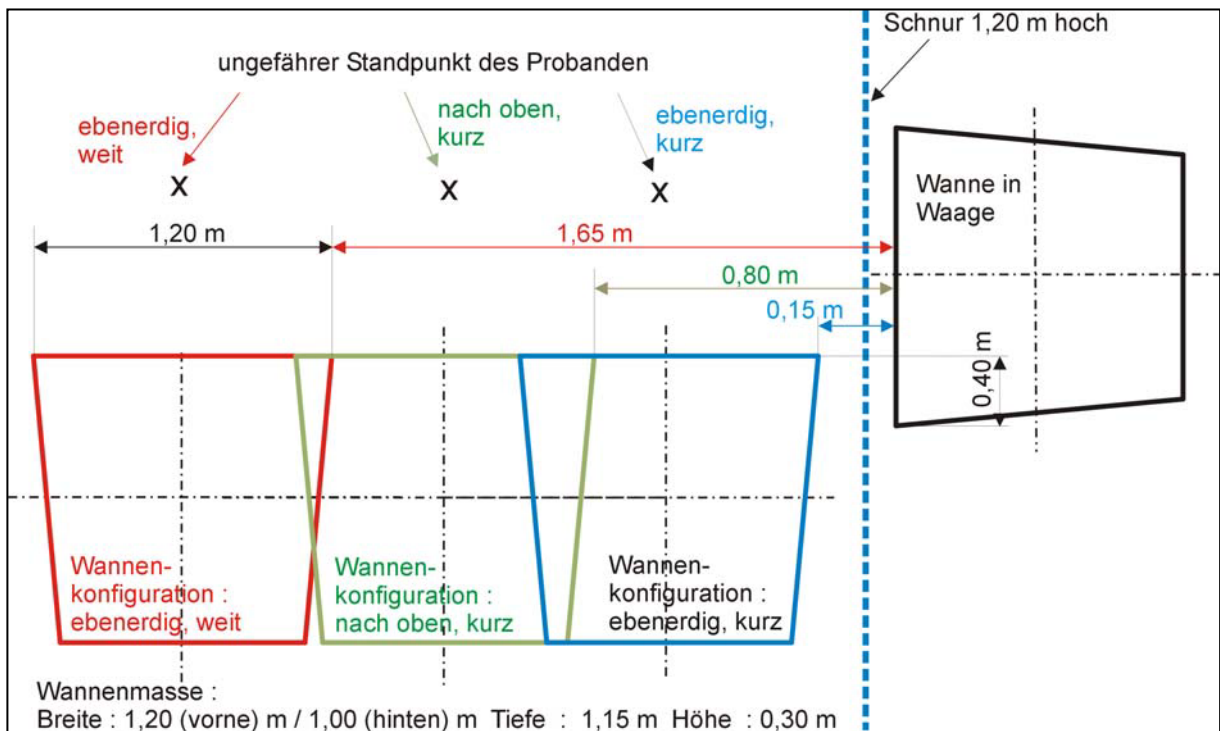
Schüttgüter	Dichte der Schüttgüter (unverdichtet) in kg/dm ³	Volumen in m ³	Schüttgutmasse in kg
Sand (Rheinsand)	1.6	0.4	640
Kies (0-32)	2.0	0.4	800
Erde (feucht)	1.5	0.4	600
Beton (B 15 K1)	2.0	0.4	800
Schotter (0-45)	1.6	0.4	640

Die Grundflächen der Wannn betragen etwa 1,25 m² und die Seitenwände waren 0,3 m hoch. In eine Wanne wurde jeweils ca. 0,4 m³ des zu schaufelnden Schüttgutes gefüllt, was etwa 50 - 70 Vollschaufeln entspricht (Tabelle 2-4). Aus dem so bereitgestellten Schüttgutvolumen konnten dann praxisgerecht 20 Einzelschaufeln in die leere Wanne umgeschaufelt werden. Der Konstruktionsaufbau einer leeren Wanne ist in Abbildung 2-5 zu sehen. Die genauen Maße der Wannnpositionen (farbig markiert) können der 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 Wannn für die umzuschaufelnden Schüttgütern und der Ecke der Wanne für die

Aufnahme des Schüttgutes von 40 cm eingerichtet. Die ungefähren Standpunkte der Probanden sind in der Abbildung 2-4 mit einem Kreuz gekennzeichnet.

Abbildung 2-4:

Maße der Wannenkonfigurationen bei den 3 Versuchsvarianten



Das Gewicht des umgeschaukelten Schüttgutes wurde mit einer speziell konstruierten Waage genau erfasst. Die Waagenkonstruktion ist in Abbildung 2-5 dargestellt. Dabei wurde die Wanne zur Aufnahme des umgeschaukelten Schüttgutes auf einen Rahmen aus Aluminiumprofileisten, der etwa 1 cm Distanz zum Boden hatte, aufgesetzt. Der Rahmen war über vier piezoelektrische Kraftmesszellen in einem äußeren Rahmengestell 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.

Abbildung 2-5:

Bilder der Schüttgutwaage mit Wanne



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 Schaufelvorganges erfasst und zeitsynchron dokumentiert.

2.6.2 Dreidimensionale Bewegungserfassung

Zur Erfassung der dreidimensionalen Körperhaltungen und Bewegungen beim Schaufeln wurde das opto-elektronische Messsystem VICON (VICON 612) mit 8 Kameras eingesetzt.

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 8 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, was die Erfassung auch der teils sehr dynamischen Bewegungen eines Schaufelvorgangs in zeitlich guter Auflösung ermöglichte. Die räumliche Auflösung des Messvolumens von ca. 8 (2 x 2 x 2) m³ betrug ca. 1 mm.

Abbildung 2-7:

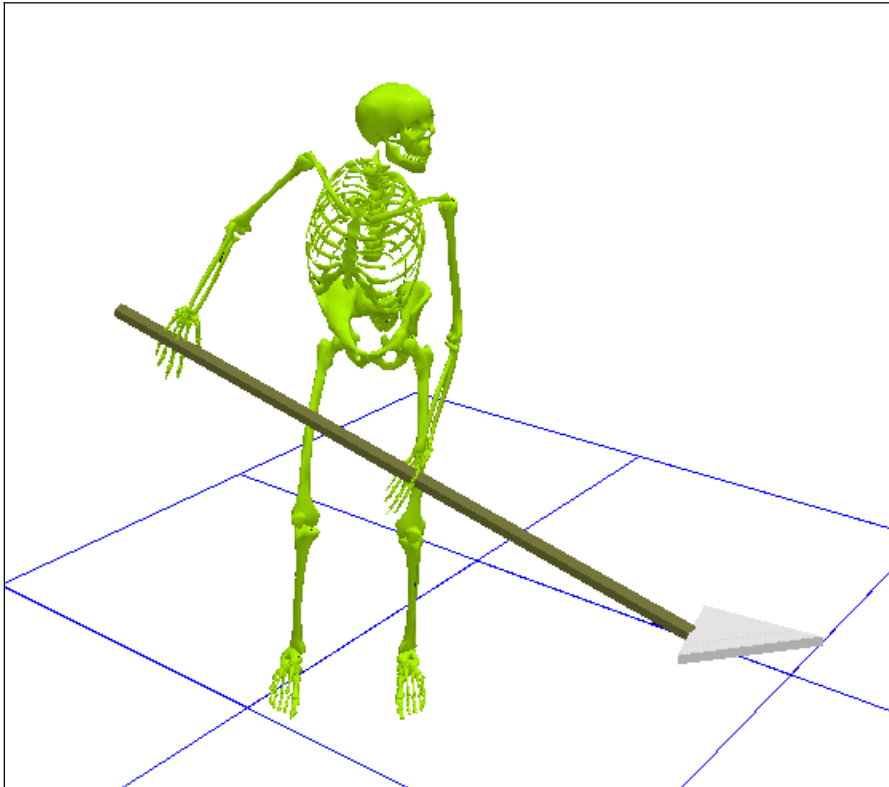
Mit reflektierenden Marken bestückte Versuchsperson beim Schaufeln mit der Messschaufel. Hier Messkonstellation: Kies, nach oben, kurze Distanz



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 u. Abbildung 2-17). 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

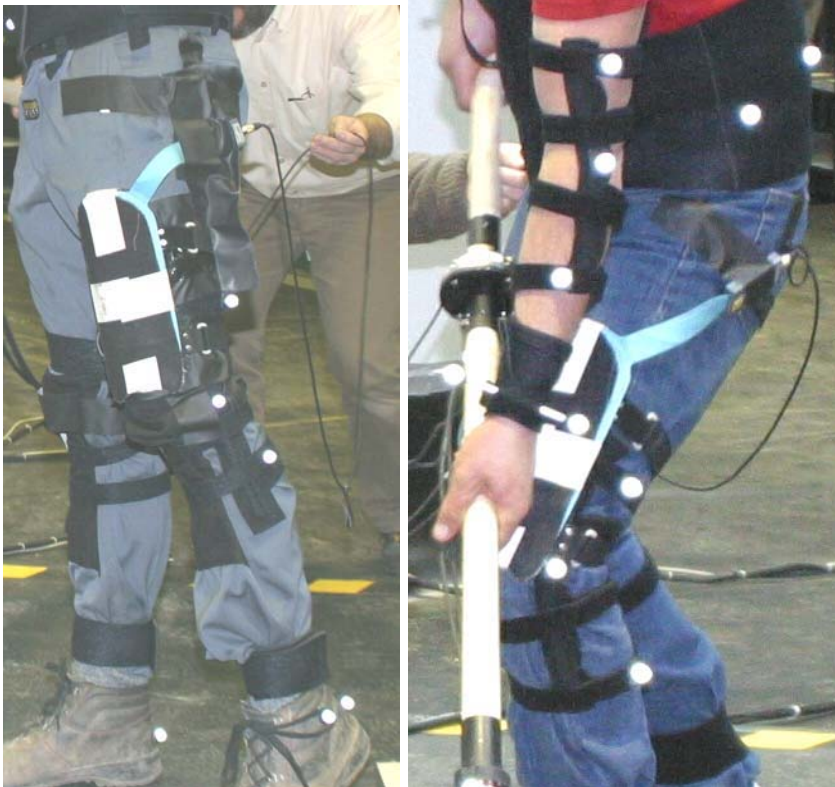


2.6.3 Druckmess-Pad am Oberschenkel

Die Messung der Auflagekraft der Schaufel auf dem Oberschenkel erfolgte über ein Druckmess-Pad, das am jeweils betroffenen Oberschenkel des Probanden mittels Klettbindern befestigt wurde (Abbildung 2-9). Dieses Mess-Pad hatte eine Länge von 25 cm und eine Breite von 12 cm mit 24 auf der Fläche gleichmäßig verteilten Druckmesszellen (Abbildung 2-10).

Abbildung 2-9:

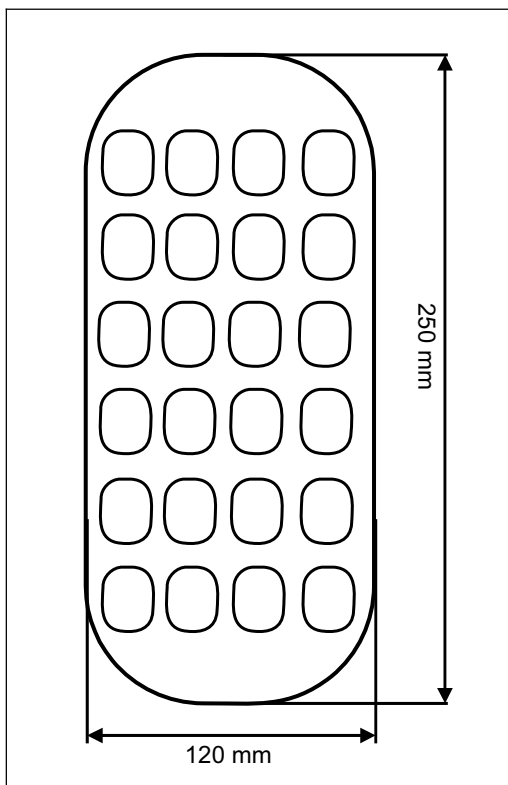
Druckmess-Pad zur Messung der Auflagekräfte der Schaufel am Oberschenkel (links).
Abstützung des Schaufelstiels auf dem Oberschenkel beim Schaufeln (rechts)



Das Mess-Pad (Fa. PAROMED) besteht aus 24 Hydrozellen mit einer Fläche von je ca. 5 cm². Jede Hydrozelle 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 +/- 2% vom Endwert und eine Nichtlinearität von +/- 0,42% (TÜV München, Oktober 1995, Projekt-Nr.: 0895-0308).

Abbildung 2-10:

Schematischer Aufbau und Zellanordnung des Druckmess-Pad



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.

Die Bestimmung der räumlichen Lage der resultierenden Oberschenkelauflagekraft erfolgte unter der Annahme, dass die Auflagekraft im Wesentlichen eine Druckkraft (senkrecht zur Auflagefläche) darstellt. Aus der räumlichen Lage des Schaufelstiels und der der 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 Mess-Pads gesetzt (weitere Berechnung siehe Kap 2.7.2.).

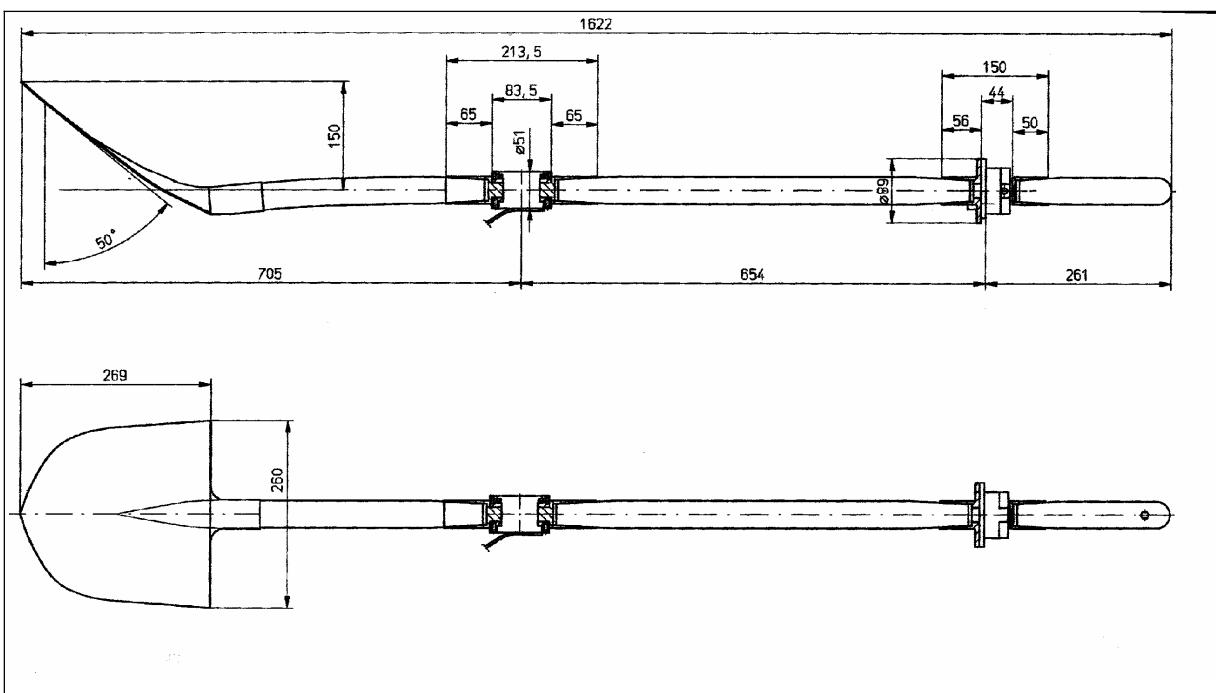
2.7 Aufbau der Messschaufel

2.7.1 Sensorik, Geometrie und Massenverteilung der Messschaufel

In dieser Untersuchung wurde nur der Schaufeltyp, „Frankfurter Schaufel“, eingesetzt. In Abbildung 2-11 und Abbildung 2-12 sind die Drauf- und Seitenansicht der Schaufel sowie Bilder über den Lagestatus vor Beginn der Messungen dargestellt. In den Schaufelstiel wurden ohne Änderung der Originallänge von 1,62 m zwei dreiaxiale Kraft- und Momentensensoren eingesetzt. Hierzu wurden spezielle Aluminiumbüchsen verwendet, in denen jeweils die Enden der Teilstiele verzapft und mit einer Holzschraube gesichert wurden.

Abbildung 2-11:

Konstruktionszeichnung mit den für das physikalische Modell notwendigen Abmaßen zur Handkraftberechnung



Die Lagen 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. Die äußeren Abmaße des Schaufelblattes sowie die Längen der Teilstücke des Schaufelstieles und die Montage/Konstruktionsmaße der Sensorik sind in der Abbildung dargestellt.

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 der Versuchsdurchführung 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 Kap. 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 Firma FTSS

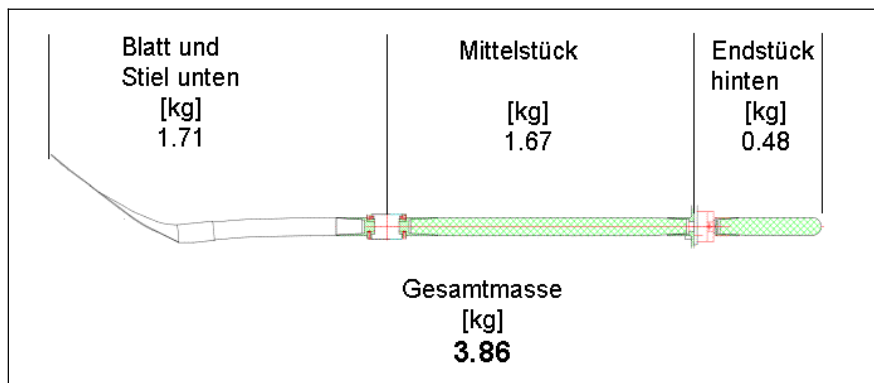
eingesetzt. Alle Kraft- und Momentenkomponenten der Sensoren sind in DMS-Technik gefertigt und wurden mit hochgenauen Brückenmessverstärkern (Firma GEPA) für die digitale Messdatenerfassung angepasst. Alle Kraft- und Momentkomponenten wurden vor der Digitalisierung mit Analog-Antialiasingtiefpässen gefiltert. 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.

Für die Bestimmung der Handkräfte bildet 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 gegenüber dem Wiegen der Einzelteile von rund 0,2 kg, 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

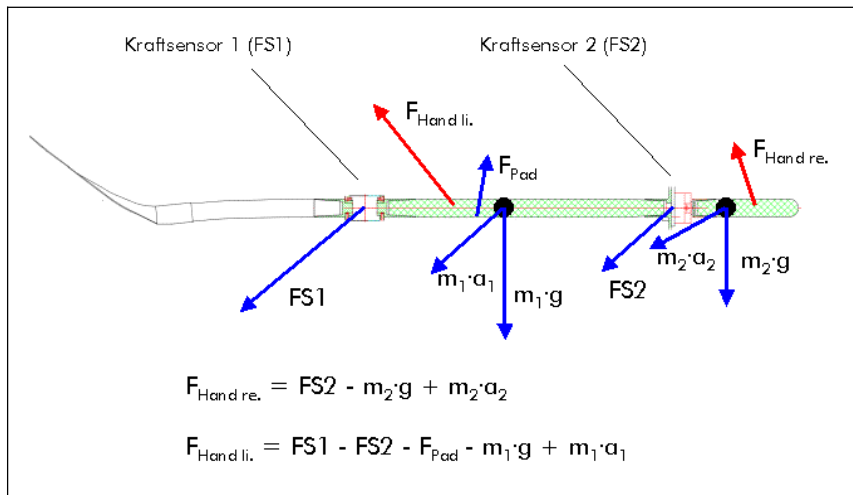


2.7.2 Bestimmung der Handkräfte

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. Dabei bezeichnet m die Masse, a die Beschleunigung für den betreffenden Schaufelteil und g die 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, so dass der Einfluss dieser Drehmomente auf die lumbale Belastung als vernachlässigbar betrachtet werden kann.

Die durchgeführten 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), was nicht zum erwarteten Effekt der Reduzierung der Handkräfte führte und oft noch zusätzlich eine für das Muskel-Skelettsystem sehr ergonomisch ungünstige Krafrichtung nach sich zog. Daher wurde aus der mittleren Krafrichtung der Schaufelkraftsensoren und der Druckkrafrichtung des Oberschenkel-Pads (vgl. Kap. 2.6.3) die Richtung der Oberschenkelauflagekraft im Verhältnis 2:1 neu berechnet. Dadurch konnten zu große Abweichungen der Druckkrafrichtung von den anderen Krafrichtungen vermieden werden und der erwartete Effekt einer Entlastung der Handkräfte besser gewährleistet werden. Eine genauere räumliche

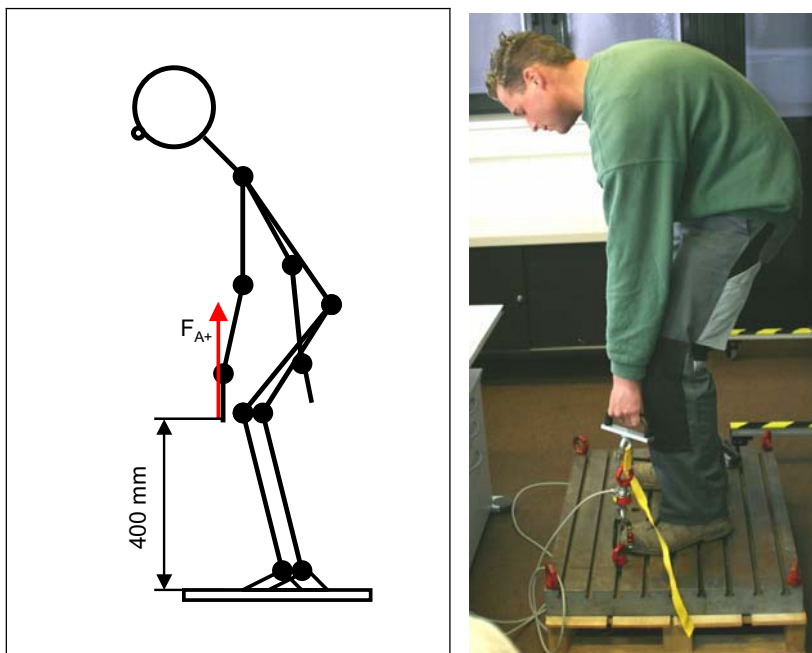
Bestimmung der Auflagekraft war unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht möglich bzw. nicht vertretbar.

2.8 Isometrische Maximalkraftmessungen

Um die Krafftigkeiten der Probanden in einer dem Schaufeln ähnliche Körperhaltung erfassen zu können, wurde gemäß DIN 33411-5 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 mittels 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. Es wurden für beide Seiten je zwei Versuche mit Pausen von je 90 s durchgeführt.

Abbildung 2-15:

Statischer Maximalkrafttest zur Bestimmung der einarmigen Hebekraft (rechts und links) gemäß DIN 33411-5, Tabelle 6 bei 400 mm Griffhöhe



Der Laboraufbau zur Durchführung der statischen Maximalkrafttests ist im rechten Teil der Abbildung 2-15 dargestellt. Dabei stand der Proband 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. 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 durch die Versuchsvorbereitungen eine Pause von ca. 30 Minuten entstand. Insofern bestand genügend Zeit für die Versuchsperson, um sich vor den Schaufelversuchen vollständig zu erholen.

2.9 Messdatenerfassung und Auswertung

Die Messwerterfassung erfolgte zentral über das VICON-System; d.h. die kinematischen Größen (Markerpositionen) und alle dynamischen Größen (Kraftsignale von Schaufel, Oberschenkel-Pad und Schüttgutwaage) wurden zeitsynchron 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.

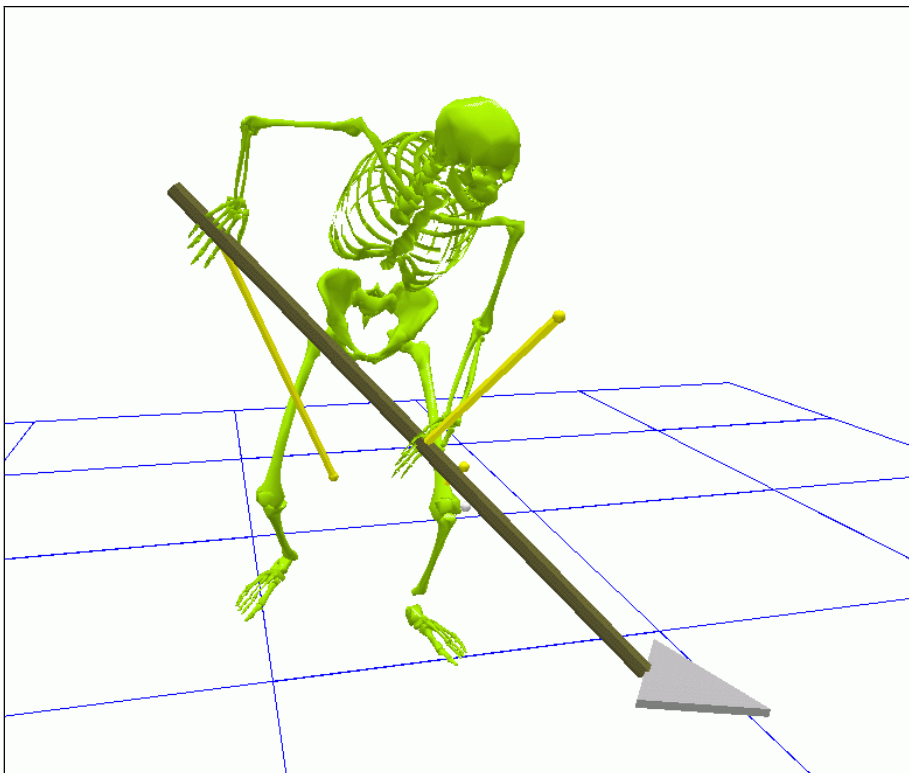
Vor der weiteren Datenverarbeitung wurden die Markerkoordinaten mit einem Spline-Filter (5. Ordg.) und die analogen Signale mit einem Butterworth-Tiefpassfilter (Schaufelsensoren und Pad 10 Hz Grenzfrequenz, Schüttgutwaage 1 Hz Grenzfrequenz) gefiltert.

Die biomechanische Modellierung des Muskel-Skelett-Systems zur Bestimmung der Gelenkmittelpunkte wurde mit dem Programm BodyBuilder (VICON) auf 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:

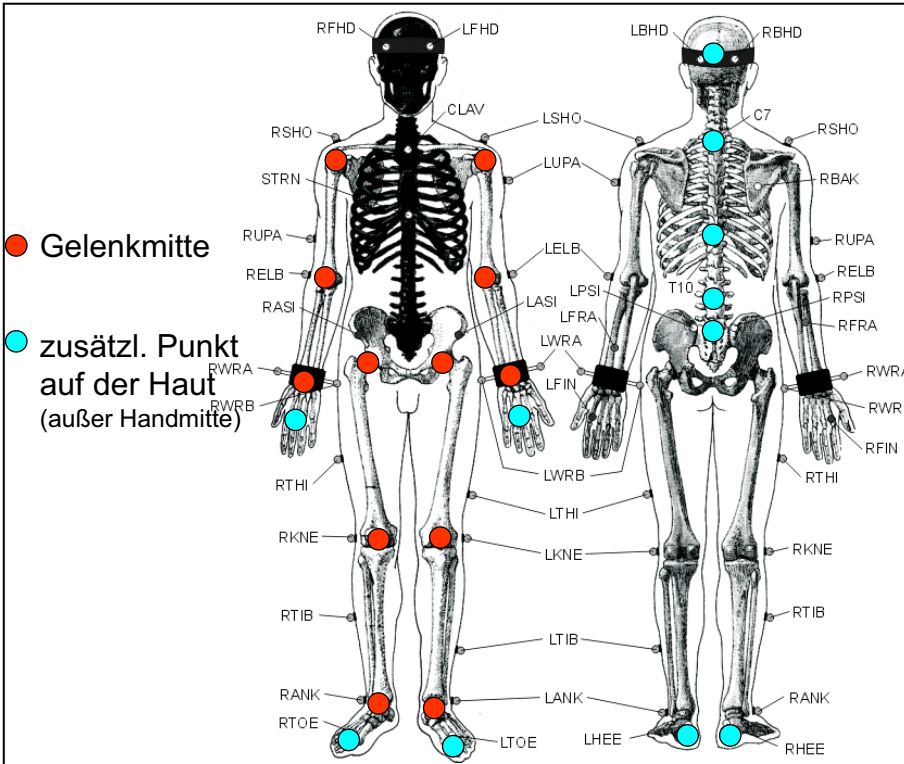
Biomechanisches Modell zur Bestimmung des Gelenkmoments an der Lendenwirbelsäule (L5/S1) aus den Aktionskräften der Hände (gelbe Pfeile) und der Körperhaltung



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 Dortmunder Modell übermittelt (Kap. 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 Dortmunder Modell.

Abbildung 2-17:

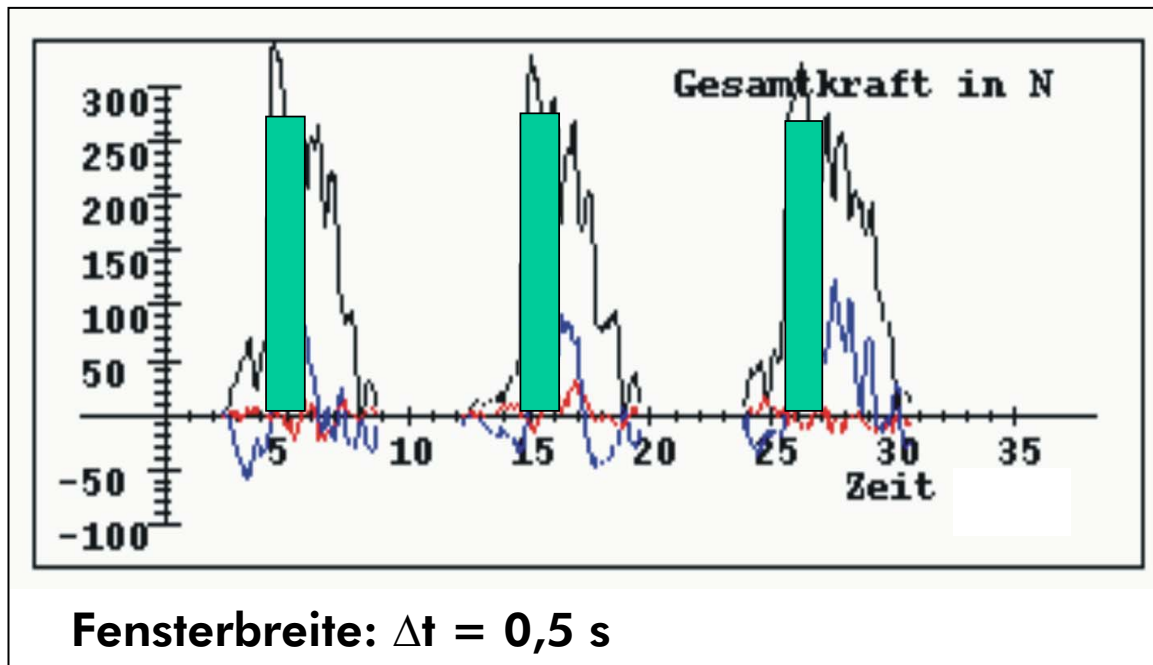
Referenzpunkte zur Übertragung der Bewegungsdaten aus dem Vicon-Modell in das Dortmunder-Modell



Um einerseits der Dynamik des Schaufelns Rechnung zu tragen und andererseits aber nicht nur einen evtl. 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).

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

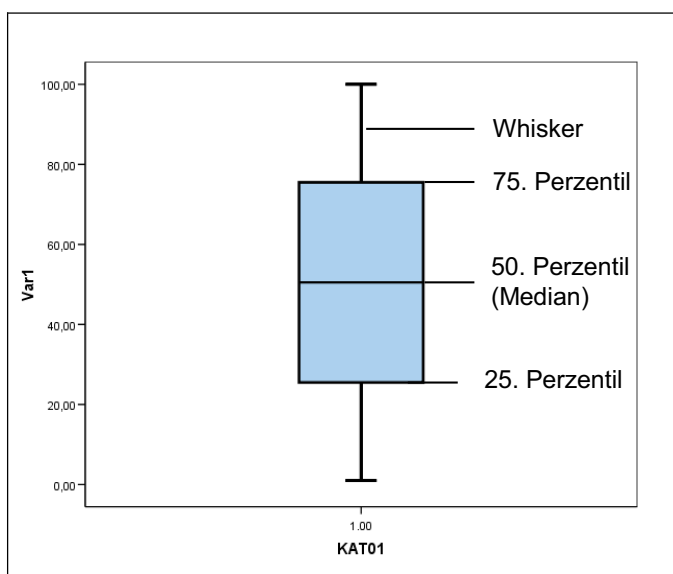


Sämtliche Daten der Versuchsreihe wurden in eine Datenbank (MS ACCESSS 2000) überführt, um für die weiteren statistischen Analysen einen effektiven Datenzugriff für die überaus großen Datenmengen zu gewährleisten. Die statistischen Analysen der Daten erfolgten mit dem Programm SPSS (Vers. 14). Zur Beschreibung der Verteilungen der Ergebnisparameter wurden so genannte Box-Plots erstellt. In einem Box-Plot 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 geschätzt, ob sie als Extremwerte oder Ausreißer charakterisiert werden müssen. Bei den nachfolgend gezeigten Darstellungen wurden zur größeren Klarheit die identifizierten Extremwerte und Ausreißer ausgeblendet; diese weisen i.d.R. nur auf

Sonderfälle bei den Versuchen hin, die für die Ergebnisbewertung keine Bedeutung haben. Die Eckwerte der verbliebenen und zur Wertegruppe gehörig erkannten Einzelwerte sind im Box-Plot durch Whiskers gekennzeichnet; die Whiskers 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 die Extremwerte und Ausreißer mit einbeziehen, sondern zeigen ggfs. eine geringere Streuung an.

Abbildung 2-19:

Box-Plot zur Beschreibung der Verteilung eines Ergebnisparameters



2.10 Erläuterungen zur Datenerhebung, zur Datenstruktur und zum Datentransfer

Aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungsschwerpunkte in diesem Forschungsvorhaben wurden insbesondere die messtechnischen Erhebungen zu Körperhaltungen und Aktionskräften sowie die darauf aufbauenden Berechnungen von LWS-bezogenen Beuge- und Torsionsmomenten beim Schaufeln im BGIA durchgeführt, während die auf den Messergebnissen basierenden Berechnungen zur Quantifizierung der Bandscheiben-Druckkräfte an der Lendenwirbelsäule im IfADo erfolgten. Dieser kombinatorische Ansatz wurde – nach primären Kompatibilitätsprüfungen in Untersuchungen zum Lastentransport mit einer Schubkarre („Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 2“: Jäger et al. 2001) - routinemäßig bisher nur bei

Untersuchungen zur Wirbelsäulenbelastung von Flugbegleitpersonal beim Bewegen von Trolleys im Flugzeuggang eingesetzt (Glitsch et al. 2004, Sawatzki und Jäger 2006), so dass die prinzipielle Vorgehensweise und einige Kompatibilitätsanpassungen übernommen werden konnten.

Allerdings unterscheidet sich das seinerzeit eingesetzte, am Körper des Probanden getragene Körperhaltungserfassungssystem CUELA (Ellegast 1998) grundlegend von dem hier genutzten, im Labor stationär installierten VICON-System: Bei letzterem werden Raumkoordinaten der Marker, die vorrangig an den Gelenken befestigt waren, erhoben; Körperhaltungsinformationen liegen dabei in Form von xyz-Wertetripeln 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 erfolgt die Körperhaltungsbeschreibung beim DORTMUNDER zwar auch winkelbasiert, jedoch anhand von Winkeln der Extremitäten gegenüber einem raumfesten Koordinatensystem sowie körperinternen Relativwinkeln zur Kennzeichnung von Wirbelsäulenkrümmungen und –torsionen. Auch wenn sich diese 3 Ansätze prinzipiell ineinander überführen lassen und sich naturgemäß beide BGIA-genutzten Datenformen in die davon unterschiedliche 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 der Trolleys charakteristisch unterscheiden: Letzteres erfolgt 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, wobei zudem die Körpersegmentstellungen bezüglich der 3 Raumrichtungen beliebig orientiert sein und während eines Schaufelvorgangs in den 8 Raumoktanten beliebig variieren können. (In einem räumlichen kartesischen Koordinatensystem ergeben Kombinationen positiver oder negativer x-, y- oder z-

Koordinatenwerte insgesamt 8 „Teilräume“ gleicher Vorzeichenkombinationen, sog. Raumoktanten.)

2.10.1 Prinzipielle Dateienstrukturen

Insgesamt waren die im BGIA erhobenen Daten zur Körperhaltung und zu Aktionskräften sowohl bezüglich der erfassten Kenngrößen (s.a. Abb. 2-13) als auch hinsichtlich der Formatierung dahingehend 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 dem BGIA und dem IfADo wurden Dateien mit einer ASCII-Datensatzstruktur verwendet, aus denen die DORTMUNDER-spezifischen, d.h. die 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 auch bezüglich Körpergröße und -gewicht, zu Zeit- und Lasteigenschaften sowie zur Körperhaltung. Aufgrund der vereinbarten Vorgehensweise, auf die im DORTMUNDER zwar implementierte, allerdings hier nicht sinnvolle Bewegungsprognose zu verzichten (s. Kap. 2.2), wurde für jeden Zeitpunkt während eines Vorganges 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“: Jäger et al. 1998; Flugbegleiterstudie: Glitsch et al. 2004), die letztendlich eine teil-automatisierte Dateneingabe für die Situationssequenzen während einer Schaufelvorgangsfolge ermöglichte.

In der Summe ergeben sich daraus bei 60 „Belastungsfällen“ (5 Probanden x 12 Bedingungen) etwa 420 Tsd. Eingabedateien, ebenso viele Ergebnis-Ausgabedateien („Datendateien“, „DAT-Dateien“) sowie auch 420 Tsd. 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 3-dimensionalen 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 der Definierung zusätzlicher Referenzpunkte am Rumpf zur eindeutigen Beschreibung der Orientierung des Beckens und der Rumpfkrümmungen. Die Anzahl der Zeilen in der Transferdatei entsprach der Anzahl der „Messzeitpunkte“, so dass 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 DORTMUNDER“ 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, 2 Winkel zu Koordinatenachse bzw. -ebene; s. dazu Jäger et al. 2003).

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, -cosinus) 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 2 Gelenkkoordinaten erforderlich. Dieser Sachverhalt galt vor allem in Hinsicht auf den vielfach segmentierten Rumpf, bei dem beim Schaufeln im Allgemeinen Überlagerungen von sagittalen und lateralen Wirbelsäulenkrümmungen sowie Torsionen vorliegen 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. nach 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, so dass - 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 wurden bei den Schaufelmessungen von fünf Probanden 1195 einzelne Schaufelvorgänge ausgeführt. Im Verlauf der Datensichtung wurden einzelne Schaufelvorgänge ausgeschlossen, die entweder gegen die Versuchsanforderungen verstießen (z. B. geforderte Wurfhöhe nicht erreicht oder Abstützung des Schaufelstiels außerhalb des Oberschenkelmess-Pads) oder als sehr atypisch eingestuft wurden (z. B. Hängen bleiben mit Schaufel an den Schüttgutwanne). Letztlich verblieben 1168 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	20
1	3	Sand weit	20
1	4	Beton eben kurz	20
1	5	Beton nach oben	19
1	6	Kies eben kurz	20
1	7	Kies nach oben	21
1	8	Schotter kurz	18
1	9	Schotter hoch	20
1	10	Erde kurz	20
1	11	Erde nach oben	18
1	12	Erde weit	19
2	1	Sand eben kurz	18
2	2	Sand nach oben	20
2	3	Sand weit	19
2	4	Beton eben kurz	20
2	5	Beton nach oben	20
2	6	Kies eben kurz	20
2	7	Kies nach oben	20
2	8	Schotter kurz	19
2	9	Schotter hoch	20
2	10	Erde kurz	19
2	11	Erde nach oben	20
2	12	Erde weit	19
3	1	Sand eben kurz	20
3	2	Sand nach oben	20
3	3	Sand weit	20
3	4	Beton eben kurz	20
3	5	Beton nach oben	20
3	6	Kies eben kurz	20

VP-Nr	Versuchs-Nr	Beschreibung	Anzahl gültiger Schaufelvorgänge
3	7	Kies nach oben	20
3	8	Schotter kurz	20
3	9	Schotter hoch	20
3	10	Erde kurz	20
3	11	Erde nach oben	20
3	12	Erde weit	20
4	1	Sand eben kurz	20
4	2	Sand nach oben	20
4	3	Sand weit	20
4	4	Beton eben kurz	19
4	5	Beton nach oben	19
4	6	Kies eben kurz	20
4	7	Kies nach oben	20
4	8	Schotter kurz	20
4	9	Schotter hoch	19
4	10	Erde kurz	20
4	11	Erde nach oben	20
4	12	Erde weit	20
5	1	Sand eben kurz	20
5	2	Sand nach oben	20
5	3	Sand weit	19
5	4	Beton eben kurz	20
5	5	Beton nach oben	20
5	6	Kies eben kurz	20
5	7	Kies nach oben	19
5	8	Schotter kurz	14
5	9	Schotter hoch	20
5	10	Erde kurz	15
5	11	Erde nach oben	18
Gesamt			1168

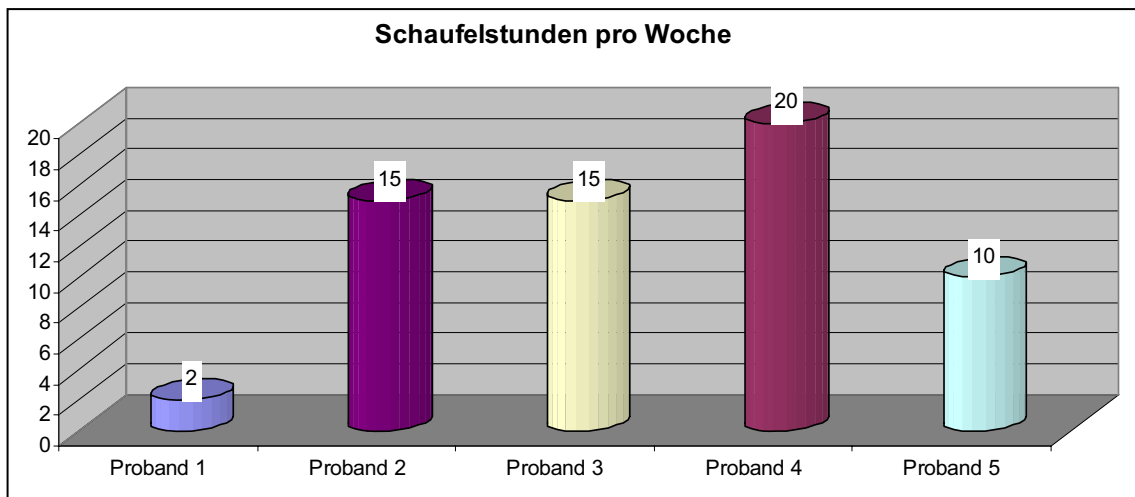
3.1 Ergebnisse der Befragung

Die Auswertung der Fragebögen der fünf Probanden ergab für den Umfang der Schaufelstunden pro Woche Werte zwischen 2 und 20 h (Abbildung 3-1). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass je nach Qualifikation und Branche, die Schaufeltätigkeiten sehr unterschiedlich sein können. So stellt das Schaufeln von Sand für einen Estrichlegerhelfer (Proband 3) quasi seine Hauptaufgabe dar. Ferner hat die bis heute immer noch fortschreitende Mechanisierung, (z.B. Einsatz von Minibagger auf engstem Raum) die Umfänge von Schaufeltätigkeiten auch in den letzten Jahren noch weiter reduziert. So können z. B. Minibagger auch auf engsten Räumen eingesetzt werden. Schließlich sind noch nicht näher quantifizierte Pausenzeiten zwischen einzelnen Schaufelphasen zu beachten. Der Estrichlegerhelfer arbeitet i.d.R. im Akkord mit einer

hohen Schaufelfrequenz, wogegen Schaufeltätigkeiten in Verbindung mit Maschinenarbeit zur Erledigung von Restarbeiten häufiger und evtl. auch von längeren Unterbrechungen geprägt sein können.

Abbildung 3-1:

Angaben der Probanden zu ihren Schaufelstunden pro Woche



Bei den Angaben zu dem Schüttgut, das die höchste subjektive Belastung verursacht, lag Schotter mit 3 von 4 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:

Schüttgut mit der höchsten Belastungsempfindung

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:

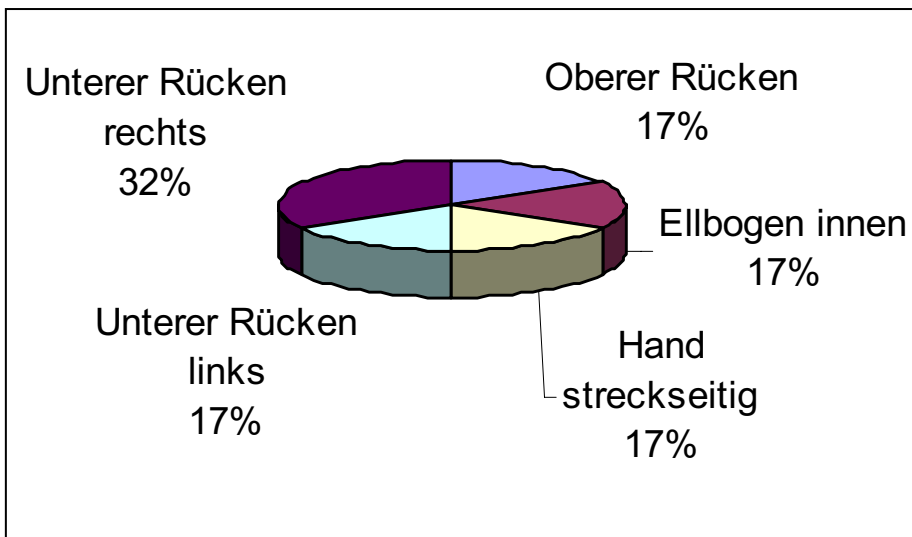
Das am häufigsten zu schaufelnde Schüttgut der Probanden

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

Als Körperregion mit der höchsten Belastungsempfindung wurde mit 4 Nennungen der untere Rücken am häufigsten genannt. Mit jeweils einer Nennung wurden oberer Rücken, Ellbogen und Hand aufgeführt.

Abbildung 3-2:

Angaben der Probanden zu der als am höchsten belasteten Körperregion (n = 12 Nennungen)



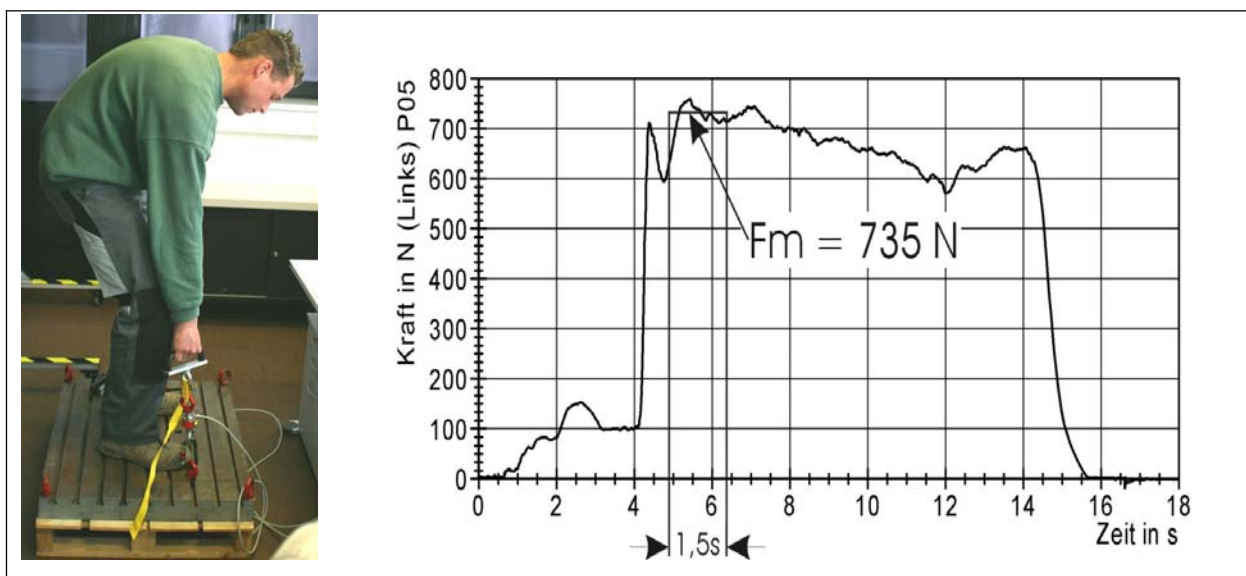
Als Einschätzung der körperlichen Beanspruchung durch Schaufeln im Vergleich zu den übrigen beruflichen Belastungen gaben alle Probanden einheitlich ein mittleres Belastungsniveau der Stufe 3 an. Diese vielleicht erstaunliche Einschätzung der Probanden, ist am Ende (Kap. 3.10) bei der Beurteilung der lumbalen Wirbelsäulenbelastung beim Schaufeln 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. In Abbildung 3-3 ist die Aufzeichnung der linken Handkraft von Proband 5 dargestellt. Für das dargestellte Kraftsignal wurde damit 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 dann der Mittelwert aus den 4 Einzelwerten der Maximalkrafttests berechnet.

Abbildung 3-3:

Proband beim Maximalkrafttest zur Bestimmung der einarmigen Hebekraft (links).
Messmitschrieb und gleitendes Mittelwertverfahren zur Bestimmung der Maximalkraft(rechts)



Die isometrischen Maximalkraftwerte aller Probanden lagen im Bereich von 554 bis 916 N mit einem Mittelwert von 752 N (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4:

Ergebnisse des einarmigen Hebekrafttests gemäß DIN 33411-5

VP-Nr	Linker Arm [N]	Rechter Arm [N]	Mittelwert [N]
1	916	898	907.0
2	554	581	567.5
3	758	748	753.0
4	747	839	793.0
5	731	749	740.0
		MW	752.1
		SD	122.4

Im Vergleich zu den Probandenkollektiven 2 und 3 aus der 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 des 50. Perzentils des männlichen Vergleichskollektivs. Die Kraftwerte von Proband 2 müssen aufgrund seines Alters von 59 Jahren relativiert werden. Zu den Probandenkollektiven 2 und 3 der 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 (♀ n=1113, Durchschnittsalter 33 Jahre) und 3 (♂ n=1967, Durchschnittsalter 34 Jahre) nach DIN 33411-5 für den einarmigen Hebekrafttest

Krafrichtung	Kraftperzentile	Kraftwerte N Geschlecht	
		weiblich	männlich
+ A (vertikal nach oben)	5.	271	560
	10.	319	634
	15.	350	671
	50.	452	829
	95.	605	1051

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

3.3 Vergleichende Analyse der Kinematik unterschiedlicher Schaufeltechniken

Bei den Schaufelmessungen konnten drei prinzipielle unterschiedliche Schaufeltechniken beobachtet werden. Die auffallendste Technik zeigte der Estrichleger (P 3). Er umgriff den Schaufelstiel mit beiden Händen im Ristgriff (Daumen zur Mitte hin) und hielt sowohl die Arme wie auch die Beine während des gesamten Schaufelvorgangs weitgehend gestreckt (Abbildung 3-4). Die erforderliche Flexionsbewegung erfolgte vorrangig aus dem Hüftgelenk und der Wirbelsäule.

Abbildung 3-4:

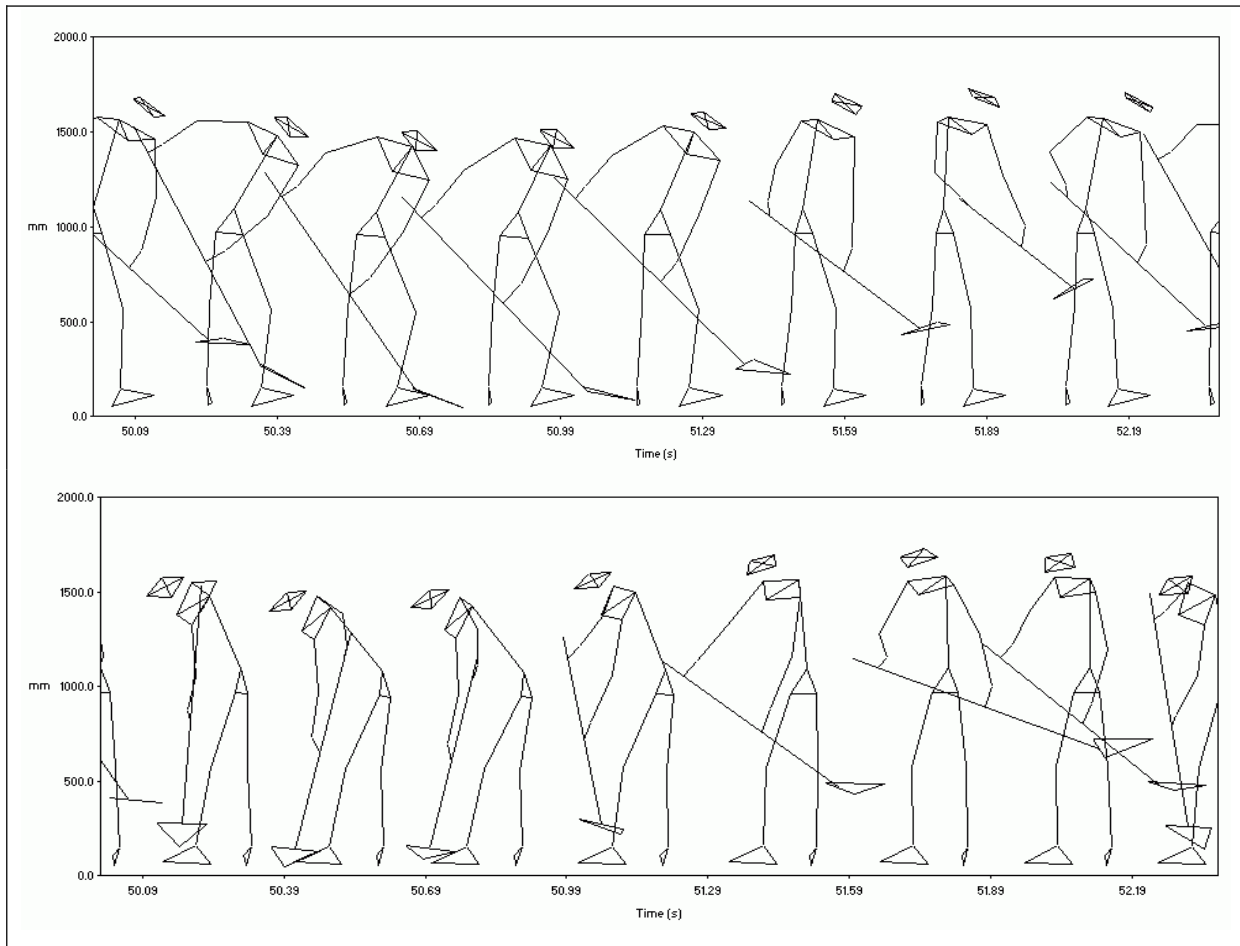
Schaufeltechnik des Estrichlegers (P 3); links: Einstich; rechts: Abwurf



Die Technik war von einem starken Rumpfeinsatz in Form von Torsions- und Rotationsbewegungen geprägt. Die Schaufelführung erfolgte in einer flüssigen halbkreisförmigen Bewegung ohne Umkehrpunkte oder Pausen (Abbildung 3-5). Diese Schaufeltechnik wird häufig von Estrichlegerhelfern angewandt und scheint sich unter arbeitsökonomischen Aspekten bewährt zu haben. Wobei in der Literatur bislang keine Hinweise auf arbeitswissenschaftliche Untersuchungen dieser Schaufeltechnik zu finden waren. Diese Schaufeltechnik fiel auch bei den im folgenden beschriebenen Ergebnisparametern immer wieder durch Besonderheiten auf.

Abbildung 3-5:

Kinegramme eines Schaufelvorgangs des Estrichlegers (P 3) 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 Abwurfbewegung richtete sich nach vorne („vorm Bauch weg“).

Abbildung 3-6:

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

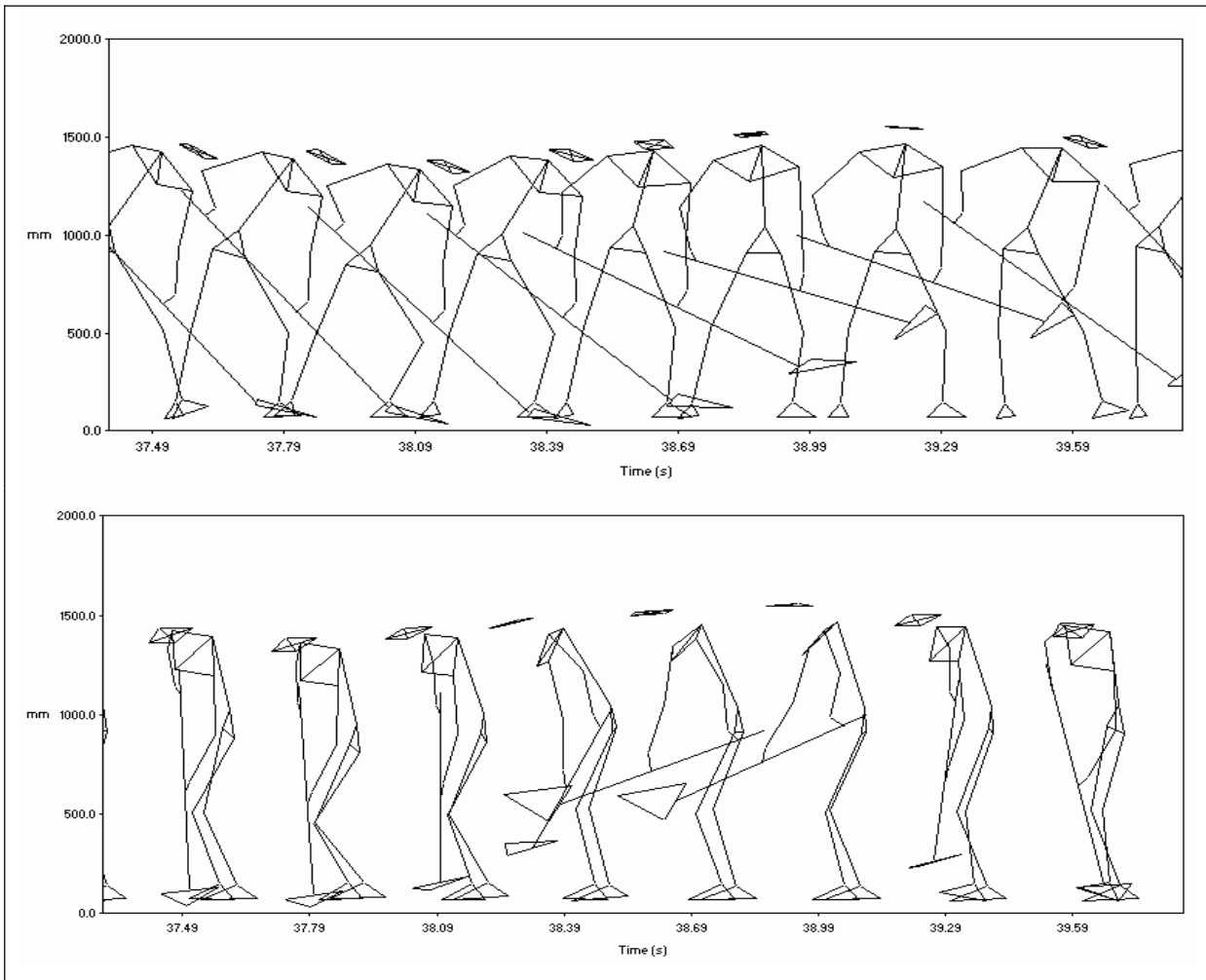


Die Schaufelblattbewegung verlief bei dieser Technik in der Einstichphase eher geradlinig in das Schüttgut hinein (Abbildung 3-7). Das blattnahe Kniegelenk war in dieser Phase etwas mehr gebeugt als bei der Technik des Estrichlegers.

Demgegenüber war die Rumpfflexion in der Sagittalebene weniger ausgeprägt (Abbildung 3-7, unten).

Abbildung 3-7:

Kinegramme der Schaufeltechnik „nach vorne“ (P 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“) (Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9). Sicher werden an erster Stelle die situativen 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.

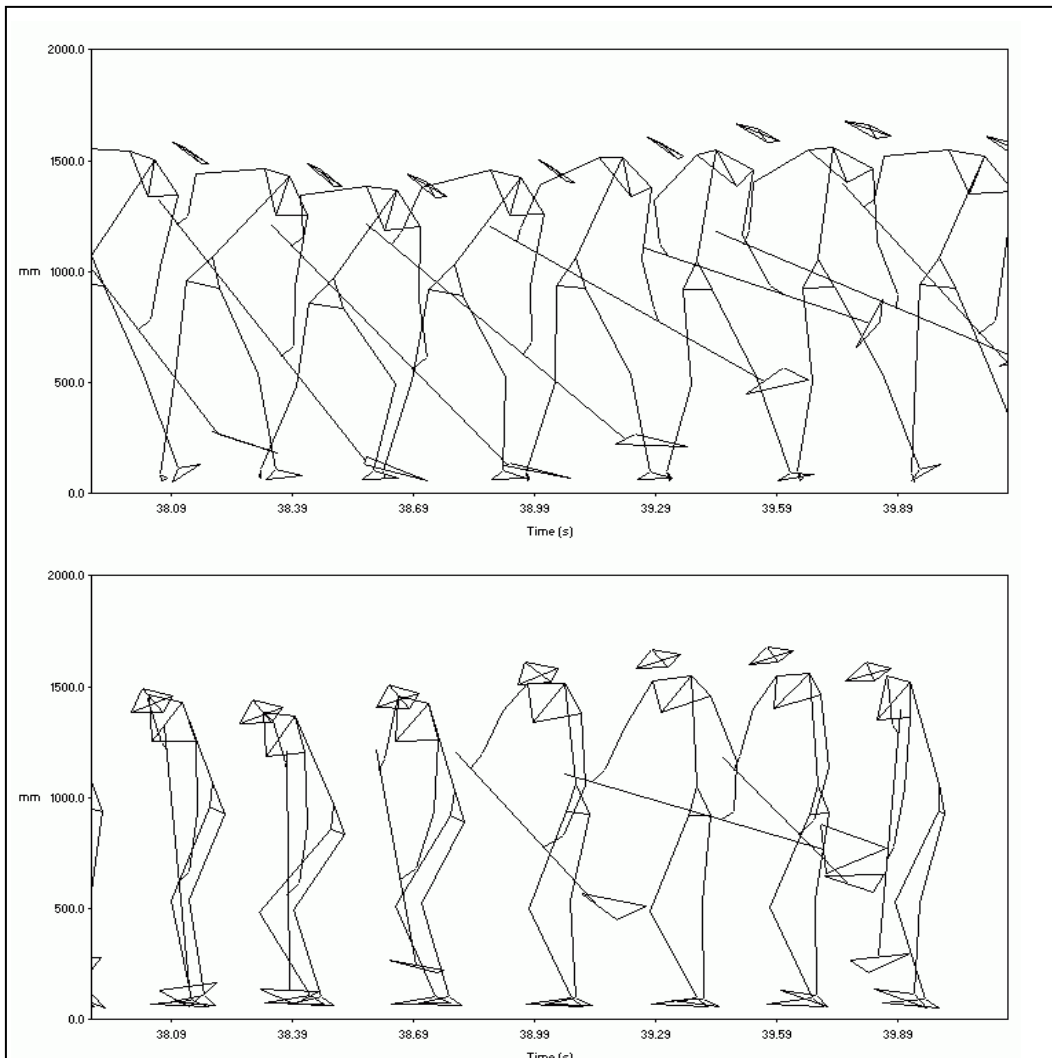
Abbildung 3-8:

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



Abbildung 3-9:

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



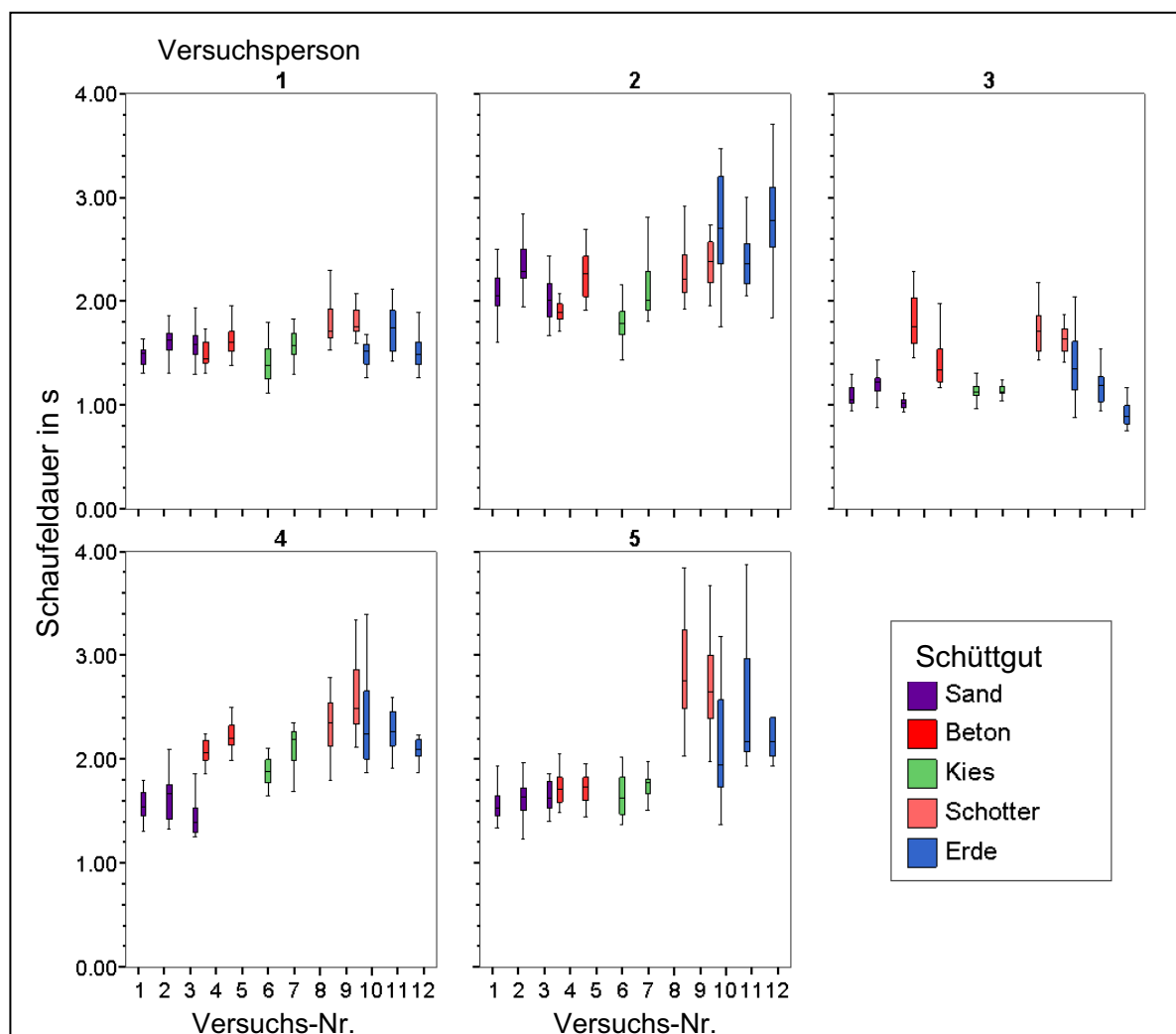
3.4 Aktionsdauer beim Schaufeln

Die Aktionsdauer für einen Schaufelvorgang wurde durch das Intervall von Einstich der Schaufel bis zum Ende des Abwurfs definiert. Die ermittelte Aktionsdauer der fünf Probanden beim Schaufeln lagen im Mittel bei rund 1,9 s und variierten zwischen 0,75 und 5,35 s. 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 Estrichleger (P 3) 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 (P 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.

Abbildung 3-10:

Boxplots der Aktionsdauern der Schaufelvorgänge aller Probanden in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchskonstellation



Tendenziell führte das Schaufeln von Schotter und Erde bei Probanden 2, 4 und 5 zu längeren Aktionsdauern und größeren Streuungen. Dies kann durch das erschwerte Einstechen in diese Schüttgüter und der damit verbundenen längeren 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 Basis der Probandenmittelwerte ergaben sich für Versuchsperson 1 und 3 mittlere Aktionsdauer von 1,60 s bzw. 1,31 s und für die restlichen Werte von über 2,00 s, so dass hier zwei Gruppen – mit hohem Arbeitstempo und normalem Arbeitstempo – unterschieden werden können (Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6:

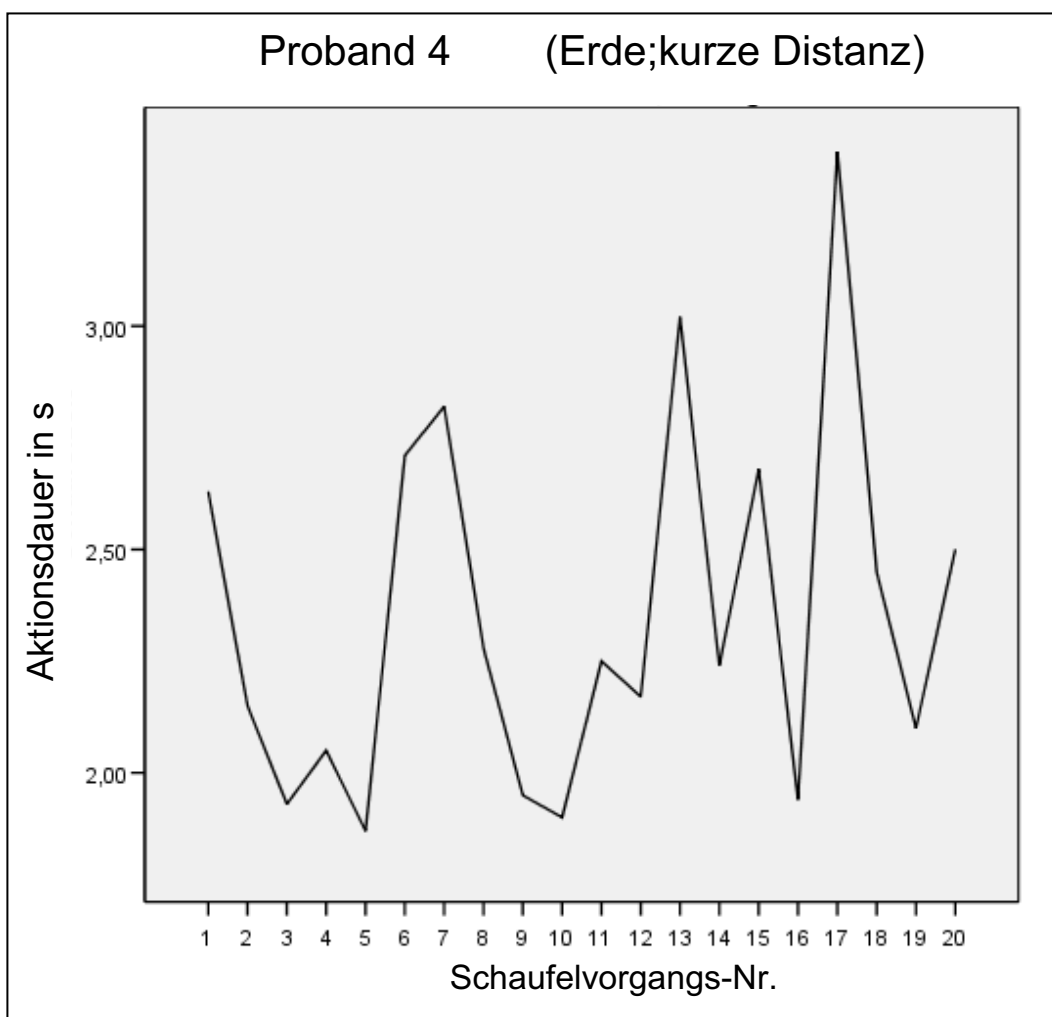
Mittlere Aktionsdauer beim Schaufeln für alle Probanden über alle 12 Versuchsbedingungen

Versuchsperson	Schaufeldauer in s		
	Mittelwert	Stdabw.	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	1168

Eine Ermüdungstendenz in Form von 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).

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 (Standardabweichung 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 5 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 des Schüttguts und der

Aufgabenstellung erscheint auf Grundlage der vorliegenden Messungen nicht erforderlich.

Abbildung 3-12:

Boxplots der Zyklusdauer in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchskonstellation für alle Probanden

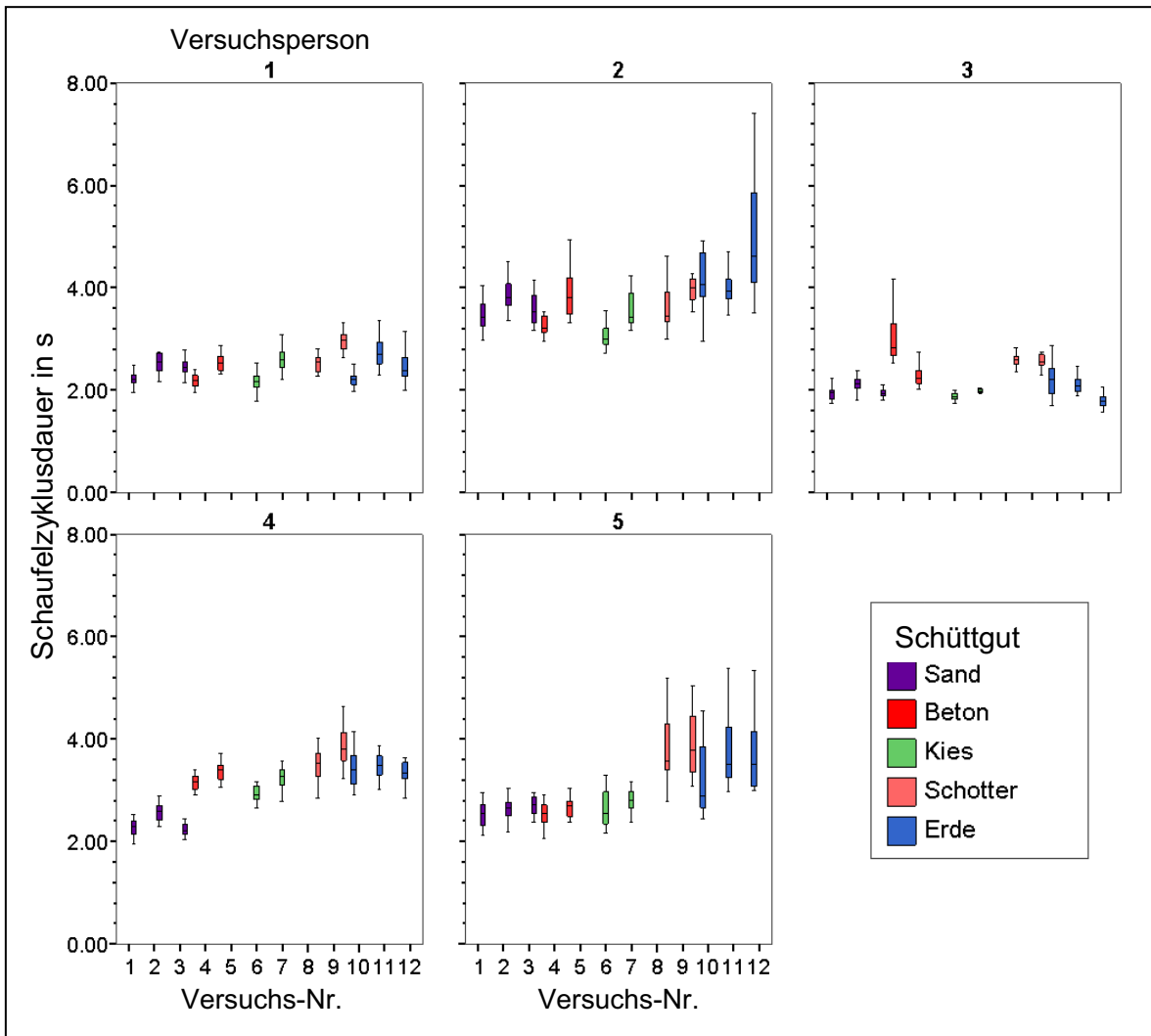


Tabelle 3-7:

Mittlere Zyklusdauer beim Schaufeln für alle Probanden über alle 12
Versuchsbedingungen

Versuchsperson	Zyklusdauer in s		
	Mittelwert	Stdabw.	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	1168

3.5 Schüttgutmassen beim Schaufeln

Die Schüttgutmasse je Schaufelvorgang wurde über die Wägeeinrichtung unter der Wanne, in die das Schüttgut geschaufelt werden musste, bestimmt (s. Kap. 2.6.1). Die Schüttgutmasse wird im Wesentlichen durch die Materialdichte und den Schüttgutwinkel limitiert. Die Schaufelexperimente ergaben einen Gruppenmittelwert von 7,7 kg mit einer Standardabweichung von 1,65 kg (Tabelle 3-8). Die Spannweite reichte von 1,19 kg bis 13,57 kg. Die Massen variierten zwar in Abhängigkeit des Schüttgutes 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.

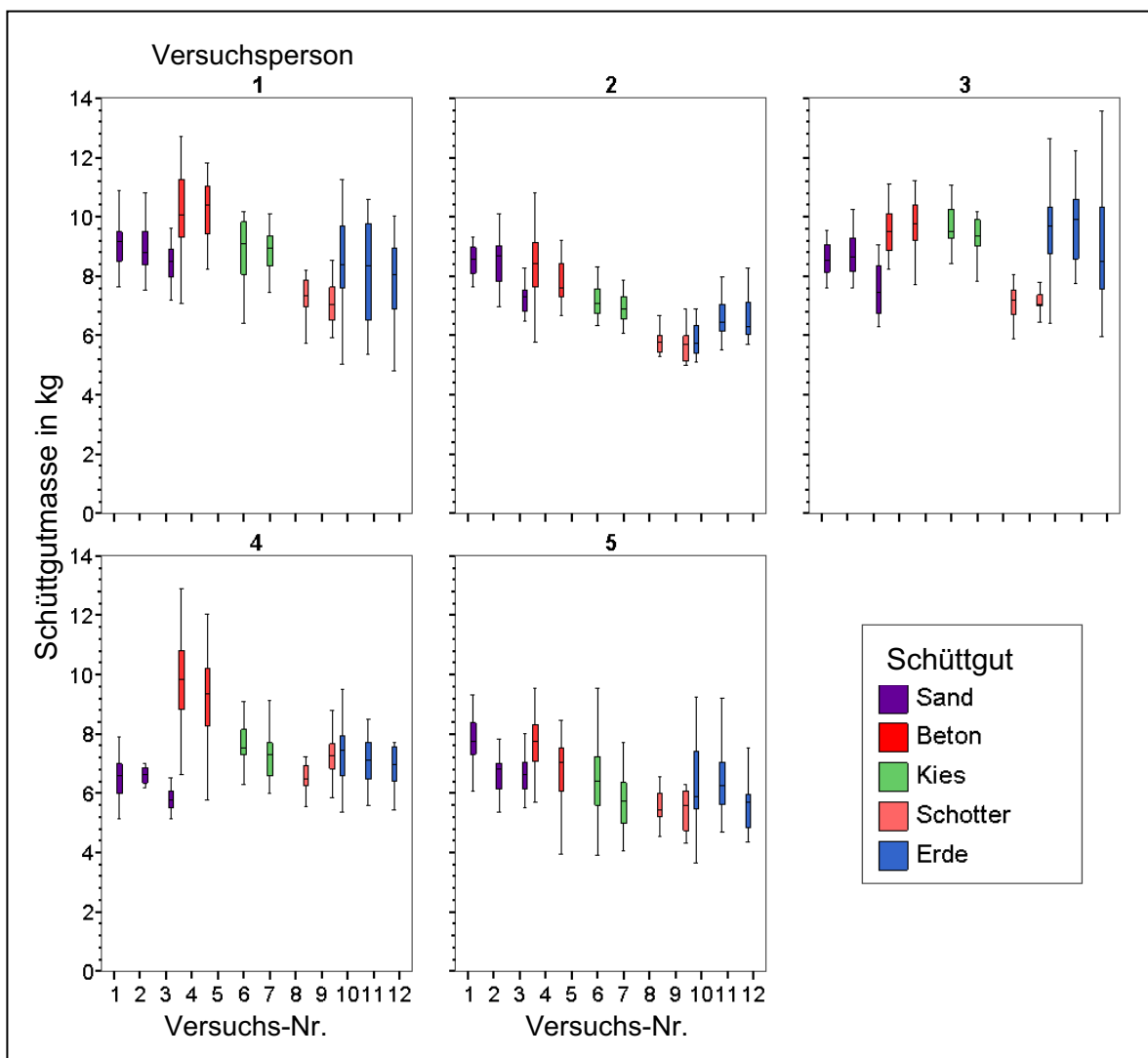
Tabelle 3-8:

Mittlere Schüttgutmasse je Schaufelvorgang für alle Probanden über alle 12
Versuchsbedingungen

Versuchsperson	Schüttgutmasse in kg		
	Mittelwert	Stdabw.	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	1168

Abbildung 3-13:

Boxplots der Schüttgutmasse je Schaufelvorgang in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchskonstellation für alle Probanden



Bemerkenswert erscheint an dieser Stelle, dass der Estrichleger (Proband 3) 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.

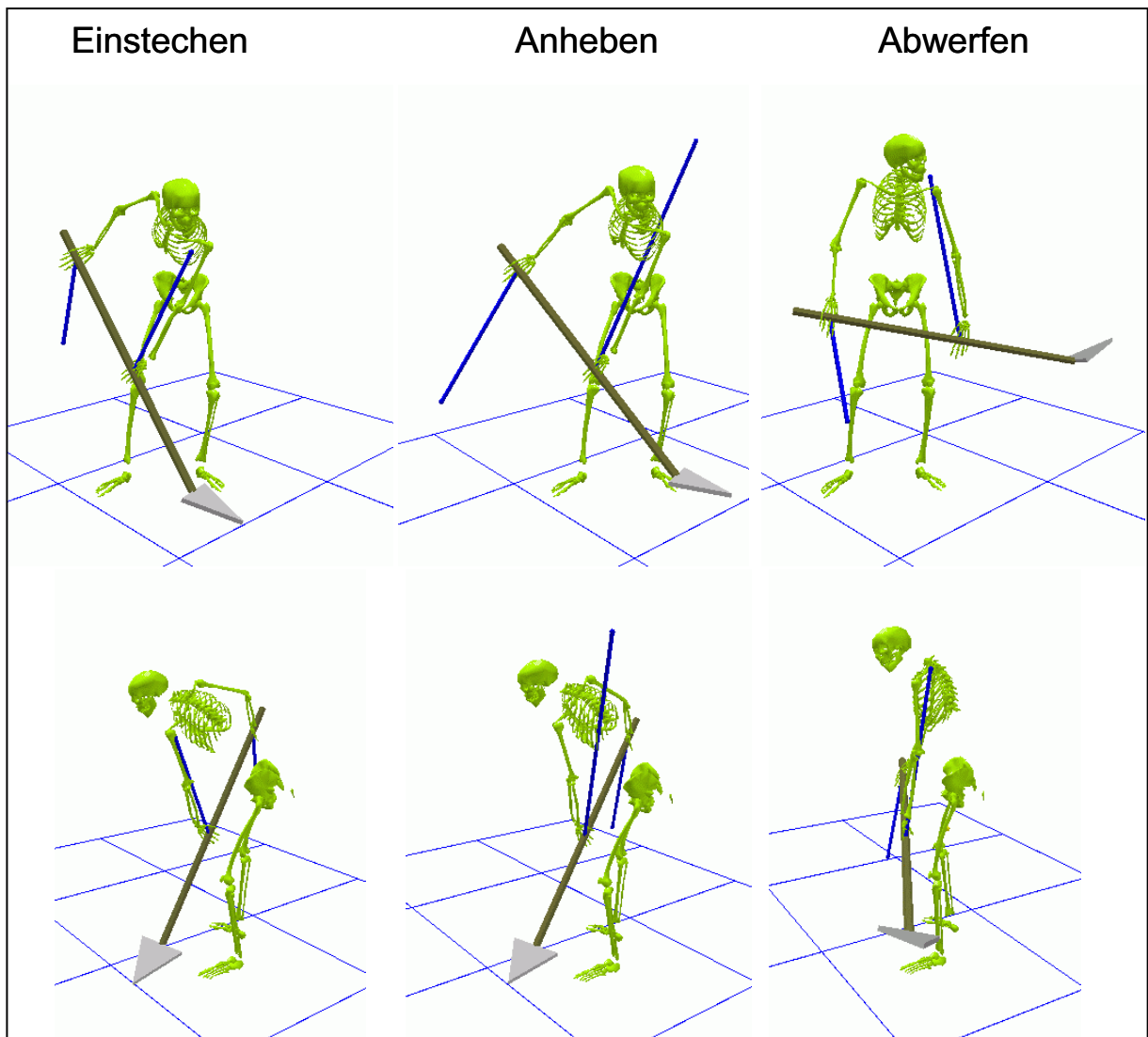
3.6 Vergleichende Analyse der Kinetik unterschiedlicher Schaufeltechniken

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

Nachfolgend sind für Proband 3, 5 und 1 als Kinetogramm die Körperhaltung und die dabei zugehörigen Aktionskräfte der Hände sowie ggfs. auch des Oberschenkels als Bildreihe aus zwei Perspektiven dargestellt (Abbildung 3-14, Abbildung 3-18 und Abbildung 3-22). 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 (i.S. v. Nettomuskelkraftmomenten in Segmentkoordinaten) dargestellt (Abbildung 3-15, Abbildung 3-16, Abbildung 3-17, Abbildung 3-19, Abbildung 3-20, Abbildung 3-21, Abbildung 3-23, Abbildung 3-24 und Abbildung 3-25). Die Zeitverläufe sind über alle 19 Schaufelzyklen (Einstich - Einstich) eines jeden Versuchs gemittelt und bzgl. Schaufelzykluszeit in Prozent dargestellt.

Abbildung 3-14:

Bildreihe der dreidimensionalen Belastungssituation von Proband 3 – Estrichleger – beim Schaufeln von Sand - ebenerdig, kurze Distanz – aus der Frontal- (oben) und Seitansicht (unten)



Die Schaufeltechnik von Proband 3 – Estrichleger – zeichnete sich in erste Linie dadurch aus, dass der Oberschenkel in keiner Phase des Schaufelvorgangs als unterstützendes Widerlager eingesetzt wurde (Abbildung 3-14, Abbildung 3-15, Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17). Hierdurch waren schon beim Einstecken relativ hohe Kräfte der blattnahen Hand zu verzeichnen.

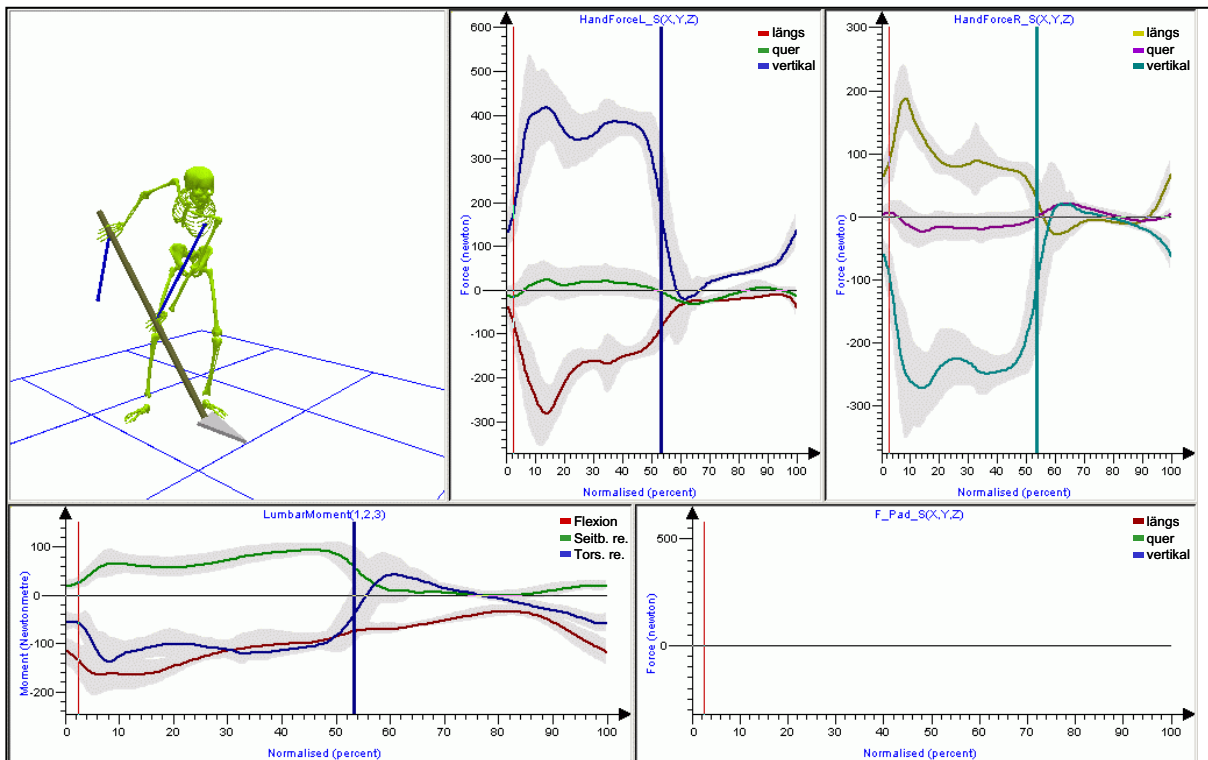
Abbildung 3-15:

Dreidimensionale Belastungssituation beim Einstich in Sand von Proband 3

(Estrichleger) - ebenerdig, kurze Distanz. Kurvenläufe: Mittelwert u.

Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter

Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



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 (Zug in Richtung Schulter) und der blattferne Arm eine Druckbelastung (nach schräg nach unten).

Proband 3 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.

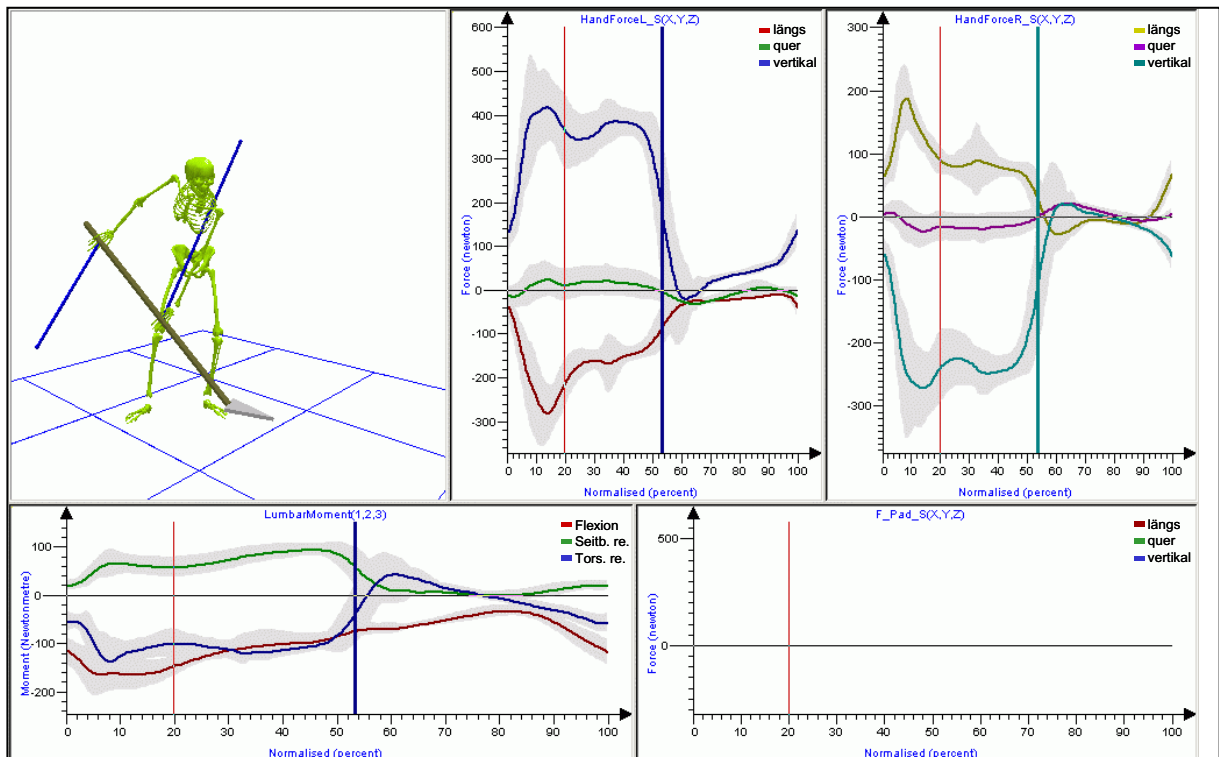
Abbildung 3-16:

Dreidimensionale Belastungssituation beim Anheben von Sand von Proband 3

(Estrichleger) - ebenerdig, kurze Distanz. Kurvenläufe: Mittelwert u.

Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter

Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



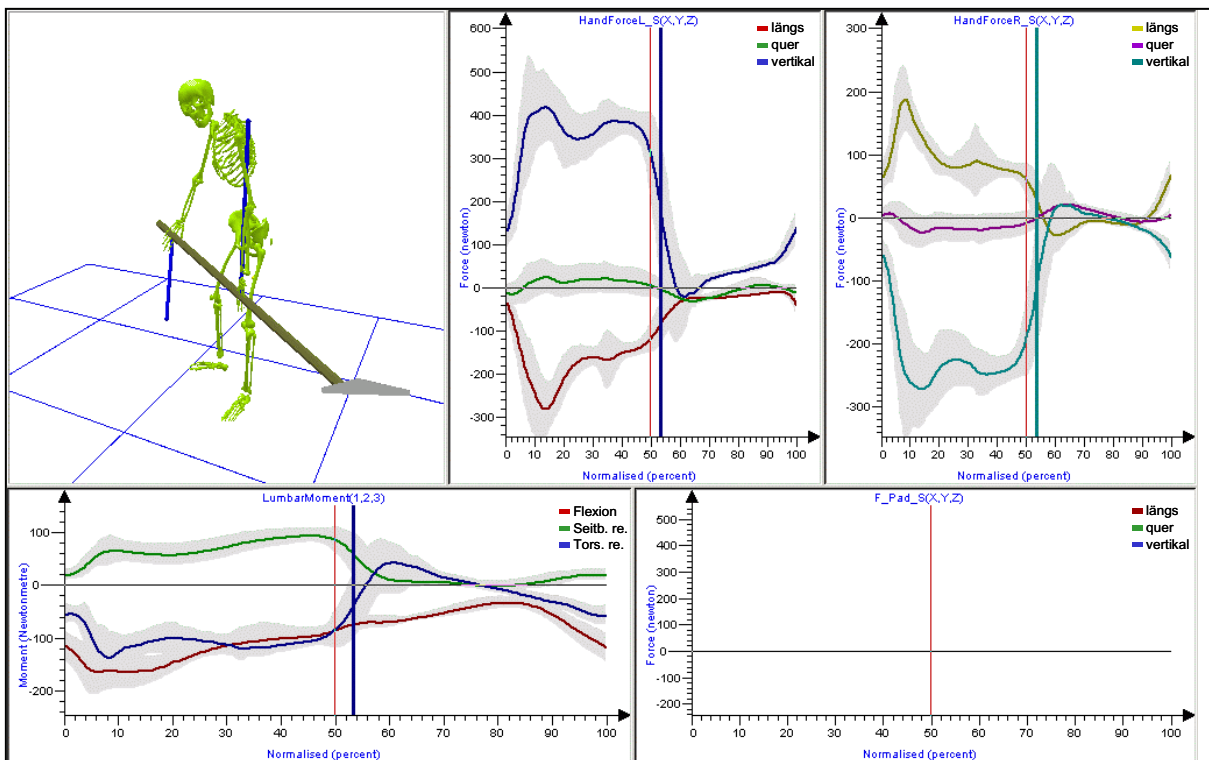
Bemerkenswert ist, dass die Aktionskräfte deutlich von der Vertikalen abwichen, und nicht ausschließlich der Gewichtskraft entgegen gerichtet waren – ein Indiz für die hohe Bewegungsdynamik von Proband 3 beim Schaufeln. Die Körperhaltung war von einer weitgehend gestreckten Beinhaltung mit einer ausgeprägten 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 (Abbildung 3-15, Abbildung 3-16 und Abbildung 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

3 Ergebnisse

100 Nm auf. Schließlich erreichte das Torsionsmoment in der Einstichphase Höchstwerte von rund 120 Nm.

Abbildung 3-17:

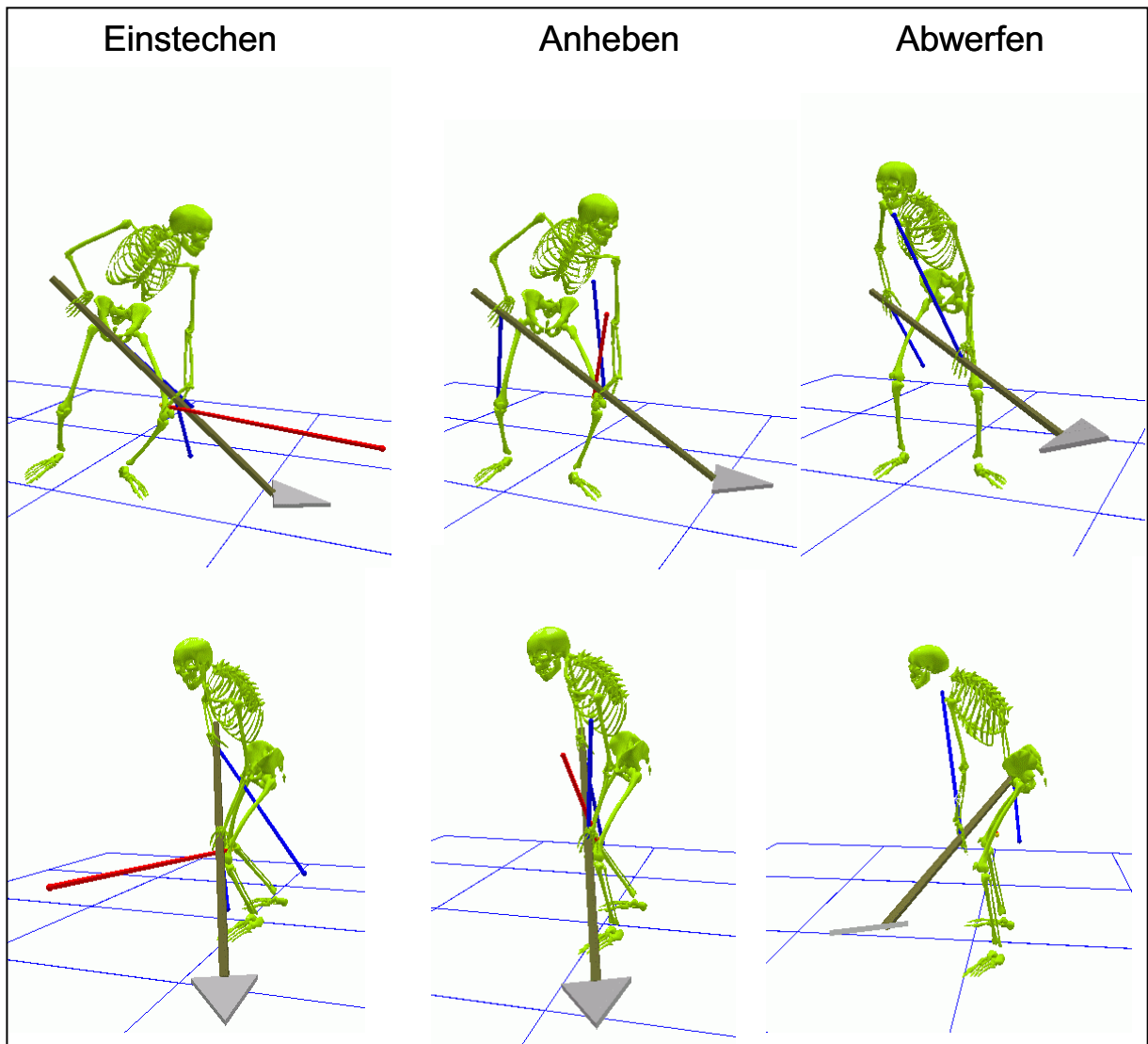
Dreidimensionale Belastungssituation beim Abwurf von Sand von Proband 3 (Estrichleger) - ebenerdig, kurze Distanz. Kurvenläufe: Mittelwert u. Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



Die Schaufeltechnik von Proband 5 wies einen deutlichen Einsatz des Oberschenkels zur Unterschätzung des Einstichvorgangs auf (Abbildung 3-18, Abbildung 3-19). Die Oberschenkelauflagekraft war im Wesentlichen vorwärts gerichtet. Der Betrag der Oberschenkelauflagekraft erreichte rund 420 N. In dieser Phase waren dann 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 von 200 N.

Abbildung 3-18:

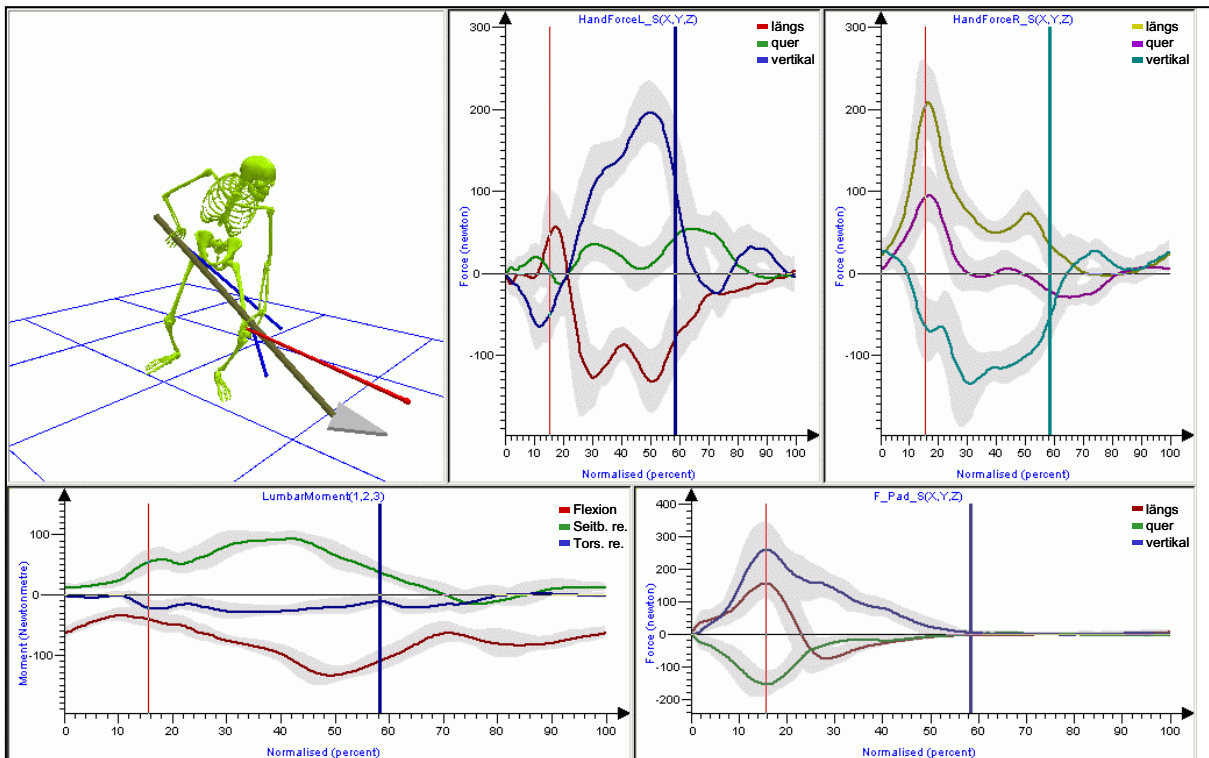
Bildreihe der dreidimensionalen Belastungssituation von Proband 5 beim Schaufeln von Sand - ebenerdig, kurze Distanz – aus der Frontal- (oben) und Seitansicht (unten); Oberschenkelauflagekraft (roter Vektor)



Beim Anheben nahm die Oberschenkelauflagekraft zusehends ab und Belastung der blattnahen Hand wuchs zunehmend bis zum Abwurf auf resultierend auf rund 260 N an (Abbildung 3-20). 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).

Abbildung 3-19:

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



Das Seitbeugemoment variierte während des Schaufelvorgangs wenig zwischen 60 und 90 Nm. In der Auswurfphase („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). 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 beim Anheben von Sand von Proband 5

(Estrichleger) - ebenerdig, kurze Distanz. Kurvenläufe: Mittelwert u.

Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter

Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende

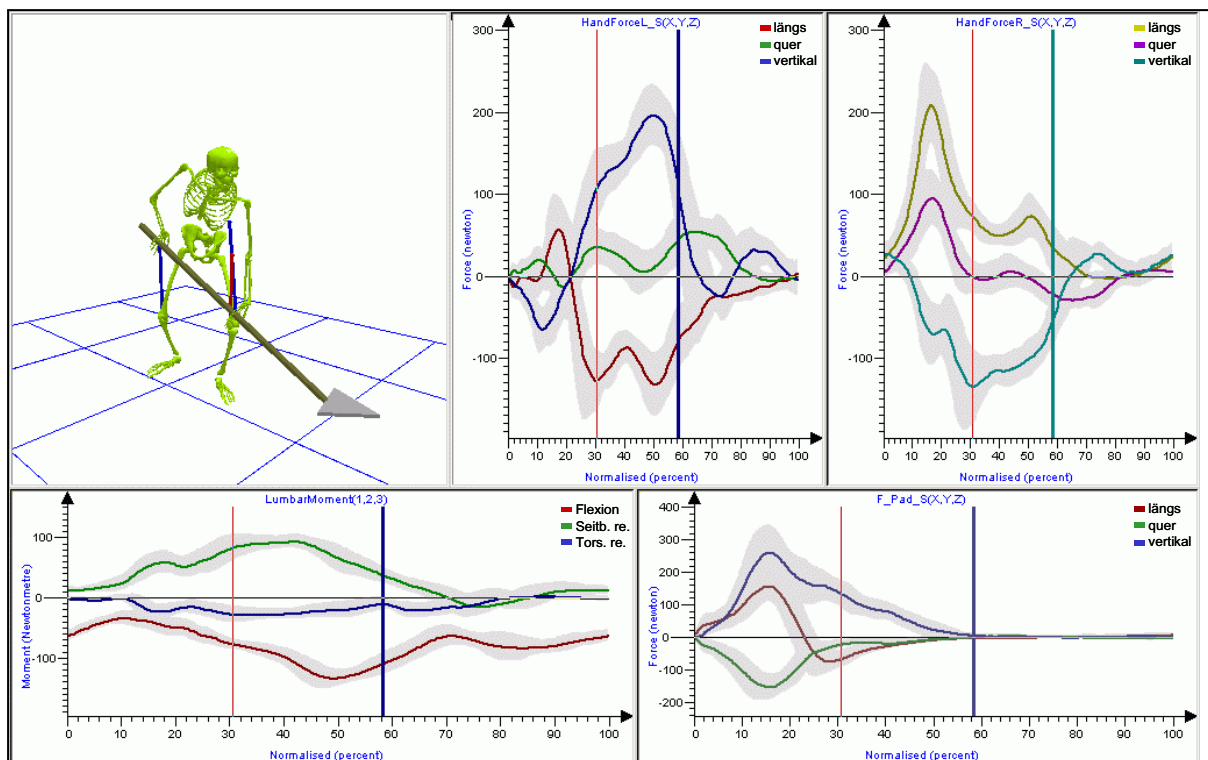
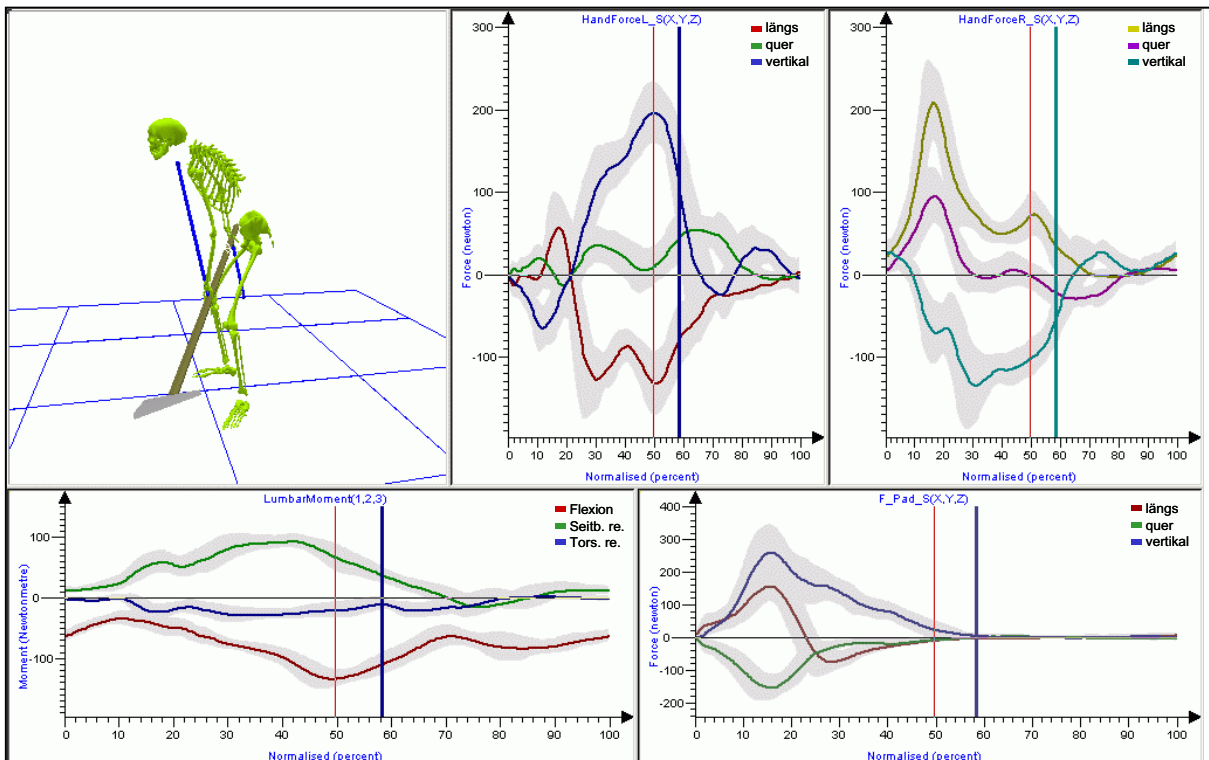


Abbildung 3-21:

Dreidimensionale Belastungssituation beim Abwurf von Sand von Proband 5 - ebenerdig, kurze Distanz. Kurvenläufe: Mittelwert u. 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 Schüttgutes war am Ende nach hinten vom Rücken weg gerichtet (Abbildung 3-22).

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). 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 3-22:

Bildreihe der dreidimensionalen Belastungssituation von Proband 1 beim Schaufeln von Sand - ebenerdig, kurze Distanz – aus der Frontal- (oben) und Seitansicht (unten); Oberschenkelauflagekraft (roter Vektor)

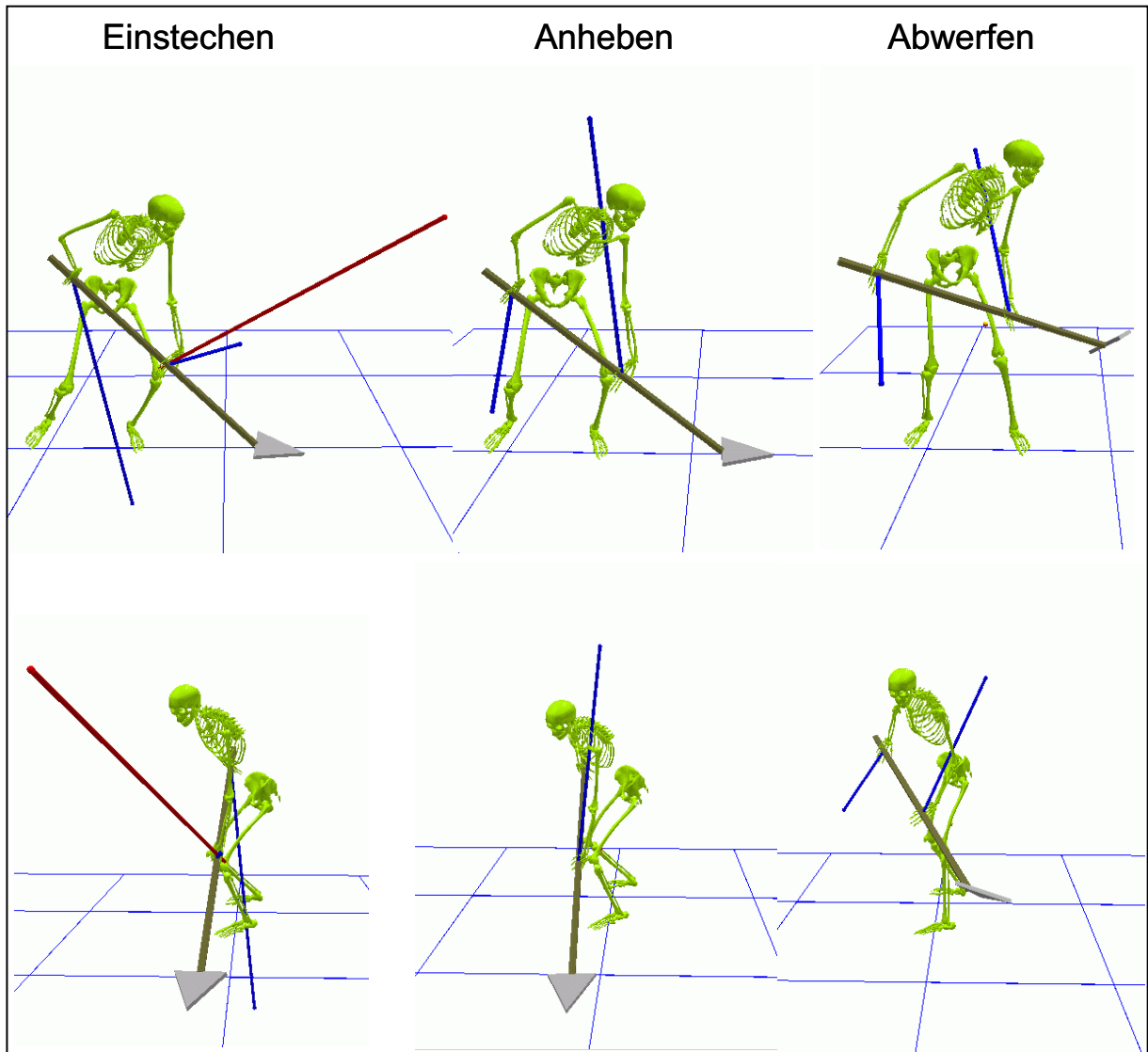
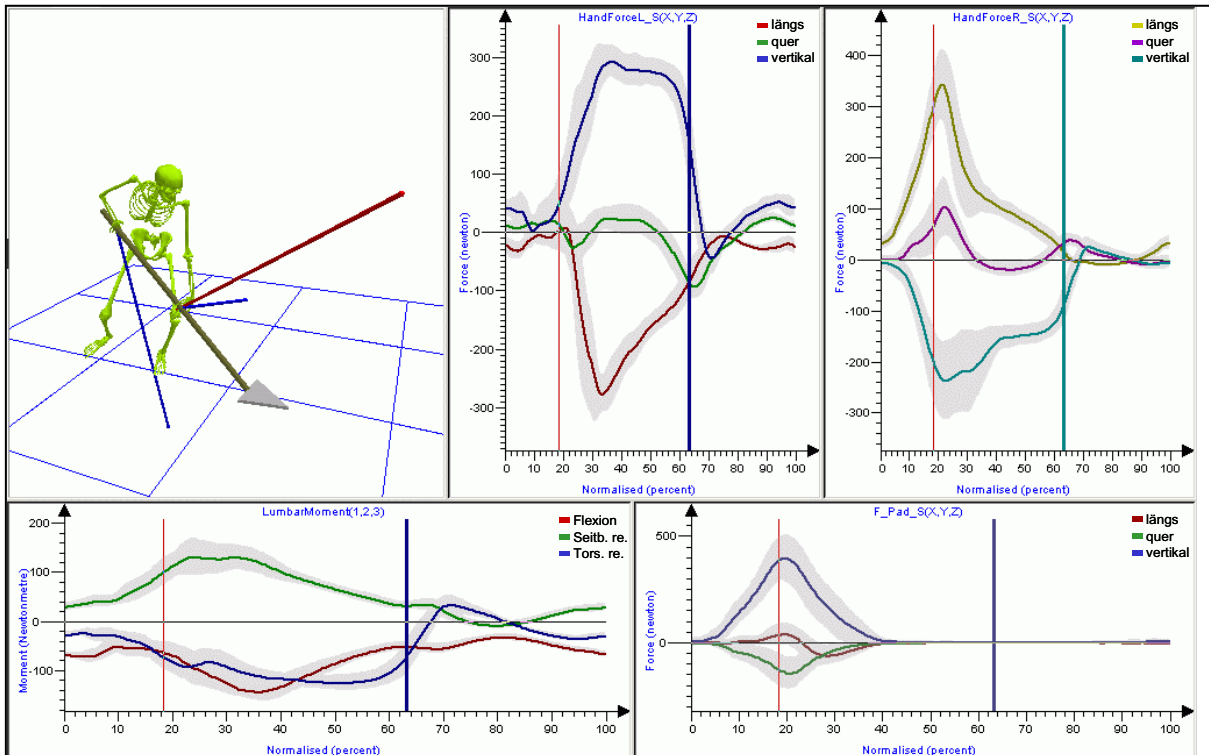


Abbildung 3-23:

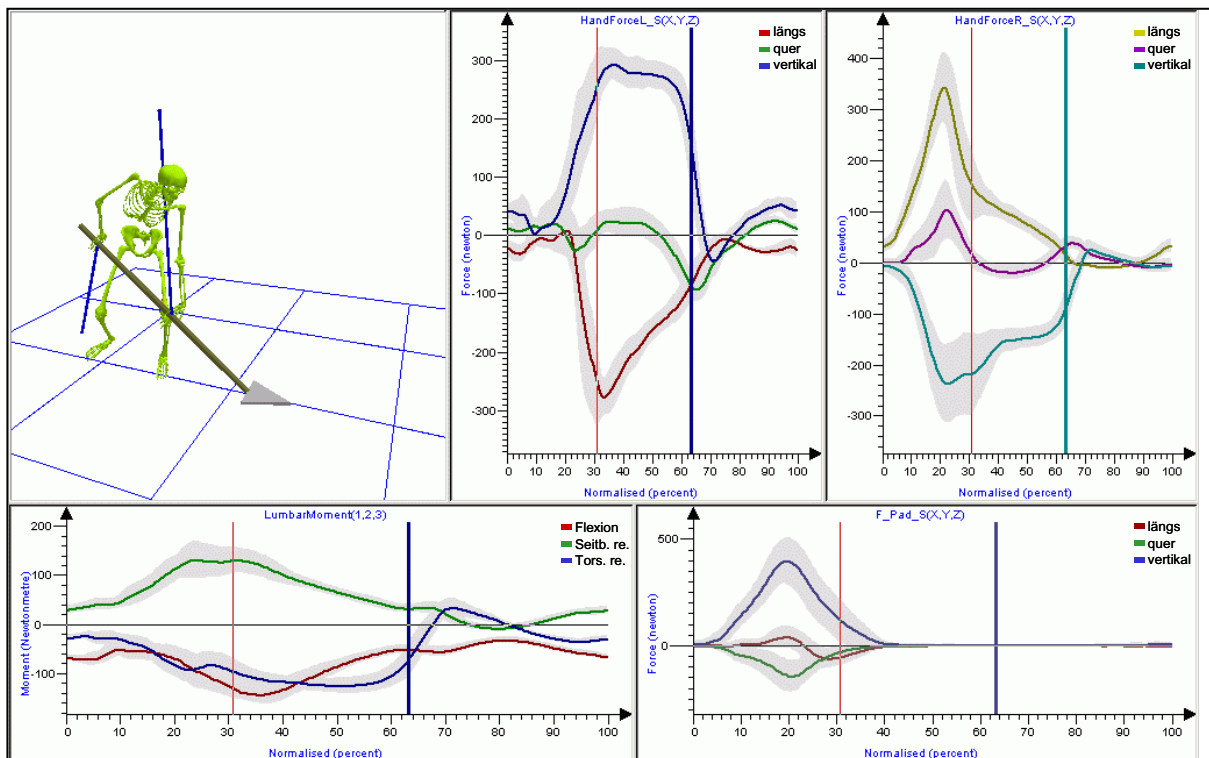
Dreidimensionale Belastungssituation beim Einstich in Sand von Proband 1 - ebenerdig, kurze Distanz. Kurvenläufe: Mittelwert u. Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



Beim Anheben sank die Oberschenkelauflagekraft schnell ab und die Kraft der blattnahen 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 Seitbeugemoment erreichte ebenfalls in dieser Phase das Maximum von 120 Nm. Resultierend ergab sich daraus eine Gelenkmomentbelastung von ca. 240 Nm.

Abbildung 3-24:

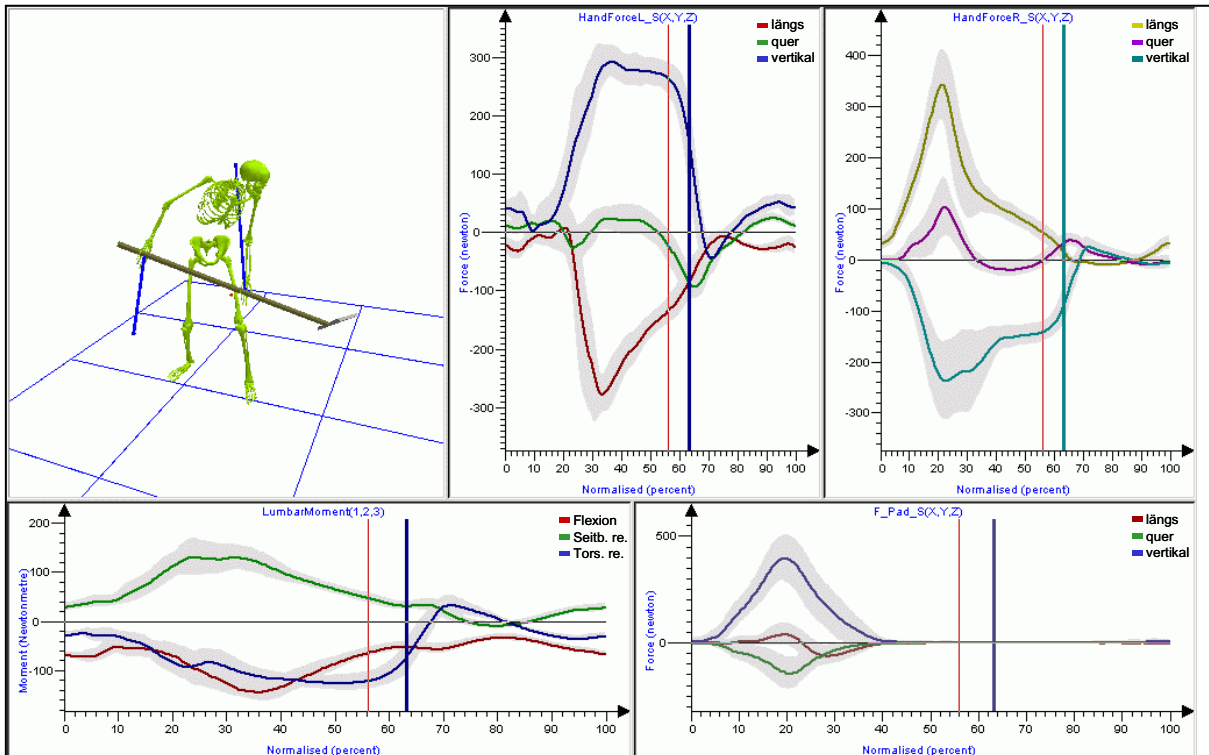
Dreidimensionale Belastungssituation beim Anheben von Sand von Proband 1 - ebenerdig, kurze Distanz. Kurvenläufe: Mittelwert u. Standardabweichung (grau) von 19 Schaufelzyklen auf % der Zykluszeit normiert; roter Zeitbalken: aktueller Zeitpunkt, blauer Zeitbalken: Abwurfende



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 gleichzeitig das Torsionsmoment sein Maximum von rund 120 Nm. Dennoch erscheint diese Schaufeltechnik unter den drei hier beobachteten Schaufeltechniken ergonomisch am günstigsten; auch obwohl sich dies nicht in einer - absolutgesehen - geringeren Lendenwirbelsäulenbelastungen niederschlug. Der Kräfteinsatz (Aktionskräfte der blattnahen Hand) von Proband 1 war um rund 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 worden war, die ergonomisch günstigste Schaufeltechnik herauszufinden.

Abbildung 3-25:

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



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

3.7 Boxplots der Handkräfte beim Schaufeln

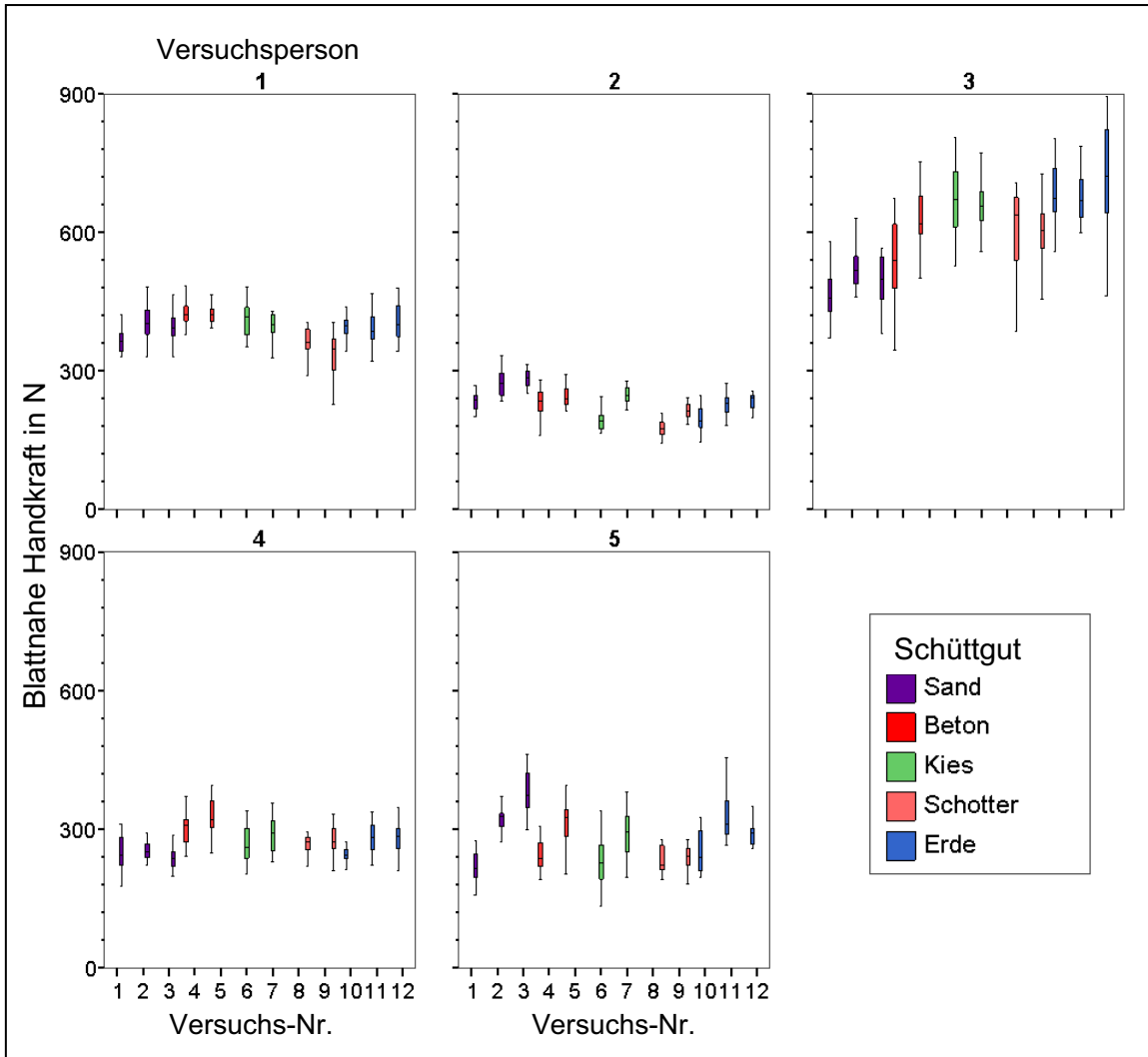
Nachfolgend werden die statistischen Verteilungen der maximalen Handkräfte (Betrag) dargestellt. Unter „maximal“ ist hierbei das Maximum des gleitenden Mittelwertes über ein 0,5 s-Fenster zu verstehen.

Die Aktionskräfte der blattnahen (hier: linken) Hand reichten von rund 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 am Oberschenkel zu sehen. 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 Schüttgüter aus der weiteren Analyse herauszunehmen, um Verzerrungen der Ergebnisdarstellungen der Belastungsparameter zu vermeiden (Abbildung 3-27).

Abbildung 3-26:

Boxplots der maximalen resultierenden Handkräfte der blattnahen (linken) Hand in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchsbedingung für alle Probanden



Alle nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich nur noch auf die praxisnahen Versuchskombinationen, wodurch sich die Gesamtzahl der berücksichtigten Schaufelvorgänge auf 998 reduzierte.

Abbildung 3-27:

Boxplots der maximalen resultierenden Handkräfte der blattnahen Hand (links) aller Probanden in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche

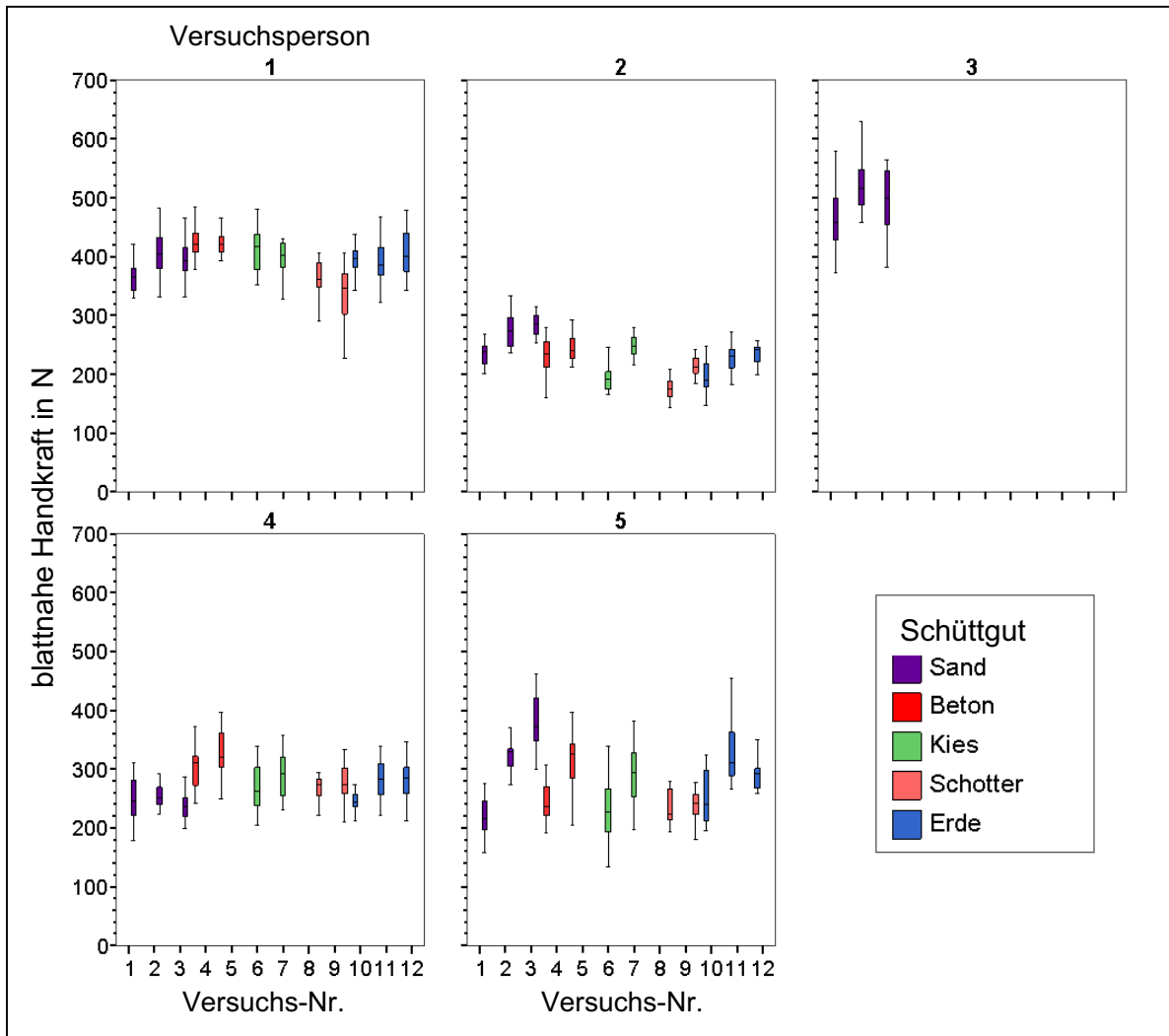


Tabelle 3-9:

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

Versuchsperson	Maximale blattnahe Handkraft in N		
	Mittelwert	Stdabw.	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

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). Dies ist durch die asymmetrische Gewichtsverteilung der beladenen Schaufel und die Widerlagerfunktion der blattnahen Hand bedingt. Die Spannweite reichte von knapp 100 N 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.

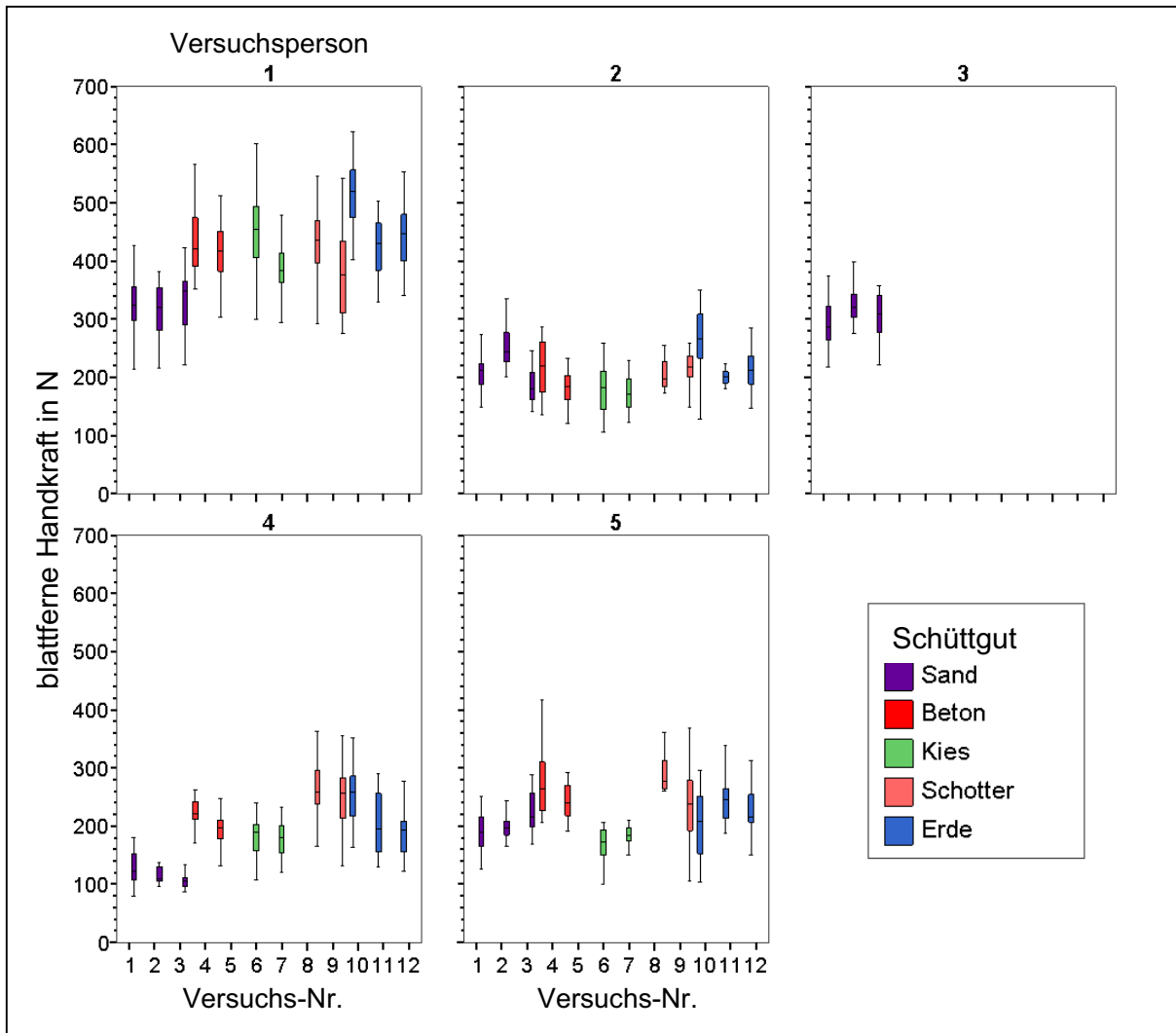
Tabelle 3-10:

Mittlere Maximalkräfte der blattfern Hand für alle Probanden über die praxisnahen Versuche

Versuchsperson	Maximale blattferne Handkraft in N		
	Mittelwert	Stdabw.	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 des Schüttguts und der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche



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.

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 an dem Mittelwert der Grundgesamtheit liegt als an dem der Probandengruppe.

Abbildung 3-29:

Boxplots der maximalen Auflagekräfte am Oberschenkel aller Probanden in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche

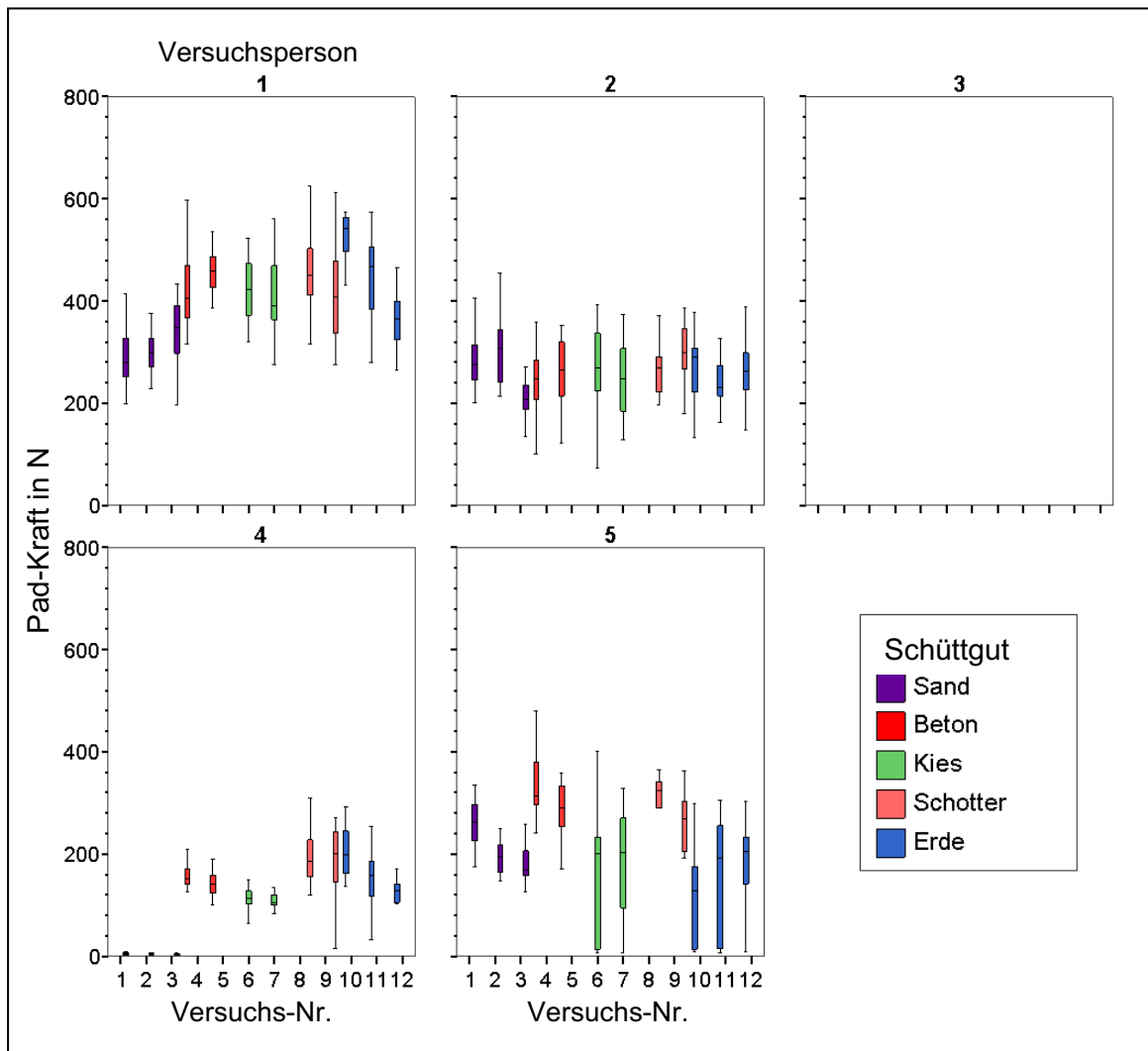


Tabelle 3-11:

Mittlere Maximalwerte der Oberschenkelauflagekraft für alle Probanden über die praxisnahen Versuche

Versuchsperson	Maximale Pad-Kraft am Oberschenkel in N		
	Mittelwert	Stdabw.	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 beim Schaufeln bzgl. der drei orthogonalen Hauptebenen des Körpers 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). Die Werte reichen von knapp -100 Nm bis deutlich unter -200 Nm bei einem Gruppenmittelwert von rund -150 Nm (Tabelle 3-12). Über die 12 Versuche offenbarten die Probanden zwei unterschiedliche Verhaltensweisen. Die Probanden 1 und 4 zeigten ein eher gleiches Belastungsverhalten unter den verschiedenen Schaufelbedingungen, wogegen 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 des Schüttguts und der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche

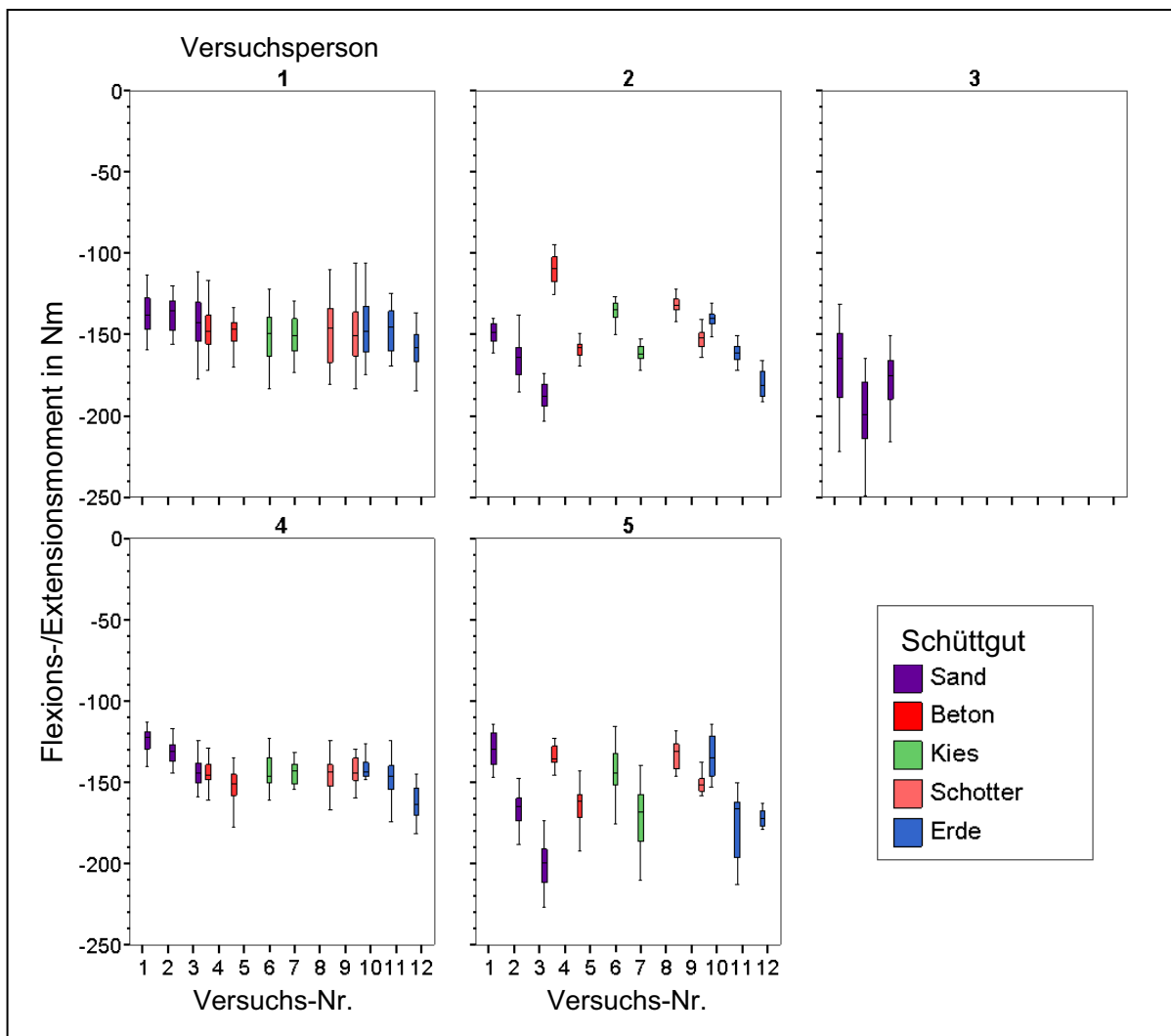


Tabelle 3-12:

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

Versuchsperson	Maximale Flex./Extensionsmomente um L5/S1 in Nm		
	Mittelwert	Stdabw.	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 der unterschiedlichen Schaufeltechniken (Kap. 3.3 und Kap. 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 Gruppenmittelwertbildung. Allenfalls können prinzipiell zwei Belastungsniveaus von 60 bis 100 Nm für die Probanden 2, 4 und 5 und 150 bis über 200 Nm für die Probanden 1 und 3 mit dem hohen Arbeitstempo identifiziert werden (Tabelle 3-13).

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

Abbildung 3-31:

Boxplots der maximalen Lateralmomente um L5/S1 aller Probanden in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche

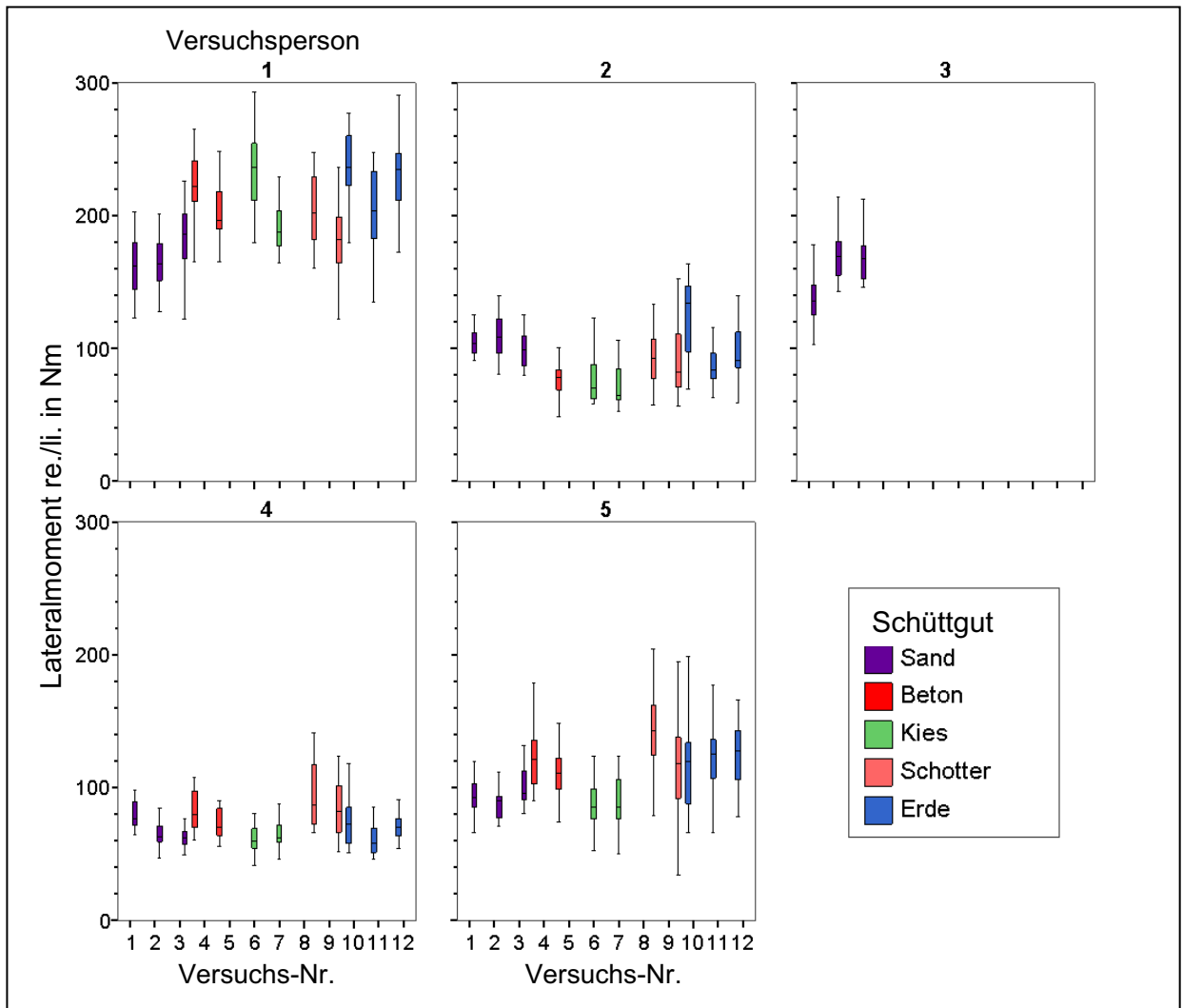


Tabelle 3-13:

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

Versuchsperson	Maximale Lateralmomente um L5/S1 in Nm		
	Mittelwert	Stdabw.	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). 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.

Abbildung 3-32:

Boxplots der maximalen Torsionsmomente um L5/S1 aller Probanden in Abhängigkeit des Schüttguts und der Versuchskonstellation für die praxisnahen Versuche

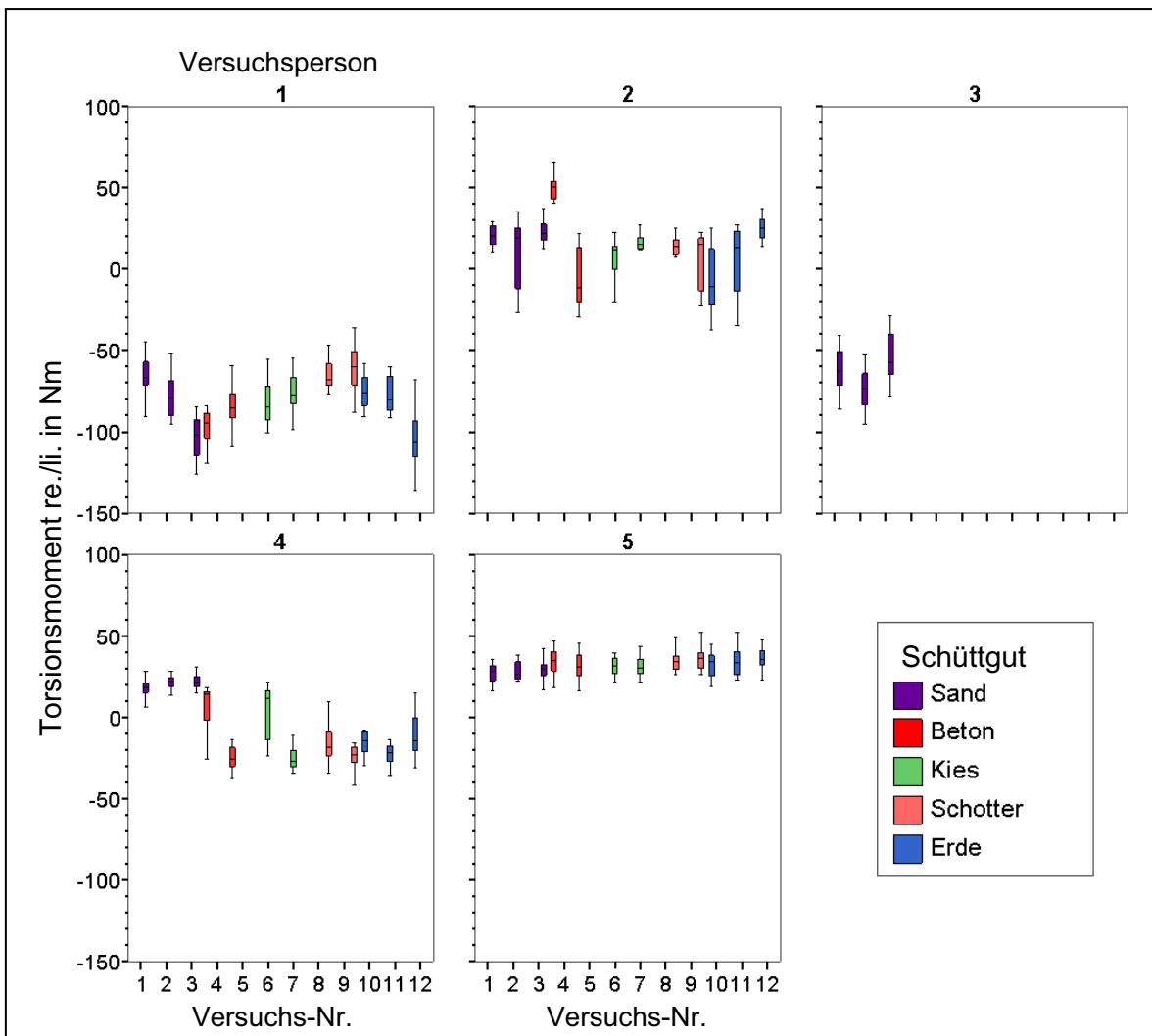


Tabelle 3-14:

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

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

3.10 Kompressionskräfte an der LWS (L5/S1)

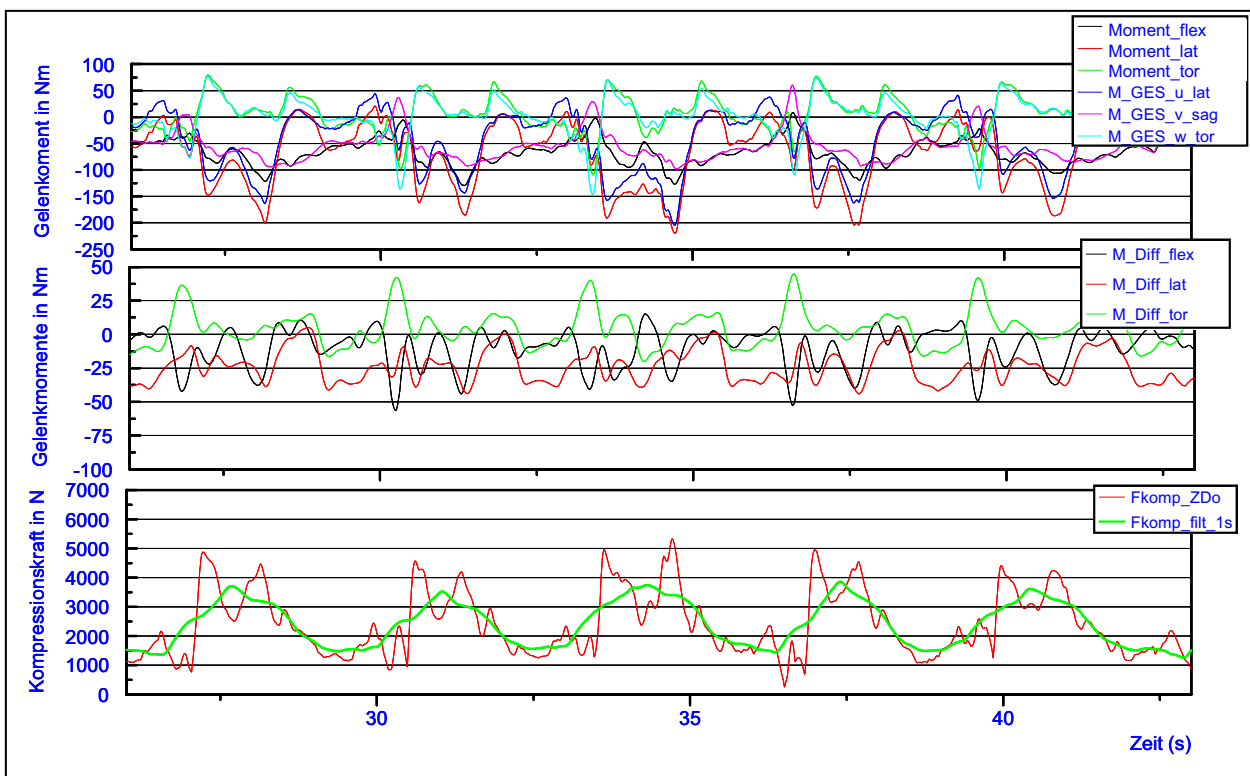
Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der Ermittlung der für die spätere Anwendung nutzbaren Bandscheiben-Druckkräfte sind in Abbildung 3-33 mehrere Kenngrößen der LWS-Belastung anhand eines typischen Ausschnittes von etwa 20 Sekunden dargestellt, der 5 aufeinander folgende Schaufelvorgänge repräsentiert. 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 Trägheitseffekte für der oberen Körpersegmente berücksichtigt sind, bei den IfADo-Momenten unberücksichtigt (quasistatischer Ansatz, s.a. Kap. 2.2).

Das Beugemoment in der Sagittalebene (Flexion/Extension => positive/negative Werte) wird durch die v- und Y-Verläufe, das Seitbeugemoment (nach rechts/links => positiv/negativ) durch die u- und X-Verläufe und das Torsionsmoment (nach links/rechts => positiv/negativ) durch die w- und Z-Verläufe repräsentiert. Wie die Zeitverläufe (Abbildung 3-33) zeigen, lassen sich die einzelnen Schaufelvorgänge eindeutig identifizieren, und die jeweils korrespondierenden Kurvenpaare weisen deutliche Ähnlichkeiten auf. Jedoch zeigen sich insbesondere 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 sind die Zeitverläufe der Momentendifferenzen (Momente aus BGIA minus IfADo) im mittleren Diagramm dargestellt; dabei ergaben sich für den gewählten Ausschnitt Differenzen bis zu etwa 50 Nm, vorrangig in der Phase des Einstehens, die zum einen auf die unterschiedliche Skelettmodellierung in BGIA und IfADo sowie 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 (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 repräsentiert 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 $3 \frac{1}{2}$ kN.

Eine Zusammenstellung derartiger Spitzenwerte aus gefilterten Druckkraft-Zeitverläufen ist in Abbildung 3-34 für die 12 verschiedenen Versuchsbedingungen und 5 Probanden dargestellt. Dabei ergaben sich vergleichsweise hohe Werte – Spitzenwerte im Mittel zwischen etwa 6 kN und $6 \frac{1}{2}$ 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 anderen 3 Probanden wurden Druckkraftspitzen im Bereich um etwa $3 \frac{1}{2}$ 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. Bedingen 1 und 12: Sand eben kurz vs. Erde weit). Insgesamt wurde je nach Schaufelgut und Proband ein großer Wertebereich für die Druckkraftspitzen zwischen etwa $2 \frac{1}{2}$ kN und $7 \frac{1}{2}$ kN ermittelt. Wie Tabelle 3-15 zeigt, weisen die Druckkraftwerte bei den Personen 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

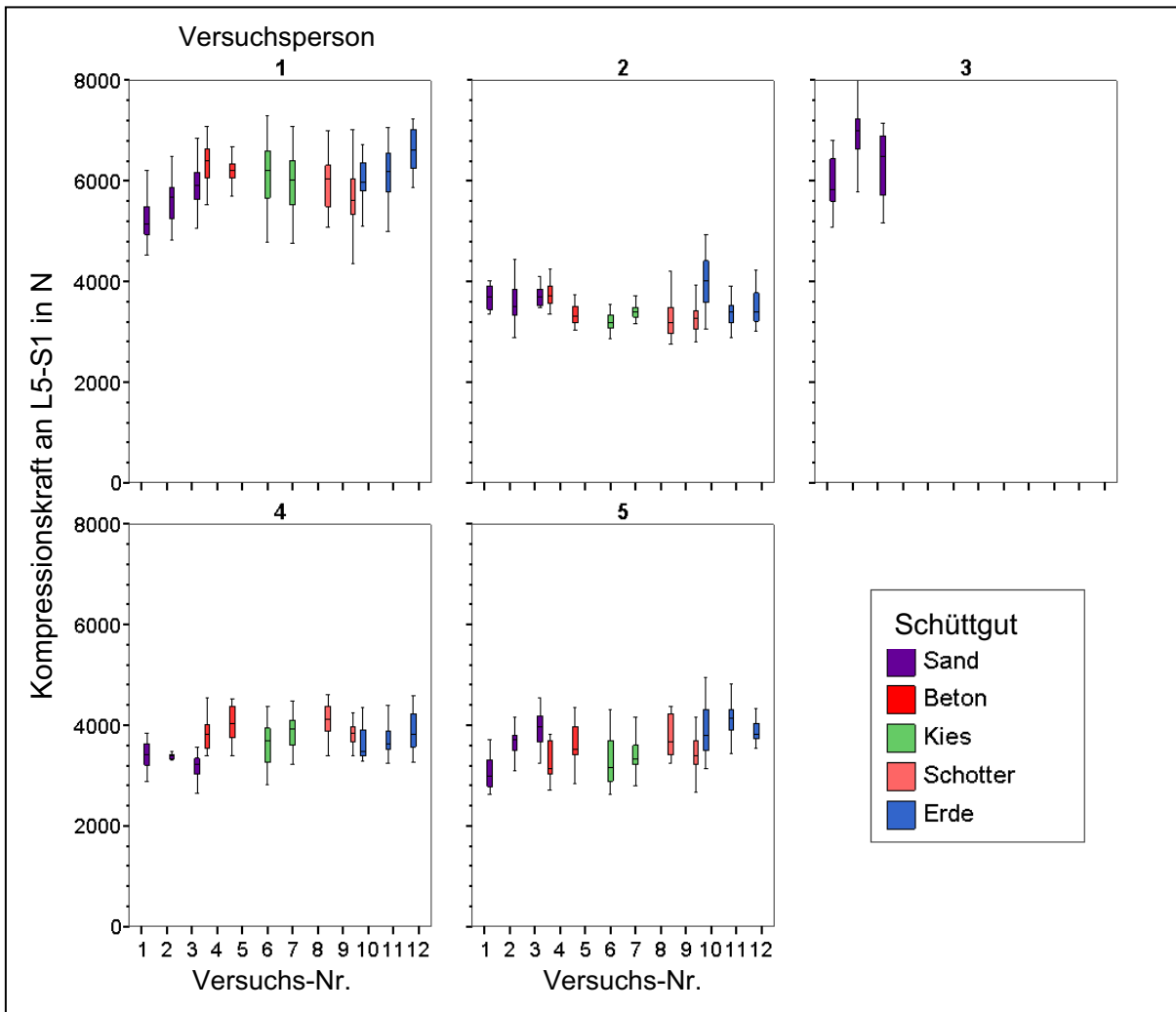


Tabelle 3-15:

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

Versuchsperson	Maximale Druckkräfte auf L5/S1 in kN		
	Mittelwert	Stdabw.	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, da hierzu bislang nur sehr wenige und kaum repräsentative Belastungsangaben vorlagen. 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 kN und 6 kN bei einem Mittelwert von etwa 4 ½ kN (Theilmeier et al. 2000) hin.

Auf Initiative von Experten der BG BAU sollte daher in einem vom HVBG geförderten Forschungsprojekt die Bandscheibenbelastung bei geübten Fachkräften aus dem Baugewerbe biomechanisch ermittelt werden. Das Studiendesign sah explorative Messungen mit 5 Fachkräften (Mauer, Pflasterer, Gartenbauer, Straßenbauer und Estrichleger), 5 verschiedenen Schüttgütern (Sand, Beton, Kies, Schotter und Erde) und einem Schaufeltyp (Frankfurter Schaufel) in 3 unterschiedlichen Aufgabenstellungen (kurze, weite Distanz, 1,2 m nach oben) – insgesamt 12 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 wurden im BGIA unter Laborbedingungen dreidimensionale Bewegungs- und Kraftmessungen in Verbindung mit einer sensorpräparierten Messschaufel durchgeführt. In jeder Versuchsanordnung führten die Probanden im Rahmen eines Arbeitszyklus 20 Schaufelvorgänge aus. Insgesamt wurden 1168 mit den Versuchsbedingungen konforme Schaufelvorgänge zeitkontinuierlich erfasst und für diese die Kompressionskraft an der untersten Bandscheibe mit dem Model „DER DORTMUNDER“ im IfADo berechnet.

In einer parallel zur Laboruntersuchung durchgeführten Befragung zu den subjektiven Belastungsempfindungen nannten die Probanden das Schaufeln von Schotter als am

höchsten belastend. Etwa die Hälfte aller Nennungen bezeichnete 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.

Bei den Laborversuchen konnten die Probanden ihr Arbeitstempo ihrer gewohnten Arbeitsanforderung gemäß frei wählen, was durch Arbeitsplatzbeobachtung (Estrichleger) und Vorversuche dokumentiert wurde. Die Häufigkeitsverteilung der Aktionsdauer (Zeitspanne zwischen Einstich bis Abwurf) der 5 Probanden wies eindeutig 2 Gruppen unterschiedlichen Arbeitstempos – „normal“ von 2,0 s bis 2,3 s und „hoch“ von 1,3 s bis 1,6 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 (Stdabw. 1,7 kg). Ein genereller Zusammenhang von Schaufelbeladung und Schüttgut konnte nicht gefunden werden. Tendenziell ergaben sich die höheren Beladungen mit Beton und die niedrigeren mit 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 N und 500 N. An der blattfernen Hand war die Belastung generell geringer bei etwa 200 N bei „normalem Tempo“ – 300 N bis 400 N bei „hohem Tempo“. Die maximale Auflagekraft des Schaufelstiels am 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 12 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 (Stdabw. 23 Nm). In der Frontalebene lagen die Werte ausfahrungsabhängig zwischen 70 Nm und 200 Nm, ebenso die Torsionsmomente mit Werten bis zu 80 Nm. Insgesamt wurden für Probanden mit „normalem Arbeitstempo“ maximale Druckkräfte um 3 ½ kN und für Probanden mit „hohem Arbeitstempo“ Werte zwischen etwa 6 kN und 6 ½ kN erhoben.

Hinsichtlich der Anwendung der Studienergebnisse zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen in BK 2108-Feststellungsverfahren ist festzustellen, dass nicht nur ein einziger Belastungswert für das Schaufeln pauschal angesetzt werden sollte. Die vorliegenden Messungen weisen auf zwei Belastungsniveaus hin, die offensichtlich mit der Belastungsdauer/Arbeitstempo in Zusammenhang stehen. Insofern empfehlen die Autoren der Studie die Einrichtung eines Arbeitskreises aus Experten, die eine Zuordnung von Schaufeltätigkeiten/Gewerken und dem typischen Arbeitstempo vornehmen können und damit eine Handlungsanleitung für die BK-Sachbearbeitung zum Thema „Schaufeltätigkeit“ erstellt werden kann.

Präventionsempfehlungen für das Schaufeln aus ergonomischer Sicht können aufgrund des Studiendesigns nur begrenzt und mit entsprechenden Vorbehalten gegeben werden. 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 wohl 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“ zu bevorzugen, 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 Literaturverzeichnis

DIN 33411-5: Körperkräfte des Menschen – Teil 5: Maximale statische Aktionskräfte, Werte (11/99). Beuth, Berlin 1999

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

Ellegast, R.: Ermittlung und Bewertung der Belastung des Muskel-Skelettsystems bei beruflichen Tätigkeiten. In: arbeitsmedizin und arbeitsschutz aktuell – ein Loseblattwerk für die Praxis. Sonderdruck aus Lieferung 47/2000. Hrsg.: Coenen, W.; Kentner, M.; Schiele, R.; Valentin, H.; Zober, A.. Urban & Fischer, München 1999

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

Hartung E, Schäfer K, Jäger M, Luttmann A, Bolm-Audorff U, Kuhn S, Paul R, Francks HP: 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 1999;34:112-122

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: J. Konietzko, H. Dupuis (Hrsg.): Handbuch der Arbeitsmedizin Kap. IV.7.8.3.1.2., S. 1-24. Ecomed Verlagsgesellschaft, 25. Erg.-Lfg., Landsbergs/Lech 2000

Jäger, M., Luttmann, A., Laurig, W.: Ein computergestütztes Werkzeug zur biomechanischen Analyse der Belastung der Wirbelsäule bei Lastenmanipulationen: "Der Dortmunder". Medizinisch-orthopädische Technik 112 (1992) 305-313

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

Jäger M, Luttmann A, Bolm-Audorff U, Schäfer K, Hartung E, Kuhn S, Paul R, Francks HP: 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) 101-111

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

Jäger, M.; Jordan, C.; Theilmeier, A.; Luttmann, A.: Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 2: Ermittlung und Beurteilung vergleichbarer Teiltätigkeiten hinsichtlich der Körperhaltung und der Wirbelsäulenbelastung bei verschiedenen beruflichen Tätigkeiten. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin 2001

Jäger, M., Jordan, C., Theilmeier, A., Luttmann, A.: Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 3: Ermittlung der Belastung der Lendenwirbelsäule bei ausgewählten Pfllegetätigkeiten mit Patiententransfer. Teil 1: Entwicklung und exemplarische Anwendung der Methodik. Shaker, Aachen 2003

Sawatzki, K., Jäger, M.: Untersuchungen zur Identifikation von Kriterien für eine wirbelsäulenschonendere Handhabung von Trolleys in Flugzeugen. Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, BG für Fahrzeughaltungen (Hrsg.), Dortmund, Hamburg 2006.
<http://www.ifado.de/forschung/biomech/Lastenhandhabung/Ergaenzungsstudie.pdf>

Schäfer, K., E. Hartung: 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) 143-147

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*. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (S 211-213). Lübeck: DGAUM, 2000