

Standhöhe und Kniebelastung im alpinen Skilauf

W. Nachbauer, K. Schindelwig, M. Mössner

Verletzungen und Überlastungsschäden des Kniegelenks treten im alpinen Skirennsport häufig auf. Im wesentlichen bestimmen Fahrgeschwindigkeit und Schwungradradius die äußeren Kräfte, die auf den Skifahrer wirken.

Die Belastung des Bewegungsapparates wird neben den äußeren Kräften durch die geometrischen Gegebenheiten des Bewegungsapparates (Momentarme) bestimmt. Die Erhöhung der Standhöhe (= Abstand zwischen Skiunterseite und Skischuhsohle) bewirkt eine Verlängerung der Momentarme der Bodenreaktionskräfte in Bezug auf das Kniegelenk. Der Effekt dieser Hebelverlängerung auf die Belastung im Kniegelenk wird nachfolgend untersucht. Ausgehend von gemessenen Bodenreaktionskräften und -momenten werden die Momente im Kniegelenk für Standhöhen von 4 bis 10 cm berechnet.

Methode

Bodenreaktionskräfte und -momente

In mehreren Untersuchungen wurden die beim Skifahren wirkenden Bodenreaktionskräfte und -momente gemessen (z.B. Nachbauer und Rauch 1991, Quinn und Mote 1992, ...). Basierend auf den publizierten Meßwerten wurden für die Berechnungen die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte verwendet. Diese Kräfte und Momente wirken auf die Schuhsohle beim Freifahren und sind nicht in einer Verletzungssituation gemessen.

Berechnung der Kniegelenksmomente

Nach den Gleichungen (1), (2) und (3) (Quinn und Mote 1992) wurden das Ab-

Adduktionsmoment $M_{x'Knie}$, das Beugemoment $M_{y'Knie}$ und das Torsionsmoment $M_{z'Knie}$ im Kniegelenk bestimmt.

$$M_{x'Knie} = M_{xSki} \cos \phi + F_{ySki}(l + h \cos \phi) - M_{zSki} \sin \phi \quad (1)$$

$$M_{y'Knie} = F_{zSki} l \sin \phi - F_{xSki}(h + l \cos \phi) + M_{ySki} \quad (2)$$

$$M_{z'Knie} = M_{xSki} \sin \phi + F_{ySki} h \sin \phi + M_{zSki} \cos \phi \quad (3)$$

ϕ Vorlagewinkel (Winkel zwischen Tibialängs- und Skitiefenachse)
 h Abstand zwischen Skiunterseite und oberem Sprunggelenk
 l Unterschenkelänge (Abstand oberes Sprunggelenk und Kniegelenk)

Für den Vorlagewinkel ϕ wurden bei obiger Belastungssituation 18° gemessen. Die Unterschenkelänge l wurde zwischen 27 cm (Kinder) und 45 cm verändert. Der Abstand zwischen Skiunterseite und oberer Sprunggelenksachse h setzt sich aus Skidicke, Bindungshöhe, Plattenhöhe, Sohlendicke des Skischuhs und Abstand Ferse - obere Sprunggelenksachse zusammen. Dieser Wert wurde zwischen 12 und 18 cm variiert. Dies entspricht einer Standhöhenvariation von 4 bis 10 cm.

Ergebnisse

Einfluß der Standhöhe

Scher- und Kompressionskräfte werden durch die Veränderung der Standhöhe nicht beeinflusst. Abb. 3 zeigt die absolute Veränderung der Kniegelenksmomente bei Erhöhung der Standhöhe von 4 auf 10 cm. Alle 3 Momente steigen mit Erhöhung der Standhöhe linear an. Das Beugemoment erhöht sich von 277 auf 286 Nm, das Ab-/Adduktionsmoment von 26 auf 32 Nm und das Torsionsmoment von 8 auf 10 Nm.

In Abb. 4 ist die prozentuelle Veränderung der Kniegelenksmomente für Standhöhen zwischen 4 auf 10 cm dargestellt. Mit 21% erhöht sich das Ab-/Adduktions-

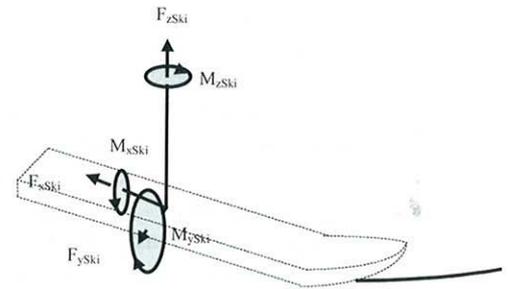


Abb. 1: Schematische Darstellung der verwendeten Bodenreaktionskräfte und -momente für den Linksschwung.

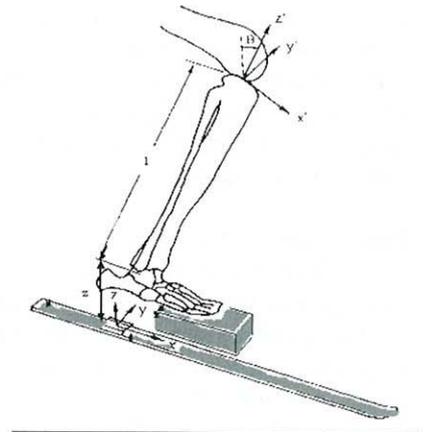


Abb. 2: Schematische Darstellung von Ski, Fuß und Unterschenkel mit Ski- (x,y,z) und Kniekoordinatensystem (x',y',z').

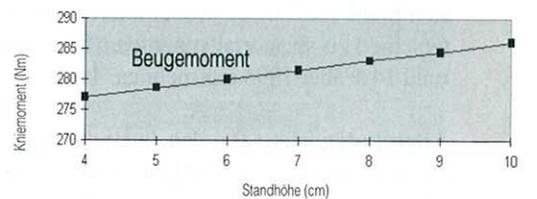
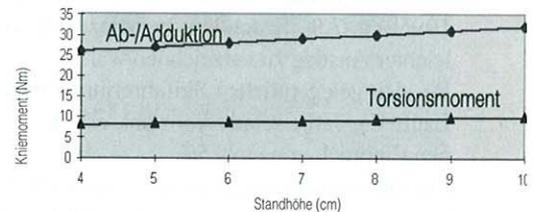


Abb. 3: Kniegelenksmomente als Funktion der Standhöhe

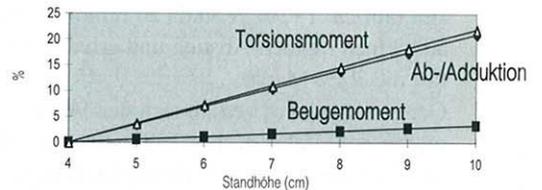


Abb. 4: Prozentuelle Belastungszunahme als Funktion der Standhöhe

Tab. 1: Eingabewerte für die Bodenreaktionskräfte und -momente für einen Linksschwung.

F_{xSki}	F_{ySki}	F_{zSki}	M_{xSki}	M_{ySki}	M_{zSki}
-160 N	-100 N	1400 N	10 Nm	100 Nm	-8 Nm

moment und mit 22% das Torsionsmoment stark. Die Erhöhung des Beugemoments beträgt 3.4 %.

Einfluß der Unterschenkellänge

Die Erhöhung der Standhöhe um 6 cm verursacht eine prozentuelle Zunahme des Ab-/Adduktionsmomentes von 22 % bei einer Unterschenkellänge von 27 cm, bei einem 37 cm langen Unterschenkel wirkt sich diese Erhöhung nur mit 14 % aus. Das Torsionsmoment ist von der Unterschenkellänge nicht beeinflusst. Die Belastungszunahme beim Beugemoment beträgt 3.5 % bei einer Unterschenkellänge von 27 cm und 2.5 % bei einer Länge von 45 cm (Abb. 5). Die relative Belastungszunahme im Kniegelenk ist daher bei Kindern deutlich höher als bei Erwachsenen.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, daß mit Zunahme der Standhöhe die Kniegelenksmomente und damit die Belastung im Kniegelenk linear zunehmen. Dies resultiert aus den mit zunehmender Standhöhe länger werden den Hebelarmen der Bodenreaktionskraft in Bezug auf das Kniegelenk.

Die Kniegelenkskräfte (Scherkraft, Kompressionskraft) werden durch die Standhöhe nicht beeinflusst.

Die Momentzunahme im Kniegelenk bewirkt eine Erhöhung der Belastung des Kniegelenks. Um nicht einzuknicken, muß auf höhere Beugemomente mit Erhöhung der Kraft der Kniestreckmuskulatur reagiert werden. Dies führt zu einem höheren Zug an der Quadrizepssehne und damit zu höheren retropatellaren Drücken, was z. B. die Entstehung von Chondropathien an der Rückseite der Patella fördert. Höhere Ab-/Adduktionsmomente verursachen eine höhere valgus/varus Belastung des Kniegelenks mit höherer Beanspruchung der lateralen und medialen Gelenksstrukturen. Torsionsbewegungen werden durch Kniebänder und Menisci begrenzt. Die kombinierte Belastung, etwa durch hohe Ab/Adduktionsmomente und Torsionsmomente, führt in der Regel zu schweren Mehrfachrupturen des Bandapparates.

Die angeführten absoluten und relativen Zunahmen der Kniegelenksmomente sind von den Ausgangsdaten für die Berechnungen (Bodenreaktionskräfte, Bodenreaktionsmomente und Längenangaben) abhängig. Werden diese Daten anders gewählt, so ergeben sich andere absolute und prozentuelle Veränderungen. Die Längenangaben konnten realistisch gewählt werden. Die dieser Studie zugrunde liegenden Daten zu den Bodenreaktionskräften und -momenten basieren auf Messungen im touristischen Skilauf und liegen schon aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeit unter den Werten im Skirennlauf.

Es ist daher nicht zu erwarten, daß die berechneten Kniegelenksmomente nahe an der Grenzbelastung für Verletzungen liegen. Aus diesem Grunde wird auf die Beurteilung der berechneten Kniegelenks-

momente anhand von Grenzbelastungen für das Kniegelenk, wie sie von menschlichen Präparaten bei Labormessungen vorliegen, verzichtet.

Die Arbeit belegt, daß die Belastung im Kniegelenk durch Erhöhung der Standhöhe zunimmt. Es kann nicht direkt nachgewiesen werden, daß durch diese Belastungszunahme die Beanspruchungsgrenzen der Kniegelenksstrukturen überschritten werden. Für derartige Aussagen müßte man neben den Bodenreaktionskräften und -momenten einer Verletzungssituation die individuellen Beanspruchungsgrenzen der Skirennfahrer kennen, welche nur an Präparaten bestimmbar sind und daher eine derartige Absicherung unmöglich machen.

Aus dem derzeitigen Kenntnisstand ergibt sich nach unserer Meinung folgende Argumentation: Verletzungsstatistiken belegen die große Zahl an Verletzungen und Überlastungsschäden im Kniegelenk bei Skirennsportlern.

Die Erhöhung der Standhöhe verursacht eine Zunahme der Kniebelastung, wodurch die Wahrscheinlichkeit, daß Beanspruchungsgrenzen im Kniegelenk für Mikrotraumata und Verletzungen überschritten werden, erhöht ist.

Aus Sicherheitsgründen ist daher zu empfehlen, daß die Standhöhe normiert wird. Eine sinnvolle Normierung muß den Abstand der Fußsohle zur Skiunterseite limitieren.

Literatur

Nachbauer, W., Rauch, A. (1991) Biomechanische Analysen der Torlauf- und Riesentorlauftechnik, in: F. Fetz, E. Müller, Biomechanik des alpinen Skilaufs, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 50-100.

Quinn, T. P., Mote Jr., C. D. (1992) Prediction of the loading along the leg during snow skiing. J. Biomechanics, 25, 609-625.

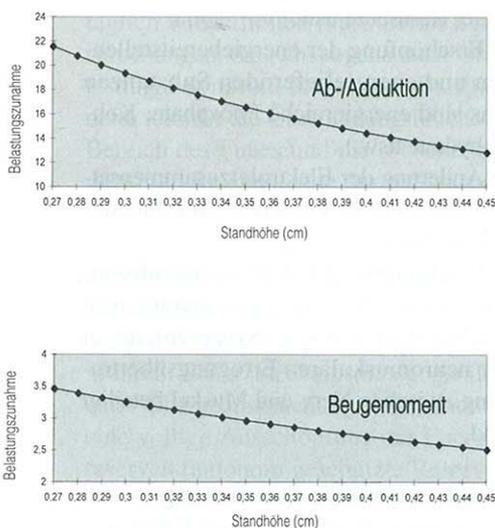


Abb. 5: Belastungszunahme bei Variation der Unterschenkellänge